

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 2 (63) АПРЕЛЬ—ИЮНЬ 2014 г.

научно-технический и производственный журнал

Технология Оборудование Инструменты Материаловедение



ПЕРВАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

НОВОСИБИРСК

ПЕРВАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

С 25 по 28 марта компания «ИТЕ Сибирь» провела в Новосибирском Экспоцентре выставку Masheх Siberia 2014 – наиболее значимое событие отрасли машиностроения и металлообработки в Сибири и на Дальнем Востоке. Международная выставка машиностроения и металлообработки Masheх Siberia ежегодно помогает профессионалам из России и зарубежья поддержать деловое сотрудничество, познакомиться со своими разработками и услугами потенциальных клиентов. На выставке демонстрируются новинки отрасли, что способствует внедрению инноваций в производство, обновлению основных фондов предприятий и повышению их конкурентоспособности. В выставке Masheх Siberia 2014 приняли участие 190 компаний из 19 регионов России, а также компании из Германии, Турции, Китая, Италии, Бельгии, Словении. За четыре дня на выставке побывали 3164 уникальных посетителя.

В рамках международной выставки проведена I Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы в машиностроении». Организаторами конференции в этом году выступили: Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, Leibniz Universität Hannover, Донбасская государственная машиностроительная академия, Беларусский национальный технический университет, Новосибирский государственный технический университет, ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром», ООО НПКФ «Машсервис-прибор», научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов», Выставочная компания «ИТЕ Сибирь», Кузбасский государственный технический университет, Кузбасское региональное отделение РАЕ, Сибирский государственный индустриальный университет, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийский технологический институт, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томский политехнический университет, Братский государственный университет.

Проректор по учебной работе НГТУ Батаев А.А. поздравил всех с тем, что ежегодная конференция получила международный статус, и с удовлетворением отметил приезд на этот научный форум больших делегаций ведущих зарубежных и российских технических вузов. Участников конференции приветствовал и пожелал успешной работы декан Механико-технологического факультета НГТУ В.Г. Буров.

На конференции были рассмотрены вопросы взаимодействия науки и промышленных предприятий, совершенствования технологии производства деталей машин, создания и исследования передовых конструкционных материалов, инновационных и инвестиционных подходов в промышленности. В конференции приняли участие более 100 представителей отечественной и зарубежной промышленности, научно-исследовательских институтов и вузов Германии, Казахстана, Украины и России.

В ходе конференции освещены следующие темы: «Инновационные технологии в машиностроении», «Технологическое оборудование, оснастка и инструменты», «Материаловедение в машиностроении», «Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении».

Редакцией журнала «Обработка металлов» подготовлен и издан к началу конференции сборник «Актуальные проблемы в машиностроении: материалы первой международной научно-практической конференции», просмотр которого в интерактивном виде и в формате pdf возможен на сайте конференции: <http://machine-building.conf.nstu.ru>.



Оргкомитет конференции
В.Ю. Скиба, В.Г. Атапин

<http://machine-building.conf.nstu.ru/>
http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

*В работе использованы материалы, предоставленные информационной службой компания «ИТЕ Сибирь».

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ISSN 1994-6309

ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ

№ 2 (63) АПРЕЛЬ—ИЮНЬ 2014 г. научно-технический и производственный журнал

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Пустовой Николай Васильевич — доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, ректор НГТУ, г. Новосибирск (Российская Федерация)

Члены совета

Федеративная Республика Бразилия: **Альберто Морейра Хорхе**, профессор, доктор технических наук, Федеральный университет, г. Сан Карлос

Федеративная Республика Германия: **Монико Грайф**, профессор, доктор технических наук, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, **Томас Хассел**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, **Флориан Нюрнбергер**, доктор технических наук, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен

Республика Беларусь: **Пантелеенко Ф.И.**, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, Заслуженный деятель науки Республики Беларусь, Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Украина: **Ковалевский С.В.**, доктор технических наук, профессор, проректор по научно-педагогической работе Донбасской государственной машиностроительной академии, г. Краматорск

Российская Федерация: **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Балков В.П.**, зам. ген. директора АО «ВНИИинструмент», канд. техн. наук, г. Москва, **Батаев В.А.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Герасенко А.Н.**, директор ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, **Иванцовский В.В.**, доктор техн. наук, доцент, НГТУ, г. Новосибирск, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАЕ, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, с.н.с., ИМАШ УрО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимьянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Смольников Н.Я.**, доктор техн. наук, профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград, **Суслов А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки и техники РФ, МГИУ, г. Москва, **Татаркин Е.Ю.**, доктор техн. наук, профессор, АлтГТУ, г. Барнаул, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, БрГУ, г. Братск.

Журнал входит в *Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий*, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 2 марта 2012 года № 8/13)

СОУЧРЕДИТЕЛИ

ОАО НПП и ЭИ «Оргстанкинпром»
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный
технический университет»
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Батаев Анатолий Андреевич — профессор,
доктор технических наук

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Атапин Владимир Григорьевич — профессор,
доктор технических наук

Буров Владимир Григорьевич — профессор,
кандидат технических наук
(технология, материаловедение)

Скиба Вадим Юрьевич — доцент, кандидат технических наук
(оборудование, инструменты)

Ложкина Елена Алексеевна — редактор перевода текста
на английский язык,
кандидат технических наук

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность — 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет»
Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНТИ.
Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory»

Журнал награжден в 2005 г. Большой Золотой Медалью Сибирской Ярмарки за освещение новых технологий, инструмента, оборудования для обработки металлов

Журнал зарегистрирован 05.04.2006 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-23961

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 274, Атапин В.Г.

Тел. (383) 346-17-77

Сайт журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

E-mail: metal_working@mail.ru

www.nstu.ru (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания)

Цена свободная

Перепечатка материалов из журнала «Обработка металлов» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Рычков Д.А., Скрипняк В.А., Янюшкин А.С., Лобанов Д.В. Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов.....	6
Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Оголь И.И., Федотов В.С. Снижение остаточных напряжений в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах пластическим растяжением.....	14
Солер Я.И., Нгуен В.Л., Гуцол И.А. Прогнозирование микрогеометрии при маятниковом шлифовании плоских деталей из стали 13X15H4AM3 высокопористыми инструментами.....	21
Черномас В.В., Богданова Н.А., Севастьянов Г.М., Соснин А.А. Влияние геометрического фактора на силовые параметры деформирования и эволюцию фронта уплотнения пористых материалов.....	31
Татаркин Е.Ю., Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С., Кряжев А.Ю. Разработка измерительного комплекса для диагностирования качества обработанной поверхности при металлообработке.....	39
Рахмьянов А.Х. Выбор технологических схем и оптимизация режимов тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей.....	46

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Дорохов А.А., Егоров С.А., Дементьева Н.А. Исследование работоспособности парогенератора для подачи смазочно-охлаждающих технологических средств.....	56
Коротков В.А., Минкин Е.М. Геометрия и напряженное состояние ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой.....	62
Копейкин С.В., Пилипенко П.А., Ингеманссон А.Р. Повышение эффективности чистовой обработки глубоких отверстий.....	78
Атапин В.Г. Рациональное проектирование несущих конструкций серийных металлорежущих станков.....	83
Подгорный Ю.И., Скиба В.Ю., Кириллов А.В., Пушкин В.Н., Ерохин И.А., Корнев Д.Ю. Моделирование несущих систем технологических машин.....	91

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Коновалов А.В., Смирнов А.С., Черномас В.В., Субачев Ю.В., Севастьянов Г.М. Экспериментальное исследование сопротивления деформации сплава АД0 в интервале подсолидусных температур.....	100
Попова М.В., Кибко Н.В. Влияние обработки расплава на параметры микроструктуры и тепловое расширение силуминов с различным содержанием кремния.....	107
Муль Д.О., Белоусова Н.С., Кривеженко Д.С., Шевцова Л.И., Лосинская А.А. Электронно-лучевая наплавка титан- и танталсодержащих порошковых смесей на образцы из стали 40Х.....	117
Рекомендации по написанию научной статьи	127
Подготовка аннотации	129
Правила для авторов	131

Корректор *Л.Н. Ветчакова*
Художник-дизайнер *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *Н.В. Гаврилова*

Подписано в печать 26.05.14. Выход в свет 11.06.14. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 16,5. Уч.-изд. л. 30,69. Изд. № 84. Заказ 705. Тираж 1000 экз.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

METAL WORKING and MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309

Journal no. 2 (63) April – June 2014

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

Anatoliy A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Vice Rector for Academic Affairs,
Head, Department of Material Science in Mechanical Engineering,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Vladimir G. Atapin, D.Sc. (Engineering), Professor,
Department of Aircraft Strength,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

Vladimir G. Burov, Ph.D. (Engineering), Professor,
Dean, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

Vadim Y. Skeebe, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

Editor of the English translation:

Elena A. Lozhkina, Ph.D. (Engineering),
Department of Material Science in Mechanical Engineering,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

The magazine is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year

Data on the magazine are published in
«Ulrich's Periodical Directory»

Edition address: Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia

Tel.: (383) 3461777

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

E-mail: metal_working@mail.ru

www.nstu.ru (the section «Scientific and innovative activity»; scientific editions)

EDITORIAL COUNCIL

CHAIRMAN:

Nikolai V. Pustovoy, D.Sc. (Engineering), Professor,
Rector, Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

Alberto Moreira Jorge Junior, Dr.-Ing., Full Professor,
Federal University of São Carlos, *São Carlos*

The Federal Republic of Germany:

Moniko Greif, Dr.-Ing., Professor,
Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, *Russelsheim*

Florian Nürnberger, Dr.-Ing.,
Chief Engineer and Head of the Department "Technology of Materials",
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*

Thomas Hassel, Dr.-Ing.,
Head of Underwater Technology Center Hanover,
Leibniz Universität Hannover, *Garbsen*

The Republic of Belarus:

Fyodor I. Panteleenko, D.Sc. (Engineering), Professor,
First Vice-Rector, Corresponding Member of National Academy of Sciences of Belarus,
Belarusian National Technical University, *Minsk*

The Ukraine:

Sergiy V. Kovalevskyy, D.Sc. (Engineering), Professor,
Vice Rector for Research and Academic Affairs,
Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

The Russian Federation:

Gennadiy E. Anisimenko, Director,
Scientific and Production company «Sigma-instrument», *Novosibirsk*;

Victor P. Balkov, Deputy general director,
Research and Development Tooling Institute «VNIINSTRUMENT», *Moscow*;

Vladimir A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Aleksandr N. Gerasenko, Director,
Scientific and Production company «Mashservispribor», *Novosibirsk*;

Vladimir V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Sergey V. Kirsanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
National Research Tomsk Polytechnic University, *Tomsk*;

Aleksandr N. Korotkov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Kuzbass State Technical University, *Kemerovo*;

Evgeniy A. Kudryashov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Southwest State University, *Kursk*;

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Senior Researcher,
Institute of Engineering Science,
Russian Academy of Sciences (Ural Branch), *Yekaterinburg*

Aleksandr G. Ovcharenko, D.Sc. (Engineering), Professor,
Biysk Technological Institute, *Biysk*;

Kharis M. Rakhimyanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*;

Yuriy N. Saraev, D.Sc. (Engineering), Professor,
Institute of Strength Physics and Materials Science,
Russian Academy of Sciences (Siberian Branch), *Tomsk*;

Nikolay Ya. Smolnikov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Volgograd State Technical University, *Volgograd*;

Anatoliy G. Suslov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Moscow State Industrial University, *Moscow*

Evgeniy Yu. Tatarkin, D.Sc. (Engineering), Professor,
I.I. Polzunov Altai State Technical University, *Barnaul*

Alexander S. Yanyushkin, D.Sc. (Engineering), Professor,
Bratsk State University, *Bratsk*

CONTENTS

TECHNOLOGY

Rychkov D.A., Skripnyak V.A., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V. Development of preparation technology of the cutting tools for layered composite materials treatment.....	6
Skvortsov V.F., Arlyapov A.Y., Ogol I.I., Fedotov V.S. Reduction of residual stresses in mandrelled thick-walled cylinders.....	14
Soler Ya.I., Nguyen V.L., Gutsol I.A. Prediction of microgeometry in pendulous grinding of plane parts made of steel 13X15H4AM3 by high porous wheels.....	21
Chernomas V.V., Bogdanova N.A., Sevastyanov G.M., Sosnin A.A. The influence of the geometrical factor on the force parameters of deformation and evolutions of the compression front of porous materials.....	31
Tatarkin E.Y., Kryazhev Y.A., Ognevenko E.S., Kryazhev A.Y. Development for measuring complex for diagnosis the quality of the treated surface in the metal cutting.....	39
Rakhimyanov A.Kh. Selection of technological schemes and high-precision plasma cutting mode optimization for structural steels.....	46

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Dorohov A.A., Egorov S.A., Dementeva N.A. Study of efficiency of a steam generator for coolant supply.....	56
Korotkov V.A., Minkin E.M. Geometry and stress condition of the oriented abrasive grains with controlled form.....	62
Kopeikin S.V., Pilipenko P.A., Ingemansson A.R. Improving the efficiency of deep hole finish machining.....	78
Atapin V.G. Intelligent design of carrying systems of serial metal-cutting machines.....	83
Podgorniy Yu.I., Skeebe V.Yu., Kirillov A.V., Pushnin V.N., Erohin I.A., Kornev D.Yu. Modeling of the technological machines support systems.....	91

MATERIAL SCIENCE

Konovalov A.V., Smirnov A.S., Chernomas V.V., Subachev Y.V., Sevastyanov G.M. Experimental studies of strain resistance of aluminum alloy АД0 in the undersolidus temperature range.....	100
Popova M.V., Kibko N.V. Influence of fusion treatment on parameters of a microstructure and thermal expansion of silumin with the various content of silicon.....	107
Mul D.O., Belousova N.S., Krivezhenko D.S., Shevtsova L.I., Losinskaya A.A. Electron beam cladding of powder mixtures containing titanium and tantalum on specimens of steel 40X.....	117
Guidelines for Writing a Scientific Paper	127
Abstract requirements	129
Rules for authors	131

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Д.А. РЫЧКОВ¹, канд. техн. наук, доцент
В.А. СКРИПНЯК², доктор техн. наук, профессор
А.С. ЯНЮШКИН¹, доктор техн. наук, профессор
Д.В. ЛОБАНОВ¹, канд. техн. наук, доцент
(¹БрГУ, г. Братск, ²ТГУ, г. Томск)*

Поступила 24 декабря 2013
Рецензирование 15 апреля 2014
Принята к печати 20 апреля 2014

Рычков Д.А. – 665709, г. Братск, Иркутская область, ул. Макаренко, 40,
Братский государственный университет,
e-mail: dielektrik84@mail.ru

Обработка композиционных материалов резанием затруднена из-за особенностей их свойств, вследствие чего происходит интенсивный износ режущего инструмента. Его режущая часть должна обладать высокой прочностью и твердостью и иметь малый угол заострения. Для выполнения этих требований режущая часть инструмента выполняется из твердых сплавов, однако формирование кромки с такой геометрией приводит к неудовлетворительному качеству изделия. В статье предлагается формировать режущую кромку инструмента затачиванием алмазными кругами с применением электрохимических процессов, облегчающих процесс резания. Для этого необходимо определить рациональные режимы комбинированного электроалмазного шлифования твердых сплавов со специфической геометрией режущей кромки. В результате лабораторных испытаний получены зависимости шероховатости обработанной поверхности и удельного расхода алмазного круга в зависимости от плотности тока правки круга и плотности тока травления детали. Установлено, что при повышении электрических параметров шлифования шероховатость снижается до значения 0,1 мкм, а удельный расход круга увеличивается до 2,3 мм³/мм³. Показано, что комбинированный метод электроалмазного шлифования имеет преимущества перед другими методами, обработанная поверхность имеет удовлетворительное качество, а величина сколов на режущей кромке не превышает 10 мкм. На основе представленных исследований разработаны рекомендации по назначению режимов затачивания режущего инструмента для обработки композиционных материалов.

Ключевые слова: композиционные материалы, режущий инструмент, затачивание, качество поверхности, комбинированное шлифование.

Введение

Стремительное развитие современных промышленных технологий сопровождается непрерывным поиском новых возможностей обеспечения требуемых свойств деталей и конструкций различного назначения. При

проектировании деталей конструкторы чаще всего стремятся уменьшить массу и себестоимость изделия, увеличить его прочность, твердость и модуль упругости, повысить стойкость к агрессивным средам и т. п. Обеспечить эти требования возможно за счет применения специально созданных композиционных материалов, спо-

* Работа выполнена в рамках проекта № 13-08-90707 мол_рф_нр «Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов» в Томском государственном университете.

собных сочетать в себе необходимые свойства. Однако при обработке таких материалов резанием происходит интенсивный износ режущего инструмента, который объясняется следующими особенностями свойств композитов [1, 2]:

- ярко выраженная анизотропия, высокие прочностные характеристики и твердость наполнителя;
- низкая теплопроводность, абразивное воздействие наполнителя, свойства которого во многом определяют износ режущего инструмента;
- деструкция полимерного связующего при резании;
- высокие упругие свойства композиционных материалов, что вызывает повышенный износ инструмента по задней поверхности из-за интенсивных контактных явлений.

Вследствие этого обработка композитов должна проводиться острозаточенным инструментом, режущая часть которого обладает высокой прочностью и твердостью и имеет увеличенные передний и задний углы. Подготовка такого режущего инструмента сводится к обеспечению рациональных рабочих параметров инструмента при минимальных трудозатратах. Одним из основных этапов подготовки режущего инструмента является формирование геометрии его режущей части механическим способом – затачиванием.

Одной из широко применяемых технологий затачивания является шлифование алмазными кругами [3], однако в данном случае остаются нерешенными ряд проблем, связанных с потерей режущей способности абразивного инструмента наряду с его интенсивным расходом, негативным влиянием температурных явлений в зоне обработки и высокой мощностью резания [4]. Минимизировать отрицательное воздействие этих явлений возможно за счет совершенствования технологии шлифования с применением электрохимических процессов.

К прогрессивным методам затачивания инструментов, режущая часть которых оснащена высокопрочными материалами, можно отнести комбинированный метод электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой круга и травлением обрабатываемого изделия [5–9]. Несмотря на то что данный способ шлифования изучен достаточно широко при обработке инструментальных материалов и твердых спла-

вов, нет однозначных данных по механическим и электрическим режимам затачивания режущих инструментов для обработки композиционных материалов со специфической геометрией режущей части, выполненной из высокопрочных инструментальных материалов таких, как твердые сплавы.

В связи с этим целью исследования является определение рациональных режимов резания при затачивании режущего инструмента для обработки композиционных материалов.

Для достижения поставленной цели нами был проведен ряд экспериментальных исследований для установления взаимосвязи шероховатости и удельного расхода алмазного круга и электрических режимов затачивания комбинированным электроалмазным шлифованием режущих инструментов, оснащенных твердыми сплавами с соблюдением специфической геометрии режущей части для обработки композиционных материалов.

Методика проведения исследований

Лабораторные испытания качественных и количественных характеристик методов затачивания проводились с применением пластин твердых сплавов марок ТН20, ВК15, ВК8, ВК6, ВК6М, ВК3М, поскольку они имеют высокую прочность, теплостойкость и твердость и рекомендуются для обработки высокопрочных материалов, к которым относятся композиционные материалы, а также широко применяются в промышленности при оснащении режущей части сборных инструментов.

В качестве формообразующего инструмента использовался алмазный круг на металлической связке, имеющий следующие характеристики: форма круга 12А2-45; типоразмер 150×10×3×40×32; марка алмазов АС6; связка М1-01; зернистость 100/80; относительная концентрация алмазов в алмазоносном слое 100 %.

Затачивание твердосплавных пластин проводилось на заточном станке модели 3Д642Е, модернизированном под процессы комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной правкой круга и травлением поверхности детали при помощи специального устройства [10].

При этом применялся электролит, представляющий раствор солей: 0,5 % Na_2CO_3 и 1 % NaCl

в воде с добавлением ингибитора коррозии 0,5 % NaNO_2 . Проводимость электролита составила 26 мСм/см, содержание солей – 20 г/л.

В настоящей работе исследовалась зависимость удельного расхода круга и шероховатости обработанной поверхности от электрических параметров комбинированного электроалмазного затачивания: плотности тока правки круга $i_{\text{пр}}$ и плотности тока травления детали $i_{\text{тр}}$.

Согласно рекомендациям по комбинированному электроалмазному шлифованию быстрорежущих сталей [9] плотность тока правки круга должна быть не более $i_{\text{пр}} < 0,3 \text{ А/см}^2$, плотность тока травления детали – $i_{\text{тр}} < 20 \text{ А/см}^2$, продольная подача – $S_{\text{пр}} < 2,5 \text{ мм/мин}$, поперечная подача – $S_{\text{поп}} < 0,04 \text{ мм/дв.ход}$, скорость резания – $V < 52 \text{ м/с}$, поскольку в противном случае возрастает удельный расход алмазного круга, появляются прижоги на поверхности инструмента и детали. Отмечено, что данные режимы нуждаются в корректировке в зависимости от обрабатываемого материала.

При обработке представленных марок твердых сплавов комбинированным электроалмазным затачиванием увеличение электрических режимов резания до значений $i_{\text{пр}} > 0,07 \text{ А/см}^2$, $i_{\text{тр}} > 5 \text{ А/см}^2$ приводит к увеличению удельного расхода алмазного круга и ухудшению качества обработанных поверхностей. Также хрупкость и высокая прочность твердых сплавов не позволяют устанавливать высокие механические режимы резания и их значения должны быть ниже, чем при обработке быстрорежущих сталей.

Для лабораторных исследований использовалось ортогональное планирование первого порядка, значения плотности тока травления и плотности тока правки круга варьировались в таких пределах: $i_{\text{пр}} = 0 \dots 0,06 \text{ А/см}^2$; $i_{\text{тр}} = 0 \dots 4,0 \text{ А/см}^2$. Механические режимы обработки следующие: $S_{\text{пр}} = 1,5 \text{ мм/мин}$; $S_{\text{поп}} = 0,02 \text{ мм/дв.ход}$; $V = 19,6 \text{ м/с}$.

Формирование режущей кромки твердосплавных пластин осуществлялось обработкой образцов по передней и задней поверхностям с образованием угла заострения $\beta = 55^\circ$, в результате чего для каждой марки твердого сплава получено по 4 образца, заточенных разными способами алмазного шлифования: без электрохимии ($i_{\text{пр}} = 0 \text{ А/см}^2$, $i_{\text{тр}} = 0 \text{ А/см}^2$), с правкой

круга ($i_{\text{пр}} = 0,06 \text{ А/см}^2$, $i_{\text{тр}} = 0 \text{ А/см}^2$), с травлением детали ($i_{\text{пр}} = 0 \text{ А/см}^2$, $i_{\text{тр}} = 4,0 \text{ А/см}^2$) и комбинированным ($i_{\text{пр}} = 0,06 \text{ А/см}^2$, $i_{\text{тр}} = 4,0 \text{ А/см}^2$).

Для оценки качественных и количественных параметров электроалмазного затачивания твердых сплавов использованы методы статистической обработки данных и оборудование Томского государственного университета: сканирующий электронный микроскоп *SEM 515 (Philips)*, микроскоп оптический металлографический *Olimpus BX-51*.

Результаты и обсуждение

По результатам лабораторных исследований с применением методов статистической обработки данных получены математические модели удельного расхода круга q и шероховатости R_a от плотности тока правки и плотности тока травления при затачивании твердых сплавов:

для ВК8:

$$q = 0,49 + 4,20i_{\text{пр}} - 0,01i_{\text{тр}} + 2,07i_{\text{пр}}i_{\text{тр}},$$

$$R_a = 0,39 + 1,73i_{\text{пр}} - 0,05i_{\text{тр}} - 0,18i_{\text{пр}}i_{\text{тр}}, \text{ мкм};$$

для ВК15:

$$q = 0,20 + 8,39i_{\text{пр}} + 0,12i_{\text{тр}} + 12,50i_{\text{пр}}i_{\text{тр}},$$

$$R_a = 0,55 + 2,48i_{\text{пр}} - 0,06i_{\text{тр}} - 0,69i_{\text{пр}}i_{\text{тр}}, \text{ мкм};$$

для ВК3М:

$$q = 0,56 + 1,47i_{\text{пр}} + 0,13i_{\text{тр}} + 2,07i_{\text{пр}}i_{\text{тр}},$$

$$R_a = 0,16 - 12,08i_{\text{пр}} - 0,19i_{\text{тр}} - 1,06i_{\text{пр}}i_{\text{тр}}, \text{ мкм};$$

для ТН20:

$$q = 0,63 + 21,31i_{\text{пр}} + 0,05i_{\text{тр}} + 0,78i_{\text{пр}}i_{\text{тр}},$$

$$R_a = 0,22 + 0,47i_{\text{пр}} + 0,01i_{\text{тр}} + 0,27i_{\text{пр}}i_{\text{тр}}, \text{ мкм}.$$

Рассмотрев частные случаи, когда один из переменных факторов является постоянным, получили графики зависимости удельного расхода алмазного круга (рис. 1) и шероховатости заточенной поверхности (рис. 2) от плотности тока правки и плотности тока травления.

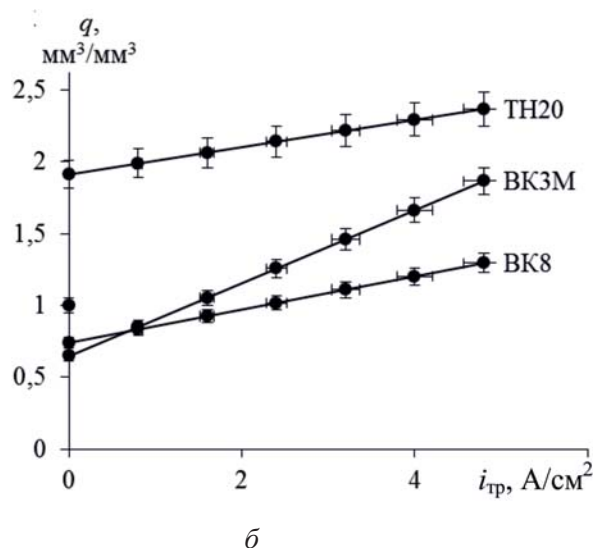
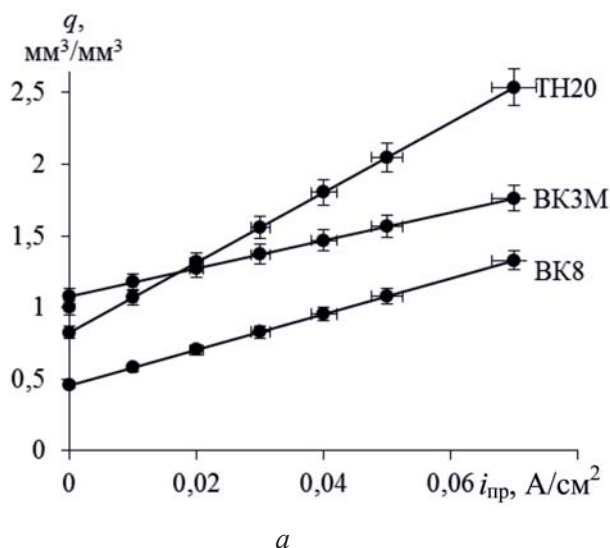


Рис. 1. Зависимости удельного расхода алмазного круга:

a – от плотности тока правки при $i_{тр} = 4 A/cm^2$; b – от плотности тока травления при $i_{гр} = 0,06 A/cm^2$

Удельный расход круга (см. рис. 1) с повышением электрических режимов обработки увеличивается вследствие растравливания образовавшегося засаленного слоя и связки алмазного круга и при максимальных значениях плотности тока правки и плотности тока травления ($i_{тр} = 4 A/cm^2$; $i_{гр} = 0,06 A/cm^2$) составляет не более $2,3 mm^3/mm^3$.

Шероховатость обработанной поверхности в большей степени зависит от плотности тока травления детали (рис. 2), поскольку электрохимическое разупрочнение поверхности способствует сглаживанию микронеровностей. В этом случае наименьшая шероховатость наблюдается при комбинированном методе электроалмазного шлифования с одновременным разупрочнением

поверхности обрабатываемой заготовки и правкой алмазного круга.

Оптические исследования были направлены на изучение изменения качества режущей кромки при затачивании различными методами алмазного шлифования. Далее представлены результаты исследования затачивания твердосплавных пластин на примере сплава BK3M, для остальных марок твердых сплавов получены аналогичные результаты. На рис. 3 и 4 представлены фотографии с оптического микроскопа и растрового электронного микроскопа режущей кромки твердосплавных пластин марки BK3M, заточенных различными методами: без электрохимии, комбинированным, с правкой круга и с травлением детали.

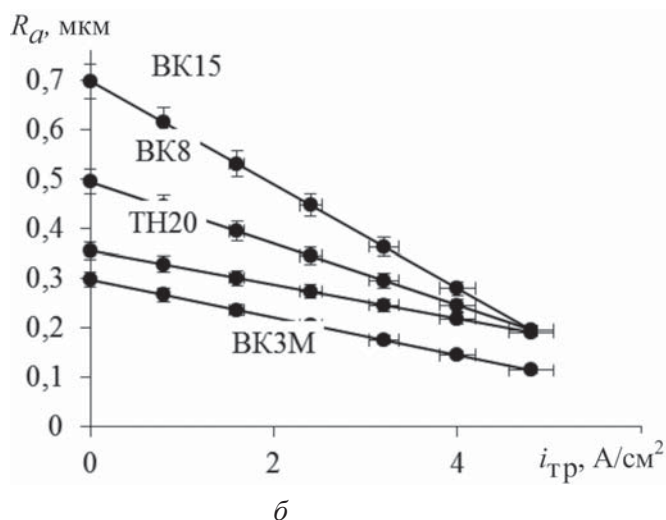
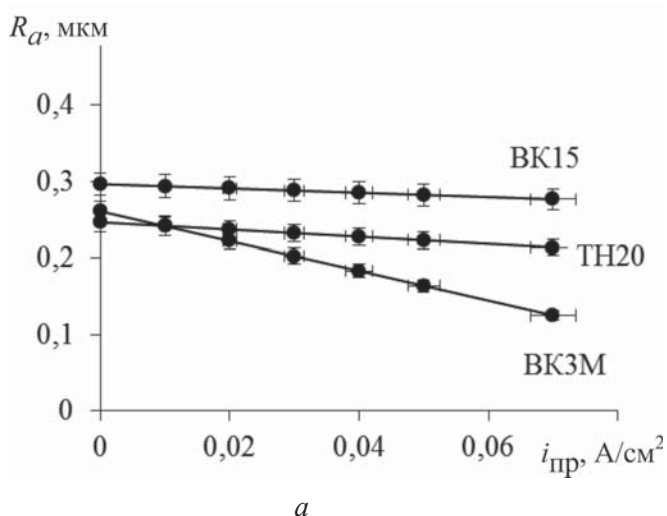


Рис. 2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности:

a – от плотности тока правки при $i_{тр} = 4 A/cm^2$; b – от плотности тока травления при $i_{гр} = 0,06 A/cm^2$

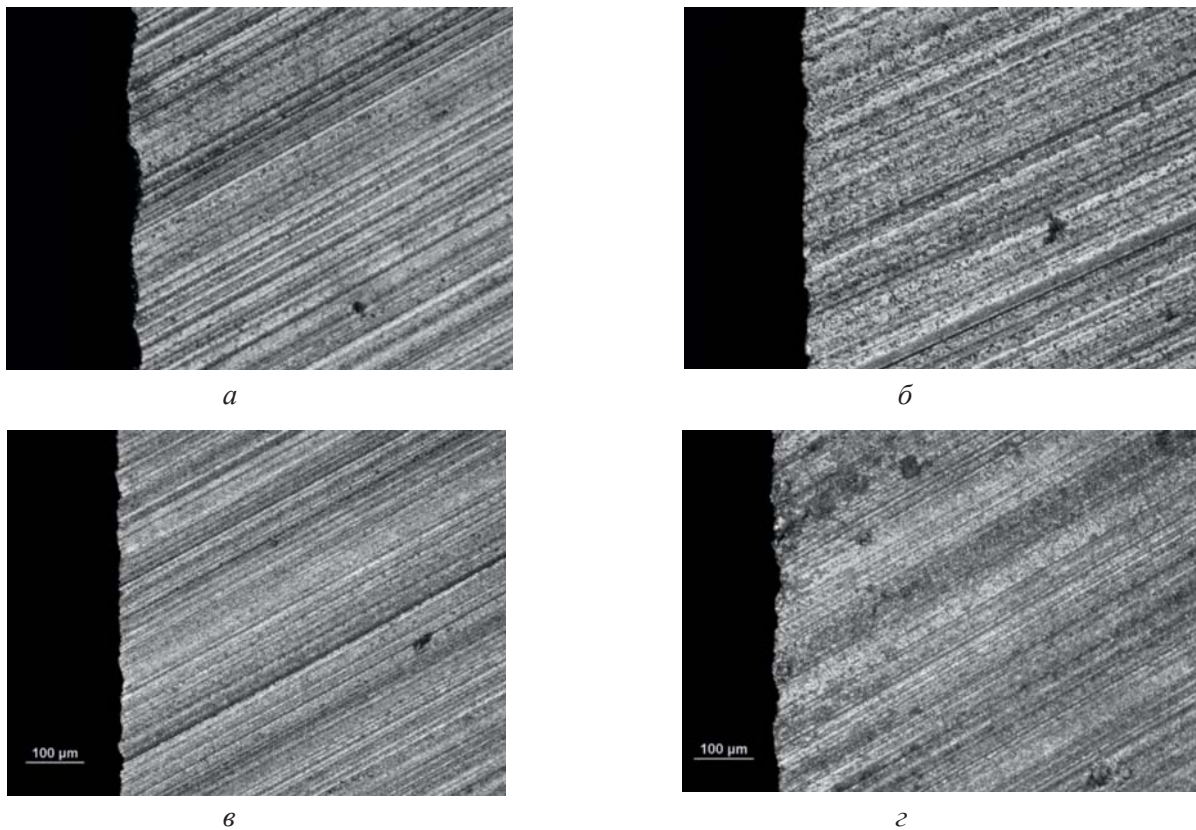


Рис. 3. Поверхность твердого сплава ВКЗМ, заточенная (световая микроскопия):
а – без электрохимии; *б* – комбинированным методом; *в* – с правкой круга; *г* – с травлением детали

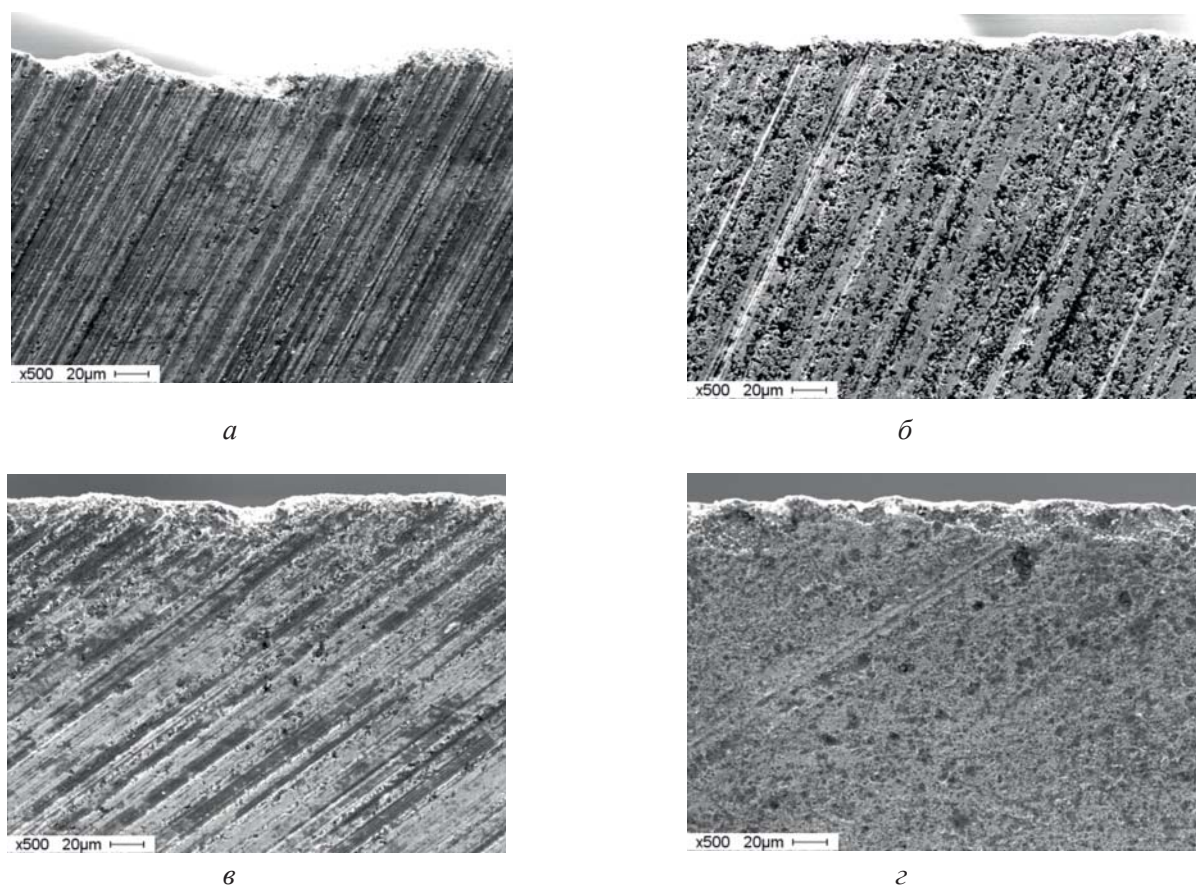


Рис. 4. Поверхность твердого сплава ВКЗМ, заточенная (растровая микроскопия):
а – без электрохимии; *б* – комбинированным методом; *в* – с правкой круга; *г* – с травлением детали

После затачивания твердых сплавов без электрохимии наблюдается более высокая склонность к образованию дефектов, чем при обработке другими методами, а величина сколов на режущей кромке составляет порядка 30...85 мкм. Растровая микроскопия при этом показывает наличие следов трения рабочей поверхности алмазного круга о поверхность детали, о чем свидетельствует полное или частичное сглаживание неровностей на обработанной поверхности.

Затачивание с электрохимическим травлением детали показывает более удовлетворительный результат. Так, величина сколов на режущей кромке имеет меньшие значения, на поверхности отчетливее видна структура материала вследствие его растворения под действием электрохимии. Однако проявление электроэрозионных процессов, происходящих в результате контакта детали с засаленным слоем алмазного круга, приводит к образованию кратеров в местах локализации электрической энергии.

После затачивания твердых сплавов с непрерывной электрохимической правкой круга прослеживается воздействие абразивных частиц алмазного круга на обработанной поверхности, что свидетельствует о высокой степени режущей способности круга. Однако на режущей кромке, являющейся концентратором внутренних напряжений, присутствуют следы адгезионного износа в виде вырванных с поверхности детали частиц обрабатываемого материала.

Наилучшие результаты показывают образцы твердосплавных пластин, заточенных комбинированным методом электроалмазного шлифования. Величина сколов варьируется в пределах 5...10 мкм, на режущей кромке нет следов адгезионного износа, обработанная поверхность имеет равномерную структуру со слабым проявлением эрозионных процессов. В этом случае растровая микроскопия показывает, что поверхность образца ВКЗМ растравлена хуже, чем у других материалов, что может быть следствием более низкой электрической проводимости данного сплава.

Выводы

1. Предложенная технология комбинированного электроалмазного затачивания режущих инструментов, оснащенных твердыми сплавами, позволяет добиться высокого качества об-

работанной поверхности с шероховатостью $R_a = 0,1 \dots 0,2$ мкм. При этом методе затачивания режущая кромка имеет сколы величиной не более 10 мкм, а удельный расход алмазного круга составляет не более $q = 2,3$ мм³/мм³.

2. Получены математические модели шероховатости R_a обработанных поверхностей твердых сплавов и удельного расхода алмазного круга q в зависимости от режимов затачивания: плотности тока правки $i_{пр}$ и плотности тока травления $i_{тр}$.

3. Разработаны рекомендации по затачиванию режущего инструмента, оснащенного вставками из твердых сплавов для обработки композиционных материалов. При комбинированном методе затачивания рекомендуются следующие режимы обработки: $i_{тр} = 3,5 \dots 4,0$ А/см², $i_{пр} = 0,05 \dots 0,06$ А/см², $S_{пр} = 1,5 \dots 2,0$ м/мин, $S_{поп} = 0,02 \dots 0,04$ мм/дв. ход, $V = 19 \dots 20$ м/с.

Список литературы

1. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технологий. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
2. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Ткаченко Е.В., Ткаченко Н.А. Особенности фрезерования полимерных композиционных материалов // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 2. – С. 88 – 90.
3. Попов С.А., Малевский Н.П., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с.
4. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации: монография. – Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2013. – 336 с.
5. Попов В.Ю. Повышение качества изделий из инструментальных сталей при электроалмазном шлифовании: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Братск, 2002. – 16 с.
6. Васильев Е.В. Повышение производительности алмазного шлифования твердосплавных изделий и ресурса кругов выбором оптимальных схем и режимов шлифования и характеристики круга: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2005. – 169 с.
7. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Прокопьева А.В. Оптимизация процесса шлифования быстрорежущих пластин инструментом из CBN по критериям точности формы поверхности // Металлообработка. – 2006. – № 5–6. – С. 21–24.
8. Архипов П.В. Повышение режущих свойств алмазных кругов на металлической связке путем

устранения их засаливания: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010. – 20 с.

9. Сурьев А.А. Повышение качества поверхностного слоя деталей за счет совершенствования процесса комбинированного электроалмазного шлифования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Братск, 2005. – 20 с.

10. Яньюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Лосев Е.Д., Яковец А.В., Черемных А.С. Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке // Патент России № 2446039. – 2010. – Бюл. № 21.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April - June 2014, Pages 6–13

Development of preparation technology of the cutting tools for layered composite materials treatment

Rychkov D.A.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: dielektrik84@mail.ru

Skripnyak V.A.², D.Sc. (Engineering), Professor

Yanyushkin A.S.¹, D.Sc. (Engineering), Professor

Lobanov D.V.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor

¹ Bratsk State University, 40 Makarenko st., Bratsk, 665709, Russian Federation

² Tomsk State University, 36 Lenina Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

Processing of composite materials is difficult due to the nature of its properties, resulting in an intensive wear of the cutting tool. Its cutting part should have a high strength and hardness, and small wedge angle. To meet these requirements, the cutting part of the tool is made of hard alloy, but the formation of the edge with the geometry results in poor quality products. The article proposes to form a cutting edge tool by honing with diamond wheels using electrochemical processes that facilitate the process of cutting. For this it is necessary to determine rational modes of combined electro-diamond grinding of hard alloys with specific cutting edge geometry. The relationship between surface roughness and specific consumption of the diamond wheel depending on the diamond wheel growing current density and etching details current density are received during laboratory tests. It is found that when increase electrical parameters of the grinding, roughness decreases to 0.1 microns and the specific consumption of the wheel increases to 2.3 mm³/mm³. It is shown that the combined method of electro-diamond grinding has advantages over other methods. The treated surface has a sufficient quality and quantity of chips at the cutting edge does not exceed 10 microns. Recommendations on the appointment regimes for sharpening of the cutting tools for composite materials treatment are offered on the basis of the research work.

Keywords:

composite materials, cutting tool, sharpening, surface quality, combined grinding.

References

1. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A. *Obrabotka spetsial'nykh materialov v mashinostroenii: Spravochnik. Biblioteka tekhnologa* [Processing of special materials in machine building: A Handbook. Library technologist]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p.

2. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V., Tkachenko E.V., Tkachenko N.A. Osobennosti frezerovaniia polimernykh kompozitsionnykh materialov [Features milling polymer composites]. *Sistemy. Metody. Tekhnologi. – Systems. Methods. Technologies*, 2013, no. 2, pp. 88 – 90.

3. Popov S.A., Malevskii N.P., Tereshchenko L.M. *Almazno-abrazivnaia obrabotka metallov i tverdykh spлавov* [Diamond-abrasive machining metals and hard alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 263 p.

4. Yanyushkin A.S. *Tekhnologiya elektroalmaznogo zatachivaniia rezhushchikh instrumentov i metody ee realizatsii: monografiia* [Technology electro diamond grinding of cutting tools and methods of its realization: Monograph]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2013. 336 p.

5. Popov V.Yu. *Povyshenie kachestva izdelii iz instrumental'nykh stalei pri elektroalmaznom shlifovanii*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving of products quality made of tool steel with electro diamond grinding. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Bratsk, 2002. 16 p.

6. Vasil'ev E.V. *Povyshenie proizvoditel'nosti almaznogo shlifovaniia tverdosplavnykh izdelii i resursa krugov vyborom optimal'nykh skhem i rezhimov shlifovaniia i kharakteristiki kruga*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increased productivity of diamond grinding carbide products and wheel life by selection of optimal schemes and modes and features grinding wheel. Dr. tech. sci. diss.]. Omsk, 2005. 169 p.

7. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu., Prokop'eva A.V. *Optimizatsiia protsessa shlifovaniia bystrorezhushchikh plastin instrumentom iz CBN po kriteriiam tochnosti formy poverkhnosti* [Optimization of the process of high-speed grinding cutter plates of the CBN tool on the criteria of accuracy of the surface shape]. *Metalloobrabotka – Metal Processing*, 2006, no. 5–6, pp. 21–24.

8. Arkhipov P.V. *Povyshenie rezhushchikh svoistv almaznykh krugov na metallicheskoj svyazke putem ustraneniia ikh zasalivaniia*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the cutting properties of diamond wheels in metal bond by removing them blunting. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Tomsk, 2010. 20 p.

9. Sur'ev A.A. *Povyshenie kachestva poverkhnostnogo sloia detalei za schet sovershenstvovaniia protsessa kombinirovannogo elektroalmaznogo shlifovaniia*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving of surface layer quality parts by process advancement of combined electro diamond grinding. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Bratsk, 2005. 20 p.

10. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A., Popov V.Yu., Sur'ev A.A., Arkhipov P.V., Losev E.D., Iakovets A.V., Cheremnykh A.S. *Konstruktsiia katoda dlia pravki kruga pri kombinirovannoi elektroalmaznoi obrabotke* [Cathode design for wheel at combined electro diamond grinding]. Patent RF, no. 2446039, 2010.

Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 13-08-90707 “Development of technology preparation of cutting tools for machining of layered composite materials”.

Received 24 December 2013

Revised 15 April 2014

Accepted 20 April 2014

СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАБОТАННЫХ ДОРНОВАНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ ПЛАСТИЧЕСКИМ РАСТЯЖЕНИЕМ

В.Ф. СКВОРЦОВ, канд. техн. наук, доцент
А.Ю. АРЛЯПОВ, канд. техн. наук, доцент
И.И. ОГОЛЬ, ассистент
В.С. ФЕДОТОВ, магистрант
(ТПУ, г. Томск)

Поступила 30 января 2014
Рецензирование 20 марта 2014
Принята к печати 24 марта 2014

Скворцов В.Ф. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: TMRI@tpu.ru

Представлены методика и результаты экспериментальных исследований возможности снижения остаточных напряжений в обработанных дорнованием цилиндрах из стали 45 с диаметром отверстий 5 мм и степенью толстостенности D/d , равной 2 и 3, пластическим растяжением. Установлено, что уже при осевой пластической деформации растяжения 0,005 происходит значительное уменьшение окружных остаточных напряжений в этих цилиндрах; при увеличении этой деформации до 0,015...0,020 окружные остаточные напряжения снижаются по абсолютной величине со 140...500 МПа до 30...50 МПа. Приведены расчетные зависимости для оценки точности диаметральных размеров цилиндров после их пластического растяжения. Показано, что точность отверстий диаметром не более 5 мм при пластическом растяжении обработанных дорнованием цилиндров снижается менее чем на один квалитет.

Ключевые слова: дорнование отверстий, толстостенные цилиндры, остаточные напряжения, пластическое растяжение, точность отверстий.

Введение

Дорнование глубоких отверстий малого диаметра ($d = 1...5$ мм, $L/d \leq 100$, где L – глубина отверстий) в деталях типа толстостенных цилиндров, выполняемое твердосплавными инструментами с большими натягами (до $0,1d$ и более), является высокопроизводительным методом их отделочной обработки. Оно может быть использовано сразу после сверления отверстий спиральными сверлами, позволяя повысить точность диаметра отверстий с IT11–IT 13 до IT 7, уменьшить шероховатость поверхности с $Ra = 2,5...5$ мкм до $Ra = 0,1...1$ мкм, а также значительно упрочнить поверхностный слой и сформировать в нем благоприятные сжимающие

остаточные напряжения [1–3]. В то же время необходимо иметь в виду, что после дорнования с большими натягами во всем объеме толстостенных цилиндров возникают высокие остаточные напряжения [1–3]. Если при дальнейшей обработке с цилиндров удаляются значительные припуски (напуски), то вследствие перераспределения остаточных напряжений имеют место их существенные деформации и снижение точности [4–9]. Это возможно также из-за релаксации остаточных напряжений с течением времени [8].

Анализ литературы [10–12] показал, что одним из эффективных методов снижения остаточных напряжений в изделиях простой геометрической формы является метод пластического растяжения с малыми деформациями, который

в отличие от отжига позволяет сохранить исходную структуру и механические свойства металла. Экспериментально установлено, что при пластических деформациях растяжения $\epsilon_p = 0,01 \dots 0,02$ остаточные напряжения в алюминиевых плитах и стальных стержнях снимаются почти полностью [10, 11]. В связи с изложенным значительный интерес представляет изучение возможностей указанного метода для снижения остаточных напряжений в цилиндрах после дорнования. Цель работы – установить закономерности изменения остаточных напряжений в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах и их точности при пластическом растяжении.

Методика исследования

Эксперименты проводились на образцах (рис. 1) из стали 45 (HB 1800...2000 МПа) с диаметром отверстий $d = 5$ мм и наружным диаметром D , равным 10 и 15 мм, что соответствовало степеням толстостенности D/d образцов, равных 2 и 3.

Суть экспериментов состояла в измерении деформаций образцов и определении в них остаточных напряжений после дорнования и последующего пластического растяжения. Отверстия в образцах сверлили и рассверливали спиральными сверлами на токарном станке. Дорнование отверстий выполняли однозубыми дорнами из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов 6° и шириной соединяющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Эту обработку осуществляли с помощью специального приспособления [1] по схеме растяжения на универсальной испытательной машине УМЭ-10ТМ при скорости 0,008 м/с. Для обеспечения высокой точности и качества поверхностного слоя отверстий дорнование проводили в два цикла. Натяг при первом цикле составлял около 0,3 мм, при втором – 0,05 мм. В качестве смазоч-

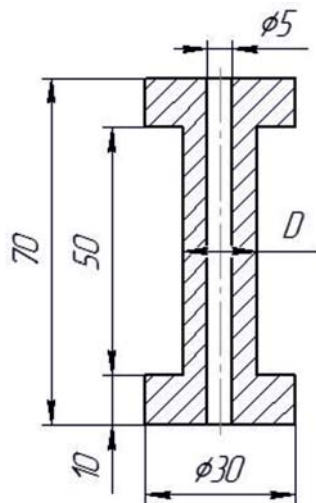


Рис. 1. Экспериментальный образец

ного материала при дорновании использовали жидкость МР-7. Пластическое растяжение образцов выполняли с помощью специального ручного винтового приспособления. При этом осевую пластическую деформацию изменяли от нуля до 0,023.

Окружные остаточные деформации на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов определяли по изменению их диаметров. Диаметр отверстий измеряли нутромером фирмы «Carl Zeiss Jena» (ФРГ) с ценой деления 0,01 мм, диаметр наружной поверхности – рычажным микрометром МР25 с ценой деления 0,002 мм. Осевую остаточную деформацию образцов находили на их наружной поверхности по изменению расстояния между нанесенными на эту поверхность отпечатками конического индентора. Для измерения этой деформации использовался универсальный измерительный микроскоп УИМ-21 с ценой деления 0,001 мм.

В ходе исследований ограничивались приближенной оценкой окружных остаточных напряжений, которые при дорновании отверстий в толстостенных образцах существенно превышают по абсолютной величине радиальные и осевые остаточные напряжения [1–3]. Окружные остаточные напряжения σ_θ определяли после отрезки головок по изменению срединного диаметра образца (полого цилиндра с наружным диаметром D) при его разрезке вдоль образующей (гиперболический закон распределения напряжений изгиба). Расчет выполняли по формуле [13], которая в принятых нами обозначениях имеет вид

$$\sigma_\theta = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{E}{D_c - 2\gamma} \left(\frac{-\frac{t}{2} + b + \gamma}{-\frac{t}{2} + b + \frac{D_c}{2}} \right) \Delta D_c,$$

где μ – коэффициент Пуассона материала образца; E – его модуль продольной упругости; D_c – диаметр срединной поверхности образца; γ – расстояние от нейтральной оси сечения стенки образца до центра его тяжести; t – толщина стенки образца; b – расстояние от рассматриваемой точки до его отверстия; ΔD_c – приращение диаметра срединной поверхности образца при его разрезке вдоль образующей. Расстояние γ находили по формуле [13]

$$\gamma = r - \rho = \frac{D_c}{2} - \frac{t}{\ln \frac{D}{D-2t}},$$

в которой r и ρ – соответственно радиусы срединной поверхности образца и его нейтрального слоя; D – наружный диаметр образца (при разрезке считается неизменным).

Для исключения дополнительных остаточных напряжений в образцах при отрезке головок и разрезке вдоль образующей эти операции выполняли дисковой отрезной фрезой толщиной 1 мм при обильном охлаждении водной эмульсией. Значение ΔD_c определяли по приращению Δ расстояния между отпечатками конического индентора на срединной окружности торца образцов, используя соотношение $\Delta D_c = \Delta / \pi$.

Указанное расстояние до и после разрезки (до разрезки оно составляло около 4 мм) измеряли на микроскопе УИМ-21.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены зависимости окружных остаточных напряжений от расстояния до образующей отверстия образцов различной толстостенности после дорнования с указанными выше натягами. Как видно из рис. 2, у поверхности отверстия (в прилегающей к нему области образцов) формируются сжимающие окружные остаточные напряжения, которые уравновешиваются растягивающими напряжениями в области, прилегающей к наружной поверхности образцов. Наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения имеют место на поверхности отверстия. При увеличении степени толстостенности образцов D/d от 2 до 3 эти напряжения возрастают со 140 до 500 МПа и становятся больше предела текучести стали 45 ($\sigma_{0,2} \approx 360$ МПа). Столь высокий уровень окружных остаточных напряжений, видимо, объясняется тем, что в прилегающей к отверстию образца области остаточное напряженное состояние после дорнования с принятыми натягами близко к всестороннему сжатию [1–3]. В этом случае, как известно [14], величина остаточных напряжений не ограничивается пределом текучести материала образца.

На рис. 3 показаны зависимости окружных остаточных напряжений на поверхности отвер-

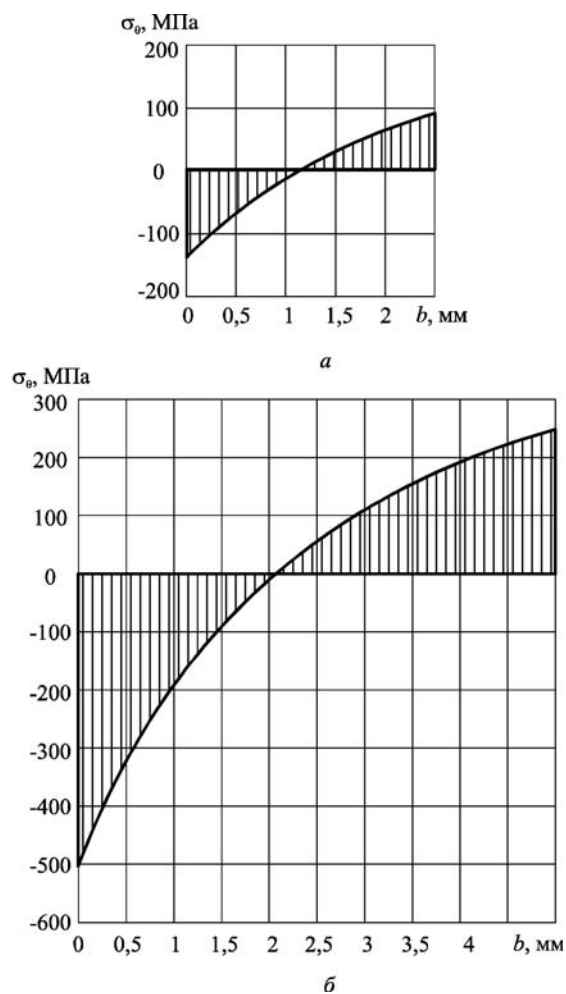


Рис. 2. Зависимости окружных остаточных напряжений в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах от расстояния от поверхности отверстия:

$a - D = 10$ мм ($D/d = 2$); $b - D = 15$ мм ($D/d = 3$)

ствия обработанных дорнованием образцов ($\sigma_{\theta}^{\max}$) различной степени толстостенности от величины осевой пластической деформации при растяжении (ϵ_p). Видно, что уже при $\epsilon_p = 0,005$ имеет место значительное снижение остаточных напряжений. При увеличении ϵ_p до 0,015...0,020 окружные остаточные напряжения у поверхности отверстия уменьшаются со 140...500 МПа до 30...50 МПа, т. е. в 5...10 раз.

Необходимо подчеркнуть, что при растяжении образцов диаметры их отверстия и наружной поверхности уменьшаются, а также изменяется точность этих диаметров. Их значения после растяжения составят:

$$d_p = d_d (1 - \mu \epsilon_p);$$

$$D_p = D_d (1 - \mu \epsilon_p),$$

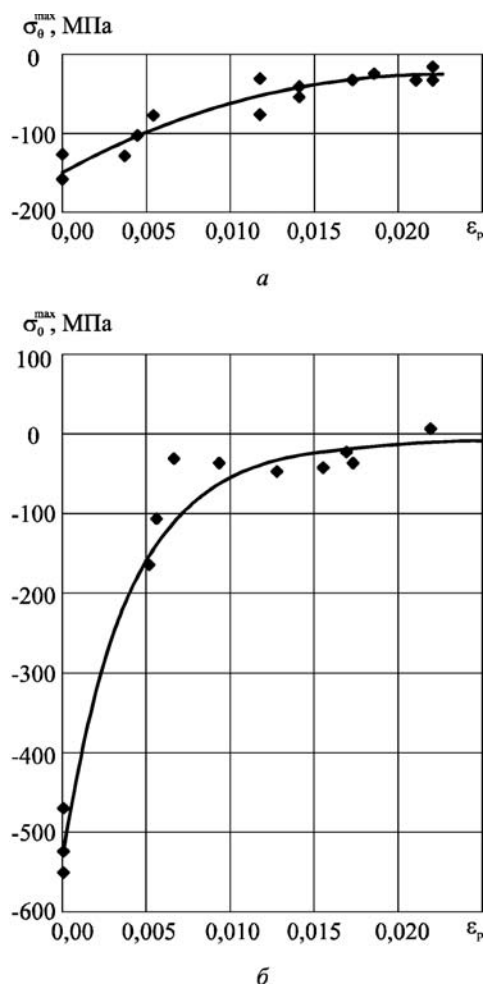


Рис. 3. Зависимости окружных остаточных напряжений у поверхности отверстия обработанных дорнованием толстостенных цилиндров от пластической деформации при их растяжении:

$a - D/d = 2$; $b - D/d = 3$

где d_p , D_p – диаметры отверстия и наружной поверхности образца после дорнования; μ – коэффициент Пуассона, который при пластическом деформировании приближенно принимается равным 0,5. С учетом этого приведенные выше зависимости запишутся следующим образом:

$$d_p = d_d (1 - 0,5\epsilon_p);$$

$$D_p = D_d (1 - 0,5\epsilon_p).$$

Средние квадратические отклонения диаметров отверстия и наружной поверхности образцов после растяжения ввиду независимости случайных величин d_d и ϵ_p (D_d и ϵ_p) в соответствии с теоремами о числовых характеристиках функций [15] составят:

$$\sigma_{d_p} = \sqrt{0,25\sigma_{\epsilon_p}^2 (\sigma_{d_d}^2 + \bar{d}_d^2) + (1 - 0,5\bar{\epsilon}_p)^2 \sigma_{d_d}^2};$$

$$\sigma_{D_p} = \sqrt{0,25\sigma_{\epsilon_p}^2 (\sigma_{D_d}^2 + \bar{D}_d^2) + (1 - 0,5\bar{\epsilon}_p)^2 \sigma_{D_d}^2},$$

где $\bar{d}_d$, $\bar{D}_d$ – соответственно средние значения диаметров отверстия и наружной поверхности образцов после дорнования; $\bar{\epsilon}_p$ – среднее значение деформаций растяжения; σ_{d_d} , σ_{D_d} , σ_{ϵ_p} – средние квадратические отклонения этих величин.

Так как эти формулы подобны, то проанализируем только первую из них. На рис. 4 подсчитанные по ней средние квадратические отклонения диаметров отверстий образцов после растяжения сопоставлены с их значениями после дорнования. Расчет выполнен для среднего значения деформации растяжения $\bar{\epsilon}_p = 0,02$ и среднего квадратического отклонения этой деформации $\sigma_{\epsilon_p} = 0,0006$. Такое значение σ_{ϵ_p} , как

показали эксперименты, может быть технологически обеспечено без существенных затруднений. Из рис. 4 видно, что отношение $\sigma_{d_p} / \sigma_{d_d}$ сильно зависит от σ_{d_d} и $\bar{d}_d$. При малых σ_{d_d}

это отношение существенно превышает единицу, по мере увеличения σ_{d_d} оно снижается,

достигает единицы и даже становится несколько меньшим ее. Такой характер зависимости $\sigma_{d_p} / \sigma_{d_d}$ от σ_{d_d} объясняется двояким влиянием

растяжения на точность диаметра отверстий σ_{d_p} . С одной стороны, из-за рассеивания деформаций ϵ_p точность диаметра отверстий, обеспеченная дорнованием σ_{d_d} , при растяжении пада-

ет, с другой – при растяжении сильнее уменьшаются большие (в пределах поля рассеивания) диаметры отверстий, что способствует повышению этой точности. При высокой точности диаметра отверстий после дорнования (малом σ_{d_d}) при растяжении преобладает влияние рассеивания его деформаций; при снижении точности диаметра отверстий после дорнования (увеличении σ_{d_d}) преобладающим становится

уточнение этого диаметра, вызываемое растяжением. С увеличением среднего значения диаметра

уточнение этого диаметра, вызываемое растяжением. С увеличением среднего значения диаметра

тров отверстий $\bar{d}_d$ отношение σ_{dp}/σ_{da} возрастает (рис. 4, а и б).

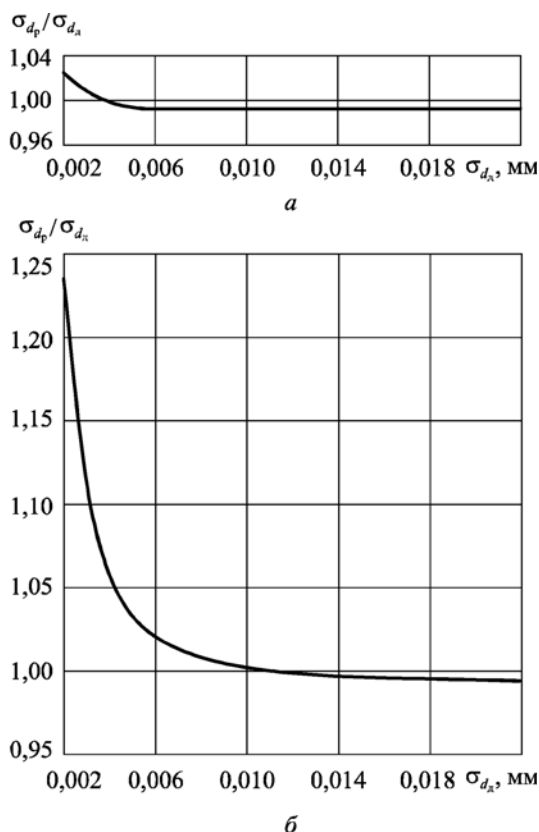


Рис. 4. Отношения средних квадратических отклонений диаметров отверстий после растяжения и дорнования в зависимости от их средних квадратических отклонений после дорнования:

$$a - \bar{d}_d = 2 \text{ мм}; б - \bar{d}_d = 5 \text{ мм}$$

В целом растяжение образцов сопровождается относительно небольшим снижением точности отверстий малого диаметра ($\bar{d}_d \leq 5$ мм). Так, при $\sigma_{da} = 0,002$ мм, которое при нормальном распределении диаметров отверстий после дорнования соответствует полю их рассеивания $\omega_{da} = 6\sigma_{da} = 0,012$ мм, после растяжения с указанными выше параметрами отношение σ_{dp}/σ_{da} составит: при $\bar{d}_d = 2$ мм – 1,04; при $\bar{d}_d = 5$ мм – 1,24. Другими словами, точность диаметров этих отверстий, обеспеченная дорнованием, при растяжении снизится соответственно в 1,04 и 1,24 раза, что существенно меньше, чем на один квалитет.

В заключение отметим, что наиболее целесообразно использование рассмотренного метода снижения остаточных напряжений при изготовлении длинных толстостенных цилиндров с отверстиями малого диаметра.

Выводы

1. Для цилиндров из стали 45 при увеличении степени их толстостенности от 2 до 3 окружные остаточные напряжения после дорнования с режимом, обеспечивающим высокую точность отверстий, возрастают по абсолютной величине со 140 до 500 МПа.

2. Пластическое растяжение с осевыми деформациями 0,015...0,020 позволяет снизить окружные остаточные напряжения в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах с указанных выше значений до 30...50 МПа, т. е. в 5...10 раз.

3. При пластическом растяжении этих цилиндров точность диаметра отверстий (при его значениях не более 5 мм) снижается менее чем на один квалитет.

Список литературы

1. Сковцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2012. – № 2. – С. 1–24.
2. Охотин И.С., Сковцов В.Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 170 с.
3. Сковцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Остаточные напряжения при дорновании отверстий малого диаметра с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – Томск: ТПУ. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 24–27.
4. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.
5. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
6. Проскуряков Ю.Г., Исаев А.Н., Попов Л.В., Валяев Ф.Ф. Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорнованием // Вестник машиностроения. – 1973. – №7. – С. 57–60.
7. Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
8. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и

деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

9. Розенберг А.М., Розенберг О.А., Гриценко Э.И., Посвятенко Э.К. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием. – Киев: Наукова думка, 1977. – 187 с.

10. Алюминий / под ред. А.Т. Туманова, Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1972. – 664 с.

11. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.

12. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

13. Бабищев М.А. Методы определения внутренних напряжений в деталях машин. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 132 с.

14. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 232 с.

15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 14–20

Reduction of residual stresses in mandrelled thick-walled cylinders

Skvortsov V.F., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: TMRI@tpu.ru

Arlyapov A.Y., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Ogol I.I., Assistant

Fedotov V.S., Undergraduate Student

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

The methodology and results of experimental studies on possibility to reduce residual stresses in the mandrelled cylinders of steel grade 45 (0.45% C) with 5 mm diameter hole and with a wall thickness ratios 2 and 3 by plastic tension are presented in the article. It is found that even when the axial tensile plastic deformation is 0.005 significant decrease in the district of residual stresses in these cylinders occurs; with deformation increasing up to 0.015...0.020 county residual stresses are reduced in magnitude from 140...500 MPa to 30 ... 50 MPa. The relationships calculated to estimate accuracy of diametric dimensions of the cylinders after plastic tension are given. It is shown that plastic tension of mandrelled cylinders reduces accuracy of holes with a diameter less than 5 mm by less than one accuracy grade. It is noted that the considered method of reducing residual stresses is the most appropriate to use in the manufacture of long cylinders.

Keywords:

mandreling, thick-walled cylinders, residual stresses, plastic tension, accuracy of holes.

References

1. Skvortsov V.F., Arlyapov A.Yu., Okhotin I.S. Dornovanie glubokikh otverstii malogo diametra [Small diameter deep hole mandrelling]. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal – HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2012, no. 2, appendix, pp. 1–24.

2. Okhotin I.S., Skvortsov V.F. Dornovanie glubokikh otverstii malogo diametra s bol'shimi natiagami [Mandrelling deep small holes with big tightness]. Germany, LAP LAMBERT Academic Publ., 2011. 170 p.

3. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. Ostatochnye napriazheniia pri dornovanii otverstii malogo diametra s bol'shimi natiagami [Residual stresses at mandrelling small holes with big tightness]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, Vol. 316, no. 2, pp. 24–27.

4. Monchenko V.P. *Effektivnaia tekhnologiya proizvodstva polykh tsilindrov* [Effective technology for the production of hollow cylinders]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 248 p.

5. Proskuriakov Yu.G. *Dornovanie otverstii* [Mandrelling holes]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961. 192 p.
6. Proskuriakov Yu.G., Isaev A.N., Popov L.V., Valiaev F.F. Ostatochnye napriazheniia i tochnost' detalei, obrabotannykh dornovaniem [Residual stresses and accuracy parts treated mandrelling]. *Vestnik Mashinostroeniya - Russian Engineering Research*, 1973, no. 7, pp. 57–60.
7. Proskuriakov Yu.G., Romanov V.N., Isaev A.N. *Ob "emnoe dornovanie otverstii* [Volume mandrelling holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.
8. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniia v protsessakh rezaniia i deformiruiushchego protiagivaniia* [Mechanics of plastic deformation in the process of cutting and pulling the deforming]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 320 p.
9. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A., Gritsenko E.I., Posviatenko E.K. *Kachestvo poverkhnosti, obrabotannoi deformiruiushchim protiagivaniem* [Quality of treated surface deforming pulling]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 187 p.
10. Tumanov A.T., Kvasov F.I., Fridliander I.N. *Aliuminii* [Aluminium]. Moscow, Metallurgii Publ., 1972. 664 p.
11. Vishniakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napriazheniiami v metallakh i splavakh* [Control residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgii Publ., 1989. 254 p.
12. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoistva metallov. Deformatsiia i razrushenie* [Mechanical properties of metals. The deformation and fracture]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 472 p.
13. Babichev M.A. *Metody opredeleniia vnutrennikh napriazhenii v detaliakh mashin* [Methods for determination of internal stresses in machine parts]. Moscow, AS USSR Publ., 1955. 132 p.
14. Birger I.A. *Ostatochnye napriazheniia* [Residual Stresses]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1963. 232 p.
15. Venttsel' E.S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1999. 576 p.

Received 30 January 2014

Revised 20 March 2014

Accepted 24 March 2014

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПРИ МАЯТНИКОВОМ ШЛИФОВАНИИ ПЛОСКИХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТАЛИ 13X15H4AM3 ВЫСОКОПОРИСТЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

*Я.И. СОЛЕР, канд. техн. наук, доцент
В.Л. НГУЕН, аспирант, И.А. ГУЦОЛ, аспирант
(ИрГТУ, г. Иркутск)*

Поступила 18 февраля 2014
Рецензирование 10 апреля 2014
Принята к печати 15 апреля 2014

Солер Я.И. – 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Иркутский государственный технический университет,
e-mail: solera@istu.irk.ru

Рассмотрен процесс шлифования как завершающий этап изготовления ответственных деталей, критерием качества которых выступает шероховатость получаемых деталей, определяющая долговечность машин. Наиболее слабым звеном в технологической системе процесса является абразивный круг, режущие способности которого не представляется возможным выразить детерминированной величиной. В связи с этим оценка режущих свойств абразивного инструмента проведена с привлечением параметрического и непараметрического методов статистики, которые позволяют получить не только ожидаемую меру положения (среднюю, медиану), но и меру рассеяния, оценками которой выступают стандарты отклонений, размахи и интерквартильные широты. Меры рассеяния редко учитываются при оценке режущей способности абразивного инструмента, хотя только они позволяют охарактеризовать стабильность процесса. Сказанное особенно актуально при обработке крупных операционных партий деталей на настроенных станках. Исследование вели высокопористыми кругами нового поколения, в которых увеличена пористость до 10–12-й структуры и использованы высокопрочные зерна кубического нитрида бора (CBN50 100/80 CT1 10K27 100-КФ40) и микроскопического корунда (5SG 46I 12 VXP). Выявлено, что различие между ожидаемыми средними и медианами находится в пределах категориальной величины (KB), а наиболее точные оценки стабильности процесса получены с использованием стандартов отклонений. Шлифование плоских деталей из стали 13X15H4AM3 следует вести кругами из синтеркорунда 5SG, которые позволяют снизить высотные параметры шероховатости в 1,12...1,16 раза, т. е. на одну KB, и повысить стабильность процесса в 1,04...1,06 раза.

Ключевые слова: шлифование, высотный параметр шероховатости, статистика, среднее, медиана, стандарт отклонения.

Введение

Сталь 13X15H4AM3 (ВНС-5) обладает хорошей коррозионной устойчивостью и высокими механическими свойствами ($\sigma_b = 1390...1650$ МПа, $\delta = 15\%$, $E = 220$ ГПа), которые придает ей мартенситная структура. На завершающем этапе изготовления ответственные детали из стали ВНС-5 часто подвергаются шлифованию, которое ведут кругами из электрокорунда нормальной пористости с номерами структур 6–7. Однако

высокая плотность черепка инструмента, малый объем и размеры пор не позволяют эффективно шлифовать жаропрочные нержавеющие стали и сплавы, обладающие высокой вязкостью и пластичностью. В этом случае реальным резервом повышения производительности процесса и качества деталей служат высокопористые круги (ВПК), в которых получение более открытых структур достигается добавлением в состав формовочной массы порообразователей: стеклянных и керамических пустотелых шариков,

дробленой скорлупы фруктовых косточек и т. п. В процессе обжига инструмента порообразователи соответственно расплавляются или выгорают с возрастанием объема пор до 45...50 %, в том числе крупных пустот до 15...20 %. Одновременно формируется более благоприятная геометрия рабочей поверхности ВПК: снижаются относительные длины профиля и возрастают средние шаги между ними. Крупные поры образуют пространство для размещения снимаемой стружки, что уменьшает засаливание ВПК; улучшают подачу СОЖ через поры непосредственно в зону резания; снижают трение между поверхностью и заготовкой, а также температуру в зоне контакта между ними до двух раз, предотвращая появление прижогов и трещин. На шероховатость поверхности в наибольшей мере оказывает влияние зернистость порообразователя, которая не должна быть крупнее абразивных зерен. Для поддержания шероховатости деталей на заданном уровне рекомендуется в ВПК снижать размеры зерен основной фракции на один-два номера [1, 2].

Заготовки из труднообрабатываемых сталей и сплавов целесообразно шлифовать ВПК из кубического нитрида бора (КНБ) и синтеркорунда [3].

Совершенствование технологии синтеза КНБ позволило повысить прочность зерен: ЛКВ40, CBN40, ЛКВ50, CBN50 и др. Так, прочность зерен ЛКВ50 на сжатие возросла в 3,7 раза по сравнению с зернами ЛО и в 2,4 раза относительно ЛП. Одновременно отмечено снижение интенсивности их износа истиранием, хотя и в меньшей мере. Повышение прочности зерен КНБ ведет к росту коэффициента шлифования [2, 3]. Укрупнение пор от 0,16 (КФ16) до 0,4 мм (КФ40) обеспечивает снижение расхода электроэнергии и увеличивает коэффициент шлифования жаропрочных сплавов до 40 % по сравнению с кругами ЛКВ30 нормальной пористости [4].

Альтернативным материалом для КНБ является химически модифицированный спеченный по специальной золь-гель технологии микроскопический корунд (синтеркорунд), выпускаемый за рубежом под различными торговыми марками: *Sol-Gel (SG)*, *Cubitron* и др. По своим физико-механическим свойствам синтеркорунд превосходит электрокорунд белый (25А) и приближается к КНБ, оставаясь дешевле последнего: 25А : SG : КНБ = 1 : (10 – 20) : (60 000)

[3–5]. Зерна SG имеют кристаллы с размерами 0,2...0,5 мкм, которые в 20...50 раз мельче, чем у абразива 25А. Это обеспечивает корундовым кругам повышение прочности до трех раз и работу в режиме умеренного самозатачивания путем обновления новых режущих кромок с минимальным износом. Последнее снижает засаливание этих ВПК и тем самым позволяет повысить производительность операций за счет уменьшения вспомогательного времени на правку.

В работах [6, 7] сопоставлены режущие способности кругов из КНБ и синтеркорунда при маятниковом и глубинном шлифовании, выполняемом по попутной схеме врезания инструментов. Установлено, что при маятниковом шлифовании исследуемые ВПК оказались равноценными по силам резания и размерному износу, но по шероховатости инструмент КНБ позволил снизить параметры R_a и R_z в 1,3...1,4 раза. При глубинном шлифовании выявились бесспорные преимущества эльборового круга перед синтеркорундом. Авторы [6, 7] старались создать идентичные условия проведения эксперимента, для чего ВПК из зерен КНБ и SG были изготовлены в идентичных условиях вплоть до состава керамической связки. При ознакомлении с методикой эксперимента складывается убеждение, что исследование проведено в адекватных условиях. Однако известно, что возможности любого круга значимо связаны с составом связки. Так, фирма *Norton* выпускает для шлифования сталей связки: *V*, *VX*, *VTX*, *VXPC*, *VXP* и др. В частности, связка *VXP* используется в ВПК с зернами синтеркорундов 3SG и 5SG, в которых присутствуют добавки зерен А в количестве 70 и 50 % соответственно. Зерна А представляют собой традиционный оксид алюминия с включением 3 % оксида титана. В кругах из синтеркорунда [6, 7] добавлены абразивы 25AF90, которые, вероятнее всего, уступают по режущим свойствам зернам А, поскольку в них отсутствуют оксиды титана. В работах [1–7 и др.] исследования проведены без учета стабильности процесса шлифования. Сказанное делает целесообразным углубление работы с участием ВПК с зернами CBN отечественной разработки и 5SG фирменного производителя *Norton*. В качестве выходных параметров процесса привлечены высоты микронеровностей, которые значимо коррелированы с режущими свойствами кругов

и оказывают значимое воздействие на эксплуатационные показатели машин [3, 8], в силу чего регламентируются на чертежах деталей.

Гипотетическая высота шероховатости без учета весовых коэффициентов представляется следующим выражением [8–11]:

$$H = \sum_{m=1}^5 h_m, \quad (1)$$

где h_1 – составляющая профиля, формируемая кинематическим переносом геометрических характеристик рельефа рабочей поверхности инструмента на заготовку; h_2 – составляющая профиля, возрастающая с увеличением амплитуды относительных колебаний круга и заготовки вследствие разноразмерности и хаотического расположения зерен в связке, а также неравномерного расположения крупных пор в черепке круга; h_3 – составляющая, учитывающая пластическую деформацию заготовки при врезании зерна в металл с образованием высот навалов по боковым сторонам шлифовочных рисков; h_4 – составляющая, обусловленная адгезионным взаимодействием абразивного инструмента с заготовкой; h_5 – составляющая, являющаяся результатом упругих отжатий зерен и черепка ВПК.

По мнению Носенко В.А. [12], первичным фактором в выражении (1) служит h_1 , а все остальные компоненты h_m , $m = \overline{2;5}$ следует отнести к вторичным величинам. Форма и размеры единичных рисков, из которых сформирована обработанная поверхность, непосредственно связаны с рельефом рабочей поверхности инструмента. Геометрические характеристики зерен КНБ и SG (острота кромок, малые радиусы их округления) ведут к снижению значимого ухудшения шероховатости в виде навалов h_4 при их врезании в металл. Составляющая h_2 в значительной мере зависит от технологии правки, что в первую очередь касается ВПК из КНБ.

Целью исследования является сопоставление режущих способностей кругов из КНБ и SG по топографии получаемой поверхности и выбор рекомендуемой характеристики по критерию шероховатости деталей, оцениваемому мерами положения и рассеяния.

Методика исследования

Натурные опыты проведены при следующих постоянных условиях: плоскошлифовальный станок – модели 3Е711В, 3Г71; образцы с размерами $D \times L = 40 \times 30$ мм, шлифуемые по торцу без выхаживания; технологические параметры – продольная подача $s_{пр} = 6$ м/мин, поперечная подача $s_{п} = 5$ мм/дв.ход, глубина резания $t = 0,01$ мм, операционный припуск $z = 0,1$ мм; СОЖ – 5 %-я эмульсия Аквол-6 (ТУ 0258-024-00148845-98), подаваемая поливом на деталь с расходом 7...10 л/мин; число параллельных опытов $n = 30$ ($v = \overline{1;30}$); схема врезания круга в деталь – встречная. Переменные условия шлифования представлены в виде кода « $dijv$ », удобном при статистической обработке наблюдений. В данном случае индекс $d = \overline{1;2}$ отражает направление шероховатости: 1 – параллельно вектору $s_{пр}$, 2 – параллельно вектору $s_{п}$. Код $i = \overline{1;2}$ связан с формой, размерами и характеристиками кругов: 1 – 1А1 200×20×76×3 CBN50 100/80 СТ1 10 К27 100 КФ40 (ГОСТ 17123-79), 2 – 01 250×20×76 5SG 46I 12VXP (каталог фирмы Norton). Индекс $j = \overline{1;3}$ отражает принятые меры рассеяния, которые рассмотрены ниже. Скорости резания (в м/с) составили соответственно $v_{к1} = 28$; $v_{к2} = 35$. Параметры шероховатости (ГОСТ 25142–82): (R_a, R_q, R_z, R_{max}) $_{di}$ – измерены с помощью системы на базе профилографа – профилметра модели 252 завода «Калибр».

Учитывая неустойчивость процесса шлифования и случайную природу формирования (1), анализ экспериментальных данных

$$\{y_{div}\}, \quad d = i = \overline{1;2}, \quad v = \overline{1;30} \quad (2)$$

ведем с привлечением статистических методов, которые, как известно, разделяются на параметрические и непараметрические (ранговые). Характеристиками одномерного распределения частот для (2) служат [13, 14], ГОСТ Р ИСО 5721-1–2002: для первого направления – средние $y_{di} = y_{di\bullet}$, стандарты отклонений (SD) $_{di}$, размахи $R_{di} = |y_{\max} - y_{\min}|_{di}$; для второго направления – медианы $\tilde{y}_{di}$, интерквартильные широты ИКШ $_{di} = |y_{0,75} - y_{0,25}|_{di}$. Первая частота ха-

рактирует меру положения (опорное значение), а последующие – меры рассеяния (прецизионность). При различии между $y_{di\bullet}$ и $\tilde{y}_{di}$ форма кривой распределения имеет асимметрию, которая приближенно вычисляется из выражения $As_{di} = [6(y_{\bullet} - \tilde{y}) / SD]_{di}$, $d = i = \overline{1;2}$, рассматриваемого при одноименных d и i .

Каждый метод статистики имеет «свое поле» [14] для эффективного применения в технических приложениях. Для параметрического метода необходимо, чтобы все данные (2) обладали свойствами гомоскедастичности (синонимы – однородность и гомогенность дисперсий отклонений) и нормальности распределений. Ранговые статистики не связаны с каким-либо семейством распределений, не используют его свойства, и в условиях нарушений гомоскедастичности и нормальности распределений (2) «на своем поле» по эффективности превосходит своего конкурента. Выбор статистического метода и последующий поиск ожидаемых средних $\hat{y}_{di\bullet}$ и медиан $m\hat{y}_{di}$, $d = i = \overline{1;2}$ изложены в [13, 15, 16]. Процедура статистической интерпретации (2) включает в себя два последовательно выполняемых этапа: одномерный дисперсионный анализ (ОДА) на предмет установления факта значимого различия между уровнями мер положения, а затем их множественный анализ, завершающийся поиском ожидаемых аналогов. Обработка (2) связана с большим объемом вычислений и проведена в программной среде Statistica 6.1.478.0.

Влияние непараметрического метода на меры положения оцениваем медианными коэффициентами при одноименных $d = i = \overline{1;2}$:

$$K_{mdi} = (m\hat{y} / \hat{y}_{\bullet})_{di} \quad (3)$$

Оценку режущих свойств круга $i = 2$ относительно базового CBN50 ($i = 1$) ведем для обеих характеристик одномерного распределения частот (2) при одноименных $d = \overline{1;2}$ [13, 17, 18]:

$$K_{d2} = (\tilde{y}_2 / \tilde{y}_1)_d, \quad (4)$$

$$\hat{K}_{d2} = (m\hat{y}_2 / m\hat{y}_1)_d, \quad (5)$$

$$K_{std21} = (SD_1 / SD_2)_d, \quad (6)$$

$$K_{std22} = (R_1 / R_2)_d, \quad (7)$$

$$K_{std23} = (ИКШ_1 / ИКШ_2)_d, \quad (8)$$

где индексы $j = \overline{1;3}$ в коэффициентах (6)–(8) отражают принятые меры рассеяния: 1 – SD_{di} (6), 2 – R_{di} (7) – для параметрических статистик; 3 – $ИКШ_{di}$ (8) – для ранговых статистик. Если по (4), (5) и (6–8) предсказаны $(K_{d2}, \hat{K}_{d2}) > 1$ и $K_{std2j} < 1$, $j = \overline{1;3}$, то меры положения и рассеяния шероховатостей при шлифовании кругом SG превышают соответствующие аналоги для ВПК с зернами CBN и таким образом уступают ему по режущим свойствам.

Результаты исследования и обсуждение

Нуль-гипотезы (H_0) относительно однородности дисперсий $(SD)_{di}^2$, $d = i = \overline{1;2}$ подтверждены в полном объеме, что редко встречается при шлифовании, особенно по высотным параметрам. H_0 о нормальности распределений (2) подтверждены только для круга SG ($i = 2$) по всем поперечным параметрам. С учетом полученных результатов решено воспользоваться параметрическим методом, а оценки ранговых критериев считать справочными. Как и ожидалось, поперечные шероховатости превысили продольные величины: в 4,8...6,6 раза для ВПК CBN, в 3,9...4 раза для ВПК SG, в силу чего они регламентируют состояние поверхности детали в целом.

ОДА и множественный анализ опытных средних $y_{1i\bullet}$, $i = \overline{1;2}$ выявили, что круги на 5 %-м уровне оказывают значимое влияние на большинство поперечных высотных параметров, за исключением наибольшей высоты профиля R_{max1} . Как видно из табл. 1, последний характеризуется общей средней $R_{max1\bullet} = 2,6$ мкм ($3,2^*$). В то же время непараметрический метод дополнительно признал, что опытные медианы $\tilde{R}_{qli}$, $i = \overline{1;2}$ (см. табл. 1) извлечены из единой генеральной совокупности и оцениваются величиной $m\hat{y}_{1\bullet} = 0,52$ ($0,63^*$) мкм. Коэффициенты K_{mli} (3), вычисленные по прогнозируемым мерам положения (см. табл. 1), свидетельствуют о том, что кривые формы распределений характе-

Влияние характеристик кругов на меры положения высотных параметров шероховатости и коэффициенты (3)–(5)

Параметры	Круги i	$y_{li\bullet}$	$\tilde{y}_{li}$	$\hat{y}_{li\bullet}$	$m\hat{y}_{li}$	$K_{\text{м}li}$ (3)	K_{12} (4)	$\hat{K}_{12}$ (5)
		МКМ						
R_{ali}	1	0,45 (0,50 [*])	0,43 (0,50 [*])	0,45 (0,50 [*])	0,43 (0,50 [*])	0,96	0,87	0,93
	2	0,39 (0,40 [*])	0,40 (0,40 [*])	0,39 (0,40 [*])	0,40 (0,40 [*])	1,03		
R_{qli}	1	0,57 (0,63 [*])	0,54 (0,63 [*])	0,57 (0,63 [*])	0,52 (0,63 [*])	0,91	0,79	1,00
	2	0,49 (0,50 [*])	0,50 (0,50 [*])	0,45 (0,50 [*])	0,52 (0,63 [*])	1,16		
R_{zli}	1	1,84 (2,0 [*])	1,77 (2,0 [*])	1,84 (2,0 [*])	1,77 (2,0 [*])	0,96	0,86	0,89
	2	1,58 (1,6 [*])	1,57 (1,6 [*])	1,58 (1,6 [*])	1,57 (1,6 [*])	0,99		
$R_{\text{max}li}$	1	2,74 (3,2 [*])	2,59 (3,2 [*])	2,60 (3,2 [*])	2,54 (3,2 [*])	0,98	1,00	1,00
	2	2,45 (2,5 [*])	2,49 (2,5 [*])	2,60 (3,2 [*])	2,54 (3,2 [*])	0,98		
Примечание. Круги i : 1-СВN50, 2-5SG; «*» категориальные величины по ГОСТ 2789–73								

ризуются положительной асимметрией, поскольку в шести из восьми случаев предсказаны меньше единицы. Дополнительно подчеркнем, что опорные значения для конкретного круга находятся в пределах одной КВ. По опытным мерам положения шлифование кругом SG следует признать более предпочтительным, поскольку обеспечивается снижение высот микронеровностей на одну КВ по сравнению с ВПК СВN50. По прогнозируемым опорным величинам отмеченная закономерность выглядит менее убедительной, поскольку дополнительно для высот $m\hat{R}_{qli}, i = \overline{1;2}$ коэффициент (5) оказался равным единице. Если сопоставить опытные средние $\bar{R}_{ali}, i = \overline{1;2}$ (см. табл. 1) с результатами [6, 7], то следует признать, что они различаются кардинально. В [6, 7] шлифование закаленных сталей ВПК ЛКВ 160/125 СТ1 12V (АЭРОБОР) привело не к росту шероховатости R_{al} относительно SG 80/25A M 12V, как отмечено в табл. 1, а, напротив, к ее снижению также на одну КВ. Результаты [6, 7] противоречат механике процесса шлифования. Для круга АЭРОБОР зернистость выбрана на два номера крупнее, а для ВПК $i = 2$, наоборот, размеры зерен SG взяты на пять номеров мельче, чем в нашем исследовании. Следовало ожидать, что результаты, приведенные в

табл. 1, должны усилиться в пользу круга из керамического корунда. Дополнительно сопоставляемые ВПК имели различие по степени твердости. Ее роль раскрыта в работах [12, 19]: с уменьшением прочности удержания абразивных зерен в черепке круга должна снижаться удельная работа его разрушения, т. е. вырывания зерен из связки. При этом параметр R_{al} должен возрастать. Скалывание зерен (самозатачивание) не зависит от твердости инструмента. Роль истирания коррелирована с нагрузкой и усиливается с ее ростом. В условиях отсутствия поступления новых вершин зерен в зону контакта с деталью ее шероховатость стабилизируется. С изложенных позиций параметр R_{al} для круга АЭРОБОР [12, 19] должен был ухудшиться, а для более твердого инструмента из зерен SG – снизиться. Расхождение результатов может быть обосновано следующим образом:

- в круге из синтеркорунда [6, 7] отсутствует информация о процентном содержании зерен SG и 25A в смеси, а технология его изготовления могла дополнительно повлиять на снижение его режущей способности в целом по сравнению с фирменным инструментом;

- в [6, 7] не указана прочность используемых зерен ЛКВ; возможно зерна СВN50 (см. табл. 1) дают более шероховатую поверхность по сравнению с ЛКВ [6, 7].

Последняя гипотеза была проверена при шлифовании деталей из стали 08X15H5Д2Т (ВНС-2), обрабатываемость шлифованием которой сопоставима с исследуемым материалом деталей. К ВПК $i = \overline{1;2}$ был добавлен инструмент ЛКВ50 160/125 СТ1 10КС10 100 КФ40. Опыты проведены на принятом режиме резания. Для стали ВНС-2 были подтверждены ранее полученные результаты: по поперечным параметрам шероховатости $(R_a, R_q, R_{\max})_1$ наименьшие меры положения показал ВПК из синтеркорунда: в 1,6...1,9 раза по сравнению с ВПК $i = 1$ и в 1,4...1,8 раза по отношению к кругу АЭРОБОР. В таком случае расхождение оценок режущих способностей кругов, вероятнее всего, обусловлены первыми двумя гипотезами. Во-первых, более низкими режущими свойствами круга SG [6, 7] по отношению к фирменному $i = 2$, в котором задано высокое содержание зерен SG ($SG : A = 1 : 1$). Это обеспечивает высокую режущую способность и увеличенный срок службы инструмента $i = 2$. Во-вторых, ВПК с зернами $CBN50$ и $ЛКВ50$ возможно обладают большей прочностью относительно зерен $ЛКВ$ [6, 7], которые даны без указания их условной прочности. В таком случае это может снизить самозатачивание ВПК в целом и ухудшить шероховатость поверхности. По результатам шлифования деталей из стали ВНС-5 и ВНС-2 обнаружено, что наименьшие меры положения по параметрам $(R_a, R_q, R_z, R_{\max})_1$ обеспечивает ВПК с зернами синтеркорунда, что делает его наиболее перспективным инструментом при чистовом шлифовании коррозионно-стойких сталей повышенной прочности.

Установлено, что круги $i = \overline{1;2}$ не оказали значимого воздействия на высотные микронеровности топографии поверхности в направлении вектора $s_{пр}$. По прогнозируемым средним их можно охарактеризовать следующими величинами: $\hat{R}_{a2} \dots 0,10$ (0,10*), $\hat{R}_{q2} \dots 0,12$ (0,125*), $\hat{R}_{z2} \dots 0,31$ (0,32*) и $\hat{R}_{\max 2} \dots 0,59$ (0,63*). В границах указанных КВ расположены ожидаемые медианы. Анизотропия высотных шероховатостей по ожидаемым средним может быть представлена следующими корреляционными коэффициентами: $(\hat{R}_{a1} / \hat{R}_{a2}, \hat{R}_{q1} / \hat{R}_{q2}) = 4,5 \dots 4,75$

при шлифовании кругом $CBN50$ и 3,75...3,9 – для инструмента $5SG$; $\hat{R}_{z1} / \hat{R}_{z2}$ соответственно 5,6 и 5,1; $\hat{R}_{\max 1} / \hat{R}_{\max 2} = 4,4$ для обеих ВПК $i = \overline{1;2}$.

Генезис формирования шероховатостей (1) позволяет считать, что уменьшение высот микронеровностей связано с составляющей h_1 , которая снижается с увеличением числа режущих зерен на рабочей поверхности ВПК. Этим требованиям наиболее полно соответствует круг $i = 2$, износ которого протекает путем микровыкрашивания частиц $5SG$ с размерами 0,2...0,5 мкм [3, 12].

Режущую способность ВПК характеризует не только их способность формировать на поверхности детали определенную шероховатость, но и поддержание или воспроизводимость ее величины на протяжении всего процесса шлифования операционной партии. При сопоставлении работы нескольких инструментов удобно воспользоваться (6)–(8), которые получены по фактическому разбросу наблюдений без учета допуска их рассеяния [17, 18].

В табл. 2 представлены результаты влияния кругов $i = \overline{1;2}$ на стабильность формирования высотных шероховатостей в двух взаимно ортогональных направлениях. Анализ полученных данных ведем в условиях приоритетного отношения к стандартам отклонений, размахам и полученным на их базе коэффициентам (6) и (7). При этом учитываем, что управление стабильностью процесса всегда получается более точным с использованием стандартов отклонений по сравнению с размахами. Как видно из табл. 2, в поперечном направлении, регламентирующем состояние микрорельефа поверхности, преимущества по стандартам SD_{12} имеют круги из синтеркорунда, о чем свидетельствуют коэффициенты стабильности $K_{cr121} = 1,04 \dots 1,07$ для параметров R_{a1}, R_{q1} и R_{z1} . Эти результаты подтверждены только для параметра R_{z1} : $K_{cr122} = 1,03$ – по размахам, $K_{cr123} = 1,33$ – по интерквартильным широтам. В последнем случае стабильность процесса для круга $i = 2$ даже возросла. Для наибольшей высоты неровностей воспроизводимость процесса повышает ВПК CBN : $K_{cr12j} = 0,92 \dots 0,98$, $j = \overline{1;3}$. В продольном направлении предсказаны прямо противоположные ре-

зультаты: для параметра $R_{\max 2}$ коэффициенты $K_{\text{ст}2j}$, $j = 1$ и 3 возросли до $1,4$ раза, а для остальных, кроме R_{q2} , снизились до $0,8$. Таким образом,

«на своем поле» для параметрического метода результаты стабильности процесса по (6) оказались наиболее точными и надежными.

Таблица 2

Оценка режущих способностей кругов по мерам рассеяния (6)–(8)

Параметры	Круги i	SD_{1i}	R_{di}	ИКШ $_{di}$	$K_{\text{ст}2j}$		
		мкм			$j = 1$ (6)	$j = 2$ (7)	$j = 3$ (8)
R_{a1i}	1	0,103531	0,400997	0,112000	1,04	0,86	1,00
	2	0,099848	0,46666	0,112000			
R_{q1i}	1	0,130407	0,511667	0,128666	1,05	0,89	0,86
	2	0,123790	0,577653	0,150333			
R_{z1i}	1	0,345787	1,460000	0,408000	1,07	1,03	1,33
	2	0,322824	1,417663	0,306633			
$R_{\max 1i}$	1	0,585490	2,480000	0,712333	0,98	0,96	0,92
	2	0,599120	2,592993	0,771666			
R_{a2i}	1	0,039212	0,168330	0,045667	0,96	0,94	0,98
	2	0,040902	0,179330	0,046667			
R_{q2i}	1	0,048554	0,207330	0,060000	1,00	0,99	1,05
	2	0,048544	0,208667	0,057000			
R_{z2i}	1	1,104803	0,431667	0,107000	0,81	0,90	0,95
	2	0,129394	0,480327	0,113000			
$R_{\max 2i}$	1	0,214979	0,830000	0,291666	1,01	0,90	1,44
	2	0,212557	0,926670	0,202334			

Примечание. Круги i : 1-CBN50100/80 CT1 10 K27 100 KФ40, 2-5SG 46I 12VXP

Выводы

1. Подтверждена гипотеза относительно го-могенности отклонений наблюдений по высотным параметрам шероховатости при шлифовании деталей ВНС-5 кругами CBN50 100/80 CT1 10 K27 100 KФ40 и 5SG 46I 12VXP, что свидетельствует об их высоких режущих свойствах.

2. В большинстве исследований не уделяется внимания величинам дисперсий отклонений, хотя статистические методы позволяют получить данную характеристику распределений частот. В работе раскрыты возможности оценки стабильности процесса по стандартам отклонений, размахам и интерквартильным широтам. Показано, что в условиях приоритетного использования параметрического метода статистики наиболее адекватным оказался коэффициент

стабильности (6), учитывающий фактический разброс стандартов наблюдений без учета их допуска рассеяния.

3. Установлено, что шлифование деталей из закаленной стали 13X15H4AM3 следует выполнять кругом 5SG 46I 12VXP, который позволяет снизить высотные шероховатости в поперечном направлении до одной KB и повысить воспроизводимость процесса в $1,04 \dots 1,07$ раза. Последнее особенно важно при шлифовании крупных операционных партий деталей на настроенных станках.

Список литературы

1. Багайсков Ю.С., Шумячер В.М. Улучшение структурно-механических и эксплуатационных свойств абразивных инструментов с порообразо-

- вателем // Технология машиностроения. – 2007. – № 3. – С. 34–37.
2. Кремень З.И. Высокопористые круги – эффективное средство повышения производительности шлифования и качества деталей из различных материалов // Инструмент и технологии. – 2001. – № 5–6. – С. 34–37.
3. Кремень З.И., Юрьев В.Г., Бабошкин А.Ф. Технология шлифования в машиностроении; под общ. ред. З.И. Кременя. – СПб: Политехника, 2007. – 424 с.
4. Кремень З.И., Лебедев А.И. Анализ возможностей управления пористостью шлифовальных кругов из эльбора с целью расширения областей их применения // Инструмент и технологии. – 2010. – № 27. – Вып. 1. – С. 46–49.
5. Лебедев А.И. Повышение эффективности процесса шлифования труднообрабатываемых материалов путем применения специальных крупнопористых кругов из эльбора: автореф. дис... канд. техн. наук (05.02.07). – Рыбинск: РГТА, 2010. – 16 с.
6. Старков В.К., Поклад В.А., Кайзер М. и др. Сравнительный анализ работоспособности высокопористых эльборовых и корундовых кругов при профильном зубошлифовании // Технология машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 17–22.
7. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. – 688 с.
8. Инженерия поверхности / под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
9. Полканов Е.Г., Кискин О.С., Големи С. и др. Применение высокопористых кругов из синтеркорунда при профильном шлифовании фасонного режущего инструмента // Справочник. Инженерный журнал. – 2008. – № 11. – С. 30–32.
10. Унянин А.Н. Научное и технологическое обеспечение шлифования заготовок из пластичных сталей и сплавов с предотвращением засаливания абразивных кругов: дис. ... д-ра техн. наук (05.03.01). – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – С. 41–49.
11. Шумячер В.М., Кадильников А.В. Влияние формы поверхности шлифовального круга и ориентации абразивного зерна в связке на начало процесса стружкообразования // Технология машиностроения. – 2007. – № 5. – С. 29–33.
12. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 616 с.
13. Закс Л. Статистическое оценивание / пер. с нем. В.Н. Варыгина; под ред. Ю.П. Адлера, В.Г. Горского. – М.: Статистика, 1976. – С. 598.
14. Холлендер М., Вулф Д. Непараметрические методы статистики / пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 506 с.
15. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness // Russian engineering research, 2010, vol. 30, No. 3, pp. 251–261.
16. Soler Ya.I., Prokop'eva A.V. More precise geometric prediction of high-speed plates for composite tools in boron-nitride grinding // Russian engineering research, 2011, vol. 33, No. 8, pp. 800–811.
17. Солер Я.И., Нгуен В.Л., Нгуен Ч.К. Прогнозирование точности формы плоских деталей из закаленных сталей при маятниковом шлифовании периферией абразивного круга // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 12 (19). – Ч. 1. – С. 128–134.
18. Уилер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами / пер. с англ. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 409 с.
19. Бикпавленова Д.Р. Повышение эффективности шлифования путем управления структурно-механическими характеристиками абразивного инструмента на керамическом связующем: автореф. дис... канд. техн. наук. (05.03.01). – Волгоград: ВолГТУ, 2005. – 15 с.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 21–30

Prediction of microgeometry in pendulous grinding of plane parts made of steel 13X15H4AM3 by high porous wheels

Soler Ya.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: solera@istu.irk.ru

Nguyen V.L., Post-graduate Student,

Gutsol I.A., Post-graduate Student

National Research Irkutsk State Technical University, 83 Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Abstract

The grinding process is used at the final stage of manufacture of responsible parts. The quality criterion in this case is surfaced roughness that determining machine durability. Abrasive wheels are the weakest link in process technology system, which cutting abilities can't be expressed as a deterministic quantity. In this connection the assessment of cutting properties of abrasive wheels is conducted with attraction of parametric and nonparametric statistical methods that allow to find not only expected measure of position (mean, median), but also a measure of scattering, estimated by deviations standards, swings and interquartile widths. The measures of scattering are seldom considered in estimating of cutting ability of abrasive wheel, although they only allow to characterize the stability of the process. This is especially important in processing of large operating batches of parts on customized machines. The research is conducted with high porous wheels (VPK) of new generation, which porosity was increased to (10-12)th structure and high-strength grains of cubic boron nitride (CBN50 100/80 CT1 10K27 100-KФ40) and microscopical corundum (5SG 46I 12 VXP) are used. It is revealed that the difference between expected means and medians is in the limit of categorical variables (CV), and the most accurate estimates of process stability are obtained with deviations of standard. Grinding of flat parts made of steel 13X15H4AM3 should be occurred with wheels made of synthetic corundum 5SG that allows to decrease the high parameters of roughness - 1,121,16 times higher (that means one CV) and increase the process stability in 1,04-1,06 times.

Keywords:

grinding, high roughness parameters, statistics, mean, median, deviation of standard

References

1. Bagayskov Yu.S., Shumyacher V.M. Uluchshenie strukturno-mekhanicheskikh i ekspluatatsionnykh svoistv abrazivnykh instrumentov s poroobrazovatelem [Improvement of constructive-mechanical properties and operating abilities of the porophore abrasive tool]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya - Mechanical Engineering*, 2007, no. 3. pp. 34–37.
2. Kremen' Z.I. Vysokoporistye krugi – effektivnoe sredstvo povysheniia proizvoditel'nosti shlifovaniia i kachestva detalei iz razlichnykh materialov [The highly wheels - an effective means of improving productivity and quality of grinding parts from different materials]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technologies*, 2001, no. 5–6, pp. 34–37.
3. Kremen' Z.I., Yur'ev V.G., Baboshkin A.F. *Tekhnologiya shlifovaniia v mashinostroenii* [Grinding technology in mechanical engineering]. Saint Petersburg, Politehnika Publ., 2007. 424 p.
4. Kremen' Z.I., Lebedev A.I. Analiz vozmozhnostei upravleniia poristost'iu shlifoval'nykh krugov iz el'bora s tsel'iu rasshireniia oblastei ikh primeneniia [Analysis of management capabilities porosity grinding wheels CBN to expand their areas of application]. *Instrument i tekhnologii – Tools and Technologies*, 2010, no. 27, Issue 1, pp. 46–49.
5. Lebedev A.I. *Povyshenie effektivnosti protsessa shlifovaniia trudnoobrabatyvaemykh materialov putem primeneniia spetsial'nykh krupnoporistykh krugov iz el'bora*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increase in the efficiency of grinding hard materials by using special macroporous CBN wheels. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Rybinsk, RSATU Publ., 2010. 16 p.
6. Starkov V. K., Ryabtsev S. A., Poklad V. A., Novikov V. S., Kayzer M., Kostrov S. V. Sravnitel'nyi analiz rabotosposobnosti vysokoporistykh el'borovykh i korundovykh krugov pri profil'nom zuboshlifovanii [Working capacity comparative analysis of high-porous L-boric and corundum wheels at contour gear grinding]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya - Mechanical Engineering*, 2007, no. 2, pp. 17–22.
7. Starkov V.K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Highly porous grinding wheels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 688 p.
8. Suslov A.G., Bez'iazychnyi V.F., Panfilov Yu.V., Bishutin S.G., Govorov I.V., Gorlenko A.O., Gorlenko O.A., Petreshin D.I., Sakalo V.I., S'ianov S.Yu., Tikhomirov V.P., Fedonin O.N., Fedorov V.P., Finatov D.N., Shcherbakov A.N. *Inzheneriia poverkhnosti* [Surface Engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 s.
9. Polkanov E.G., Kiskin O.S., Holey S., Ryabtsev S.A. Primenenie vysokoporistykh krugov iz sinterkorunda pri profil'nom shlifovanii fasonnogo rezhushchego instrumenta [Application of highly porous wheels from sintered corundum for profile grinding the shared cutting tool]. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal – HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2008, no. 11, pp. 30–32.
10. Unianin A.N. *Nauchnoe i tekhnologicheskoe obespechenie shlifovaniia zagotovok iz plastichnykh staley i spлавov s predotvrashcheniem zasalivaniia abrazivnykh krugov*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and technological

support for the grinding of workpieces plastic steels and alloys to prevent clogging of abrasive wheels. Dr. eng. sci. diss.]. Ulyanovsk, ULSTU Publ., 2006. 537 p.

11. Shumyacher V. M., Kadilnikov A. V. Vliianie formy poverkhnosti shlifoval'nogo kruga i orientatsii abrazivnogo zerna v svyazke na nachalo protsessa struzhkoobrazovaniia [Effect of surface form and abrasive grain orientation at the beginning of the chips-making process at grinding]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya – Mechanical Engineering*, 2007, no. 5, pp. 29–33.

12. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniia metallov: monografiia* [Metal grinding technology: monograph]. Staryy Oskol, TNT Publ., 2012. 616 p.

13. Sachs Lothar. *Statistische Auswertungsmethoden*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972. 548 p. (Russ. ed.: Trans. eng. Varygina V.N. Edited by Adler Yu.P., Gorskii V.G., *Statisticheskoe otsenivanie*. Moscow, Statistika Publ., 1976. 598 p.)

14. Hollander Myles, Wolfe D.A. *Nonparametric Statistical Methods*. John Wiley & Sons, 1973. 528 p. (Russ. ed: Trans. eng. Shmerling D.S. Edited by Adler Yu.P., Tiurin Yu.N. *Neparametricheskie metody statistiki*. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983. 506 p.)

15. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Selecting abrasive wheels for the plane grinding of airplane parts of the basis surface roughness. *Russian Engineering Research*, 2010, Vol. 30, Issue 3, pp. 251–261.

16. Soler Ya.I., Prokop'eva A.V. More precise geometric prediction of high-speed plates for composite tools in boron-nitride grinding. *Russian Engineering Research*, 2011, Vol. 33, Issue 8, pp. 800–811.

17. Soler Ya.I., Nguyen Van Le, Nguyen Chi Kien. Prognozirovanie tochnosti formy ploskikh detalei iz zakalennykh stalei pri maiatnikovom shlifovanii periferiei abrazivnogo kruga [Prediction of shape precision of hardened steel flat parts at pendular grinding with periphery of the abrasive wheel]. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*, 2013, no. 12(19), Part 1, pp. 128–134.

18. Wheeler D.J., Chambers D.S. *Understanding Statistical Process Control*. Knoxville, Tennessee: SPC Press, Inc. Introduction by W. Edwards Deming, 1992. (Russ. ed: Trans. eng. Kuz'min V., Adler Yu. Edited by Adler Yu., Shper V. *Statisticheskoe upravlenie protsessami. Optimizatsiia biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta*. Moscow, Al'pina Biznes Buks Publ., 2009. 409 p.)

19. Bikaplenova D.R. *Povyshenie effektivnosti shlifovaniia putem upravleniia strukturno-mekhanicheskimi kharakteristikami abrazivnogo instrumenta na keramicheskom svyazuiushchem*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Increasing the grinding efficiency by controlling the structural and mechanical characteristics of the abrasive tool with a ceramic binder. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Volgograd, 2005. 15 p.

Received 18 February 2014

Revised 10 April 2014

Accepted 15 April 2014

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИЮ ФРОНТА УПЛОТНЕНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ*

В.В. ЧЕРНОМАС, доктор техн. наук, профессор

Н.А. БОГДАНОВА, аспирант

Г.М. СЕВАСТЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук

А.А. СОСНИН, канд. техн. наук

(ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)

Поступила 17 марта 2014

Рецензирование 24 апреля 2014

Принята к печати 5 мая 2014

Черномас В.В. – 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов, 1,
Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,
e-mail: mail@imim.ru

Исследовано влияние размера отверстий перфорированной пластины на параметры процесса ее осадки в закрытом штампе. Представлены кривые, характеризующие усилие деформирования и эволюцию фронта уплотнения при различных степенях деформации. Усилие возрастает с уплотнением материала и существенно зависит от скорости движения инструмента и параметров контакта заготовки со штампом. С ростом скорости деформирования увеличивается относительная толщина полностью уплотненного слоя материала. Выявлено, что геометрический размер пор при одной степени пористости не оказывает существенного влияния на характеристики распространения фронта уплотнения и энергосиловые параметры процесса деформирования.

Ключевые слова: осадка, деформация, фронт уплотнения, перфорированная пластина.

Введение

Современное развитие машиностроительных отраслей производства характеризуется широким внедрением композиционных (структурно неоднородных) материалов для изготовления деталей со специфическими теплофизическими и физико-механическими свойствами, позволяющими значительно уменьшить массу конструкции в целом [1–5]. Примером таких материалов являются пенометаллы, и в частности, пено-

алюминий [6–8]. Получение изделий из пеноалюминиевых заготовок методами пластического деформирования является одним из перспективных направлений развития теории и практики обработки материалов давлением. Энергосиловые параметры процесса деформирования и эволюция структуры таких заготовок существенно различаются в технологиях объемной штамповки и технологиях получения металлоизделий из традиционных (кристаллических) материалов. Это требует уточнения существующих и разра-

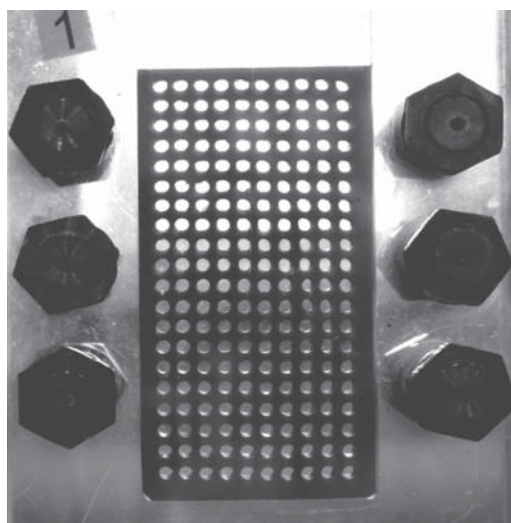
* Работа выполнена при поддержке грантов ДВО РАН 12-I-ОЭММПУ-06 «Экспериментальное моделирование процессов, протекающих при деформации гетерогенных сред в условиях сложного нагружения» и 12-I-П25-02 «Экспериментальное и теоретическое исследование процессов, протекающих в системе «инструмент – деформируемый металл» в условиях различных контактных взаимодействий при изготовлении металлоизделий на установках непрерывного литья и деформации металла».

ботки новых моделей, описывающих формирование напряженно-деформированного состояния в системе «заготовка–инструмент деформации». Необходимость решения теоретических задач, связанных с деформированием структурно неоднородных материалов, привела к созданию в конце XX века нового раздела механики деформируемого твердого тела – механики композитов. Развитие механики композитов в СССР и России связано с именами Ю.Н. Работнова, Б.Е. Победря, Ю.М. Тарнопольского; зарубежом – Р. Кристенсена и др. [9–12]. В большинстве работ при моделировании поведения разнородного материала используется принцип эквивалентной гомогенности, при котором неоднородный материал рассматривается как некий абстрактный однородный материал с усредненными теплофизическими, реологическими и физико-механическими свойствами. При этом усреднение характеристик проводится преимущественно посредством решения краевых задач механики для представительного объема, содержащего неоднородность [13, 14]. Наряду с построением теоретических моделей процессов деформирования и разрушения неоднородных материалов проводятся и экспериментальные исследования, результаты которых служат как для верификации созданных моделей, так и для инженерных расчетов технологических параметров процессов обработки металлов давлением [15, 16]. Однако несмотря на наличие существенного числа работ по механике пористых сред, посвященных

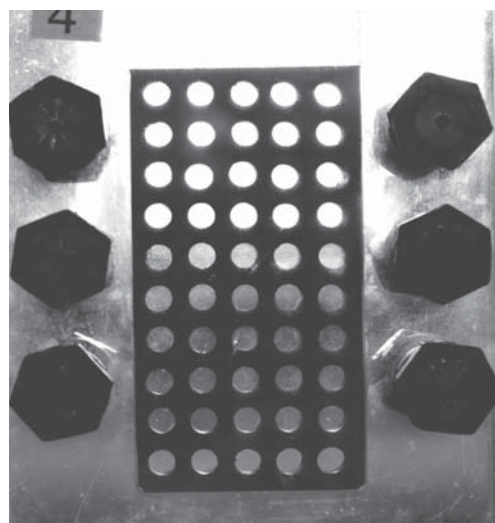
влиянию характеристик материала матрицы и объемного содержания пор (степени пористости) на энергосиловые параметры и эволюцию структуры при деформировании неоднородного материала, неизученным остается влияние геометрических характеристик пор на эти параметры. Ранее авторами статьи были предложены экспериментальный стенд и методика для определения энергосиловых параметров и эволюции структуры неоднородной пластины (с регулярной пористостью) [17]. Настоящая работа посвящена исследованию влияния геометрических размеров пор (при одной и той же степени пористости материала образцов) на параметры процесса осадки неоднородного материала в закрытом штампе.

1. Методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований по деформированию пористых материалов разработан стенд, включающий в себя закрытую матрицу, выполненную под прямоугольные пластины малой толщины, модельный материал – пластопарафиновые перфорированные пластины заданной степени пористости (с различными радиусами пор), инструмент деформирования (пресс) с комплексом измерительного оборудования и видеорегистрирующей аппаратуры [18]. Внешний вид штампа с двумя вариантами образцов изображен на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Внешний вид матрицы (штампа) с образцом:
а – диаметр пор 4 мм; б – диаметр пор 8 мм

В рамках данного исследования осадке подвергали образцы перфорированных пластин со степенью пористости 0,25 (эквивалентной плотностью 75 % от плотности материала матрицы – пластопарафина) толщиной 10,5 мм и размерами 140×70 мм с диаметром отверстий перфорации 4 и 8 мм. Деформирующее усилие приложено с меньшего торца. Перемещение инструмента равномерное, со скоростями в пределах от 0,5 до 5 мм/с.

2. Результаты исследований

Данные эксперименты направлены на моделирование процесса изготовления металлоизделий из пенометаллов и порошков. При характерных температурах прессования порошков (свыше 0,5 от температуры плавления металла) материал основы проявляет выраженные пластические свойства. При этом дисперсная среда в целом подвержена необратимым пластическим изменениям объема. Сам материал основы при расчетах традиционно принимается пластически несжимаемым (пластическое изменение объема происходит только за счет закрытия и перераспределения пор в объеме штамповки). Эти же свойства проявляет и выбранный для моделирования перфорированный пластопарафин, что позволяет перенести выявленные в ходе физического моделирования качественные особенности формирования и эволюции фронта уплотнения на порошковые металлы; при этом качественная картина кривой усилия деформирования также должна проявлять подобие.

Здесь и далее под фронтом уплотнения понимается нестационарная линия полного закрытия пор, ограничивающая вместе с линией контакта и жесткими границами матрицы объем материала с единичной относительной плотностью. Распространение этого фронта в формируемом изделии является одной из наиболее важных характеристик процесса прессования пенометаллов и порошковых металлов, так как создание в изготавливаемой детали полностью уплотненного поверхностного слоя определенной толщины является необходимым условием ее дальнейшей эксплуатации. Толщина этого слоя определяет величину предельно допустимой нагрузки на деталь, ее жесткость; с другой стороны, равномерность толщины этого слоя по поверхности

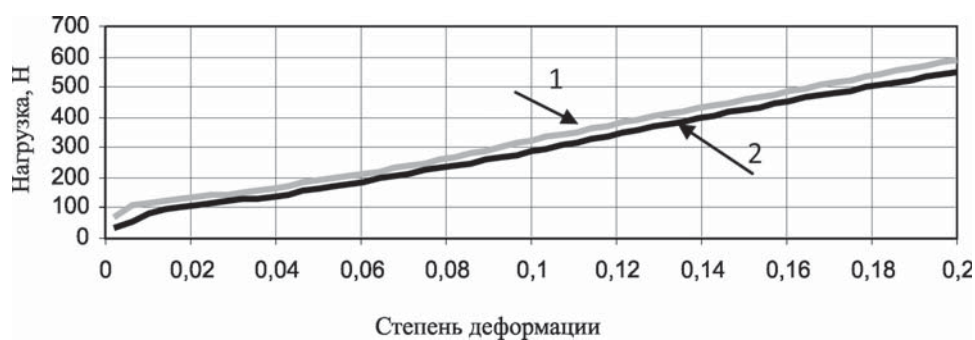
детали также сказывается на ее эксплуатационных качествах, особенно в случае быстро движущихся деталей машин и механизмов.

Процесс деформирования образцов на экспериментальном стенде фиксировался посредством видеосъемки. Результаты по эволюции фронта уплотнения получены посредством кадровой обработки видеоматериалов средствами компьютерной инженерной графики. На рис. 2 приведены кривые, характеризующие эволюцию усилия деформирования с ростом степени деформации образца при различных скоростях инструмента и характере контакта на границах «матрица – материал» (наличие или отсутствие смазки на контактных поверхностях). Данные на графиках – усредненные результаты серии экспериментов. Максимальное отклонение нагрузки – в пределах 5 % от среднего значения по серии.

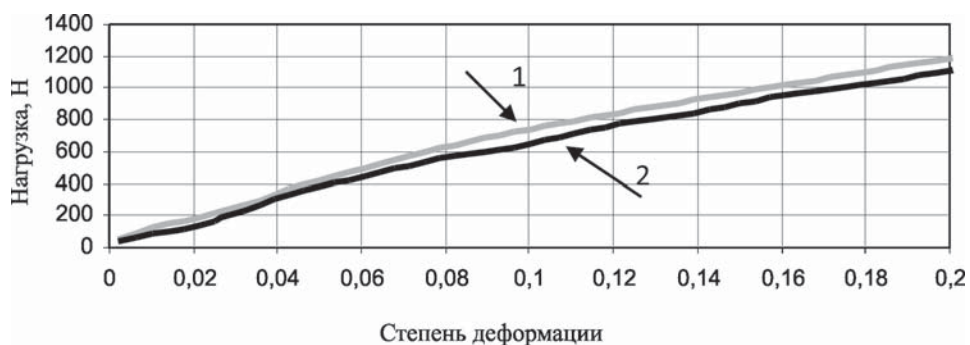
Видно, что при одной и той же степени пористости физический размер пор не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на усилие деформирования (по крайней мере, в диапазонах параметров процесса, охваченных в эксперименте). Это позволяет заключить, что с точки зрения энергосиловых характеристик деформирования дисперсная среда может быть описана всего одним параметром – относительной плотностью. Отметим, что усилие деформации независимо от наличия или отсутствия смазки на контактных поверхностях существенно зависит от скорости деформирования, что связано с проявлениями вязкостных свойств материала основы (влияние вязкости будет также существенно для цветных порошковых металлов).

3. Обсуждение результатов

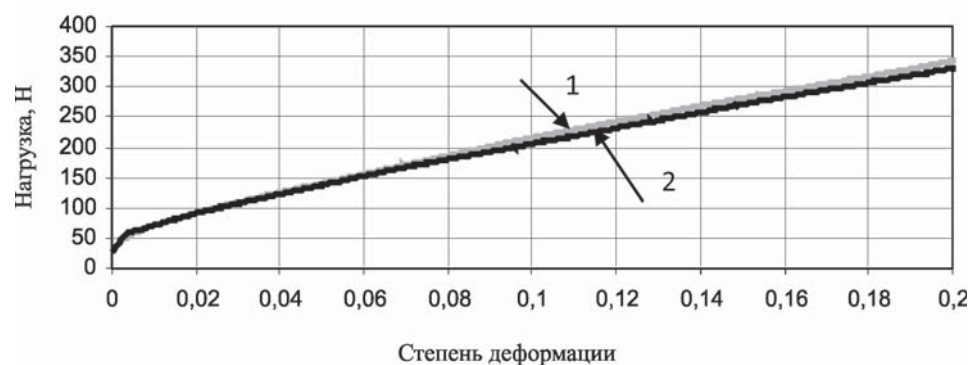
Положения кривой фронта уплотнения определяются как перемещениями пор в материале, так и величинами полуосей эллиптических пор и углами их поворотов относительно начального положения в текущий момент времени, при этом углы поворота эллипсов как раз характеризуют кривизну поверхности уплотнения. Положения фронта уплотнения (безразмерные величины, приведенные в долях текущей высоты образца), восстановленные по результатам постобработки изображений, показаны на рис. 3 для образцов, деформированных без смазки. По оси абсцисс –



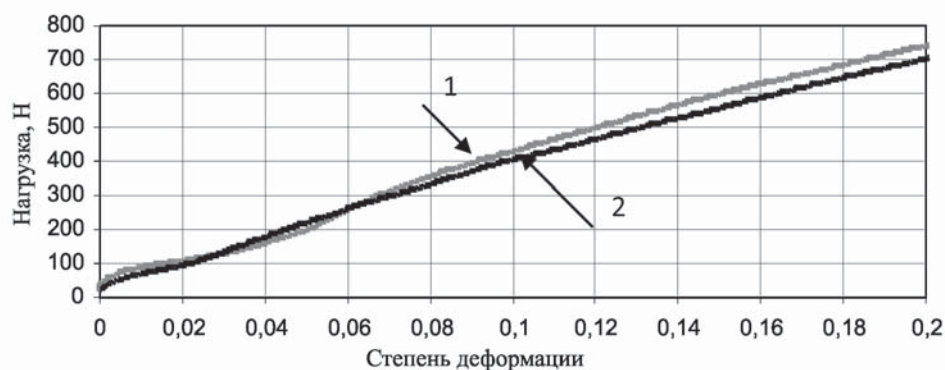
a



б



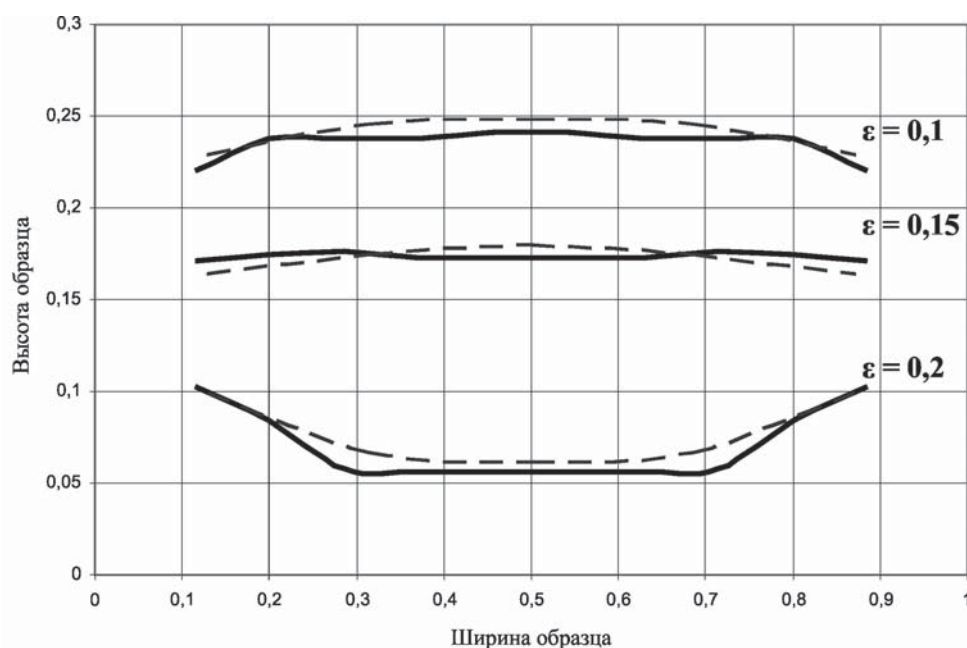
в



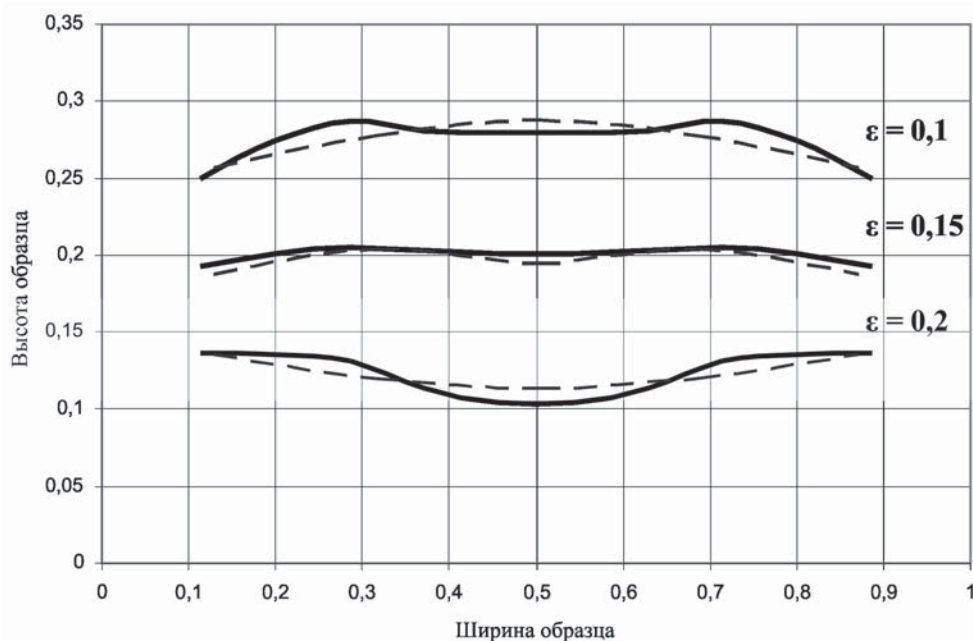
г

Рис. 2. Усилие деформации:

a – скорость инструмента 5 мм/с, со смазкой; *б* – скорость инструмента 5 мм/с, без смазки; *в* – скорость инструмента 0,5 мм/с, со смазкой; *г* – скорость инструмента 0,5 мм/с, без смазки; кривая 1 – диаметр пор 4 мм, кривая 2 – диаметр пор 8 мм



а



б

Рис. 3. Кривые фронта уплотнения на различных стадиях процесса:

а – скорость деформирования 0,5 мм/с; б – скорость деформирования 5 мм/с; пунктирные линии – диаметр отверстий 8 мм; сплошные линии – диаметр отверстий 4 мм; ε – степень деформации

безразмерная ширина. Отметим, что при наличии смазки окончательного закрытия пор не наблюдается при исследованных степенях деформации.

Физический размер пор не оказывает заметного влияния на скорость распространения и форму фронта уплотнения. Отметим, что с увеличением скорости деформирования увеличивается относительная скорость распространения

фронта уплотнения в материале. То есть для создания большей толщины полностью уплотненного слоя под инструментом деформации следует повышать скорость перемещения инструмента.

Интересно отметить, что кривая фронта уплотнения в процессе деформирования меняет знак вогнутости – при малых степенях деформации фронт уплотнения глубже проникает в

материал образца у краев (вблизи зоны контакта со стенками матрицы), далее при некотором пороговом значении степени деформации кривая фактически переходит в прямую линию и в дальнейшем фронт уплотнения выгнут вниз (см. рис. 3). Это наблюдение может объясняться перестройкой механизма трения на контактных поверхностях. В начале процесса нормальная к стенке матрицы нагрузка достаточно мала и реализуется трение типа Кулона–Амонтона, которое с ростом нагрузки переходит в трение Прандтля, когда сила трения достигает предела текучести материала на сдвиг.

Выводы

Результаты натурных экспериментов показали, что в достаточно широком диапазоне физический размер включений не оказывает существенного влияния ни на силовые параметры прессования дисперсных материалов, ни на характеристики распространения фронта уплотнения (скорость, форма кривой), что, вообще говоря, не являлось очевидным до испытаний. Таким образом, полученные в [18] авторами настоящей работы аппроксимации параметров деформированного состояния пористой среды при динамическом нагружении не нуждаются в обобщении на различные геометрические характеристики пористости за исключением одного безразмерного параметра – относительной плотности дисперсного материала.

Список литературы

1. Shiomi M., Imagama S., Osakada K., Matsumoto R. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming // *Journal of Materials Processing Technology*, 210:9 (2010), 1203–1208.
2. Banhart J. Manufacture, Characterization and application of cellular metals and metal foams // *Progress in materials Science* 46:6 (2001), 559–632.
3. Neugebauer R., Hipke T. Machine tools with metal foams // *Advanced Engineering Materials*, 8:9 (2006), 858–863.
4. Stoebener K., Rausch G. Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics // *Journal of Material Science*, 44:6 (2009), 1506–1511.
5. Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A. ALPORAS Aluminium Foam: Production Process, Properties and Application // *Advanced Engineering Materials*, 2:4 (2000), 179–183.

6. Старовойтенко Е.И. Пеноалюминиевые графулы – перспективы производства и промышленного применения нового пористого материала // *Технология легких сплавов*. – 2006. – № 1–2. – С. 218–221.

7. Арбузова Л.А., Старовойтенко Е.И., Трубкина Е.М. и др. Способ получения пористых полуфабрикатов из порошков алюминиевых сплавов. Патент на изобретение RUS 2138367, опубл. 27.07.1998.

8. Арбузова Л.А., Старовойтенко Е.И., Полькин И.С. и др. Способ получения пористых изделий из порошков алюминиевых сплавов. Патент на изобретение RUS 2139774, опубл. 18.11.1998.

9. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 336 с.

10. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: МГУ, 1984. – 336 с.

11. Тарнопольский Ю.М. Прикладная механика композитов. – М.: Мир, 1989. – 358 с.

12. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения. – М.: Наука, 1987. – 80 с.

13. Краснощеков П.И., Федотов А.Ф. Упругие модули изотропных порошковых и пористых материалов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки»*. – 2006. – Т. 43. – С. 81–87.

14. Александров С.Е., Дружанов Б.А. Прессование уплотняемого пластического материала в закрытой матрице // *Прикладная механика и техническая физика*. – 1990. – № 1. – С. 117–123.

15. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Максименко А.Е., Лысюк М.В. Исследование уплотнения при деформации пористых материалов // *Известия ТулГУ. Серия «Технические науки»*. – 2011. – Т. 3. № 1. – С. 440–448.

16. Власов А.В., Субич В.Н., Шестаков Н.А. Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2010. – № 3. – С. 31–35.

17. Черномас В.В., Ловизин Н.С., Богданова Н.А. Устройство для исследования плоской деформации модели пористого вещества. Положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение по заявке № 2012149651/28(079590) от 21.11.2012 г.

18. Богданова Н.А., Черномас В.В., Соснин А.А. Моделирование процесса деформации при осадке неоднородного материала в закрытом штампе // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 3. – С. 9–18.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 31–38

The influence of the geometrical factor on the force parameters of deformation and evolutions of the compression front of porous materials**Chernomas V.V.**, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mail@imim.ru**Bogdanova N.A.**, Post-graduate Student,**Sevastyanov G.M.**, Ph.D. (Physics and Mathematics)**Sosnin A.A.**, Ph.D. (Engineering)

Institute of Machinery and Metallurgy, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Branch), 1 Metallurgov st., Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russian Federation

Abstract

The influence of geometric size of the holes of the perforated plate on the parameters of the process of its compression in an enclosed stamp is researched. The curves, characterizing the deforming force and the evolution of the compression front at different degrees of deformation are shown. Force increases as the compaction of material and essentially depends on the speed of the tool motion speed and parameters of contact between workpiece and instrument. The relative thickness of fully densified layer material increases with increasing of the strain rate. It was revealed that the geometric size of the pores with the same degree of porosity has no significant effect on the characteristics of the compression front propagation and force parameters of the deformation process.

Keywords:

compression, deformation, compression front, perforated plate.

References

1. Shiomi M., Imagama S., Osakada K., Matsumoto R. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, Vol. 210, Issue 9, pp. 1203-1208.
2. Banhart J. Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 2001, Vol. 46, Issue 6, pp. 559-632.
3. Neugebauer R., Hipke T. Machine tools with metal foams. *Advanced Engineering Materials*, 2006, Vol. 8, Issue 9, pp. 858-863, doi: 10.1002/adem.200600095.
4. Stoebener, K., Rausch, G. Aluminium foam-polymer composites: processing and characteristics. *Journal of Material Science*, 2009, Vol. 44, Issue 6 pp. 1506-1511. doi: 10.1007/s10853-008-2786-8.
5. Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S., Kitahara A. ALPORAS Aluminium Foam: Production Process, Properties and Application. *Advanced Engineering Materials*, 2000, Vol. 2, Issue 4, pp. 179-183, doi: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<179::AID-ADEM179>3.0.CO;2-G.
6. Starovoitenko E.I. Penoaluminievye granuly – perspektivy proizvodstva i promyshlennogo primeneniia novogo poristogo materiala [Aluminum foam pellets – prospects of production and industrial application of new porous material.]. *Tekhnologiya legkikh splavov – Technology of light alloys*, 2006, no. 1-2, pp. 218-221.
7. Arbuzova L.A., Bondarev B.I., Rozhkov A.A., Shmakov Yu.V., Lashkov N.I., Talalaev V.D. *Sposob polucheniia poristykh polufabrikatov iz poroshkov aluminievyykh splavov* [A method of producing porous semi-finished aluminum alloy powder]. Patent RF, no. 2138367, 1998.
8. Arbuzova L.A., Starovoitenko E.I., Pol'kin I.S., Andreev D.A., Talalaev V.D., Ginzul A.V. *Sposob polucheniia poristykh izdelii iz poroshkov aluminievyykh splavov* [A method for producing porous articles from powders of aluminum alloys]. Patent RF, no. 2139774, 1998.
9. Christensen R.M. *Mechanics of Composite Materials*. Wiley-Interscience, New York, 1979, 348 p. (Russ. ed.: Trans. eng. Beil A.I., Zhmud' N.P. Edited by Tarnopol'skii Yu.M. *Vvedenie v mekhaniku kompozitov*. Moscow, Mir Publ, 1982. 336 p.).
10. Pobedria B.E. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. Moscow, MSU, 1984. 336 p.

11. Tarnopol'skii Yu.M. *Prikladnaia mekhanika kompozitov* [Applied Mechanics of Composites]. Moscow, Mir Publ., 1989. 358 p.
12. Rabotnov Yu.N. *Vvedenie v mekhaniku razrusheniia* [Introduction to fracture mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 80 p.
13. Krasnoshchekov P.I., Fedotov A.F. Uprugie moduli izotropnykh poroshkovykh i poristyykh materialov [The elastic moduli of isotropic porous materials and powder]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki – Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2006, Vol. 43, pp. 81–87.
14. Aleksandrov S.E., Druyanov B.A. Pressovanie uplotniaemogo plasticheskogo materiala v zakrytoi matritse [Pressing of a compact plastic material]. *Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki i Tekhnicheskoi Fiziki – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1990, no. 1, pp. 117–123.
15. Shestakov N.A., Subich V.N., Maksimenko A.E., Lysyk M.V. Issledovanie uplotneniia pri deformatsii poristyykh materialov [Consolidation research at deformation of porous materials]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Tula State University. Technical Sciences*, 2011, Vol. 3, no.1, pp. 440–448.
16. Vlasov A.V., Soubich V.N., Shestakov N.A. Modelirovanie mekhanicheskikh svoystv poristyykh i kompozitnykh materialov [Modelling of mechanical properties of porous and composite materials]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii - Blanking productions in mechanical engineering*, 2010, no. 3, pp. 31–35.
17. Chernomas V.V., Lovizin N.S., Bogdanova N.A. *Ustroistvo dlia issledovaniia ploskoi deformatsii modeli poristogo veshchestva* [An apparatus for the study of plane strain model of porous material]. Patent RF, no. 2012149651/28(079590), 2012.
18. Bogdanova N.A., Chernomas V.V., Sosnin A.A. Modelirovanie protsessa deformatsii pri osadke neodnorodnogo materiala v zakrytom shtampe [Simulation of heterogeneous material deformation process during shortening in the closed die]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3, pp. 9–18.

Funding

This work was supported by grants FEBRAS No. 12-I-06-OEMMPU "Experimental modeling of processes occurring during the deformation heterogeneous mediums under complex loading" and No. 12-I-A25-02 "Experimental and theoretical study of the processes occurring in the "Tools – Deformable metal" in a different contact interactions in the manufacture of metal in a continuous casting and deformation of the metal."

Received 17 March 2014

Revised 24 April 2014

Accepted 5 May 2014

РАЗРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ

Е.Ю. ТАТАРКИН, доктор техн. наук, профессор
Ю.А. КРЯЖЕВ, канд. техн. наук, доцент
Е.С. ОГНЕВЕНКО, канд. техн. наук
А.Ю. КРЯЖЕВ, аспирант
(АлтГТУ, г. Барнаул)

Поступила 11 апреля 2014
Рецензирование 15 мая 2014
Принята к печати 17 мая 2014

Огневенко Е.С. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: ognevenko_e@mail.ru

Получены зависимости шероховатости от параметров акустической эмиссии при иглофрезеровании, позволяющие контролировать качество поверхностного слоя, производить замену инструмента и корректировку режимов резания в реальном времени. Получены зависимости твердости обрабатываемой поверхности от диаметра и длины режущих элементов (проволоки) иглофрезерного инструмента, позволяющие контролировать степень наклепа в реальном времени. Разработана принципиальная схема измерительного комплекса для диагностирования шероховатости и твердости поверхностного слоя при металлообработке в режиме реального времени. Применение комплекса позволяет повысить качество обрабатываемой поверхности, изменить процесс иглофрезерования на чистовых операциях механической обработки.

Ключевые слова: иглофрезерование, акустическая эмиссия, шероховатость, режимы резания.

Введение

Процессы механической обработки резанием по точности, качеству обработанных деталей, а также производительности и экономичности являются более конкурентоспособными по сравнению с другими методами формообразования. Известно, что выходные параметры обработки резанием (точность, качество обработанной поверхности и т. д.) в течение всего процесса резания недоступны для прямого измерения. Поэтому алгоритмы управления технологическими системами в настоящее время, как правило, строят на базе экспериментальных зависимостей выходных параметров от режимов обработки [1–4].

Обеспечение требуемого качества изделий неразрывно связано с решением задач формирования заданных параметров микропрофиля

и наклепа обработанной поверхности. Сложность решения данных задач обуславливается многообразием динамически изменяющихся физических факторов, сопровождающих технологический процесс механической обработки материалов резанием и оказывающих влияние на показатели качества поверхностного слоя деталей. В процессе резания пластическая деформация происходит не только в срезаемом слое, но и в поверхностном слое основной массы металла [5, 6].

Глубина распространения деформации от поверхности резания и от обработанной поверхности зависит от ряда факторов и может достигать сотых долей миллиметра, а в отдельных случаях даже миллиметров. Пластическое деформирование вызывает упрочнение металла, его наклеп. Твердость наклепанного слоя в ряде случаев

может значительно превышать твердость недеформированного металла. Чем мягче обрабатываемый металл, тем большему наклепу он подвергается. Наклеп обработанной поверхности детали повышает ее износостойкость. Но с другой стороны, значительное увеличение твердости поверхности может вызвать затруднения при дальнейшей ее обработке. Таким образом, прогнозирование и управление наклёпом обработанной поверхности имеет большое значение для разработки технологического процесса механической обработки деталей машин.

Иглофрезерование является одним из наиболее перспективных видов отделочно-зачистной обработки. Основное преимущество данного метода – низкая себестоимость обработки благодаря незначительным затратам на изготовление и эксплуатацию режущего инструмента [7]. Однако до сих пор не рассматривался вопрос о применении иглофрезерования на этапах чистовой обработки для получения поверхностей высокого качества. При этом основные проблемы заключаются в отсутствии рекомендаций по выбору режимов резания и конструктивно-геометрическим параметрам (длины проволоки, диаметра проволоки) иглофрезерного инструмента [4, 8], а также значительная степень наклепа (до 40 %) обрабатываемой поверхности [9]. Поэтому актуальными задачами являются:

- исследование процесса иглофрезерования с целью определения оптимальных режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента по критерию качества обрабатываемой поверхности;

- разработка измерительного комплекса, позволяющего контролировать параметры качества и степень наклепа обрабатываемой поверхности в режиме реального времени.

Одним из наиболее универсальных и высокоинформативных методов исследования процессов механической обработки, отражающим условия формирования микрорельефа поверхности и распространения деформации от поверхности резания, является метод акустической эмиссии (АЭ). Основным источником АЭ при механической обработке материалов – зона резания, в которой происходит пластическая деформация и разрушение обрабатываемого материала, трение на контактных поверхностях режущего инструмента. Анализ АЭ на операциях механической

обработки обеспечивает возможность непосредственной диагностики вибраций, процессов разрушения, трения и пластического деформирования в зоне структуро- и формообразования, ответственных за технологические и эксплуатационные характеристики детали и инструмента, например, рациональную скорость обработки и качество поверхностного слоя обработанной поверхности [10–15]. Поэтому для решения задачи по определению оптимальных режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента был выбран метод АЭ.

Для проведения исследования твердости наклепанного слоя поверхности использовался прибор ПМТ-3, определяющий микротвёрдость материала по отпечатку, оставленному на выбранном участке после вдавливания в него индентора. Однако контактные методы контроля твердости наклепанного слоя не могут быть использованы для определения микротвердости поверхностного слоя при металлообработке в режиме реального времени, поэтому для целей контроля степени наклепа в реальном времени был выбран метод вихревых токов (МВТ). МВТ базируется на возбуждении в контролируемом объекте или среде под воздействием переменного магнитного поля вихревых токов и одновременной регистрации вторичного поля – поля наведенных вихревых токов [16]. Величина вторичного поля зависит от параметров контролируемого объекта, и если должным образом выстроить математическую модель отклика первичного преобразователя на поле вихревых токов, оказывается возможным определять раздельно более десятка параметров объекта, в том числе твердость поверхностного слоя. Твердость наклепанного слоя обработанной поверхности в реальном времени может быть определена с помощью измерителя переменного магнитного поля металлов, сплавов и композиционных материалов, действие которого основано на МВТ.

Методика экспериментального исследования

В рамках задачи по определению оптимальных режимов резания и конструктивно-геометрических параметров инструмента проведены экспериментальные исследования [17]. По результатам экспериментов получена зависимость

параметра шероховатости поверхности Ra от длины вылета режущих элементов l , диаметра режущих элементов d и подачи S :

$$Ra = 4,867l^{-0,102}d^{-0,09}S^{0,1138}, \text{ мкм}, \quad (1)$$

где l – длина режущих элементов (проволоки), мм; d – диаметр режущих элементов (проволоки), мм; S – подача, мм/об.

В данной работе для установления зависимостей между параметром шероховатости Ra и параметрами АЭ проводилась обработка иглофрезерованием поверхностного слоя образцов, изготовленных из стали 45. Поверхности одной половины от общего числа заготовок предварительно подвергались черновой обработке, второй – чистовой обработке. В первом случае среднеарифметическое отклонение профиля варьировалось в диапазоне $Ra = 7 \dots 8$ мкм, во втором $Ra = 20 \dots 22$ мкм. Таким образом, проводилось два факторных эксперимента с использованием образцов с разными начальными показателями шероховатости Ra обрабатываемой поверхности.

Эксперимент проводился на вертикально-фрезерном станке марки 6Р13. Одновременно с процессом резания проводилась запись сигнала АЭ. Запись осуществлялась с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) L-card L-780М с частотой дискретизации до 400 кГц. В качестве преобразователя АЭ использовался пьезоэлектрический датчик на основе цирконат-титаната свинца (ЦТС). По окончании эксперимента проводилось измерение шероховатости обработанной поверхности каждого из образцов на профилографе-профилометре «HOMMEL TESTER W55».

Для проведения исследования твердости наклепанного слоя поверхности использовался прибор ПМТ-3, определяющий микротвердость материала по отпечатку, оставленному на выбранном участке после вдавливания в него индентора. Исходная твердость поверхностного слоя заготовки из стали 45 до обработки иглофрезерованием, измеренная с помощью измерителя переменного магнитного поля, имела значение $HRC = 20 \dots 21$.

Для проведения исследований степени наклепа в реальном времени может быть использован измеритель, разработанный на кафедре экспериментальной физики Алтайского государ-

ственного университета [16]. Аппаратная часть измерителя состоит из датчика вихревых трансформаторов (ВТНТ) и звукового устройства ЭВМ, в котором поступающий сигнал от датчика ВТНТ представляется при помощи компьютерных программ в абсолютные значения твердости поверхностного слоя металла. Датчик ВТНТ обеспечивает высокую поверхностную локальность сканирования обработанной поверхности за счёт своего сверхминиатюрного размера.

Результаты и обсуждение

Анализ сигнала АЭ позволил установить зависимости параметра шероховатости Ra от средней амплитуды A и интенсивности N сигнала АЭ:

- при начальной шероховатости обрабатываемой поверхности $7 \dots 8$ мкм имеем:

$$Ra = 0,000000149 \cdot N^3 - 0,000141891 \cdot N^2 + 0,033913944 \cdot N + 3,731108351, \text{ мкм}, \quad (2)$$

$$Ra = -0,001204284 \cdot A^3 + 0,099245825 \cdot A^2 - 2,582925032 \cdot A + 26,407514981, \text{ мкм}; \quad (3)$$

- при начальной шероховатости обрабатываемой поверхности $20 \dots 22$ мкм имеем:

$$Ra = -0,000001546 \cdot N^3 + 0,000803509 \cdot N^2 - 0,111479267 \cdot N + 18,705909129, \text{ мкм}, \quad (4)$$

$$Ra = -0,000685292 \cdot A^4 + 0,071510017 \cdot A^3 - 2,693063122 \cdot A^2 + 43,062665194 \cdot A - 230,412251554, \text{ мкм}, \quad (5)$$

где A – средняя амплитуда сигнала АЭ (дБ); N – интенсивность сигнала АЭ (с^{-1}).

Полученные зависимости показывают, что при минимальной шероховатости средняя амплитуда A сигнала АЭ имеет минимальное значение.

Проведение измерений твердости наклепанного слоя поверхности, обработанной торцевой иглофрезой, позволило установить зависимости твердости HRC от различных конструктивных параметров иглофрезы и технологических параметров процесса иглофрезерования. На рис. 2 представлены зависимости твердости HRC от диаметра ворса (проволоки) и его длины.

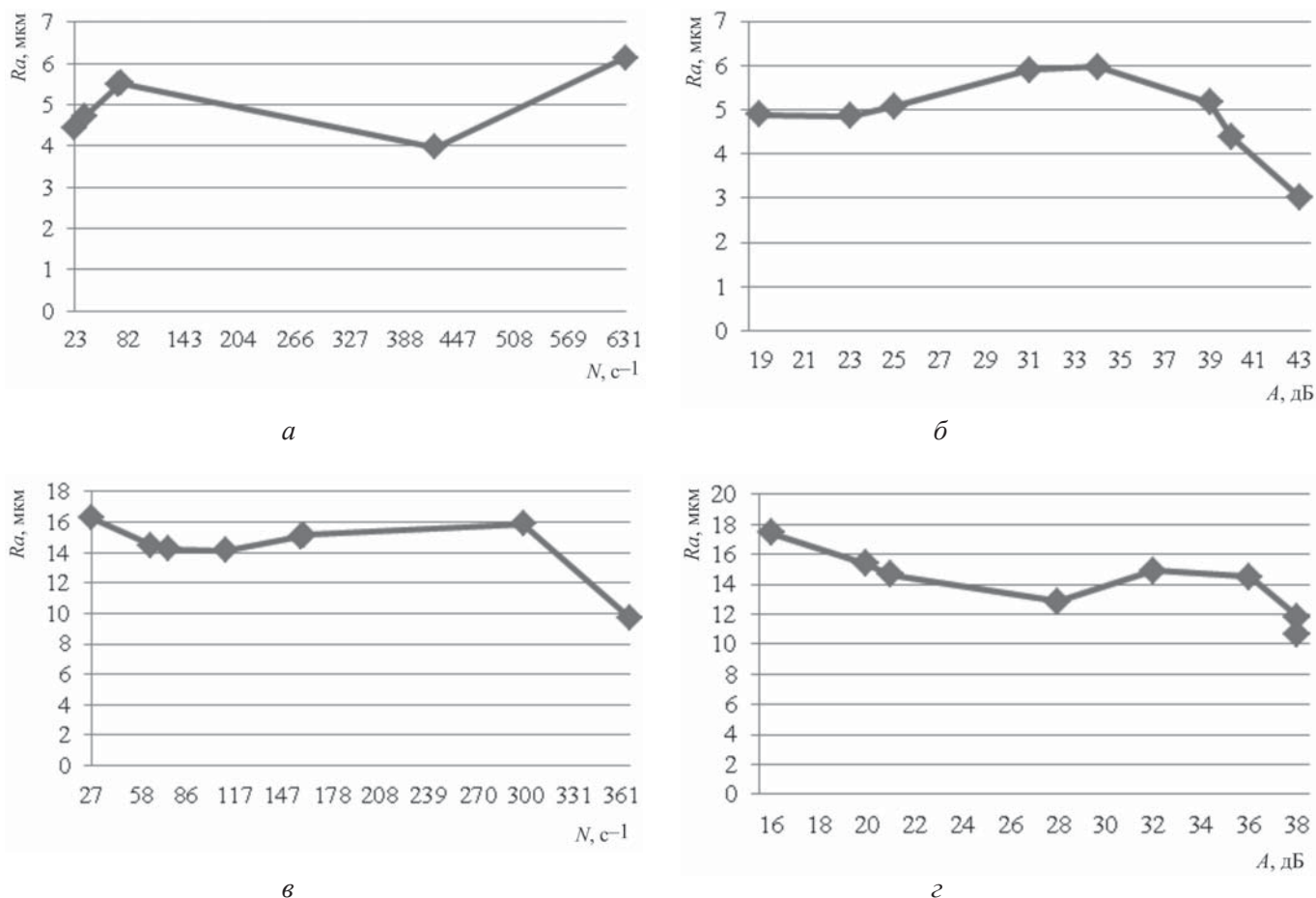


Рис. 1. Зависимости параметра шероховатости Ra от средней амплитуды A и интенсивности N сигнала АЭ: a – зависимость (2); $б$ – зависимость 3; $в$ – зависимость (4); $г$ – зависимость (5)

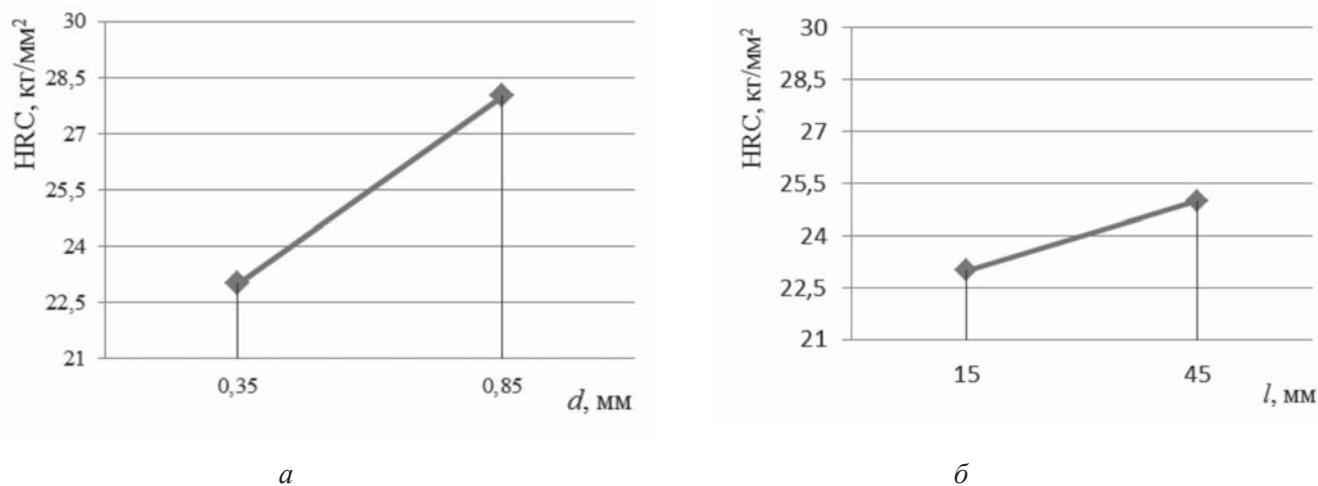


Рис. 2. Зависимости твердости HRC обработанной поверхности:

a – от диаметра d режущих элементов (проволоки) ($l = 45$ мм, $V = 175,83$ м/мин, $S_m = 100$ мм/мин); $б$ – длины l режущих элементов (проволоки) ($d = 0,85$ мм, $V = 175,83$ м/мин, $S_m = 100$ мм/мин)

Полученные зависимости позволяют сделать вывод о том, что диаметр режущих элементов (проволоки) оказывает большее влияние на твердость наклепанного слоя обработанной иглофрезерованием поверхности, чем их длина. Для достижения минимальной степени наклепа об-

работанной поверхности необходимо выбирать режущие элементы (проволоку) с минимально возможными длиной и диаметром.

Таким образом, использование прибора, работающего на основе метода MBT, позволяет определить твердость поверхностного слоя

(наклепа) обрабатываемой поверхности, оптимальные конструктивные параметры режущего инструмента и управлять технологическими параметрами процесса резания для достижения требуемых параметров качества обрабатываемой поверхности.

Результаты проведенных экспериментов были использованы для разработки измерительного комплекса диагностирования шероховатости и твердости обработанной поверхности в процессе металлообработки. Для реализации поставленных задач была разработана принципиальная схема (рис. 3) измерительного комплекса диагностирования шероховатости Ra обрабатываемой поверхности от средней амплитуды A и интенсивности N сигнала АЭ в режиме

реального времени. Полученные зависимости (1)–(5) могут быть использованы в алгоритме и реализованы в модульной программе, которая устанавливается на микроконтроллере. Центральным элементом измерительного комплекса служит микроконтроллер, функцией которого является цифровая обработка информации, поступающей с пьезодатчика и блока управления, осуществляющего, в свою очередь, управление элементами индикации и передающего сигнал на замену режущего инструмента или корректировку режимов резания в системе ЧПУ станка. Микроконтроллер по программе обрабатывает сигнал АЭ и в случае отклонения параметра шероховатости Ra от заданного чертежом детали выдает сигнал на индикатор.

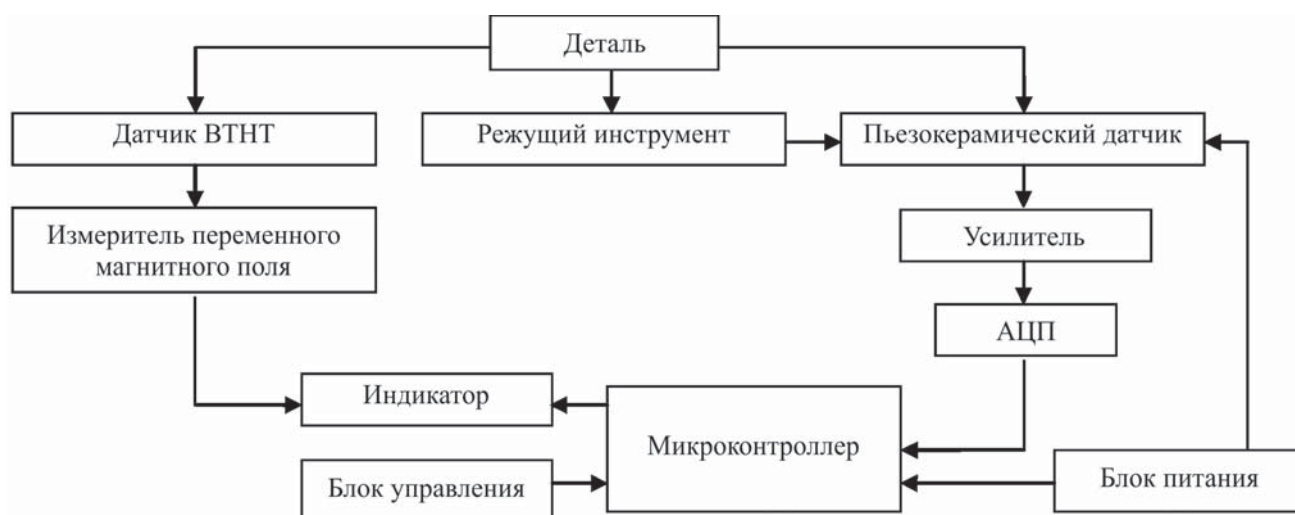


Рис. 3. Принципиальная схема измерительного комплекса

Выводы

1. Получены зависимости параметра шероховатости Ra от параметров АЭ при иглофрезеровании, позволяющие контролировать качество поверхностного слоя, производить замену инструмента и корректировку режимов резания в реальном времени.

2. Получены зависимости твердости HRC обрабатываемой поверхности от диаметра и длины режущих элементов (проволоки) иглофрезерного инструмента, позволяющие контролировать степень наклепа в реальном времени.

3. Разработана принципиальная схема измерительного комплекса для диагностирования шероховатости и твердости поверхностного слоя при металлообработке в режиме реального времени. Применение комплекса позволяет по-

высить качество обрабатываемой поверхности, применять процесс иглофрезерования на чистовых операциях механической обработки.

Список литературы

1. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Marck's Standard Handbook for Mechanical Engineers : Tenth edition / Eugene A. Avallone, Theodor Baumeister III. – New York : McGraw-Hill, 1996. – 1770 p.
3. Даниленко Б. Д. Некоторые вопросы нормирования режимов резания // Инженерное образование. – №6. – 2004. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://technomag.stack.net/doc/44306.html>.
4. Обработка металлов резанием: справочник технолога / под общ. ред. А. А. Панова. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2004. – 784 с.

5. Вульф А. М. Резание металлов. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
6. Филоненко С. Н. Резание металлов. – Киев: Техника, 1975 – 232 с.
7. Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М. Нетрадиционные методы обработки материалов. – М.: МГОУ, 2007. – 211 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя: В 2 т. Т. 2 / под общ. ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
9. Перепичка Е.В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками. – М.: Машиностроение, 1989. – 136 с.
10. Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С. Исследование колебательных процессов, возникающих при работе спирального сверла, с применением анализа акустического сигнала // Технология машиностроения. – 2008. – №1. – С. 28–29.
11. *Acoustic Emission and Ultrasonics Handbook [Text]* / Trevor Holroyd, Charles W. Reeves. – Coxmoor Publishing Co., 2000. – 160 p.
12. *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Applications and Civil Engineering* / Jurgen Eisenblatter, Christian U. Groose, Stefan Koppel. – Berlin : Springer, 2008. – 403 p.
13. Барзов А.А. Эмиссионная технологическая диагностика. Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2005. – 384 с.
14. Рассказов Н. Н., Диваев А. В. Исследования повреждения режущего инструмента методом акустической эмиссии // Известия вузов. Машиностроение. – 1987. – № 11. – С. 150–153.
15. Подураев В. Н., Барзов А. А., Горелов В. А. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 56 с.
16. Дмитриев С.Ф., Панов С.Г., Ишков А.В. Виртуализированные приборы, использующие метод вихревых токов для контроля параметров различных объектов и окружающей среды // Ползуновский альманах. – 2008. – № 2. – С. 15–19.
17. Татаркин Е.Ю., Кряжев Ю.А., Огневенко Е.С. Прогнозирование шероховатости при иглофрезеровании методом акустической эмиссии // Вестник Алтайской науки. – 2013. – № 2–1 – С. 30–33.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 39–45

Development for measuring complex for diagnosis the quality of the treated surface in the metal cutting

Tatarkin E.Y., D.Sc. (Engineering), Professor

Kryazhev Y.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Ognevenko E.S., Ph.D. (Engineering), e-mail: ognevenko_e@mail.ru

Kryazhev A.Y., Post-graduate Student

I.I. Polzunov Altai State Technical University, 46 Lenina avenue, Barnaul, Altai region, 656038, Russian Federation

Abstract

The dependences of the roughness versus the parameters of acoustic emission during needle milling, that allow to monitor the quality of the surface layer, replacement and adjustment of tool cutting in real time are received. Obtained dependences show that the average roughness at the minimum amplitude of the acoustic signal is minimized. The dependences of the treated surface hardness versus the diameter and length of the cutting elements (wire) of the needle milling tool, that allow to monitor the degree of cold work, are received. Obtained dependences allow us to conclude that the diameter of the cutting elements (wire) has a greater impact on the hardness of the hardened layer than its length. To achieve a minimum degree of cold work of the treated surface it is necessary to choose the cutting elements (wire) with a minimal length and diameter. A principal scheme of measuring complex for diagnosing the roughness and surface hardness during metalworking in real time is developed. Using developed complex allows to improve the surface quality, apply process needle milling in finishing operations.

Keywords:

Needle milling, acoustic emission, roughness, cutting conditions.

References

1. Bazrov B.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniia: Uchebnik dlia vuzov* [Fundamentals of engineering technology: Textbook for Universities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 736 p.
2. Avallone E.A., Baumeister T. *Marck's Standard Handbook for Mechanical Engineers*. Tenth edition. New York, McGraw-Hill, 1996. 1770 p.
3. Danilenko B.D. Nekotorye voprosy normirovaniia rezhimov rezaniia [Some questions normalization cutting]. *Inzhenernoe obrazovanie – Engineering Education*, 2004, no. 6. (In Russ.) Available at: <http://technomag.stack.net/doc/44306.html> (accessed 10.04.2014)
4. Panov A.A., Anikin V.V., Boim N.G. et al. *Obrabotka metallov rezaniem: Spravochnik tekhnologa* [Metalcutting. The Handbook of Technologist]. 2th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 784 p.
5. Vul'f A.M. *Rezanie metallov* [Metalcutting]. 2nd ed. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1973. 496 p.
6. Filonenko S.N. *Rezanie metallov* [Metalcutting]. Kiev, Tekhnika Publ., 1975. 232 p.
7. Kovshov A.N., Nazarov Yu.F., Iaroslavtsev V.M. *Netraditsionnye metody obrabotki materialov* [Nontraditional methods of materials processing]. Moscow, MSRU, 2007. 211 p.
8. Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K. et al. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia: V 2-kh t. T. 2.* [The Handbook of Technologist-Machine Engineer. In 2 Volumes, Vol. 2]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 496 p.
9. Perepichka E.V. *Ochistno-uprochniaiushchaia obrabotka izdelii shchetkami* [Cleaning-and-strengthening treatment products brushes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 136 p.
10. Kryazhev Yu. A., Ognevenko Ye.S. Issledovanie kolebatel'nykh protsessov, vznikaiushchikh pri rabote spiral'nogo sverla, s primeneniem analiza akusticheskogo signala [Study of the twist-drill vibrating process applying audible signal analysis]. *Tekhnologiya Mashinostroeniya – Mechanical Engineering*, 2008, no.1, pp. 28–29.
11. Holroyd T., Reeves Ch.W. *Acoustic Emission and Ultrasonics Handbook*. Coxmoor Publishing Co., 2000. 160 p.
12. Eisenblatter J., Groose Ch.U., Koppel S. *Acoustic Emission Testing: Basics for Research – Applications and Civil Engineering*. Berlin, Springer, 2008. 403 p.
13. Barzov A.A. *Emissionnaia tekhnologicheskaiia diagnostika. Biblioteka tekhnologa* [Emission process diagnostics. Library technologist]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2005. 384 p.
14. Rasskazov N.N., Divaev A.V. Issledovaniia povrezhdeniia rezhushchego instrumenta metodom akusticheskoi emissii [Studies damage the cutting tool acoustic emission method]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie – Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1987, no. 11, pp. 150–153.
15. Poduraev V. N., Barzov A. A., Gorelov V. A. *Tekhnologicheskaiia diagnostika rezaniia metodom akusticheskoi emissii* [Process diagnostics cutting acoustic emission method]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 56 p.
16. Dmitriev S.F., Panov S.G., Ishkov A.V. Virtualizirovannye pribory, ispol'zuiushchie metod vikhrevykh tokov, dlia kontrolya parametrov razlichnykh ob'ektov i okruzhaiushchei sredy [Virtualized devices using the eddy current method, to control the parameters of different objects and the environment]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2008, no. 2, pp. 15–19.
17. Tatarkin E.Yu., Kriazhev Yu.A., Ognevenko E.S., Kriazhev A.Yu. Prognozirovaniie sherokhovatosti pri iglofrezerovanii metodom akusticheskoi emissii [Prediction of surface roughness in wire brushing by acoustic emission method]. *Vestnik Altaiskoy nauki – Bulletin of the Altai Science*, 2013, no. 2–1, pp. 30–33.

Received 11 April 2014

Revised 15 May 2014

Accepted 17 May 2014

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТОНКОСТРУЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ*

*А.Х. РАХИМЯНОВ, инженер
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 26 марта 2014
Рецензирование 7 мая 2014
Принята к печати 12 мая 2014

Рахимьянов А.Х. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: centerfht@mail.ru

Рассмотрены вопросы выбора технологических схем тонкоструйной плазменной резки листовых конструкционных сталей в диапазоне толщин от 0,5 до 30 мм. Представлены результаты экспериментальных исследований по оптимизации режимов плазменного раскроя углеродистой стали Ст3 толщиной 3 мм с оценкой точности реза, качества его поверхности, графообразования на нижней кромке. Точность раскроя листовых материалов оценивалась по углу наклона кромок реза на поперечных шлифах, а качество обработанных поверхностей – по параметру шероховатости. Установлено, что при выбранной технологической схеме тонкоструйной плазменной резки в зависимости от класса листового материала, его толщины достижение требуемой точности и качества реза обеспечивается за счет скорости обработки. Так, при повышении скорости обработки конструкционной стали Ст3 с 2,0 до 2,4 м/мин происходит увеличение отклонения кромок реза от перпендикулярности с 3,8 до 5,8° и повышение шероховатости поверхности реза от $Ra = 1,75$ мкм до $Ra = 3,2$ мкм. Снижение точности реза с повышением скорости обработки объясняется ростом градиента температур по сечению реза, приводящим к неравномерному температурному полю по толщине реза. Ухудшение шероховатости поверхности реза на максимальных скоростях объясняется ограничениями в развитии газо- и гидродинамических потоков, участвующих в удалении продуктов расплава из зоны реза, что приводит к частичному их осаждению на обработанных поверхностях. Тонкоструйная плазменная обработка конструкционной стали Ст3 не приводит к значительному графообразованию на кромках реза во всем исследованном диапазоне скоростей.

Ключевые слова: тонкоструйная плазменная резка, точность и качество реза, технологические схемы, плазмообразующие и завихряющие газы, конструкционные стали.

Введение

Технологический процесс изготовления деталей машин в общем случае предполагает традиционную структуру: заготовительная операция; комплекс механических операций, включая обдирочные, черновые, чистовые и отделочные этапы обработки; различного рода термические операции (нормализация, отжиг, закалка, от-

пуск); нанесение покрытий, мойка и контроль. Перспективным путем снижения технологической себестоимости может быть использование методов обработки, позволяющих сократить или исключить определенные этапы технологического процесса. Так, на этапе заготовительного производства использование традиционных технологий раскроя листовых материалов, таких как газопламенная [1], плазменная резка [2], со-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию № 2014/138, проект № 257.

проводится низким качеством реза, что требует назначения излишних припусков и введения дополнительных обдирочных операций по их удалению.

Применение современных технологий, таких как лазерная [3–5], струйная гидравлическая, тонкоструйная плазменная обработка, позволило повысить точность и качество реза [6, 7].

Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов в зоне обработки металлических материалов при тонкоструйной плазменной резке [8] говорят об эффективности использования данного теплового источника как инструмента для разделительной резки листовых материалов в широком диапазоне толщин с высокой производительностью процесса.

В работах [9,10] авторами дан анализ современного состояния заготовительной стадии машиностроительного производства при раскрое листовых материалов. Экспериментально доказана возможность исключения стадий предварительной механической обработки в технологическом процессе изготовления деталей машин.

Для эффективного внедрения того или иного метода разделительной резки на заготовительной стадии процесса необходимо создание технологических рекомендаций для обработки определенного класса материалов.

Настоящая статья посвящена выбору технологических схем и оптимизации режимных параметров тонкоструйной плазменной резки конструкционных сталей по критериям точности и качества реза.

Методики экспериментальных исследований

Для проведения исследований в качестве материала была выбрана конструкционная углеродистая сталь обыкновенного качества марки сталь Ст3 в виде листового проката [11].

Раскрой листовых материалов осуществляется на технологическом комплексе тонкоструйной плазменной резки, состоящем из следующих основных блоков: система ЧПУ BURNY PHANTOM ST 1, координатный стол с порталом 2, плазматрон PerCut 160 3, источник тока Ni – Focus 130i с газовой консолью 4, газобаллонное оборудование 5 (рис. 1).

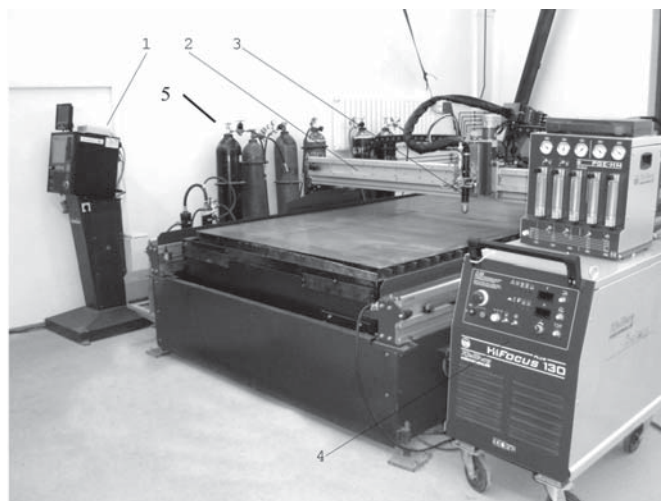


Рис. 1. Технологический комплекс тонкоструйной плазменной резки

Система ЧПУ обеспечивает перемещение плазматрона по заданной траектории, а раскрой осуществляется по программе обработки единичной детали или по программе раскладки деталей в пределах листа с учетом информации о настройках процесса для обеспечения требуемой точности формообразования [6,12].

Источник технологического тока Ni – Focus 130i обеспечивает требуемые энергетические параметры процесса, а встроенная газовая консоль – расходы плазмообразующего и завихряющего газов.

Тонкоструйная плазменная резка является сложным электрофизическим процессом, точность и качество реза при котором зависят от многих факторов, включая энергетические параметры (напряжение и ток дуги), состав, давление и расход плазмообразующих (режущих) и завихряющих газов, факельный зазор, скорость реза, теплофизические свойства и химический состав обрабатываемого материала.

Составы плазмообразующего и завихряющего газов определяются классом обрабатываемого материала. Если при раскрое конструкционных углеродистых сталей в качестве плазмообразующего газа используется кислород, то его применение для легированных сталей нежелательно, так как активное окисление металла в зоне реза приводит к образованию тугоплавких оксидов с образованием окалина на поверхности реза. Поэтому для раскроя металлов данного класса в качестве плазмообразующего газа используется чистый азот либо азото-водородная смесь в составе 95 % N и 5 % H. Однако применение азота

приводит к образованию нитридов на поверхности реза, что впоследствии ухудшает свариваемость деталей.

Назначение рабочих давлений и расходов используемых газов в основном определяется толщиной реза, а соответственно и силой тока плазменной дуги. Напряжение последней зависит от величины факельного зазора (расстояния от плазмотрона до обрабатываемой поверхности). Увеличение напряжения от оптимального ухудшает точность реза (в первую очередь отклонение кромок от перпендикулярности) и увеличивает графообразование. Снижение напряжения вследствие уменьшения факельного зазора приводит к преждевременному сгоранию сопла [13], что сопровождается снижением точности формообразования при обработке [14,15].

Таким образом, для оптимизации процесса тонкоструйной плазменной резки по оценкам точности и качества обработки, графообразования, зоны термического влияния в качестве управляющих факторов процесса следует считать ток плазменной дуги и скорость реза.

Оценка точности реза проводилась на поперечных шлифах образцов после раскроя и заключалась в определении углов наклона кромок реза в соответствии с рекомендуемой методикой по ISO 9013: 2002 (рис. 2). Угловое отклонение кромок реза от перпендикулярности (α_1, α_2) оценивалось на базовой длине, значение которой определялось как $(S - 2\Delta a)$, где S – толщина реза; Δa – зависит от толщины реза и определяется по таблице.

Качественная оценка состояния поверхности реза и количества грата на нижней кромке осуществлялась на микроскопе МБС-10. Для количественной оценки шероховатости исполь-

зовался профилограф-профилометр модели 252. Изучение морфологии поверхности реза проводилось с помощью комплекса изучения топографии поверхности ZIGO New View 7300.

Зависимость величины Δa от толщины реза

Толщина реза, мм	Δa , мм
$S \leq 3$	0,1
$3 < S \leq 6$	0,3
$6 < S \leq 10$	0,6
$10 < S \leq 20$	1,0
$20 < S \leq 40$	1,5

Результаты и обсуждения

Оптимизация процесса плазменного раскроя по критерию качества обработки предполагает установление значений режимных параметров – тока плазменной дуги и скорости реза. При этом необходимо иметь в виду, что для каждой толщины обрабатываемого материала определенного класса и марки существует критическое значение скорости реза для конкретной величины тока дуги, выше которой не достигается сквозной прорез материала. Исходя из этих соображений разработчиком оборудования тонкоструйной плазменной резки (фирма Kjellberg, Германия) был предложен ряд технологических схем (Hi-Focus, Hi-Focus^{plus}, Hi-FocusF) с определением области их распространения для разделительной резки материалов в различном диапазоне толщин. Класс обрабатываемого материала в пределах технологических схем определяет набор плазмообразующего и завихряющего газов и значения их параметров (расход и давление), что обуславливает необходимый характер развития газо- и гидродинамических процессов в зоне реза.

На рис. 3 показан реализуемый диапазон скоростей обработки в зависимости от толщины реза конструкционных сталей при значениях тока дуги, соответствующих технологической схеме Hi-Focus.

Данная технологическая схема ограничена диапазоном токовых значений от 20 до 50 А, что обеспечивает обработку листовых конструкционных сталей толщиной от 0,5 до 8 мм. Диапазон скоростей реза находится в пределах от 0,5 до 5 м/мин. При этом в качестве плазмообразующего газа используется кислород с параметрами давления 5 бар и расхода от 10 до 25 услов-

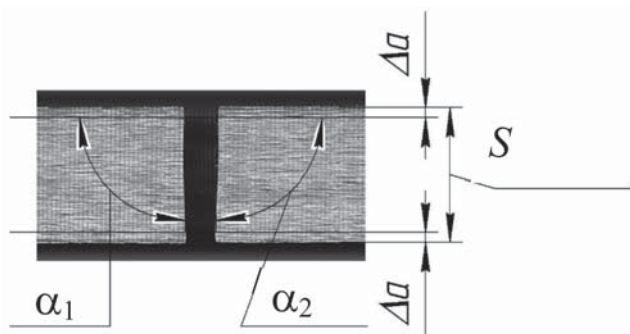


Рис. 2. Схема определения отклонения кромок реза от перпендикулярности в соответствии с методикой по ISO 9013: 2002

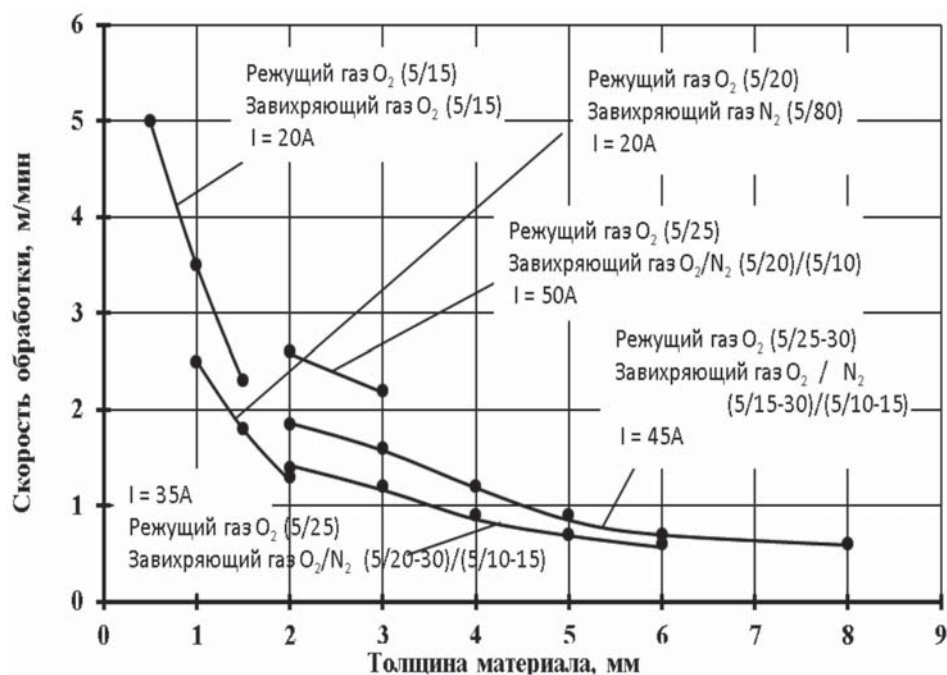


Рис. 3. Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Hi-Focus

ных делений по шкале прибора газовой консоли установки. Так, при минимально возможном значении тока $I = 20$ А диапазон толщин реза находится в пределах от 0,5 до 1,5 мм при соответствующих скоростях обработки. Реализация данной технологической схемы на больших толщинах возможна при повышении тока дуги до 35...50 А с соответствующим увеличением расхода плазмообразующего газа и снижением скорости обработки. При увеличении толщины реза необходима смена завихряющего газа с кислорода на азот и далее на кислородно-азотную смесь.

Следует отметить, что изменение тока дуги требует установки соответствующего сопла, что сопровождается изменением ширины реза (с 1,2 мм при $I = 20$ А, до 2,3 мм при $I = 45$ А).

При необходимости обработки конструкционных сталей в расширенном диапазоне толщин реза (от 4 до 30 мм) рекомендуется использовать технологическую схему Hi-Focus^{plus} (рис. 4).

Данная схема характеризуется расширенным диапазоном рабочих токов (от 50 до 130 А) и обеспечивает раскрой на скоростях реза от 0,5 до 2,7 м/мин. Как и в предыдущей схеме, в качестве плазмообразующего газа используется кислород, но при повышенном давлении (10 бар) и регулируемых расходах от 20 до 60 условных делений шкалы прибора. В качестве завихряющего газа используется азот ($I = 50$ А) и кислородно-

азотная смесь ($I = 100...130$ А). Как и следовало ожидать, переход к максимальным токам сопровождается увеличением ширины реза до 3,2 мм.

Третья технологическая схема (Hi-FocusF) в обработке конструкционных сталей также ориентирована на широкий диапазон толщин реза (6...25 мм), но в отличие от предыдущей схемы характеризуется постоянством мощности дуги при максимально возможном значении тока ($I = 130$ А) (рис. 5).

По существу, технологическая схема Hi-FocusF является аналогом схемы Hi-Focus^{plus} с единственным отличием – использование максимальных токов на относительно малых толщинах реза (6...10 мм).

Возможность обработки листовых материалов в широком диапазоне толщин на одних технологических режимах, с одной стороны, является привлекательной, поскольку не требует дополнительной переналадки плазмотрона, а с другой – эксплуатация оборудования на максимальных токах ведет к ускоренному износу расходных элементов и росту энергозатрат.

Оптимизация режимов обработки в рамках конкретной технологической схемы должна производиться по критериям точности и качества раскроя определенной марки материала, состояния поставки и толщины. В качестве конструкционной стали для оптимизации режимов тон-

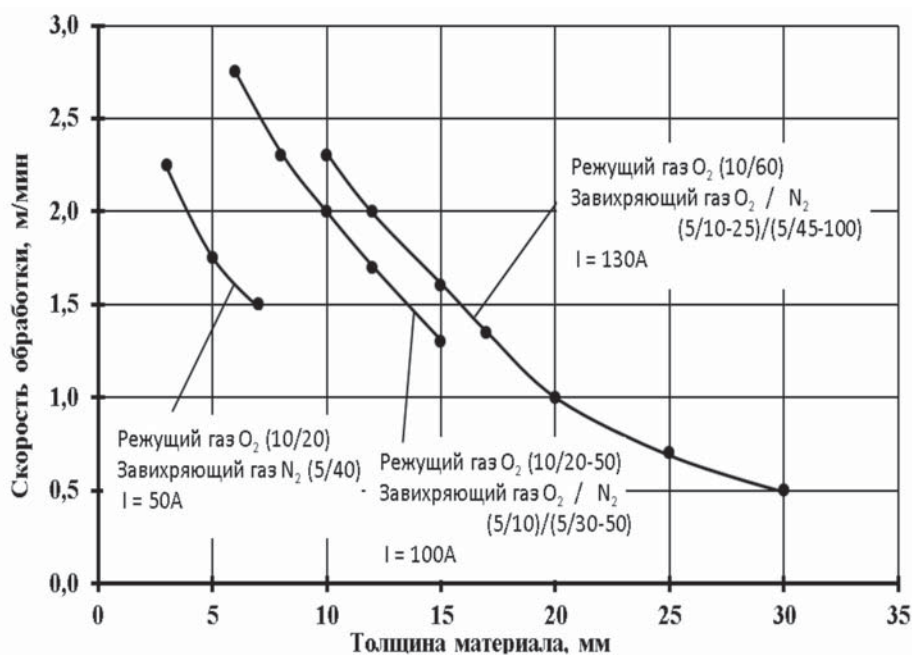


Рис. 4. Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Ni-Focus^{plus}

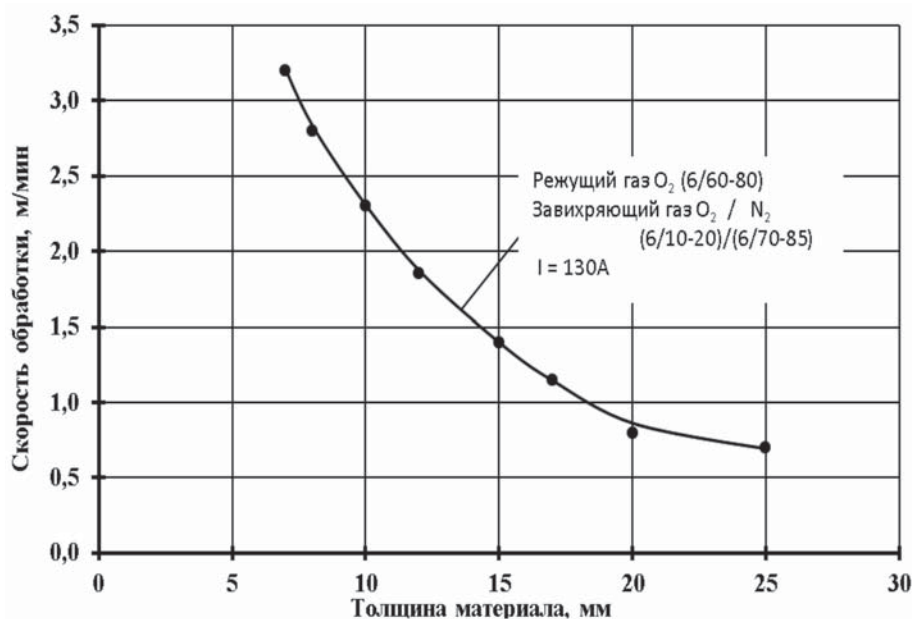


Рис. 5. Технологические параметры раскроя конструкционных сталей для технологической схемы Ni-FocusF

коструйной плазменной резки использовался листовой прокат стали Ст3 толщиной 3 мм. Из рассмотренных технологических схем представляется целесообразной схема Ni-Focus. Из возможных вариантов обработки с токами 35, 45, 50 А предпочтение было отдано последнему варианту, как обладающему наибольшей мощностью, а следовательно, допускающему обработку с максимальной производительностью.

Выбирая для обработки определенную технологическую схему с соответствующим значе-

нием токовой характеристики, с установленным набором плазмообразующего и завихряющего газов и их параметрами, в роли технологического режима для оптимизации точности и качества реза может быть использована только скорость обработки. По результатам предварительных экспериментов был установлен диапазон варьирования скоростью обработки – $V = 2,0 \dots 2,4$ м/мин [11].

В соответствии с методикой оценки геометрической точности реза получена зависимость

отклонения от перпендикулярности реза от скорости обработки (рис. 6).

Аналогичный характер зависимости от скорости обработки имеет характеристика качества поверхности реза стали Ст3, представленная на рис. 7.

Топография поверхности реза с количественной оценкой характеристик ее микрогеометрии показана на рис. 8.

Внешний вид поверхности реза стали Ст3 при различных скоростях обработки изображен на рис. 9.

Если на скорости $V = 2,0$ м/мин морфология поверхности реза относительно однородна, то с увеличением скорости до $V = 2,4$ м/мин на поверхности реза появляется рельеф, характерный для термических методов разделительной резки. Рельеф представляет собой совокупность следов от мгновенных положений потоков продуктов расплава из зоны реза. Увеличение скорости обработки вносит ограничения в развитие газо- и гидродинамических потоков, участвующих в удалении продуктов расплава с поверхности реза.

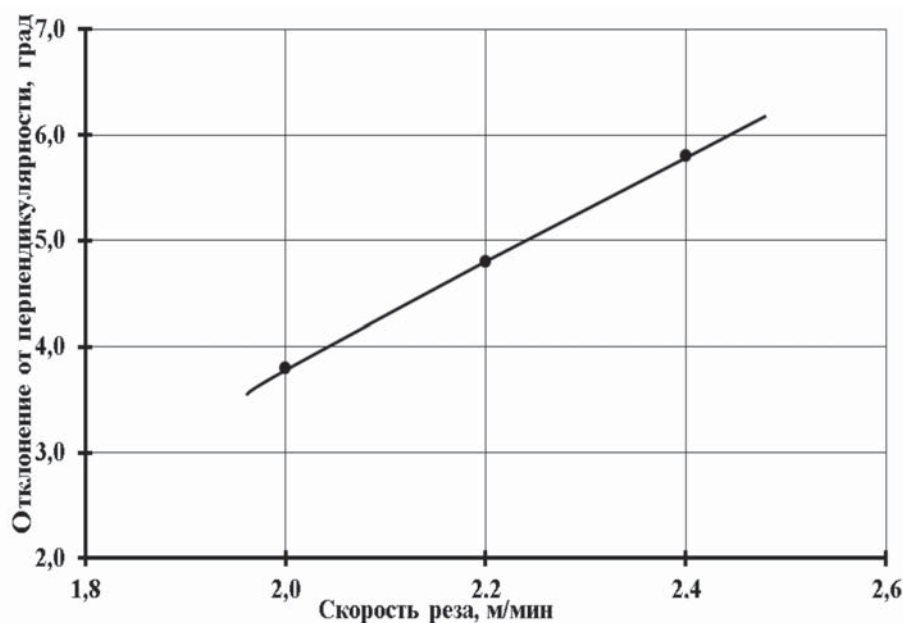


Рис. 6. Влияние скорости обработки на точность реза стали Ст3

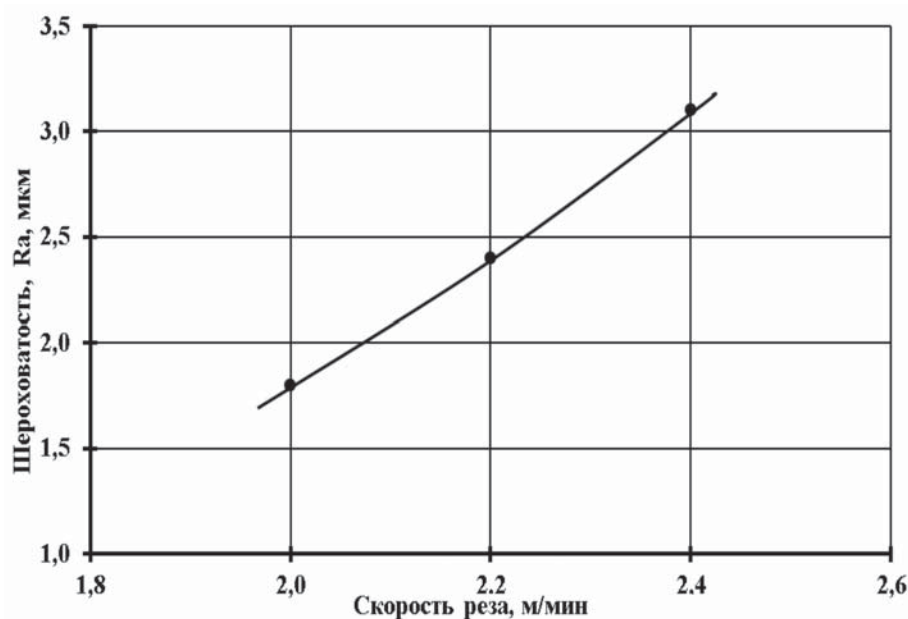


Рис. 7. Влияние скорости обработки на шероховатость поверхности реза стали Ст3

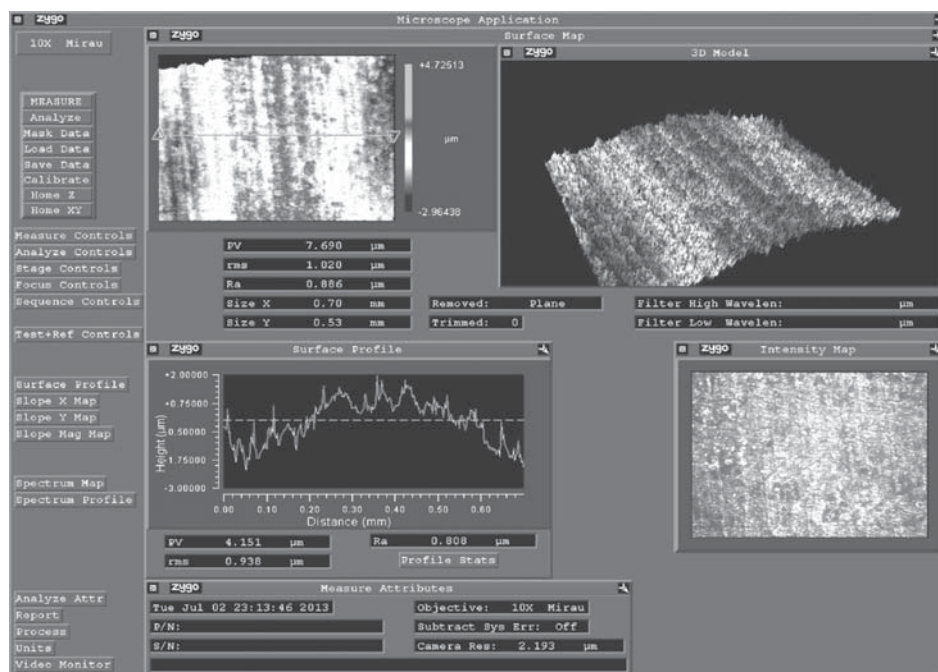


Рис. 8. Топография поверхности реза стали Ст3

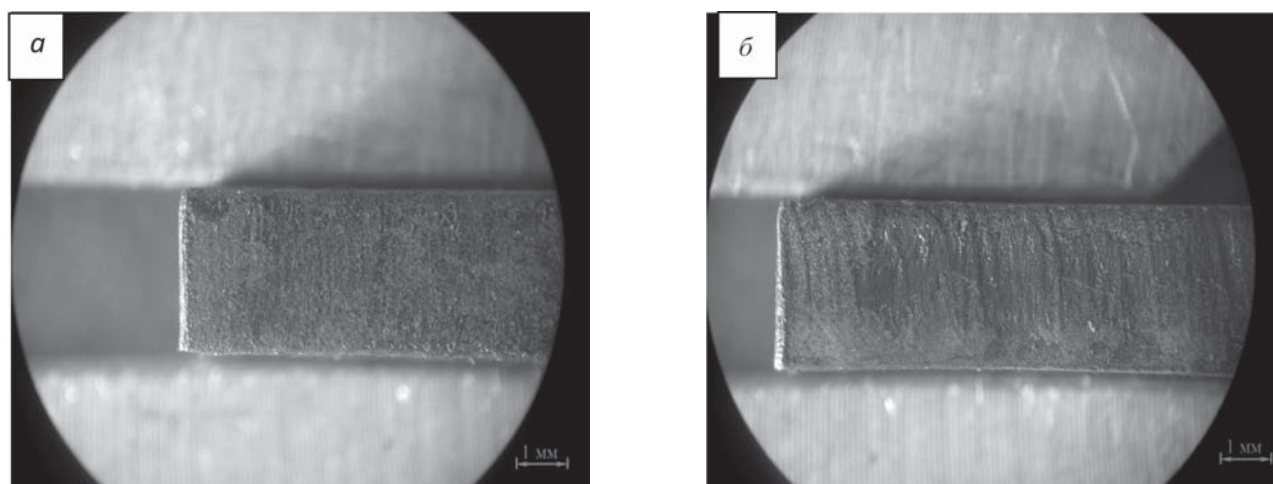


Рис. 9. Морфология поверхности реза стали Ст3:

a – $V = 2,0$ м/мин; *б* – $V = 2,4$ м/мин

Изучение процессов гратообразования на нижней кромке реза показало на отсутствие данного дефекта в существенной мере. Величина грата незначительно увеличивается со снижением скорости обработки, что объясняется «смягчением» газо- и гидродинамических потоков в зоне реза. При этом образующийся грат легко отделим от кромок реза.

Выводы

Технология тонкоструйной плазменной резки листовых конструкционных сталей основана на трех технологических схемах: Hi-Focus, Hi-Fo-

cus^{plus}, Hi-FocusF, предназначенных для различных толщин обрабатываемого материала. Так, для малых толщин реза (0,5...8 мм) рекомендуется технологическая схема Hi-Focus, реализующая процесс раскроя при токах плазменной дуги от 20 до 50 А. Использование максимального значения тока позволяет повысить скорость обработки, но при этом ухудшаются показатели точности и качества реза. Повышение тока сопровождается ростом диаметра столба плазменной дуги, что ведет к увеличению ширины реза.

Необходимость обработки больших толщин материала требует применения других технологических схем: Hi-Focus^{plus} либо Hi-FocusF, по-

звolyающих вести обработку на токах до 130 А (для используемого технологического комплекса). Технологическая схема Hi-Focus^{plus} допускает ряд токовых значений плазменной дуги от 50 до 130 А для обработки материалов в широком диапазоне толщин реза (4...30 мм). Для технологической схемы Hi-FocusF характерна обработка во всем рекомендуемом диапазоне толщин (6...25 мм) листового материала при максимальном значении тока (130 А).

Выбор плазмобразующих и завихряющих газов в основном определяется классом обрабатываемого материала. Так, для конструкционных сталей в качестве плазмобразующего газа используется кислород, а завихряющего – кислород, азот либо кислородно-азотная смесь. Параметры газов (давление и расход), определяющие характер газо- и гидродинамических потоков, ответственных как за плавление, так и за удаление продуктов расплава из зоны реза, назначаются для каждой технологической схемы в зависимости от тока дуги.

Таким образом, для управления точностью формообразования, качеством поверхности реза и производительностью процесса наиболее эффективным режимным параметром плазменного раскроя в рамках каждой технологической схемы является скорость обработки.

Список литературы

1. Полевой Г.В. Газопламенная обработка металлов: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Г.В.Полевой, Г.К.Сухинин. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 336 с. ISBN 5-7695-1604-6.
2. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.
3. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с.
4. Афонин Ю.В., Ермолаев Г.В., Малов А.Н., Малов Н.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б., Печурин В.А., Филев В.Ф. Экспериментальное исследование газолазерной резки малоуглеродистой стали // Тр. 4-й Междунар. конф. «Лазерные технологии и средства их реализации». – С-Петербург, 23-28 сент. 2003.
5. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – 2-е изд. стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 664с.

6. Рахимьянов Х.М. Моделирование процессов тонкоструйной плазменной резки для обеспечения точности формирования криволинейных контуров / Х.М. Рахимьянов, А.И. Журавлев, А.А. Локтионов, А.Х. Рахимьянов // Научный вестник НГТУ. – 2009. – № 4 (37). – С. 123–134.

7. Рахимьянов Х.М. Влияние технологий тонкоструйной плазменной резки на формирование шероховатости поверхности реза / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч. – техн. конф., Томск, 11–13 нояб. 2013 г. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2013. – С. 349–353.

8. Рахимьянов А.Х. Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов при тонкоструйной плазменной резке листовых материалов / А.Х. Рахимьянов // Высокие, критические электро- и нанотехнологии [Электронный ресурс]: Всерос. науч.-техн. конф.: программа конф.: сб. трудов конф. – Тула: ТулГУ, 2011. – 1 электрон. опт. диск (CD-Rom). – Загл. с этикетки контейнера.

9. Локтионов А.А. Повышение эффективности листового раскроя в заготовительном производстве / А.А. Локтионов, Х.М. Рахимьянов // Инновации в машиностроении: Тр. 3-й междунар. науч.-практ. конф., Барнаул, 26–28 сентября 2012 г.

10. Локтионов А.А. Тонкоструйная плазменная резка как эффективная технология в заготовительном производстве / А.А. Локтионов, В.В. Захаров // Наука. Технологии. Инновации: Материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых, 2–4 дек. 2011 г. – В 6 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 2. – С. 29–30.

11. Рахимьянов А.Х. Исследование обрабатываемости стали Ст3 методом тонкоструйной плазменной резки / А.Х. Рахимьянов, К.Х. Рахимьянов, С.В. Шопф // Ползуновский альманах, 2012. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – № 1 – С. 121–124.

12. Рахимьянов Х.М. Анализ погрешностей формообразования при тонкоструйной плазменной резке металлических материалов / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Современные проблемы в технологии машиностроения: Всерос. науч. – практ. конф., посвященная 100-летию со дня рождения профессора И.И. Муханова: сб. тр. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 151–153.

13. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [eine elektronische Ressource] / Werkstatt Ausrüstung Leitner Josef. – Salzweg, 2002. – 66 s. – Zugriffsmodus: http://www.wal-austria.at/pdf/wissenswertes/handbuch_plasmaschneiden.pdf – Der Titel Bildschirm.

14. Локтионов А.А. Износ расходных элементов плазмотрона при термической резке листового материала / А.А. Локтионов, Х.М. Рахимьянов,

А.И. Журавлев // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): Материалы докладов II Всерос. с междунар. участием науч. – техн. конф. (Иркутск, 25–27 апреля 2012 г.) / под ред. профессора С.А. Зайреса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 61–65.

15. Рахимьянов Х.М. Влияние износа расходных элементов на точность формообразования при тонкоструйной плазменной резке / Х.М. Рахимьянов, А.А. Локтионов // Обработка металлов: Технология. Оборудование. Инструменты. – 2011. – № 4 (53). – С. 14–18.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 46–55

Selection of technological schemes and high-precision plasma cutting mode optimization for structural steels

Rakhimyanov A.Kh., Engineer, e-mail: centerfht@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Problems of the high-precision plasma cutting technological scheme for structural sheet steels with thickness range from 0,5 to 30 mm are considered. Results of experimental research on plasma cutting mode optimization for 3 mm thick steel St 37-3 are presented with evaluation of cutting precision, surface quality and burr forming on the bottom edge. The accuracy of sheet materials cutting was estimated by cutting edge angle at the transverse sections, the surface quality assessed by roughness parameter. It is established that depending on material class for the chosen scheme, the required accuracy and cutting quality are provided by processing speed. Thus the perpendicularity deviation increase in cutting edge from 3,8° to 5,8° and roughness development from $Ra = 1,75 \mu m$ to $Ra = 3,2 \mu m$ occurs with the processing speed increase from 2,0 to 2,4 m / min while structural steel St 37-3 cutting. Loss of the cutting precision with increased processing speed is due to the increase of the temperature gradient over the cross section of the cut, which leads to uneven temperature field over the thickness of the cut. Deterioration of the cut surface roughness at the maximum speed is due to limitations in the development of gas-dynamic and hydrodynamic flow that participate in removal of products from the cutting zone of the melt, leading to their partial deposition on treated surface.

Keywords:

the high-precision plasma cutting, accuracy and cutting quality, plasma gas and swirl gas, structural steels.

References

1. Polevoi G.V., Sukhinin G.K. *Gazoplamennaya obrabotka metallov: Uchebnik dlia studentov uchrezhdenii srednego professional'nogo obrazovaniia* [Flame machining metals: Textbook for students of secondary vocational education]. Moscow, Publishing Center «Academia», 2005. 336 p.
2. Popilov L.Ya. *Elektrofizicheskaia i elektrokhimicheskaia obrabotka materialov: Spravochnik* [Electrophysical and electrochemical processing of materials. Handbook]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 400 p.
3. Grigor'iants A.G., Sokolov A.A. *Lazernaia rezka metallov* [Laser cutting of metals]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1988. 127 p.
4. Afonin Yu.V., Ermolaev G.V., Malov A.N., Malov N.A., Orishich A.M., Shuliat'ev V.B., Pechurin V.A., Filev V.F. [Experimental study of gas-laser cutting of mild steel]. *Trudy 4 Mezhdunarodnoi konferentsii «Lazernye tekhnologii i sredstva ikh realizatsii»* [Proceedings of the 4th International Conference “Laser technology and their means of implementation”]. Saint Petersburg, 2003, pp. 47–54. (In Russian).
5. Grigor'iants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki: Uchebnoe posobie dlia vuzov* [Technological processes of laser machining: Textbook for universities]. 2nd ed. Moscow, BMSTU Publ., 2008. 664 p.
6. Rakhimyanov Kh.M., Zhuravlev A.I., Loktionov A.A., Rakhimyanov A.Kh. Modelirovanie protsessov tonkostruinoi plazmennoi rezki dlia obespecheniia tochnosti formirovaniia krivolineinykh konturov [High-precision

plasma arc cutting modeling for shaping accuracy of cam contours assurance]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of NSTU*, 2009, no. 4 (37), pp. 123–134.

7. Rakhimianov Kh.M., Loktionov A.A. [Impact of technology trickle plasma cutting on the formation of the surface roughness of the cut]. *Sbornik nauchnykh trudov 7 Mezhdunarodnoi nauchno – tekhnicheskoi konferentsii “Sovremennye problemy mashinostroeniia”* [Collection of Scientific Papers 7th International Scientific - Technical Conference “Modern Problems of Engineering”, Tomsk, 11–13 November 2013]. Tomsk, TPU Publ., 2013, pp. 349–353. (In Russian).

8. Rakhimianov A.Kh. [Theoretical and experimental study of thermal processes in trickle plasma cutting sheet materials]. *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno – tekhnicheskoi konferentsii “Vysokie, kriticheskie elektro – i nanotekhnologii”* [Proceedings of the All-Russian Scientific - Technical Conference “High critical electro – and nanotechnology”]. Electronic edition. Tula, TSU Publ., 2011. (In Russian).

9. Loktionov A.A., Rakhimianov Kh.M. [Increased efficiency in cutting sheet blank production]. *Trudy 3 mezh-dunarodnoi nauchno – prakticheskoi konferentsii “Innovatsii v mashinostroenii”* [Proceedings of the 3rd International scientific and practical conference “Innovations in Machine Building “], Barnaul, 2012, pp. 158–159. (In Russian).

10. Loktionov A.A., Zakharov V.V. [Trickle plasma cutting as an effective technology in the blank production]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh, 2–4 dekabria 2011 g. v 6 chastiakh* [Proceedings of All-Russian scientific conference of young scientists “Science. Technologies. Innovations”, 2-4 December 2011 in 6 parts]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011, Part 2, pp. 29–30. (In Russian).

11. Rakhimianov A.Kh., Rakhimianov K.Kh., Shopf S.V. Issledovanie obrabatyvaemosti stali St3 metodom tonkostruinoi plazmennoi rezki [Study workability of the steel St3 trickle method for plasma cutting.]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2012, no. 1, pp. 121–124.

12. Rakhimianov Kh.M., Loktionov A.A. [Analysis of errors in forming trickle plasma cutting metal materials]. *Sbornik trudov Vserossiiskaia nauchno–prakticheskaiia konferentsiia “Sovremennye problemy v tekhnologii mashinostroeniia”, posviashchennaia 100-letiiu so dnia rozhdeniia professora Mukhanova I.I.* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Modern Problems in Mechanical Engineering Technology”, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Professor II Mukhanova]. Novosibirsk, 2009, pp. 151–153. (In Russian).

13. Handbuch zum Thema Plasmaschneiden [eine elektronische Ressource]. Werkstatt Ausrüstung Leitner Josef. Salzweg, 2002. 66 p. Zugriffsmodus: http://wal.dcon.at/cu/wal/pdf/Handbuch_Plasmaschneiden_web.pdf

14. Loktionov A.A., Rakhimianov Kh.M., Zhuravlev A.I. [Depreciation cost elements in the thermal plasma torch cutting sheet material]. *Materialy dokladov II Vserossiiskoi s mezhdunarodnym uchastiem nauchno–tekhnicheskoi konferentsii “Zhiznennyi tsikl konstruksionnykh materialov (ot polucheniiia do utilizatsii)”*. Irkutsk, 25–27 apreliia 2012 [Proceedings of the 2nd All-Russian scientific conference with international participation “The life cycle of construction materials (from receipt to disposal)” (Irkutsk, 25–27 April 2012)]. Irkutsk, 2012, pp. 61015065. (In Russian).

15. Rakhimianov Kh.M., Loktionov A.A. Vliianie iznosa raskhodnykh elementov na tochnost' formoobrazovaniia pri tonkostruinoi plazmennoi rezke [Deterioration of consumable elements influence on accuracy forming at high-precision plasma cutting]. *Obrabotka metallov (tekhnologiia, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2011, no. 4 (53), pp.14–18.

Funding

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (The public contract no. 2014/138, project no. 257).

Received 26 Mart 2014

Revised 7 May 2014

Accepted 12 May 2014

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАРОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

*А.А. ДОРОХОВ, аспирант,
С.А. ЕГОРОВ, канд. техн. наук, доцент
Н.А. ДЕМЕНТЬЕВА, канд. хим. наук
(Текстильный институт ИВГПУ, г. Иваново)*

Поступила 12 февраля 2014
Рецензирование 4 апреля 2014
Принята к печати 10 апреля 2014

Егоров С.А. –153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 21,
Текстильный институт Ивановского государственного политехнического университета,
e-mail: tmp@ivgpu.com

Рассматривается конструкция парогенератора для подачи смазочно-охлаждающих технологических средств в паровой фазе в зону механической обработки металлов резанием. Исследована его работоспособность и определен размерный износ инструмента, происходящий в результате наружного точения стали твердосплавным инструментом. Объем камеры парогенератора составляет 0,32 дм³. Расход жидкости составляет 0,8 л/ч. Температура пара на выходе около 90 °С. Эффективность действия смазочно-охлаждающих технологических средств различна и не зависит от основы. Проведенные исследования показали, что наиболее эффективны водомасляные эмульсии Прессойл, Эмульсол Т, а также полусинтетические жидкости Прогресс 13К, Ивкор. На процесс изнашивания инструмента оказывают влияние трибоактивные присадки, содержащиеся в смазочно-охлаждающих технологических средствах.

Ключевые слова: парогенератор, смазочно-охлаждающие технологические средства, износ.

Введение

Применение смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) в процессе обработки металлов резанием позволяет снизить износ инструмента, повысить точность механической обработки, интенсифицировать процесс резания [1, 2].

Большинство металлорежущих станков оснащено собственными системами подачи СОТС поливом, которые включают в себя: емкость для хранения, насос и систему труб для подачи, систему сбора отработанной жидкости и очистки от стружки [3]. Ряд станков, в частности обрабатывающие центры, станки-автоматы, имеют дополнительные устройства для подачи распыленных СОТС, представляющих собой аэрозоли [3]. Преимуществом способа является малый расход

СОТС: 400...500 г/ч эмульсии или 3...4 г/ч масла. В связи с малым расходом СОТС отпадает необходимость сбора, очистки и утилизации отработанной жидкости [1–5].

Для экономии СОТС и уменьшения теплового удара при выполнении чистовых операций резанием ряд исследователей применяют подачу СОТС в паровой фазе [6, 7]. Преимуществами данного способа являются малый расход технологического средства, сравнимый с подачей аэрозоли, отсутствие теплового удара и повышение стойкости инструмента, чувствительного к перепадам температуры, повышение точности обработки вследствие снижения тепловых деформаций. Капустин А.С. и Подгорков В.В. [6] исследовали влияние водяного пара на процесс лезвийной обработки, оставив открытым вопрос о влиянии масляных СОТС, водомасляных

эмульсий, а также отдельных функциональных компонентов.

Конструкции парогенераторов, встречающиеся в патентной литературе, обладают сложной системой настройки рабочих режимов [5, 6, 7]. Некоторые из них предполагают автоматизацию подачи жидкости за счет применения электронных устройств.

Важным преимуществом применения СОТС в паровой фазе является снижение времени транспорта активных компонентов в зону резания. В работах [4, 8] предполагается: для того чтобы СОТС достигло зоны плотного контакта инструмент–заготовка и успело образовать на поверхностях адсорбционные пленки, препятствующие износу, оно должно находиться в паровой фазе. Это сокращает время трибохимических реакций при резании. Возможно в этом случае рецептура приготовления СОТС, применяемого в паровой фазе, должна быть иной, чем при обычном использовании поливом.

Цель данной работы – предложить конструкцию парогенератора для подачи СОТС в зону обработки металлов резанием и исследовать её работоспособность.

Конструкция парогенератора

Разработано устройство (рис. 1), которое состоит из резервуара 5, помещенного на электронагреватель 1 и изолированного от внешней среды слоем асбеста 4. Патрубок подачи 2 соединяется с системой подачи СОТС станка. Данная конструкция отличается простотой исполнения, надежна в работе. Она не содержит сложных и дорогостоящих элементов.

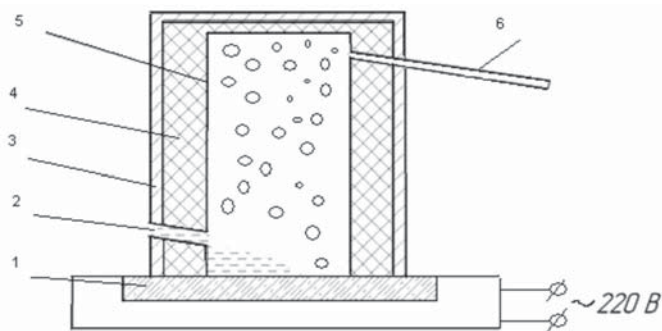


Рис. 1. Конструкция парогенератора:

1 – керамический нагреватель; 2 – патрубок подачи СОТС; 3 – корпус; 4 – теплоизоляция (асбест); 5 – резервуар из нержавеющей стали; 6 – патрубок отвода пара

Для образования паровой фазы необходимо, чтобы количество теплоты, выделяемой нагревателем, было достаточным для нагрева и испарения подаваемого количества жидкости. Конструкцией предусмотрено изменение температуры нагрева и количества подаваемой в парогенератор жидкости. Парогенератор устанавливается на суппорте металлорежущего станка (рис. 2), а подача готовой СОТС производится по трубопроводу 3 из емкости 5. Объем камеры парогенератора составляет 0,32 дм³. Расход СОТС составляет 0,8 л/ч. Температура пара на выходе – около 90 °С. Регулировка объема подачи жидкости в парогенератор производится краном 2. Жидкость из емкости 5 поднимается по трубопроводу насосом и попадает в резервуар парогенератора. Соприкасаясь с нагретым до 300 °С дном парогенератора, жидкость испаряется, и насыщенный пар под действием собственного давления выходит из резервуара и подается в зону обработки.

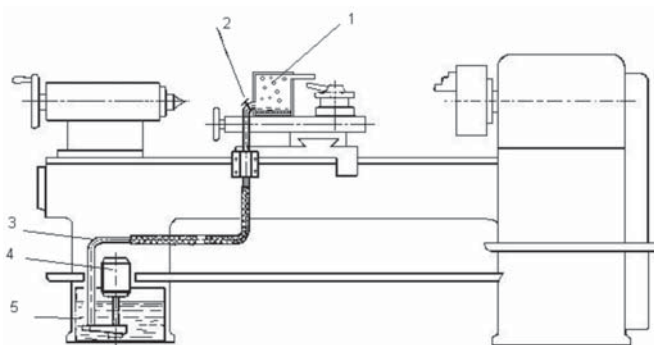


Рис. 2. Схема подачи СОТС в паровой фазе на металлорежущем станке:

1 – парогенератор; 2 – кран регулирования подачи жидкости; 3 – трубопровод подачи жидкости; 4 – двигатель насоса подачи жидкости; 5 – емкость с СОТС

Методика исследования

Исследование работоспособности конструкции парогенератора проводили на операции наружного точения стали марки ХС9 проходным резцом с твердосплавной пластиной. Важной характеристикой, влияющей на точность обработки, силу резания, тепловыделение при резании, является стойкость инструмента [9, 10]. Поэтому в процессе обработки фиксировался размерный износ по следующей методике. Производились замеры микрометром наружного диаметра обработанной заготовки фиксирован-

ной длины 200 мм и фиксированного диаметра 50 мм по длине. Разница в размерах радиуса заготовки свидетельствует об износе инструмента или наличии нароста. Если радиус заготовки в начале резания оказывается меньше, чем в конце резания, то наблюдается размерный износ. Если радиусы совпадают, то износ отсутствует. Если радиус заготовки в начале резания оказывается больше, чем в конце, то присутствует образование нароста. Определение среднего значения размерного износа проводили по данным пяти опытов, устанавливая каждый раз новое режущее лезвие сменной пластины.

Результаты и обсуждение

Следующие результаты исследования получены при обработке стали марки ХС9 на операции наружного точения резцом с твердосплавной пластиной Т15К6. Режимы резания соответствуют получистовой обработке. С одной стороны, необходимо добиться максимального износа инструмента за короткий промежуток времени, а с другой – выявить разницу от влияния технологических средств. При максимальной скорости резания разницу влияния СОТС на силу резания и износ трудно заметить, потому что имеет большое значение охлаждающее действие. Что-

бы выявить смазочное действие, скорость была ниже рекомендуемой в 10 раз: 21 м/мин; глубина резания 1 мм; подача 0,1 мм/об.

Данные испытаний представлены в таблице и на рис. 3. Размерный износ определялся по формуле $I_p = (D_k - D_n)/2$. Расчетная ошибка измерения износа составила 10...15 %. Меньшее значение ошибки соответствует большим значениям износа. Для исследования работоспособности парогенератора использовали воду с показателем pH 7,0 (дистиллированная вода).

Оказалось, что размерный износ инструмента при обработке стали с поливом водой составляет 0,27 мкм, что на 20 % меньше, чем без полива (0,34 мкм). Применение водяного пара дает такие же результаты. Износ резца в этом случае составлял 0,29 мкм (рис. 3). Это свидетельствует о работоспособности устройства.

На следующем этапе исследования необходимо было выяснить, влияет ли на износ химический состав паровой фазы и может ли быть получен пар в предлагаемом парогенераторе из промышленно выпускаемых жидкостей для металлообработки. Для приготовления экспериментальных растворов были взяты концентраты водо- и маслорастворимых жидкостей, выпускаемых предприятием ОАО «Ивхимпром» г. Иваново. Они имеют различный химический

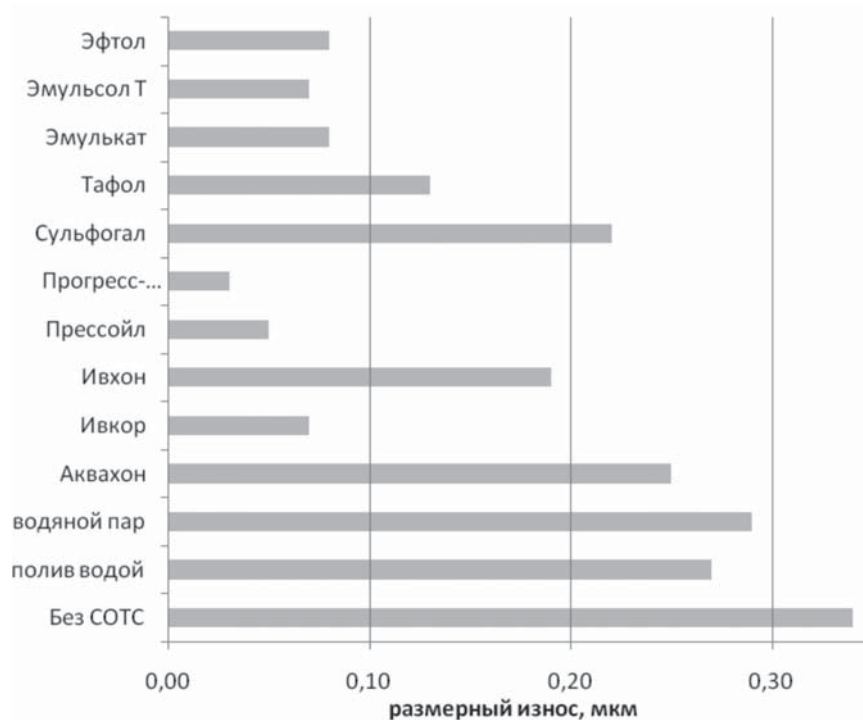


Рис. 3. Размерный износ инструмента при точении с применением паровой фазы

состав и основу для изготовления: гликолевую или масляную. Из концентратов готовили 5 %-е растворы СОТС в воде, получая водомасляные эмульсии и полусинтетические жидкости. Затем полученную эмульсию или раствор помещали в емкость станка. Проверяли действие полученного СОТС на операции наружного точения, подавая поливом и в паровой фазе. Результаты исследования представлены в таблице.

Результаты исследования влияния применяемых СОТС на операции наружного точения

№ п/п	Применяемое СОТС	Основа для СОТС	Величина размерного износа инструмента, мкм	
			паром	поливом
1	5 %-й р-р Аквахон	Гликолевая	0,25	0,28
2	5 %-й р-р АЭ Ивкор	Масляная	0,07	0,12
3	5 %-й р-р Ивхон	Гликолевая	0,19	0,23
4	5 %-й р-р Прессойл	Масляная	0,05	0,09
5	5 %-й р-р Прогресс 13К	Гликолевая	0,05	0,04
6	5 %-й р-р Сульфогал	Масляная	0,22	0,17
7	5 %-й р-р Тафол	Масляная	0,13	0,11
8	5 %-й р-р Эмулькат	Масляная	0,08	0,15
9	5 %-й р-р Эмульсол Т	Масляная	0,07	0,08
10	5 %-й р-р Эфтол	Гликолевая	0,08	0,12

Эффективность действия СОТС различна и не зависит от основы. Наиболее эффективны водомасляные эмульсии Прессойл, Эмульсол Т, а также полусинтетические жидкости Прогресс 13К, Ивкор.

Некоторые из испытанных составов оказались более эффективны при подаче поливом – это Прогресс 13К, Сульфогал, Тафол. Другие, наоборот, более эффективны в паровой фазе – это Аквахон, Прессойл, Ивкор, Ивхон, Эмулькат, Эфтол. На процесс изнашивания инструмента оказывают влияние трибоактивные присадки, содержащиеся в СОТС. Практически все они содержат олеиновую кислоту, касторовое масло и другие функциональные присадки.

Выводы

Предложенная конструкция парогенератора отличается простотой исполнения, надежна в работе, не содержит сложных и дорогостоящих элементов и рекомендуется к использованию на металлорежущих станках при подаче СОТС в парообразной фазе.

Эффективность действия СОТС различна и не зависит от основы. Наиболее эффективны водомасляные эмульсии Прессойл, Эмульсол Т,

а также полусинтетические жидкости Прогресс 13К, Ивкор. Действие СОТС в паровой фазе в большинстве случаев уменьшает износ инструмента по сравнению с жидким состоянием.

Список литературы

1. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / под ред. С.Г. Энтелеса, Э.М. Берлинера. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
2. Бердичевский Е.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
3. Машиностроение. Энциклопедия / ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. Т. IV-7. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование; под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Машиностроение, 1999. – 863 с.
4. Латышев В.Н. Повышение эффективности СОЖ. – 2-е изд. перераб. – М.: Машиностроение, 1985. – 64 с.
5. Курносое Н.Е., Тарнопольский А.В. Технология вихревой подготовки и подачи воздушно-жидкостных аэрозолей смазочно-охлаждающих технологических сред при механообработке // Вестник Саратовского государственного технического университета. – № 2. Вып.1. – 2007. – С. 45–49.
6. Капустин А.С. Исследование эффективности действия СОТС в парообразном состоянии при обработке металлов резанием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Иваново: ИвГУ, 1997. – 16 с.
7. Капустин А.С., Подгорков В.В., Подгорков С.В., Капустин С.А. Автоматизированное устройство для подачи смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания // Патент Российской Федерации № 2163862 RU B23Q011/10, 10.03.2001.
8. Волков А.В., Годлевский В.А. Математические модели смазочных процессов в технических трибо-системах. – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2010. – 144 с.
9. Симсиге Ж.В., Кутышкин А.В., Симсиге Д.Ц. Оценка износа твердосплавного режущего инструмента при механической обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 1. – С. 50–55.
10. Симсиге Ж.В., Кутышкин А.В., Симсиге Д.Ц. Прогнозирование усталостного разрушения твердосплавного инструмента при механической обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3. – С. 52–55.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 56–61

Study of efficiency of a steam generator for coolant supply

Dorohov A.A., Post-graduate Student

Egorov S.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: tmp@ivgpu.com

Dementeva N.A., Ph.D. (Chemical)

Textile Institute of Ivanovo State Polytechnical University, 21 Sheremetev Avenue, Ivanovo, 153000, Russian Federation

Abstract

The design of a steam generator for cutting fluids supply (in a steam phase) into the zone of metals machining is described in the article. Efficiency of the device is examined; dimensional wear-out of the instrument is defined as the result of external steel cutting by a hard-alloy instrument. The volume of the steam generator chamber is 0,32 dm³. Coolant-cutting fluid consumption is 0,8 l/h. Output steam temperature is about 90 °C. Operation efficiency of coolant-cutting fluids is different and does not depend on the base. The best efficiency of water-and-oil emulsions Pressoil, Emulisol T and half synthetic fluids Progress 13K and Ivkor is proved by the study. The process of the instrument wear-out is influenced by triboactive additives contained in cutting fluids.

Keywords:

steam generator, coolant-cutting fluids, wear.

References

1. Entelis S.G., Berliner E.M. et al. *Smazochno-okhlazhdaiushchie tekhnologicheskie sredstva dlia obrabotki metallov rezaniem: Spravochnik* [Metal-working lubricant for metal cutting: Handbook]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 496 p.
2. Berdichevskii E.G. *Smazochno-okhlazhdaiushchie tekhnologicheskie sredstva dlia obrabotki materialov: Spravochnik* [Metal-working lubricant for materials processing: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.
3. Cherpakov B.I., Aver'ianov O.I., Adoian G.A., Alekseev G.A. et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediia. Tom IV-7. Metallovezhushchie stanki i derevoobrabatyvaiushchee oborudovanie* [Machine Building. Encyclopedia. Vol. IV-7. Metal-cutting machine tools and woodworking equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1999. 863 p.
4. Latyshev V.N. *Povyshenie effektivnosti SOZh* [Improving the efficiency of the liquid coolant]. 2nd ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 64 p.
5. Kurnosov N.E., Tarnopolskij A.V. *Tekhnologiya vikhrevoi podgotovki i podachi vozdušno-zhidkostnykh aerolei smazochno-okhlazhdaiushchikh tekhnologicheskikh sred pri mekhanooobrabotke* [Technology of vortical preparation and submission of air-liquid aerosols of cooling technological environments at processing by cutting]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Bulletin of Saratov State Technical University*. 2007, Vol. 1, no. 2, pp. 45–49.
6. Kapustin A.S. *Issledovanie effektivnosti deistviia SOTS v paroobraznom sostoianii pri obrabotke metallov rezaniem*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study the effectiveness of the lubricant-cooling agent in the vapor state in metal cutting. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Ivanovo, IvSU, 1997. 16 p.
7. Kapustin A.S., Podgorkov V.V., Podgorkov S.V., Kapustin S.A. *Avtomatizirovannoe ustroistvo dlia podachi smazochno-okhlazhdaiushchei zhidkosti v zonu rezaniia* [An automated apparatus for supplying coolant to the cutting area]. Patent RF, no. 2163862, RU B23Q011/10, 2001.
8. Volkov A.V., Godlevskii V.A. *Matematicheskie modeli smazochnykh protsessov v tekhnicheskikh tribosistemakh* [Mathematical models of lubricating processes in technical tribosystem]. Ivanovo, IvSU, 2010. 144 p.
9. Simsive J.V., Kutyshekin A.V., Simsive D.C. *Otsenka iznosa tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta pri mekhanicheskoi obrabotke* [Estimation of the tool crater wear of the cutting tool with carbide cutting inserts in turn-

ing]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* – *Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1, pp. 50–55.

10. Simsive J.V., Kutyshkin A.V., Simsive D.C. Prognozirovanie ustalostnogo razrusheniia tverdosplavnogo instrumenta pri mekhanicheskoi obrabotke [Prediction of fatigue failure of the cutting tool with carbide cutting inserts at orthogonal turning], *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* – *Metal Working and Material Science*, 2012, no. 3, pp. 52–55.

Received 12 February 2014

Revised 4 April 2014

Accepted 10 April 2014

ГЕОМЕТРИЯ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ЗЕРЕН С КОНТРОЛИРУЕМОЙ ФОРМОЙ

*В.А. КОРОТКОВ, канд. техн. наук, доцент
Е.М. МИНКИН, инженер,
ФГБОУ ВПО КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева
(г. Кемерово)*

Поступила 10 января 2014
Рецензирование 30 апреля 2014
Принята к печати 17 мая 2014

Коротков В.А. – 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28,
Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева,
e-mail: korotkov-va@mail.ru

Эффективность процесса шлифования во многом определяется свойствами абразивных зерен, в том числе их формой и ориентацией в теле шлифовальных инструментов. Повысить эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов можно упорядочением геометрии зерен, т.е. подбором рациональной формы и ориентации зерен для конкретных условий обработки и параметров силового нагружения. Для решения такой проблемы предлагается разработанная и опробованная на практике методика исследования для оценки взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен и напряжений в них при варьировании разновидностей их формы и пространственной ориентации в теле инструмента. В ходе разработки методики исследована взаимосвязь передних углов шлифовальных зерен нормального электрокорунда с факторами формы, ориентации и износа. Установлено, что минимальные значения передних углов фиксируются у зерен изометрической формы и тангенциально ориентированных зерен, а максимальные значения – у игольчато-пластинчатых зерен, ориентированных под углами $\Theta = 22,5 \dots 45^\circ$ к плоскости резания. Произведен также анализ напряжений в ориентированных шлифовальных зернах нормального электрокорунда различных форм при работе отрезных шлифовальных кругов.

Установлено, что для отрезных кругов рациональный угол ориентации зерен составляет $\Theta = 67^\circ 30'$. Осуществлена практическая проверка разработанной методики исследований путем проведения экспериментов по установлению пределов прочности ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой различных марок и зернистостей при одноосном сжатии.

Ключевые слова: шлифование, шлифовальные инструменты, отрезные шлифовальные круги, шлифовальные зерна, передний угол, коэффициент формы зерен, угол ориентации, износ зерен, напряжения в шлифовальных зернах, прочность зерен.

Введение

Эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов, такие как режущая способность, коэффициент шлифования, эффективная мощность резания, температура резания и другие, зависят от множества факторов, в числе которых: физико-механические свойства абра-

зивных материалов, зернистость, тип связки, твердость, номер структуры, характер воздействия силовой нагрузки, схема шлифования и форма инструментов.

При прочих равных условиях эффективность процесса шлифования во многом определяется свойствами зерен, в частности, их прочностью и абразивной способностью, которые, в свою

очередь, задаются химическим составом и геометрией зерен. Химический состав абразивного материала формируется в соответствии со сложившейся практикой применения абразивов различных марок для обработки тех или иных материалов. Геометрия зерен зависит от их формы, пространственной ориентации в теле инструментов, а также от характера износа и оказывает непосредственное влияние на передние углы зерен и их прочность.

При изготовлении шлифовальных зерен по наиболее распространенной технологии, состоящей в дроблении слитков абразивного материала с последующим рассевом на ситах, зерна получают произвольную форму. Для идентификации формы зерен используют качественную и количественную классификацию. Качественная классификация основана на описании формы зерен следующими общепринятыми терминами: зерна изометрические, осколочные, промежуточные, пластинчатые, мечевидные, иглообразные, игольчато-пластинчатые [1–4]. Количественная оценка формы зерен основана на сравнении их проекций с плоскими либо объемными фигурами. Так, например, для оценки формы абразивных зерен может быть использовано соотношение сторон параллелепипеда, описанного вокруг объемной проекции зерна [1, 2], а для алмазных зерен – соотношение осей описанного эллипса [5]. Также форма абразивных зерен может быть количественно оценена коэффициентом формы (K_ϕ), равным отношению диаметров описанных $D_{\text{оп}}$ к диаметрам вписанных окружностей $D_{\text{вп}}$ в плоскую проекцию зерен [4]. Форма алмазных зерен, согласно ГОСТ 9206–80, оценивается с помощью коэффициента формы K_ϕ , равного отношению длины плоской проекции зерна l к ее ширине b , при этом изометрическими считаются зерна, коэффициент формы которых $K_\phi \leq 1,3$. Коэффициент формы зерен во фракции определяется как среднее арифметическое по результатам оценки формы не менее 50 зерен.

Форма абразивных зерен непосредственно влияет на их геометрию, в частности, на величины их передних углов [4, 6, 7] и на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов [8, 9, 10]. Шлифовальные зерна требуемой формы могут быть получены путем применения специальных технологий их изготовления (регулированием скорости кристаллизации расплава

абразива, различными способами дробления, применением технологий изготовления формокорундов и сферокорундов и др.) [11], а также посредством сепарации из исходной массы обычного абразива [9, 10, 12].

Пространственная ориентация абразивных зерен в теле инструментов также существенно влияет на геометрию зерен и эффективность процесса шлифования [10, 13]. Ориентация зерен при изготовлении шлифовальных инструментов может быть реализована различными способами. Например, известен способ изготовления твердотельных шлифовальных инструментов, при котором металлизированные шлифовальные зерна ориентируют воздействием электромагнитного поля в сочетании с ультразвуковыми колебаниями [14]. Известен также способ изготовления шлифовальных инструментов, при котором обычные неметаллизированные шлифовальные зерна, предварительно покрытые пленкой клея, помещают в ферромагнитную жидкость и ориентируют электромагнитным полем, клеевое покрытие полимеризуется, после чего ферромагнитную жидкость удаляют [15]. Известен и широко распространен способ изготовления шлифовальных шкур и лент, при котором абразивные зерна ориентируют электростатическим полем [16].

Разработан и опробован на практике способ изготовления твердотельных шлифовальных инструментов на основных типах связующих (бакелитовой, керамической, вулканической и других связках), при котором зерна ориентируют воздействием электростатического поля [10, 17].

Таким образом, существует широкий набор способов целенаправленного регулирования геометрии режущих микроклиньев шлифовальных инструментов. Вместе с тем имеющиеся возможности по обеспечению рациональной геометрии зерен используются лишь частично. Одна из основных причин этого состоит в том, что практически во всех предшествующих исследованиях факторы формы и ориентации зерен рассматривались и подбирались отдельно, без учета друг друга. В частности, рациональная форма зерен подбиралась под конкретные условия обработки для повышения определенных эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов, например, режущей способности, качества обработанных поверхностей, сни-

жения износа инструментов и др. [1, 4, 5, 8, 9, 10, 13]. Кроме того, ориентация зерен, как правило, осуществлялась по двум характерным направлениям. Зерна ориентировали радиально, когда их главные (т. е. наибольшие) оси перпендикулярны плоскости резания ($\Theta = 90^\circ$) и в тангенциальном направлении, когда главные оси зерен параллельны плоскости резания ($\Theta = 0^\circ$) [10, 16]. Вместе с тем номенклатура шлифовальных инструментов и схемы их силового нагружения в процессе работы весьма разнообразны, и ориентирование зерен следует осуществлять под углами, наиболее эффективными для конкретного случая шлифования. Рациональные углы ориентации зерен могут существенно отличаться от вариантов их радиального или тангенциального расположения. Современные способы изготовления шлифовальных инструментов позволяют обеспечить любые требуемые направления ориентирования зерен [10, 13, 17]. Основные же перспективы упорядочения геометрии зерен и повышения эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов открываются в совместном использовании и целенаправленном регулировании факторов формы и ориентации зерен.

Совместный подбор рациональной формы и ориентации зерен экспериментальным путем является весьма трудоемким, сложным и затратным по времени. Так, например, сравнение шлифовальных инструментов с четырьмя различными коэффициентами формы зерен и четырьмя направлениями их ориентации потребует изготовления шестнадцати разновидностей инструментов. Для получения адекватных сравнительных данных следует изготовить минимум по три инструмента каждой разновидности и испытать каждый инструмент. При этом использование матрицы испытаний 4×4 может оказаться недостаточным для нахождения рационального коэффициента формы и угла ориентации зерен.

В связи с вышеизложенным для создания шлифовальных инструментов с рациональной геометрией зерен целесообразно иметь разработанную методику, позволяющую предвидеть и анализировать эксплуатационные показатели инструментов на этапе их проектирования. Такая методика должна обеспечивать установление взаимосвязи величин передних углов ориентированных шлифовальных зерен с раз-

новидностями их формы с учетом фактора износа, а также анализировать напряжения в ориентированных зернах с контролируемой формой. Представленная работа посвящена разработке указанной методики и экспериментальной проверке достоверности получаемых с ее помощью результатов.

Методика исследований взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен и напряжений в них при работе с параметрами их формы и ориентации в теле инструмента

При проектировании шлифовальных инструментов с упорядоченной формой и ориентацией зерен на первом этапе производится анализ геометрии зерен в исходном (базовом) шлифовальном инструменте, взятом за основу. Для этого необходимо получить изображения не менее 50...100 зерен из фракции абразива, использованной для изготовления данного шлифовального инструмента. Изображения зерен можно получать путем сканирования либо фотографирования с увеличением и разрешением, достаточным для четкой фиксации контуров поверхности зерен. Далее производится количественная оценка формы у изображений зерен и для каждого исследуемого зерна устанавливается коэффициент формы K_f , что возможно осуществить вручную либо с привлечением специально разработанного программного обеспечения [18].

После этого производятся измерения передних углов на исследуемых изображениях шлифовальных зерен при варианте их гипотетической радиальной ориентации относительно плоскости резания ($\Theta = 90^\circ$). На основе получаемых данных строятся геометрические модели шлифовальных зерен с различными коэффициентами формы, варьирующимися от минимального до максимального значений в исследуемой фракции абразива. Общее число построенных моделей зерен должно быть не менее 4–5, в том числе модель зерна со средним коэффициентом формы зерен в исследуемой фракции. Указанные операции целесообразно выполнять с помощью специально разработанных программ для ЭВМ [19, 20, 21], которые позволяют поворачивать изображения зерен под требуемым углом относительно плоскости резания, определять

передние углы во всех точках контура зерен и получать исходные данные для построения их геометрических моделей. Непосредственное построение геометрических моделей зерен можно осуществлять в любом графическом редакторе, например, «Компас», «AutoCAD» и другие, которые обеспечивают преобразование получаемых изображений в формат bmp.

Полученные изображения моделей зерен посредством упомянутых выше программ для ЭВМ поворачиваются под различными углами относительно плоскости резания, и для каждого варианта их ориентации определяются величины передних углов. Получаемые результаты позволяют построить двухфакторные графики зависимости передних углов шлифовальных зерен в исследуемой фракции от коэффициента их формы K_f и угла ориентации Θ .

Анализ получаемых зависимостей позволяет спрогнозировать ряд эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов. Так, известно, что величины передних углов шлифовальных зерен напрямую влияют на режущую способность инструментов, температуру в зоне резания, деформации обрабатываемого материала, шероховатость и другие показатели качества обрабатываемых поверхностей [1–5, 8, 9, 10, 13, 16].

Для прогнозирования уровня износа проектируемого шлифовального инструмента целесообразно оценить величины напряжений в шлифовальных зернах в зависимости от их формы и пространственного расположения в теле инструмента. С этой целью необходимо установить характер и величины силовой нагрузки, действующей на базовый шлифовальный инструмент в процессе эксплуатации, а именно требуется измерить составляющие силы резания, определить количество зерен, одновременно участвующих в работе, и рассчитать величины нагрузок, действующих на единичные зерна.

Измерение составляющих силы резания производится либо напрямую с помощью динамометров, либо косвенно, например, через эффективную мощность резания. Для подсчета количества зерен на единице площади рабочей поверхности круга необходимо получить ее увеличенное изображение при помощи микроскопа или современного цифрового фотоаппарата с режимом макросъемки. Число зерен, одновременно участвующих в работе, определяется через

известную площадь пятна контакта шлифовального инструмента с обрабатываемой заготовкой.

Картина распределения напряжений в ориентированных шлифовальных зернах с контролируемой формой может быть получена при помощи различных программных комплексов для прочностных расчетов, например, «SolidWorks», «Ansis» и др. Для этого в выбранном программном комплексе к полученным ранее моделям зерен с различными коэффициентами формы и при различных вариантах их ориентации прикладываются составляющие силы резания, воздействующие на единичное зерно при работе. Получаемые результаты позволяют построить двухфакторные графики зависимости напряжений в шлифовальных зернах от коэффициента их формы K_f и угла ориентации Θ .

Совместный анализ графиков зависимостей передних углов и напряжений у шлифовальных зерен от коэффициента их формы угла ориентации относительно плоскости резания позволяет выбрать оптимальное сочетание количественных показателей формы и пространственного расположения зерен для достижения требуемого сочетания эксплуатационных показателей в проектируемом шлифовальном инструменте.

Исследование взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен с параметрами их формы и ориентации в теле инструмента

Практическая отработка описанной выше методики исследований осуществлялась на примере шлифовальных зерен, использованных для изготовления опытных отрезных шлифовальных кругов с контролируемой ориентацией зерен и характеристикой 230×4×22 13A40H T2 БУ 80 м/с [10]. Указанные шлифовальные инструменты были изготовлены в соответствии с разработанным и запатентованным способом [17] без применения описанной методики. Результаты их испытаний послужили отправной точкой для установления взаимосвязи величин передних углов ориентированных шлифовальных зерен с разновидностями их формы, а также использованы для сравнения с результатами анализа напряжений в ориентированных зернах с контролируемой формой.

При проектировании и изготовлении отрезных кругов форма шлифовальных зерен коли-

чественно оценивалась в трехмерном пространстве с помощью специально разработанного алгоритма и программы для ЭВМ [10, 18]. Коэффициент формы K_ϕ в данном случае был равен отношению диаметров, описанных вокруг контуров зерен сфер $D_{оп}$, к диаметрам вписанных в них сфер $D_{вп}$.

Для оценки величин передних углов ориентированных шлифовальных зерен разработан программный комплекс, позволяющий поворачивать их изображения, полученные с помощью микроскопа и цифрового фотоаппарата, под требуемым углом относительно плоскости резания и определять передний угол во всех точках контура [19, 20, 21].

С целью сокращения времени и трудоемкости оценки передних углов шлифовальных зерен при различных углах их ориентации разработана и реализована методика, основанная на построении в графическом редакторе «Компас» моделей шлифовальных зерен с различными коэффициентами формы и определении величин средних передних углов зерен при их различной ориентации и степени износа. Исходными данными для построения моделей зерен с различными коэффициентами формы послужили результаты оценки передних углов радиально ориентированных зерен марки 13A40H.

В процессе проведения исследований для каждой модели зерна с определенным коэффициентом формы формировалась матрица значений передних углов для различных вариантов их ориентации и с учетом фактора износа. Полученные результаты сводились в таблицы формата Excel с последующим построением трехмерных графиков зависимости передних углов шлифовальных зерен от коэффициента их формы K_ϕ и угла пространственной ориентации Θ , измеряемого между главной (т. е. наибольшей) осью зерна L и плоскостью резания.

Результаты исследования взаимосвязи величин передних углов шлифовальных зерен с параметрами их формы и ориентации

Результаты оценки передних углов ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой марки 13A40H представлены на рис. 1. Полученные данные говорят о том, что

независимо от коэффициента формы, чем длиннее шлифовальное зерно работает, т.е. изнашивается вдоль главной оси и находится в теле инструмента, тем больше (в среднем) становится его передний угол. При этом фактор ориентации зерен относительно плоскости резания весьма существенно влияет на величины передних углов.

Так, например, при $K_\phi = 1,6$ передние углы шлифовальных зерен могут варьироваться в пределах $-60...-6^\circ$ (износ до $1/3L$) и $-44...+9^\circ$

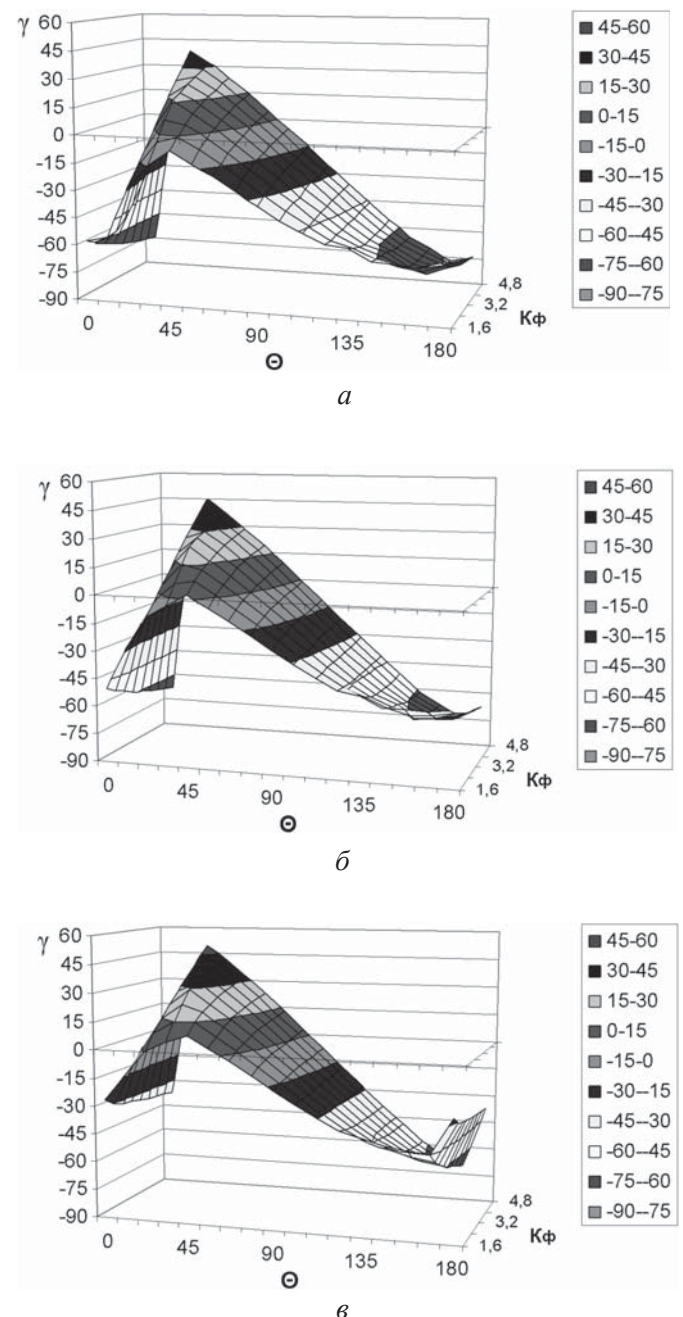


Рис. 1. Влияние коэффициента формы K_ϕ и угла пространственной ориентации Θ зерен 13A40H при их гипотетическом износе до $1/3L$ (а), до $1/2L$ (б) и до $2/3L$ (в) на величины передних углов γ

(износ до $2/3L$). При $K_\phi = 4,8$ передние углы зерен в зависимости от угла ориентации Θ изменяются в диапазоне $-77...+39^\circ$ (износ до $1/3L$) и $-69...+42^\circ$ (износ до $2/3L$).

Таким образом, одно и то же зерно, по-разному ориентированное относительно плоскости резания, имеет значительную разницу величин передних углов. Она достигает $53...54^\circ$ у изометрических зерен ($K_\phi = 1,6$) и $111...116^\circ$ у игольчато-пластинчатых зерен ($K_\phi = 4,8$), что существенно больше диапазона изменения передних углов лезвийных инструментов, применяемых для обработки сталей и сплавов. Кроме того, полученные данные показывают, что передние углы шлифовальных зерен достигают максимальных положительных значений при углах ориентации $\Theta = 22,5...45^\circ$.

Результаты оценки передних углов шлифовальных зерен (рис. 1) коррелируют с результатами экспериментов по установлению режущей способности отрезных кругов с ориентированными зернами [10], где сравнивались отрезные круги с тангенциальной ориентацией зерен ($\Theta = 0^\circ$), круги с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$) и круги с радиальной ориентацией зерен ($\Theta = 90^\circ$). Наименьшей режущей способностью и минимальными значениями передних углов характеризуются отрезные круги с тангенциальной ориентацией зерен ($\Theta = 0^\circ$). Далее по возрастанию следуют обычные отрезные круги с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$). Максимальной режущей способностью и максимальными величинами передних углов среди сравниваемых разновидностей инструментов отличаются круги с радиальной ориентацией зерен ($\Theta = 90^\circ$).

Результаты оценки передних углов шлифовальных зерен (см. рис. 1) также коррелируют с результатами испытаний отрезных кругов с контролируемой формой зерен [10]. Из графиков (см. рис. 1) следует, что у неориентированных шлифовальных зерен (с произвольными углами их ориентации) с увеличением коэффициента формы происходит рост величин передних углов. В соответствии с этим с увеличением коэффициента формы зерен зафиксирован существенный рост режущей способности отрезных кругов, снижение температуры в зоне резания и деформаций обрабатываемого материала.

Анализ результатов оценки передних углов шлифовальных зерен (см. рис. 1) и результатов

испытаний отрезных кругов с заданной ориентацией и контролируемой формой зерен [10] показывает, что для достижения максимальной режущей способности шлифовальных инструментов и соответственно снижения деформаций обрабатываемого материала и температуры резания необходимо применять зерна игольчато-пластинчатой формы (с максимальными значениями K_ϕ) и располагать их в инструментах под углами ориентации $\Theta = 22,5...45^\circ$.

Исследование взаимосвязи величин напряжений в шлифовальных зернах с параметрами их формы и ориентации в теле инструмента

Для исследования напряжений, возникающих в шлифовальных зернах при различных вариантах их ориентации в теле инструмента, предварительно определялись составляющие силы резания, действующие на зерна марки 13A40H при работе отрезных шлифовальных кругов с характеристикой $230 \times 4 \times 22$ 13A40H T2 БУ 80 м/с [10]. С этой целью был рассмотрен случай разрезки заготовок из стали 10 (трубы $21,3 \times 2,8$) на скорости $V = 80$ м/с с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу $F = 32$ Н ($P_y = 32$ Н). В процессе разрезки заготовок среди прочих показателей определялась эффективная мощность резания, что позволило вычислить тангенциальную составляющую силы резания ($P_z = 8,46$ Н).

Для анализа напряжений в зернах цифровым фотоаппаратом в режиме макросъемки фотографировались участки рабочей поверхности отрезных кругов и производился подсчет количества зерен на единице площади поверхности в графическом редакторе Paint. Установлено, что на рабочей поверхности исследуемых отрезных кругов число зерен в среднем составляет $N_s = 2,68$ зерен/ мм^2 . Исходя из этой величины, а также из площади контакта отрезного круга с разрезаемой заготовкой ($S = 22,4$ мм^2), определено количество шлифовальных зерен, одновременно участвующих в работе ($N_s = 60$ зерен), и установлены величины сил, действующих на единичное шлифовальное зерно на поверхности круга ($P_y = 0,533$ Н; $P_z = 0,141$ Н).

Полученные данные позволили произвести расчет напряжений, возникающих в моделях шлифовальных зерен марки 13A40H с различ-

ными коэффициентами формы и вариантами ориентации в теле инструмента в программном комплексе SolidWorks. Программными настройками при проведении расчетов послужили следующие данные: линейная упругая изотропная модель; материал – нормальный электрокорунд; предел прочности при растяжении $8,5 \cdot 10^7$ Н/м²; предел прочности при сжатии $7,6 \cdot 10^8$ Н/м²; модуль упругости $3,74 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициент Пуассона 0,22; массовая плотность 4025 кг/м³; модуль сдвига $1,5 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициент теплового расширения $8 \cdot 10^{-6}$ 1/К. Тип сетки: сетка на твердом теле на основе кривизны; четыре точки Якобиана; максимальный размер элемента 0,00 968 809 мм; минимальный размер элемента 0,00 322 933 мм.

Для определения объемной прочности зерен проведены исследования по оценке напряженного состояния на границе их заделки в связку. На основе данных по оценке величин передних углов радиально ориентированных зерен марки 13A40H, полученных с помощью программного комплекса [19, 20, 21], построены модели зерен с различными коэффициентами формы. К полученным моделям шлифовальных зерен 13A40H (рис. 2) имитировалось приложение сил, действующих на реальное единичное шлифовальное зерно ($P_y = 0,533$ Н; $P_z = 0,141$ Н), при различных вариантах их ориентации и заделки в связку. При этом установлено, что в зависимости от конкретного варианта ориентации максимальные напряжения возникают на различных участках модели зерна по границе заделки в связку.

Для более полного представления о напряженном состоянии модели шлифовального зерна при всех вариантах ее ориентации снимались и анализировались данные в трех характерных зонах по границе заделки в связку: слева, по центру и справа (рис. 2, б).

Результаты оценки напряжений в модели шлифовального зерна с $K_\phi = 2,4$ (средний коэффициент формы зерен в исследуемой фракции) при различных углах ориентации представлены на рис. 3.

Данные графика (рис. 3) показывают, что наименьшие напряжения возникают при тангенциальной ориентации модели зерна. Далее в диапазоне от $\Theta = 11^\circ 15'$ до $\Theta = 45^\circ$ происходит существенный рост напряжений, при этом максимальные значения достигаются в «зоне

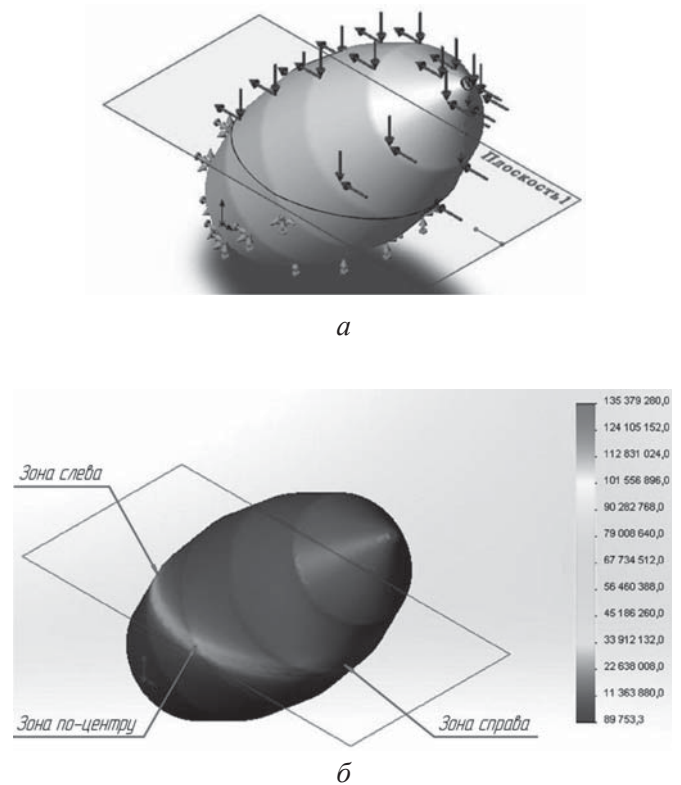


Рис. 2. Схема нагружения (а) и картина напряжений по границе заделки в связку (б) в модели зерна 13A40H с $K_\phi = 2,4$ и углом ориентации $\Theta = 45^\circ$, до $1/2L$, закрепленной в связку

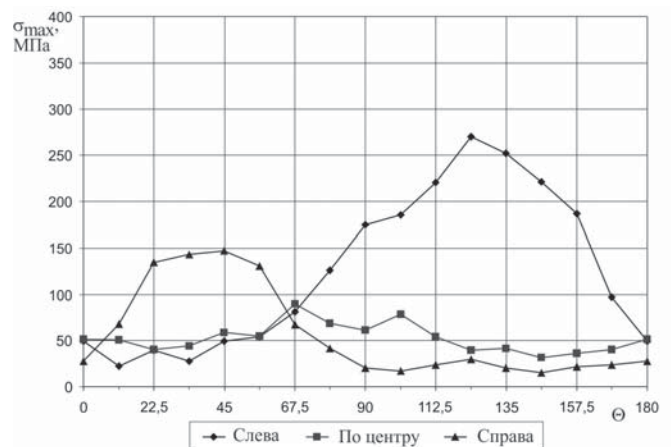


Рис. 3. Напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H, закрепленной до $1/2L$, с $K_\phi = 2,4$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации

справа» под свесом выступающей части зерна. В следующем диапазоне от $\Theta = 45^\circ$ до $\Theta = 67^\circ 30'$ происходит снижение максимальных напряжений до значений, приближенных к варианту тангенциальной ориентации. При этом очевидно, что снижение максимальных напряжений при $\Theta = 67^\circ 30'$ происходит в результате равномерного распределения напряжений в объеме зерна (слева, по центру и справа) по границе заделки

в связку. В свою очередь, такое распределение напряжений достигается за счет того, что угол ориентации зерна $\Theta = 67^\circ 30'$ близок к направлению вектора силы резания P . Здесь составляющие силы резания $P_y = 0,533$ Н, $P_z = 0,141$ Н, т. е. имеют соотношение 3,78 : 1, и вектор силы резания P совпадает с продольной осью зерна при его ориентации с $\Theta = 75^\circ 12'$.

Расчет и последующее сравнение напряжений для углов ориентации $\Theta = 67^\circ 30'$ и $\Theta = 75^\circ 12'$ показывают, что более рациональным для снижения максимальных напряжений является угол $\Theta = 67^\circ 30'$.

При дальнейшем увеличении угла ориентации в диапазоне от $\Theta = 67^\circ 30'$ до $\Theta = 123^\circ 45'$ происходит значительный рост напряжений до

наибольших наблюдаемых значений. Максимально нагруженная зона здесь – «зона слева» под свесом выступающей части зерна.

Вместе с тем полученные данные говорят о том, что во всех случаях более рациональным является ориентирование зерна вершиной навстречу направлению действия составляющей силы резания P_z . Это объясняется тем, что при ориентации зерна навстречу P_z вектор силы резания P находится вблизи от главной оси зерна. При ориентации зерна вершиной противоположно направлению P_z сила резания P действует под большими углами по отношению к главной оси зерна, создавая максимальные напряжения в «зоне слева» (рис. 4).

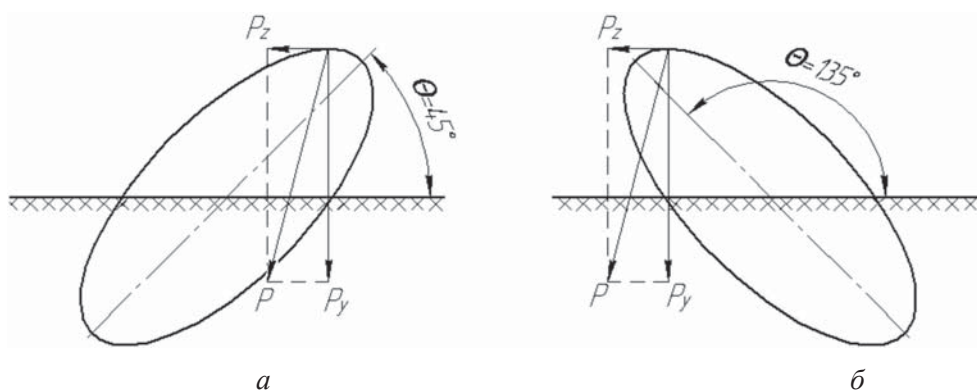


Рис. 4. Направление действия сил резания по отношению к главной оси зерна при его расположении вершиной навстречу силе P_z (а) и вершиной от направления действия силы P_z (б)

Аналогичные по характеру распределения данные (см. рис. 3) получены при исследовании напряжений в моделях зерна при различных вариантах ориентации и закреплении в связке до $2/3L$ и до $1/3L$. В результате обобщения всех полученных данных построен сводный график максимальных напряжений в модели шлифовального зерна 13A40H с $K_\Phi = 2,4$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации и глубинах закрепления в связке (рис. 5).

График (см. рис. 5) подтверждает, что, как и предполагалось, чем глубже закреплено зерно в связке, тем меньшие напряжения в нем возникают. При этом разница в значениях напряжений при закреплении зерна в связке до $2/3L$ и до $1/2L$ невелика. Существенный рост напряжений наблюдается при переходе к закреплению зерна в связке до $1/3L$ (выступании из связки на $2/3L$).

Характер изменения напряжений в зависимости от угла ориентации зерна во всех рассматриваемых случаях практически одинаков.

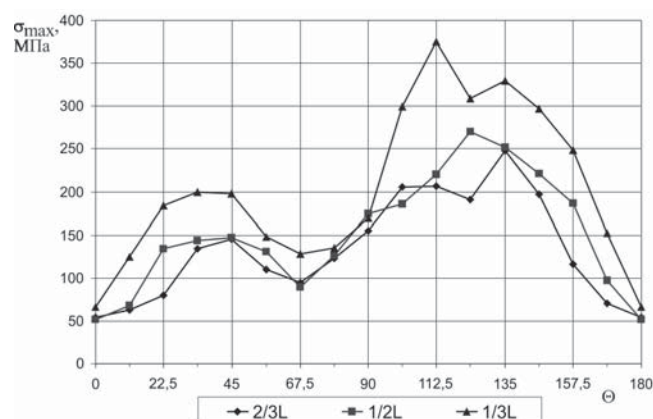


Рис. 5. Максимальные напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H с $K_\Phi = 2,4$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации и при закреплении в связке до $2/3L$, до $1/2L$ и до $1/3L$

Обобщая все приведенные данные, можно сделать вывод о том, что наименьшие напряжения по границе заделки зерен в связку (см. рис. 5) фиксируются при их тангенциальной ориентации относительно плоскости резания

($\Theta = 0^\circ$). Однако данный вариант ориентации зерен является наименее эффективным с точки зрения обеспечения процесса резания, поскольку передние углы зерен здесь достигают наименьших значений из возможных в рассматриваемом случае ($\gamma = -56^\circ$ при закреплении в связке до $1/2L$), и резание такими зернами весьма затруднено. Наиболее рациональным вариантом ориентации зерен в рассматриваемом случае является $\Theta = 67^\circ 30'$. При данном угле ориентации зерен относительно плоскости резания напряжения на их вершинах и по границе их заделки в связку незначительно отличаются от случая тангенциальной ориентации ($\Theta = 0^\circ$), а передние углы характеризуются рациональными значениями, близкими к нулевым ($\gamma = -3^\circ$).

Таким образом, при $\Theta = 67^\circ 30'$ шлифовальные зерна в отрезных кругах эффективно срезают металл и имеют при этом напряжения, близкие к минимально возможным при отрезном шлифовании.

Основные результаты исследования взаимосвязи величин напряжений в шлифовальных зернах с параметрами их формы и ориентации

Дальнейшие исследования по установлению рациональных углов ориентации зерен для нескольких разновидностей их формы ($K_\phi = 1,6$; $K_\phi = 2,4$; $K_\phi = 3,2$; $K_\phi = 4,0$; $K_\phi = 4,8$) и глубины заделки в связку выявили аналогичный характер распределения напряжений (рис. 6, а, б, в). Приведенные данные (рис. 6) также показывают, что для всех углов ориентации зерен при увеличении их коэффициента формы максимальные напряжения существенно возрастают. Так, при наиболее рациональном угле ориентации $\Theta = 67^\circ 30'$ при переходе от $K_\phi = 1,6$ до $K_\phi = 4,8$ (заделка в связку до $1/2L$) максимальные напряжения возрастают в 4,2 раза (с $\sigma_{\max} = 79,8$ МПа до $\sigma_{\max} = 335,6$ МПа). При наименее рациональном угле ориентации $\Theta = 123^\circ 75'$ при переходе от $K_\phi = 1,6$ до $K_\phi = 4,8$ максимальные напряжения возрастают в 7,7 раза (с $\sigma_{\max} = 187,7$ МПа до $\sigma_{\max} = 1443,9$ МПа).

Выявленные зависимости коррелируют с результатами испытаний по оценке износа отрезных кругов с контролируемой формой и ориентацией зерен [10] и подтверждают их. Так,

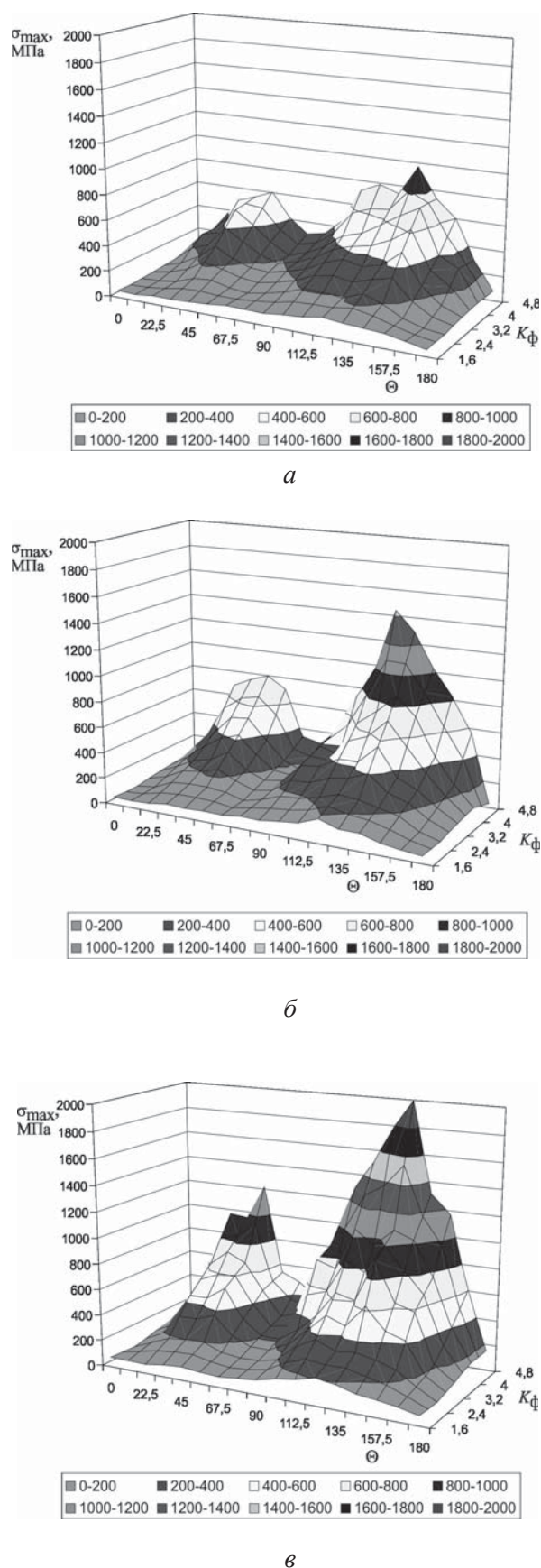


Рис. 6. Зависимости величин максимальных напряжений в моделях зерен 13A40H по границе заделки в связку от угла ориентации Θ и коэффициента формы K_ϕ при закреплении в связку до $2/3L$ (а), до $1/2L$ (б) и до $1/3L$ (в)

результаты оценки износа отрезных кругов с контролируемой формой зерен показывают, что с увеличением коэффициента формы зерен износ кругов существенно возрастает. Сравнение результатов испытаний отрезных кругов с тангенциальной ориентацией зерен ($\Theta = 0^\circ$), кругов с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$) и с радиальной ориентацией зерен ($\Theta = 90^\circ$) показывает, что наименьшим износом и минимальными величинами напряжений в зернах характеризуются инструменты с тангенциальной их ориентацией ($\Theta = 0^\circ$). Далее по возрастанию следуют обычные отрезные круги с неориентированными зернами ($\Theta = \text{var}$). Максимальный износ и максимальные величины напряжений в зернах сравниваемых отрезных кругов наблюдаются при радиальной ориентации зерен ($\Theta = 90^\circ$).

Анализ результатов оценки напряжений в шлифовальных зернах (см. рис. 6) и результатов испытаний отрезных кругов с заданной ориентацией и контролируемой формой зерен [10] показывает, что для обеспечения максимальной стойкости шлифовальных инструментов целесообразно использовать зерна изометрической формы (с минимальными значениями K_Φ), а также ориентировать шлифовальные зерна в тангенциальном направлении ($\Theta = 0^\circ$). Кроме того, анализ распределения напряжений в ориентированных зернах (см. рис. 6) и величин их передних углов (см. рис. 1) позволяет констатировать, что шлифовальные инструменты с достаточно высокой стойкостью и одновременно повышенной режущей способностью можно изготовить, ориентируя шлифовальные зерна под углами наклона, близкими к направлению вектора силы резания P , действующей на инструмент в процессе эксплуатации. Для отрезных шлифовальных кругов, изготавливаемых из зерен нормальных электрокорундов и используемых для обработки конструкционных сталей, при эксплуатации которых радиальная составляющая силы резания P_y в 3...5 раз превосходит тангенциальную составляющую P_z , может быть рекомендован рациональный угол ориентации зерен порядка $\Theta = 67^\circ 30'$.

Таким образом, представленная методика исследований, а также совместный анализ получаемых с ее помощью результатов позволяют обоснованно проектировать шлифовальные инструменты с рациональной геометрией зерен для конкретных условий обработки и параметров силового нагружения.

Экспериментальные исследования по установлению пределов прочности ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой

Для практической проверки разработанной методики исследований дополнительно проведены эксперименты по установлению пределов прочности шлифовальных зерен различных марок и зернистостей, с различными коэффициентами формы и направлениями ориентации путем их разрушения посредством одноосного сжатия на специальной установке, где моделировалось воздействие на зерна радиальной составляющей силы резания P_y .

Анализ условий работы единичных шлифовальных зерен в процессе резания показывает, что они находятся под действием сжимающей P_y и изгибающей P_z нагрузок, которые главным образом и определяют их напряженное состояние (см. рис. 4). Причем радиальная составляющая силы резания, как правило, значительно (в 2...9 раз) превосходит тангенциальную. Поэтому в большинстве методик по оценке прочности шлифовальных зерен реализуется схема одноосного сжатия (сдавливание навески зерен в пресс-форме, поштучное разрушение зерен в валковой дробилке и др.) [2, 9, 16, 22].

Известно, что определение прочности единичных зерен относится к стандартным методам оценки эксплуатационных показателей абразивных материалов (ТУ2-036-105-85). В соответствии с этим методом установление прочности единичных зерен осуществляют путем их поштучного сжатия и разрушения между двумя металлическими пластинками при постепенно возрастающей нагрузке. Для этой цели используют прибор ППЗ-1М, который имеет циферблатные весы, снабженные нагружающим устройством в виде штока, перемещаемого в вертикальном направлении с постоянной скоростью, и реверсивным электродвигателем. Шток опускается вниз, соприкасается с зерном, сжимает его и разрушает. Момент разрушения фиксируется путем визуального наблюдения за испытуемым зерном в микроскоп. Испытание считается законченным, когда неразрушенная часть зерна составляет менее половины его первоначального размера. Показателем прочности зерен во фракции служит средняя величина усилия разрушения 50 отдельных зерен.

У данного метода есть недостатки, в числе которых: отсутствие точного критерия момента разрушения зерен, отсутствие определенной ориентации зерен при испытании, трудоемкость проведения большого числа испытаний.

Для устранения этих недостатков разработана конструкция автоматической установки, являющаяся дальнейшим развитием испытательного оборудования подобного назначения [10]. Установка в автоматическом режиме обеспечивает возможность проведения испытаний в условиях, имитирующих радиальное либо тангенциальное расположение зерен на рабочей поверхности шлифовального круга. При радиальной ориентации испытуемого зерна его наибольшая ось совпадает с вектором действия усилия сжатия (перпендикулярна теоретической плоскости резания), а при тангенциальной – перпендикулярна данному вектору (параллельна теоретической плоскости резания). Радиальное (рис. 7) расположение зерна 2 на установке достигается за счет наличия продольного паза треугольной формы, выполненного в столе 5.

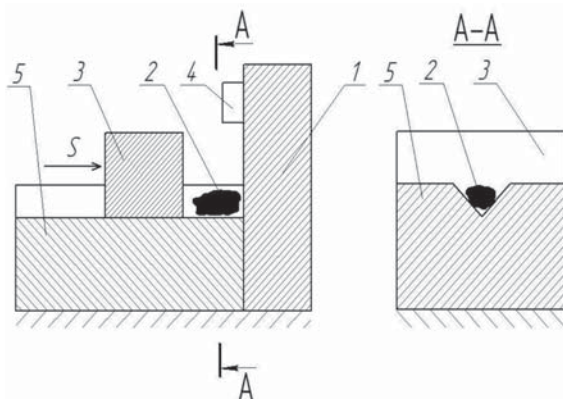


Рис. 7. Схема радиальной ориентации испытуемых шлифовальных зерен на установке для оценки их прочности

Шлифовальное зерно, попадая из питателя в этот паз, под действием силы тяжести занимает в нем положение, при котором его наибольшая ось становится параллельной вектору усилия сжатия. В подвижной пластине 3, которой осуществляется сжатие и разрушение зерна, имеется выступ, соответствующий по форме пазу в столе 5. Момент разрушения устанавливается с помощью датчика шума 4, а усилие разрушения – за счет тензодатчиков, встроенных в балку неподвижной пластины 1. Тангенциальная ориентация зерен на установке обеспечивается

посредством поворота стола на 90° так, чтобы поверхность неподвижной пластины 1 располагалась горизонтально. В этом случае зерна из питателя попадают на плоскость неподвижной пластины и располагаются на ней большей осью перпендикулярно вектору усилия сжатия.

На данной установке в отличие от предыдущих исследований, где оценивалась прочность только радиально ($\Theta = 90^\circ$) и тангенциально ($\Theta = 0^\circ$) ориентированных зерен [10], в ходе выполнения представленной работы были проведены испытания зерен при разнообразных углах их ориентации. При проведении испытаний зерна ориентировались под следующими углами: $\Theta = 0^\circ$, $\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$, $\Theta = 45^\circ (135^\circ)$, $\Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30')$, $\Theta = 90^\circ$. Это было достигнуто путем установки на неподвижную пластину 1 (см. рис. 7) дополнительной металлической пластинки прямоугольной формы с предварительно подготовленными углублениями и вклеенными в них под требуемым углом ориентации испытуемыми шлифовальными зернами (рис. 8). После разрушения одного зерна пластинка с зернами вручную перемещалась таким образом, чтобы следующее зерно оказалось под сжимающим наконечником (поз. 3, рис. 7).

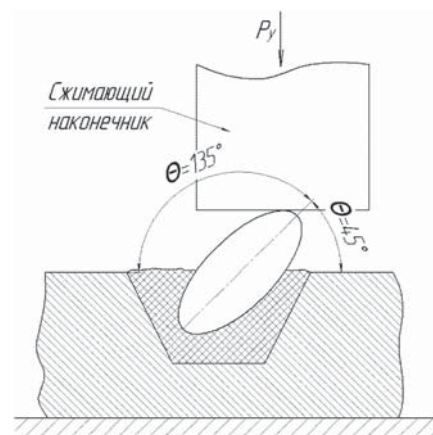


Рис. 8. Схема испытания ориентированных шлифовальных зерен на установке для оценки их прочности

При подготовке к проведению испытаний для каждого фиксированного угла ориентации зерен в исследуемой фракции отбиралось по 50 зерен. Перед вклейкой на пластинку у каждого шлифовального зерна определялся коэффициент формы, зерну присваивался порядковый номер, под которым оно подвергалось испытанию. Это позволяло установить взаимосвязь усилия раз-

рушения зерен от коэффициента их формы для различных углов ориентации. Заданная ориентация зерен обеспечивалась тем, что пластинки с подготовленными углублениями устанавливались и фиксировались на кондукторах с требуемым углом уклона относительно горизонтальной плоскости. В углубления наносился клеевой состав (эпоксидная смола, смешанная с отвердителем, близкая по свойствам к бакелитовой связке), после загустения которого зерна поштучно клеивались пинцетом. Шлифовальные зерна фиксировались в углублениях с вертикальным расположением их главных осей, а глубина заделки составляла $1/2L$.

На данной установке согласно описанной методике проведены исследования по установлению пределов прочности шлифовальных зерен двух различных марок и четырех зернистостей – нормальных электрокорундов 13A200H, 13A100H, 13A63H и карбида кремния черного 53C80H. В исследуемых фракциях абразива было испытано по 50 зерен при каждом выбран-

ном угле ориентации. Таким образом, цикл испытаний для одной фракции абразива состоял в разрушении 250 зерен с предварительно установленными коэффициентами формы. Полученные данные заносились в таблицы Excel, на основе которых строились диаграммы, выводились математические зависимости усилия разрушения зерен от коэффициента формы и сравнивались по коэффициентам корреляции.

Результаты исследования по установлению пределов прочности ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой

По результатам проведения экспериментов установлены зависимости усилия разрушения ориентированных зерен от коэффициента формы, наиболее достоверно отражающиеся экспоненциальными функциями, типичные представители которых приведены на графиках (рис. 9, 10) и в виде следующих математических моделей.

Усилия разрушения зерен нормального электрокорунда марки 13A200H:

$\Theta = 0^\circ$:	$P = 347,03 \cdot e^{-0,2086 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,63$
$\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$:	$P = 626,27 \cdot e^{-1,2195 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,79$
$\Theta = 45^\circ (135^\circ)$:	$P = 528,82 \cdot e^{-0,9246 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,70$
$\Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30')$:	$P = 382,84 \cdot e^{-0,6296 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,67$

Усилия разрушения зерен нормального электрокорунда марки 13A100H:

$\Theta = 90^\circ$:	$P = 447,19 \cdot e^{-0,6275 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,70$
$\Theta = 0^\circ$:	$P = 120,28 \cdot e^{-0,2327 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,58$
$\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$:	$P = 471,75 \cdot e^{-1,62 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,77$
$\Theta = 45^\circ (135^\circ)$:	$P = 275,76 \cdot e^{-1,2577 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,71$
$\Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30')$:	$P = 254,91 \cdot e^{-1,029 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,69$
$\Theta = 90^\circ$:	$P = 179 \cdot e^{-0,7186 \cdot K\Phi}$,	$R^2 = 0,55$

Полученные результаты позволяют констатировать:

- усилия разрушения зерен и их прочность достаточно ощутимо зависят как от фактора формы, так и от фактора пространственной ориентации;

- независимо от направления ориентации с увеличением коэффициента формы зерен усилие их разрушения уменьшается, т. е. при прочих равных условиях изометрические зерна более прочны, чем игольчато-пластинчатые;

- наиболее эффективным с точки зрения обеспечения прочности зерен при одноосном

сжатии является вариант их тангенциальной ориентации ($\Theta = 0^\circ$), далее по убыванию следует случай их радиальной ориентации ($\Theta = 90^\circ$), когда главные оси зерен совпадают с вектором воздействующей сжимающей нагрузки, затем $\Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30')$ и наименее рациональными являются углы ориентации $\Theta = 45^\circ (135^\circ)$ и $\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$;

- разница в прочности различно ориентированных зерен тем более заметна, чем больший коэффициент формы они имеют.

Для адекватного сопоставления результатов оценки напряженного состояния зерен при

работе в отрезных шлифовальных кругах (см. рис. 6, а, б, в) с результатами прочностных испытаний шлифовальных зерен методом одноосного сжатия (см. рис. 9, 10) ввиду различий в схемах нагружения зерен проведен дополнительный анализ напряжений, возникающих в шлифовальных зернах под воздействием силы резания (т. е. совместного воздействия ее составляющих P_y и P_z) и отдельного воздействия сжимающей силы P_y (рис. 11).

Анализ полученных данных (рис. 11) показывает, что график распределения максимальных напряжений в шлифовальных зернах при различных углах ориентации от действия сжимающей силы P_y соответствует результатам испытаний на прочность ориентированных шлифовальных зерен методом одноосного сжатия (см. рис. 9, 10). Наименьшие напряжения в зернах возникают при их тангенциальной ориентации ($\Theta=0^\circ$) и соответственно для разрушения зерен при данном варианте ориентации требуются наибольшие усилия. Далее по возрастанию напряжений следует случай радиальной ориентации зерен

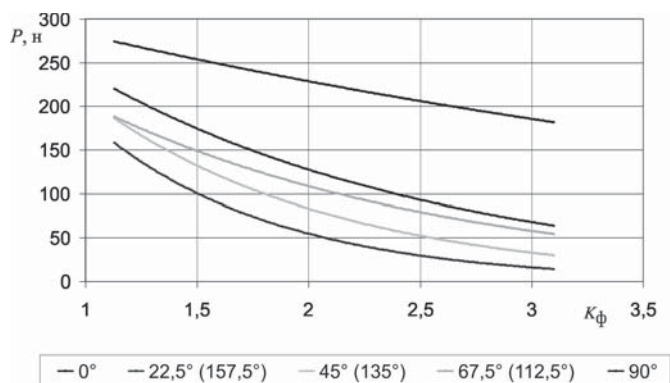


Рис. 9. Зависимости усилия разрушения P шлифовальных зерен 13A200H от коэффициента формы K_Φ при различных углах ориентации Θ

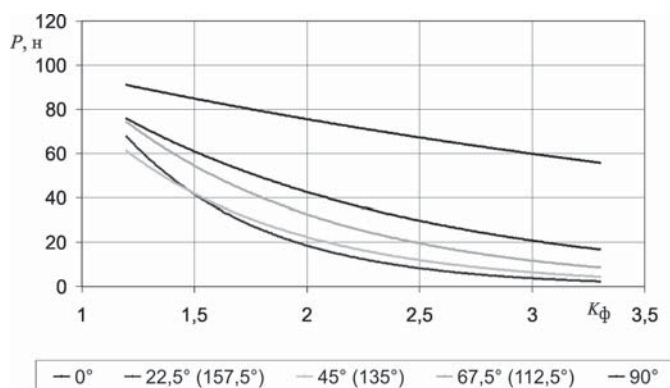


Рис. 10. Зависимости усилия разрушения P шлифовальных зерен 13A100H от коэффициента формы K_Φ при различных углах ориентации Θ

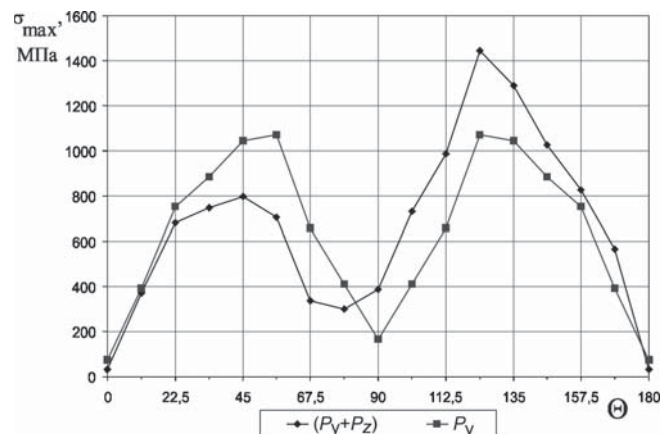


Рис. 11. Максимальные напряжения в модели шлифовального зерна 13A40H с $K_\Phi = 4,8$ по границе заделки в связку при различных углах ориентации, закреплении до $1/2L$ под действием силы резания ($P_y + P_z$) и отдельно P_y

($\Theta = 90^\circ$), а наибольшие напряжения в зернах фиксируются при углах ориентации $\Theta = 45^\circ (135^\circ)$ и $\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$, что коррелирует с результатами прочностных испытаний зерен.

Анализ данных (см. рис. 10) показывает также, что наличие P_z в сравнении со случаем одноосного сжатия зерен приводит к тому, что наименьшие максимальные напряжения в зернах (после варианта их тангенциальной ориентации) фиксируются при углах ориентации, практически совпадающих или близких к направлению вектора результирующей силы резания P (в данном случае $\Theta = 67^\circ 30'$ и $\Theta = 78^\circ 45'$). Кроме того, воздействие P_z в диапазоне углов ориентации $\Theta = 0 \dots 90^\circ$ приводит к более равномерному распределению напряжений в теле зерен и снижению их максимальных величин, а в диапазоне углов ориентации $\Theta = 90 \dots 180^\circ$ воздействие P_z приводит к концентрации напряжений под свесом выступающей части зерен и росту их максимальных значений. При этом очевидно, что с уменьшением соотношения величин P_y и P_z выявленные отличия картины напряжений от варианта одноосного сжатия будут возрастать. Это дополнительно подтверждает, что для каждого инструмента и вида шлифования целесообразно находить рациональные углы ориентации зерен с учетом всех особенностей их нагружения в инструменте.

Выводы

Таким образом, в представленной работе удалось разработать и реализовать на практике методику по анализу передних углов и напряжений

у ориентированных шлифовальных зерен с контролируемой формой. В ходе разработки методики созданы и зарегистрированы программы для ЭВМ по количественной оценке формы шлифовальных зерен и их передних углов при различных вариантах ориентации. Экспериментальным путем установлено, что разработанная методика пригодна для проектирования шлифовальных инструментов с рациональной геометрией зерен. Кроме того, в процессе исследований подтверждено, что факторы формы и ориентации шлифовальных зерен существенно влияют на их передние углы и прочность и, как следствие, на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов в целом. Результаты исследований показывают, что совместное упорядочение факторов формы и ориентации зерен открывает перспективу дальнейшего повышения эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов и возможность проектирования инструментов с заданными свойствами.

Установлено также следующее:

- для достижения максимальной режущей способности шлифовальных инструментов, снижения деформаций обрабатываемого материала и температуры резания необходимо применять зерна игольчато-пластинчатой формы (с максимальными значениями K_{ϕ}) и располагать их в инструментах под углами ориентации порядка $\Theta = 22,5 \dots 45^\circ$;

- для обеспечения максимальной стойкости шлифовальных инструментов, при прочих равных условиях, целесообразно использовать зерна изометрической формы (с минимальными значениями K_{ϕ}), а также ориентировать шлифовальные зерна в тангенциальном направлении ($\Theta = 0^\circ$);

- шлифовальные инструменты с повышенной режущей способностью и одновременно с достаточно высокой стойкостью можно изготовить, ориентируя шлифовальные зерна под углами наклона, близкими к направлению вектора силы резания P , действующей на инструмент в процессе эксплуатации;

- для отрезных шлифовальных кругов, изготавливаемых из зерен нормальных электрокорундов и используемых для обработки конструкционных сталей, при эксплуатации которых радиальная составляющая силы резания P_y в 3...5 раз превосходит тангенциальную составля-

ющую P_z , может быть рекомендован рациональный угол ориентации зерен порядка $\Theta = 67^\circ 30'$.

Реализовать перечисленные выводы и рекомендации на практике можно путем применения запатентованного способа изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами [17] и упорядочения формы зерен.

Список литературы

1. Любомудров В.Н. Абразивные инструменты и их изготовление / В.Н. Любомудров, Н.Н. Васильев, Б.И. Фальковский. – М.; Л.: МАШГИЗ, 1953. – 375 с.
2. Opitz H. Untersuchug der Eigenschaften von Schleifkörpern und ihr Verhalten im Schleifvorgang / H. Opitz, J. Peklenik, K. Brückner / – Köln und Opladen: Westdeutscher Verlag, 1964. – 63 S.
3. Лурье Г.Б. Абразивные инструменты и их эксплуатация. – М.: Машиностроение, 1971. – 62 с.
4. Коротков А.Н. Эксплуатационные свойства абразивных материалов : монография. – Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. – 122 с.
5. Абразивная и алмазная обработка. Справочник / под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
6. Грановский Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
7. Ваксер Д.Б. Пути повышения производительности при шлифовании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.
8. Зайцев А.Г. Влияние формы алмазного зерна на износостойкость круга при шлифовании твердых сплавов // Вестник машиностроения. – 1975. – № 2. – С. 76–77.
9. Коротков А.Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов: монография / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2005. – 232 с.
10. Коротков В.А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов: монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 178 с.
11. Абразивные материалы и инструменты. Каталог / под. ред. В.Н. Тыркова. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 358 с.
12. Плисс Д.А. Вибрационные сепараторы / Д.А. Плисс, В.А. Анахин, В.Н. Монахов. – М.: Недра, 1991. – 157 с.
13. Люкин В.С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путем использования зерен с контролируемой формой и ориентацией: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Кемерово, 2007. – 25 с.
14. А. с. 582957 СССР, М. Кл³. В 24D 3/00. Способ изготовления абразивного инструмента / В.И. Зайцев. – № 2198300/25-08; заявл. 11.12.75; опубл. 05.12.77, Бюл. № 45. – 2 с.

15. А. с. 1495100 СССР, М. Кл.³. В 24D 5/00. Способ изготовления абразивного инструмента / Б.Н. Бирюков, И.М. Буюкли, Л.В. Попова и др. – № 4281271/31-08; заявл. 13.07.87; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27. – 3 с.
16. Ковальчук Ю.М. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глазовский и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.
17. Патент на изобретение № 2369474. Способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами / В.А. Коротков. – № 2008105086; заявл. 11.02.08; опубл. 10.10.09. Бюл. № 28.
18. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613051. Форма шлифовальных зерен в объеме / В.А. Коротков, Г.М. Рылов. – № 2006612327; заявл. 4.07.06; опубл. 1.09.06.
19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614263. Угол наклона шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011612443; заявл. 8.04.11; опубл. 30.05.11.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615114. Передние углы ориентированных шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011613167; заявл. 4.05.11; опубл. 29.07.11.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616506. Геометрические модели шлифовальных зерен / В.А. Коротков, Е.М. Минкин. – № 2011614679; заявл. 27.06.11; опубл. 19.08.11.
22. Комине С. Испытание прочности алмазных зерен / С. Комине, А. Охара // ВЦП – № Ц-56600; пер. с яп. яз. – Кикай косаку. 1963. Т. 10. – № 55. – С. 42–49.

OBRAHOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 62–67

Geometry and stress condition of the oriented abrasive grains with controlled form

Korotkov V.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: korotkov-va@mail.ru

Minkin E.M., Engineer

Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 28 Vesennaya st., 650000, Kemerovo, Russian Federation

Abstract

The efficiency of the polishing process is determined by the properties of abrasive grains, including its form and orientation in the body of the grinding tool. It is possible to improve the operational factors of the grinding instruments by ordering of the grain geometry, selection of the rational form and orientation of abrasive grains for specific processing conditions and parameters of the power load. To solve this problem the research technique for estimation of the abrasive grains front angle parameter and tension value parameter with the form and orientation parameters is proposed. The offered technique is successfully tested in practice. During the development of this technique the interrelation of the alumina abrasive grain front angle parameter with the form, orientation and wear parameters is found. It is established that the minimum values of the front angles are fixed at grains of an isometric form and tangentially oriented grains. The maximum values of front angles are fixed at the needle and lamellar grains oriented under angles $\Theta = 22,5^\circ \div 45^\circ$ to the cutting plane. The analysis of tension in the orientated alumina abrasive grains of various forms in cutting discs is also made. It is established that for cutting discs the rational angle of the abrasive grains orientation is about $\Theta = 67^\circ 30'$. Practical enquiry of the developed technique is made by carrying out the experiments for determination of ultimate strength of the orientated abrasive grains with a controlled form of various brands and sizes by monoaxial compression.

Keywords:

polishing process, grinding instruments, cutting discs, abrasive grains, front angle of the abrasive grains, the form parameter coefficient, orientation angle of the abrasive grains, wear out of the abrasive grains, stress value in the abrasive grains, solidity of the abrasive grains.

References

1. Liubomudrov V.N., Vasil'ev N.N., Fal'kovskii B.I. *Abrazivnye instrumenty i ikh izgotovlenie* [Abrasive tools and their fabrication]. Moscow – Leningrad, MASHGIZ Publ., 1953. 375 p.
2. Opitz H., Peklenik J., Brückner K. Untersuchug der Eigenschaften von Schleifkörpern und ihr Verhalten im Schleifvorgang. Köln und Opladen. Westdeutscher Verlag, 1964. 63 p.
3. Lur'e G.B. *Abrazivnye instrumenty i ikh ekspluatatsiia* [Abrasive tools and their operation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 62 p.
4. Korotkov A.N. *Ekspluatatsionnye svoistva abrazivnykh materialov: monografiia* [Operational properties of abrasives: monograph]. Krasnoyarsk, KraSU Publ., 1992. 122 p.
5. Reznikov A.N., Aleksentsev E.I., Barats Ya.I. et al. *Abrazivnaia i almaznaia obrabotka. Spravochnik* [Abrasive and diamond processing. Handbook.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 391 p.
6. Granovskii G.I., Granovskii V.G. *Rezanie metallov* [Cutting metals]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1985. 304 p.
7. Vakser D.B. *Puti povysheniia proizvoditel'nosti pri shlifovanii* [Ways to increase productivity in grinding]. Moscow, BMSTU Publ., 2001. 448 p.
8. Zaitsev A.G. Vliianie formy almaznogo zerna na iznosostoikost' kruga pri shlifovanii tverdykh splavov [Influence of the shape of the diamond grains on the wear resistance range for grinding carbide]. *Vestnik Mashinostroeniya - Russian Engineering Research*, 1975, no. 2, pp. 76–77.
9. Korotkov A.N. *Povyshenie ekspluatatsionnykh vozmozhnostei shlifoval'nykh instrumentov: monografiia* [Improving operational capability of grinding tools: Monograph]. Kemerovo, KuzSTU Publ., 2005. 232 p.
10. Korotkov V.A. *Povyshenie ekspluatatsionnykh vozmozhnostei otreznykh shlifoval'nykh krugov: monografiia* [Improving operational capability cutting grinding wheels: Monograph]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 178 p.
11. Tyrkov V.N., Burov V.S., Glagovskii B.A., Grigor'eva N.I. et al. *Abrazivnye materialy i instrumenty. Katalog* [Abrasive materials and tools. Catalogue]. Moscow, VNIITEMR Publ., 1986. 358 p.
12. Pliss D.A., Anakhin V.A., Monakhov V.N. *Vibratsionnye separatory* [Vibratory separators]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 157 p.
13. Liukshin V.S. *Povyshenie rabotosposobnosti shlifoval'nykh lent putem ispol'zovaniia zeren s kontroliruemoi formoi i orientatsiei*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improving efficiency of grinding bands by use of a controlled grain shape and orientation. Author's abstract of Dr. tech. sci. diss.]. Kemerovo, 2007. 25 p.
14. Zaitsev V.I. *Sposob izgotovleniia abrazivnogo instrumenta* [A method for manufacturing abrasive tools]. Author's Certificate USSR, no. 582957, 1977.
15. Biriukov B.N., Buiukli I.M., Popova L.V. et al. *Sposob izgotovleniia abrazivnogo instrumenta* [A method for manufacturing abrasive tools]. Author's Certificate USSR, no. 1495100, 1989.
16. Koval'chuk Yu.M., Bukin V.A., Glagovskii B.A. et al. *Osnovy proektirovaniia i tekhnologiia izgotovleniia abrazivnogo i almaznogo instrumenta* [Basis of design and fabrication of abrasive and diamond tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 288 p.
17. Korotkov V.A. *Sposob izgotovleniia shlifoval'nykh instrumentov s orientirovannyimi zernami* [Method of manufacturing grinding tools with a grain-oriented]. Patent RF, no. 2369474, 2009.
18. Korotkov V.A., Rylov G.M. *Forma shlifoval'nykh zeren v ob'eme* [Shape of grinding grains in a volume]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2006613051, 2006.
19. Korotkov V.A., Minkin E.M. *Ugol naklona shlifoval'nykh zeren* [Tilt angle of grinding grains]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2011614263, 2011.
20. Korotkov V.A., Minkin E.M. *Perednie ugly orientirovannykh shlifoval'nykh zeren* [Hook angles of grinding grain oriented]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2011615114, 2011.
21. Korotkov V.A., Minkin E.M. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia* [Geometric model of grinding grains]. Certificate of official registration of computer programs, no. 2011616506, 2011.
22. Komine S., Okhara A. *Ispytanie prochnosti almaznykh zeren* [Test the strength of diamond grains. Japanese translation: Kikai kosaky]. 1963, Vol. 10, no. 55, pp. 42–49.

Received 10 January 2014

Revised 30 April 2014

Accepted 17 May 2014

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

С.В. КОПЕЙКИН, начальник
производственно-технической службы
по новой технике

П.А. ПИЛИПЕНКО, ведущий специалист
производственно-технической службы
по новой технике

А.Р. ИНГЕМАНССОН, канд. техн. наук,
ведущий специалист отдела главного технолога
(ОАО «ПО «Баррикады», г. Волгоград)

Поступила 7 апреля 2014

Рецензирование 15 мая 2014

Принята к печати 17 мая 2014

Ингеманссон А.Р. – 400071, г. Волгоград, пр. Ленина, 71,
ОАО «ПО «Баррикады», e-mail: ingemanssonar@barricady.ru

Обработка глубоких отверстий традиционно связана с трудностями обеспечения работоспособности режущего инструмента и качества получаемых поверхностей. Износ головок для глубокого сверления обуславливает получение отверстий с отклонением геометрических размеров и формы от технических условий на изготовление деталей. Для решения представленной проблемы в статье предлагается выполнять чистовую обработку глубоких отверстий с использованием разверток из быстрорежущей стали, специально доработанных для применения на станке для глубокого сверления и упрочненных твердым сплавом. Упрочнение производится методом электроискрового легирования на портативной промышленной установке. Для повышения эффективности процесса развертывания предложено поочередное комбинирование упрочненных и неупрочненных зубьев развертки. Производственные испытания показали увеличение работоспособности упрочненных разверток при обработке глубоких отверстий.

Ключевые слова: глубокое сверление, развертка, электроискровое легирование, работоспособность инструмента.

Введение

Обработка глубоких отверстий (отношение длины L обрабатываемого отверстия к его диаметру d_0 соответствует $L/d_0 > 5$) традиционно связана с трудностями обеспечения работоспособности режущего инструмента и качества получаемых поверхностей [1, 2]. Нередко при сверлении глубоких отверстий необходима чистовая (окончательная) обработка, что определяется техническими условиями на изготовление деталей и в некоторых случаях износом сверлильных головок. Особые требования предъявляются к работоспособности инструмента, в

частности, головок для глубокого сверления при изготовлении деталей из труднообрабатываемых сталей [3].

Применяемые на производстве головки для глубокого сверления имеют низкую стойкость как режущих, так и направляющих пластин, обусловленную физико-механическими свойствами обрабатываемых материалов – конструкционных высоколегированных сталей после различных стадий термообработки. Нередко на практике возникает проблема, заключающаяся в размерном износе сверлильной головки при обработке глубокого отверстия. Результатом износа является получение отверстий с отклонением

геометрических размеров и формы (конусность) от требований, заданных техническими условиями на изготовление деталей. Для решения представленной проблемы при чистовой обработке глубоких отверстий предлагается использование разверток из быстрорежущей стали с доработкой для применения на станке глубокого сверления и упрочненных твердым сплавом. Развертка улучшает шероховатость и точность отверстия после предшествующей обработки. Однако большой путь резания, приходящийся на режущую кромку при обработке глубоких отверстий, обуславливает интенсивное изнашивание инструмента при обработке партии деталей.

Для повышения работоспособности разверток при обработке глубоких отверстий предлагается использование электроискрового легирования режущих зубьев инструмента. Метод электроискрового легирования, заключающийся в нанесении на режущие кромки стального инструмента слоя карбидных частиц, позволяет увеличить стойкость инструмента при сохранении высокого сопротивления ударной нагрузке. Данный метод упрочнения в настоящее время наиболее доступен для предприятий машиностроительной отрасли, так как не требует сложного дорогостоящего оборудования, прост в наладке и эксплуатации, отличается безопасностью процесса и поддается автоматизации [4].

Основными областями применения технологии электроискрового легирования являются: повышение стойкости металлорежущего и деревообрабатывающего инструмента; повышение долговечности прессовой и штамповой оснастки, литейной оснастки; нанесение упрочняющего слоя на поверхности трения деталей машин [5, 6].

Метод электроискрового легирования основан на переносе материала электрода-анода на электрод-катод при электроискровом разряде в газовой среде. В процессе электроискрового упрочнения возникает периодический электрический разряд, сопровождающийся мгновенным освобождением электрической энергии, резким повышением температуры искры и ионизацией межэлектронного пространства, в результате чего расплавляются границы зерен вокруг карбидных частиц электродного материала. Данные частицы под действием электродвижущих сил перемещаются с большой скоростью к поверхности обрабатываемого материала и внедряются в него, образуя износостойкое покрытие [7, 8, 9].

Таким образом, целью работы является повышение эффективности чистовой обработки глубоких отверстий. Достижение поставленной цели планируется за счет использования специально доработанных разверток, режущие зубья которых упрочнены методом электроискрового легирования.

Методика экспериментального исследования

Для чистовой обработки глубоких отверстий были применены нормализованные развертки (рис. 1) со следующими характеристиками: количество зубьев – 8; наклон зубьев – левый; материал рабочей части – быстрорежущая сталь Р6М5 [10]. С целью повышения износостойкости развертки и гарантированного выполнения технических условий на изготовление деталей с глубиной обработки отверстия более 900 мм на режущие зубья инструмента нанесен твердый сплав марки Т15К6 [11, 12]. Упрочнение осуществлялось на портативной промышленной электроискровой установке ЭИУ-1 [13] на следующих режимах: рабочее напряжение – 20 В, сила тока – 1 А. Толщина нанесенного слоя составила 0,005 мм. Твердый сплав наносился через один зуб развертки, т. е. было получено 4 упрочненных зуба и 4 необработанных.

Для возможности выполнения глубокого сверления крепежный хвостовик с конусом Морзе заменен на резьбовое соединение для закрепления в стебле. Также для этой цели вдоль оси развертки сверлом АЗ399ХРЛ-9 с покрытием «Titex» (фирма «Walter», Германия) просверлено сквозное отверстие для отвода СОЖ при обработке по одноштанговой системе (STS-Single Tube System [14]) (рис. 2).

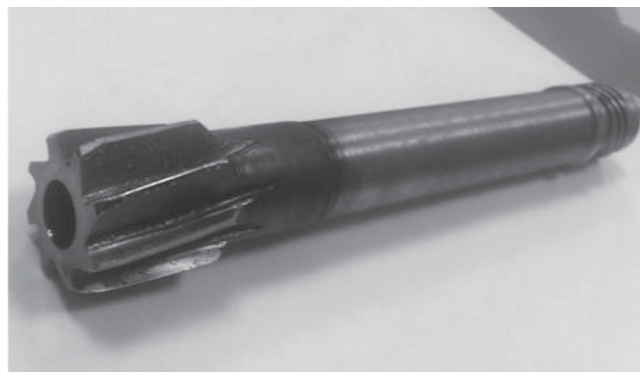


Рис. 1. Развертка, использовавшаяся при обработке глубокого отверстия



а



б

Рис. 2. Доработка развертки для возможности использования на станке для глубокого сверления:

а – хвостовик с резьбовым соединением для крепления в сверлильном стебле; б – сквозное отверстие для отвода СОЖ

Обработка деталей выполнялась на станке для глубокого сверления модели «ОС 4816» с использованием СОЖ МР-7, ТУ 0253-016-70351853–2008. Обрабатываемое отверстие: диаметр $d_0 = 22\text{H}10^{(+0,084)}$, длина $l = 915$ мм; $l/d_0 = 41,6$. Тип отверстия: сквозное. Требуемая шероховатость поверхности обработанного отверстия – Ra 2,5. Обрабатываемый материал: конструкционная высоколегированная сталь 34ХН1М (HRC 30,8). Режимы резания: частота вращения инструмента $n = 170$ об/мин; минутная подача $s = 100$ мм/мин; глубина резания $t = 0,25$ мм. Объем партии – 14 деталей.

Результаты и обсуждение

После обработки всей партии деталей средний износ по задней поверхности зубьев составил $h_3 = 0,25$ мм. Обработанные отверстия всей партии деталей (14 штук) соответствовали техническим условиям на изготовление по точности размера, точности формы и величине шероховатости поверхности ($d_0=22\text{H}10^{(+0,084)}$; Ra 2,5).

Совокупный эффект повышения работоспособности инструмента и обеспечения заданных параметров шероховатости обработанной поверхности был получен за счет нанесения твердого сплава через один зуб развертки. Данное решение обусловлено тем, что лезвия твердосплавного инструмента имеют менее острую геометрию заточки, чем инструмент из быстрорежущей стали. Поэтому после прохода упрочненного зуба материал обработанной поверхности упруго восстанавливается на величину, удаляемую вступающим следом в работу неупрочненным зубом из быстрорежущей ста-

ли. Таким образом, упрочненные зубья развертки обеспечивают повышение работоспособности инструмента, а неупрочненные – получение требуемой микрогеометрии обработанной поверхности.

Высокая эффективность использования упрочненных разверток обусловлена также следующим фактором. Более высокая упругая вязкость быстрорежущих сталей является преимуществом по сравнению с применением твердого сплава при производстве инструментов. Однако инструментальные стали отличаются меньшей

износостойкостью. Электроискровое легирование режущего инструмента позволяет совместить преимущества высокой упругой вязкости быстрорежущих сталей с износостойкостью твердых сплавов. Лезвия инструментов из быстрорежущей стали традиционно имеют твердость HRC 63...66. Поверхностная твердость соединения, полученного электроискровым легированием, по данным [7, 15], достигает HRC 72...80.

Использование электроискрового легирования зубьев развертки позволило существенно повысить производительность обработки. Согласно рекомендациям [16] для описанных в статье условий и режимов обработки расчетная скорость резания при развертывании должна составлять 8,6 м/мин. Согласно экспериментальным данным, приведенным в статье, скорость резания при использовании упрочненной развертки составляла 11,7 м/мин. Таким образом, было достигнуто повышение скорости резания на 36 %.

Выводы

Использование разверток, режущие зубья которых упрочнены методом электроискрового легирования, является способом повышения эффективности чистовой обработки глубоких отверстий. Повышение эффективности процесса реализуется в следующих направлениях:

- специальная доработка позволяет использовать развертки для выполнения чистовых операций на станках для глубокого сверления;
- электроискровое легирование зубьев быстрорежущих разверток позволяет повысить рекомендуемые значения скорости резания;

– способ нанесения твердого сплава через один зуб развертки позволяет совместить повышение работоспособности инструмента с обеспечением заданного качества обработанного глубокого отверстия.

Список литературы

1. *Обработка глубоких отверстий* / Н.Ф. Уткин [и др.]; под ред. Н.Ф. Уткина. – Л.: Машиностроение, 1988. – 269 с.
2. *Троицкий Н.Д.* Глубокое сверление / Н.Д. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1971. – 176 с.
3. *Шерстобитов Г.А.* Пути улучшения конструкции спиральных сверл для обработки глубоких отверстий в нержавеющей сталях / Г.А. Шерстобитов. – М.: Изд-во ЦНИИ ИТЭИ, 1987. – 35 с.
4. *Лазерное и электроискровое упрочнение материалов* / В.С. Коваленко [и др.]. – М.: Наука, 1986. – 276 с.
5. *Жигалко Н.И.* Проектирование и производство режущих инструментов / Н.И. Жигалко, В.В. Киселев; под ред. П.И. Ящерицына. – Минск: Вышэйш. школа, 1969. – 280 с.
6. *Логинов Н.Ю.* Увеличение ресурса режущего инструмента методом электроискрового легирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Н.Ю. Логинов. – Тольятти, 2005. – 140 с.
7. *Чехмахчев Л.Х.* Отдельные вопросы оптимизации нанесения износостойких покрытий на режущий инструмент / Л.Х. Чехмахчев, В.А. Герштейн, Ю.Ю. Юрасов // Повышение стойкости металлорежущего инструмента: Материалы межотраслевых н.-т. конференций, совещаний, семинаров и выставок. – ВИМИ. – 1981. – С. 4–12.

8. *Верхотуров А.Д.* Обобщенная модель процесса электроискрового легирования / А.Д. Верхотуров // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – 1983. – № 1. – С. 3–6.

9. *Мулин Ю.И.* Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании / Ю.И. Мулин, В.В. Гостищев, Д.В. Ярков // Физика и химия обработки материалов. – 2000. – № 3. – С. 50–56.

10. *Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник* / В.И. Баранчиков [и др.]; под общ. ред. В.И. Баранчикова. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.

11. *Тимошенко В.А.* Избирательное нанесение покрытий на режущий инструмент / В.А. Тимошенко, Е.В. Голдыш, А.В. Тимошенко // СТИН. – 1995. – № 11. – С. 20–22.

12. *Электроодные материалы для электроискрового легирования* / А.Д. Верхотуров [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 224 с.

13. А. с. № 837715 СССР, МПК В 23 Р 1/18. Устройство для электроискрового упрочнения / С.В. Копейкин, В.К. Шаповал. – 1992, Бюл. № 40.

14. Sandvik Coromant. Глубокое сверление: Каталог продукции. – Швеция: Sandvik Coromant, 2008. – 162 с.

15. *Тополянский П.А.* Опыт нанесения электроискровых покрытий на режущий инструмент и штамповую оснастку / П.А. Тополянский // Металлообработка. – 2004. – № 6. – С. 37–40.

16. *Справочник технолога-машиностроителя*. В 2 т. Т. 2. / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского [и др.]. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 942 с.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 78–82

Improving the efficiency of deep hole finish machining

Kopeikin S.V., Head of Production and Technical Services for New Technology

Pilipenko P.A., Advanced Engineer Production and Technical Services for New Technology

Ingemansson A.R., Ph.D. (Engineering), Advanced Engineer of the Chief Technologist, e-mail: ingemanssonar@barricady.ru

Publicly Traded Company “Production Association “Barricades”, 71 Lenina avenue, Volgograd, 400071, Russian Federation

Abstract

Machining of the deep holes is traditionally associated with the difficulties of the cutting tools performance assurance and quality of the machined surface. Wear of the deep holes drilling heads is responsible for dependence between getting holes with deviation dimensions and shape and the technical conditions for the production of parts.

To solve this problem it is suggested to make finish machining of deep holes with application of the high-speed steel reamers, hardened by carbides, and having special construction for application on the deep hole drilling machine. The hardening process is realized by electro-spark treatment with the portable industrial device. To improve the efficiency of the reaming process, the combination of hardened and non-hardened reamer teeth is suggested. Field tests showed an improved the efficiency of hardened reamers working performance at deep hole machining operations.

Keywords:

deep hole drilling, reamer, electro-spark treatment, tools working performance.

References

1. Utkin N.F. Kizhniaev Iu.I., Pluzhnikov S.K., Shamanin A.A., Drozdov F.M., Nemtsev B.A., Bychkov N.A., Borzov V.F. *Obrabotka glubokikh otverstii* [Treatment of of deep holes]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 269 p.
2. Troitskii N.D. *Glubokoe sverlenie* [Deep-hole drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 176 p.
3. Sherstobitov G.A. *Puti uluchsheniia konstruktssii spiral'nykh sverl dlia obrabotki glubokikh otverstii v nerzhaveiushchikh staliakh* [Ways to improve the design of twist drills for deep holes in stainless steels]. Moscow, TsNII ITEI Publ., 1987. 35 p.
4. Kovalenko V.S., Verkhoturov A.D., Golovko L.F., Podcherniaeva I.A. *Lazernoe i elektroerozionnoe uprochnenie materialov* [Laser and electrodischarge hardening materials]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 276 p.
5. Zhigalko N.I., Kiselev V.V. *Proektirovanie i proizvodstvo rezhushchikh instrumentov* [Design and manufacture of cutting tools]. Minsk, Vysshaia shkola Publ., 1969. 280 p.
6. Loginov N.Yu. *Uvelichenie resursa rezhushchego instrumenta metodom elektroiskrovogo legirovaniia*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increased resource cutter by electric spark alloying. Dr. tech. sci. diss.]. Togliatti, 2005. 140 p.
7. Chekhmakhchev L.Kh., Gershtein V.A., Iurasov Yu.Yu. [Single questions of optimization of wear-resistant coatings on cutting tools]. *Povyshenie stoikosti metallorazhushchego instrumenta: Materialy mezhotraslevykh nauchno-tekhnicheskikh konferentsii, soveshchani, seminarov i vystavok* [Materials of interbranch scientific and technical conferences, meetings, seminars and exhibitions "Increasing resistance of cutting tools"]. Moscow, VIMI, 1981, pp. 4-12. (In Russian).
8. Verkhoturov A.D. Obobshchennaia model' protsessa elektroiskrovogo legirovaniia. [Generalized model of electric spark alloying]. *Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki – Electrophysical and electrochemical processing methods*, 1983, no. 1, pp. 3–6.
9. Mulin Yu.I., Klimova L.A., Yarkov D.V. Fenomenologicheskoe opisaniie zakonornostei formirovaniia poverkhnostnogo sloia pri elektroiskrovom legirovanii [Phenomenological description of regularities of surface layers formation under electric-spark alloying]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov – Inorganic Materials: Applied Research*, 2000, no. 3, pp. 50–56.
10. Baranchikov V.I., Zharinov A.V., Iudina N.D., Sadykhov A.I. *Progressivnye rezhushchie instrumenty i rezhimy rezaniia metallov: Spravochnik* [Advanced cutting tools and cutting metals: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 400 p.
11. Timoshenko V.A., Goldysh E.V., Timoshenko A.V. Izbiratel'noe nanesenie pokrytii na rezhushchii instrument [Selective coating of cutting tool]. *STIN - Russian Engineering Research*, 1995, no. 11, pp. 20–22.
12. Verkhoturov A.D., Podcherniaeva I.A., Priadko L.F., Egorov F.F. *Elektrodnye materialy dlia elektroiskrovogo legirovaniia* [Electrode materials for electric-spark alloying]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 224 p.
13. Kopeikin S.V., Shapoval V.K. *Ustroistvo dlia elektroiskrovogo uprochneniia* [Device for electric-spark hardening]. Author's Certificate USSR, no. 837715, IPC B 23 P 1/18, 1992.
14. Deep hole drilling. Product catalogue and application guide. Sandvik Coromant. 2008. 162 p. (In Sweden).
15. Topolianskii P.A. Opyt naneseniia elektroiskrovyykh pokrytii na rezhushchii instrument i shtampovuiu osnastku [Electric-spark coating of cutting tools and stamp parts]. *Metallorabotka – Metal processing*, 2004, no. 6, pp. 37–40.
16. Dal'skii A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheriakov R.K. et al. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelia. V 2-kh t. T. 2.* [The Handbook of Technologist-Machine Engineer. In 2 Volumes, Vol. 2]. 5th ed. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2001. 942 p.

Received 7 April 2014

Revised 15 May 2014

Accepted 17 May 2014

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СЕРИЙНЫХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

*В.Г. АТАПИН, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Поступила 10 марта 2014

Рецензирование 6 мая 2014

Принята к печати 15 мая 2014

Атапин В.Г. – 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: metal_working@mail.ru

Рассматриваются вопросы практического использования разработанной нами технологии рационального проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков к проектированию других типов металлорежущих станков – токарно-карусельного станка и горизонтального координатно-расточного станка. Результаты расчета качественно совпадают с известными в литературе результатами для этих станков, полученными другими методами. Количественные расхождения в результатах расчета являются следствием неполных исходных данных по станкам, представленных в литературе. Подтверждена возможность распространения технологии проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков на проектирование станков других типов. Показано, что в случае возможности сформулировать целевую функцию в явном виде, применение прямых методов оптимизации приводит к более быстрым и адекватным решениям.

Ключевые слова: технология проектирования, оптимизация, токарно-карусельный станок, горизонтальный координатно-расточный станок, несущие конструкции.

Введение

В работах [1, 2] изложена технология проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков (МС), обеспечивающая создание станков без избыточных возможностей, прогнозирование их работоспособности в условиях интенсивных механических воздействий и научное обоснование выбора проектных решений. Технология включает четыре основных этапа (рис. 1).

Этап I (блок 1). Определяются внешние нагрузки на основе детерминированных или вероятностных моделей внешнего нагружения. Внешние нагрузки представляют собой статические и динамические воздействия на несущую систему со стороны окружающей среды. Так, основной внешней нагрузкой на несущую систему станка являются силы резания. Внешней нагрузкой для несущей системы стола здесь служит вес обрабатываемой детали.

Этап II (блоки 2–4). На этапе моделирования компоновки станка формируются граничные условия (силовые и кинематические) для отдельных несущих конструкций; несущие конструкции здесь имеют упрощенную геометрию поперечного сечения. В результате решения задачи устанавливается полный набор граничных условий (силовых, кинематических) для отдельной базовой детали. Это позволяет в отличие от классического метода проектирования далее рассматривать базовые детали независимо друг от друга.

Этап III (блоки 5–8). На этапе моделирования отдельной несущей конструкции получаем оптимальную конструкцию с реальной геометрией поперечного сечения и минимально возможной массой при удовлетворении граничных условий, полученных на первом этапе.

Этап IV (блок 9). Проводится динамический анализ или имитационное моделирование для типовых условий эксплуатации несущей системы с оптимальными базовыми деталями.

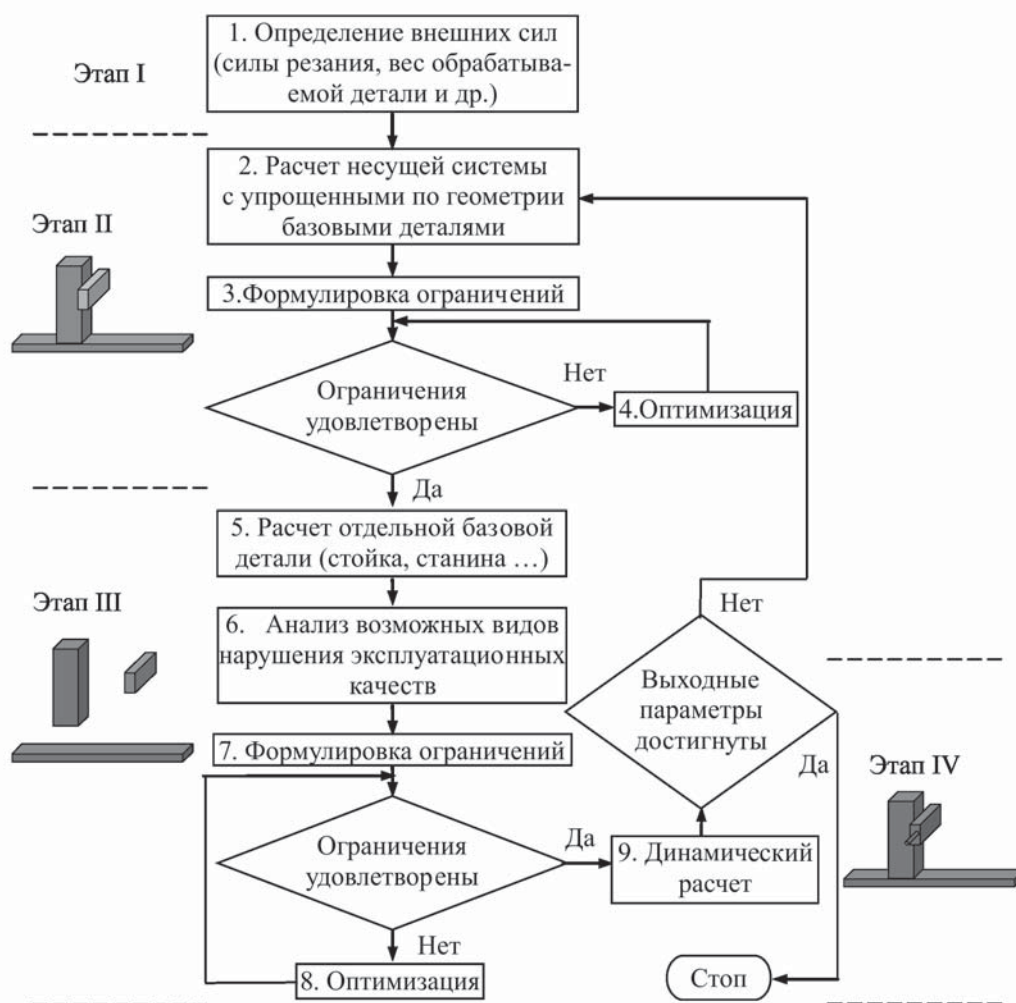


Рис. 1. Блок-схема проектирования базовых деталей МС

Цель настоящей работы – обоснование использования данной технологии для проектирования несущих конструкций других типов станков, в частности, токарно-карусельного станка и горизонтального координатно-расточного станка.

1. Токарно-карусельный станок

Постановка задачи. В работе [3] на основе анализа чувствительности рассматривается оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка модели 1К540Ф1 (рис. 2). Варианты конструкций несущей системы станка оценивались по четырем показателям: масса и податливость системы в зоне обработки по координатным осям x , y , z . Используя исходные данные работы [3], рассмотрим проектирование несущих конструкций этого станка по предлагаемой технологии [1], в которой используются прямые методы оптимизации [4–6].

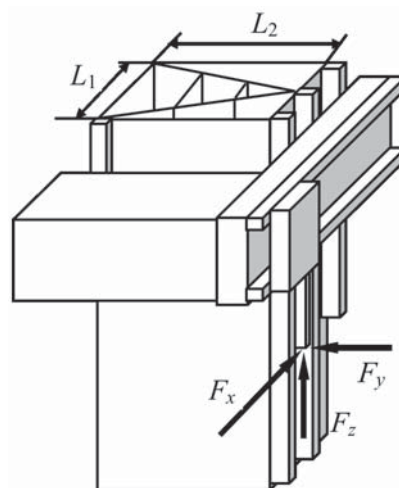


Рис. 2. Модель несущей системы токарно-карусельного станка

На этапе расчета компоновки несущей системы представим конструкции станка в форме оболочечных коробчатых элементов. В соответствии с данными работы [3] принимаем соотношение составляющих сил резания $F_x : F_y : F_z =$

$= 0,5 : 1,0 : 0,5$ при $F_y = 80$ кН, допускаемые коэффициенты податливости несущей системы $[k_x] = 1,08$ мкм/кН, $[k_y] = 5,89$ мкм/кН, $[k_z] = 1,08$ мкм/кН.

Математическую модель несущей системы представим в следующем виде:

минимизировать

$$\psi_0 = \sum_{i=1}^n \rho_i V_i \quad (1)$$

при ограничениях на податливость по осям:

$$\left. \begin{aligned} x \quad \psi_1 &= 1 - k_x / [k_x] \geq 0, \\ y \quad \psi_2 &= 1 - k_y / [k_y] \geq 0, \\ z \quad \psi_3 &= 1 - k_z / [k_z] \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

За целевую функцию принимаем массу конструкций. Переменной проектирования является толщина сечения профиля. Податливость несущей системы определяется расчетом по методу конечных элементов, применение которого к станкам рассмотрено в работах [7, 8].

Результаты и обсуждение. В табл. 1 приведен сравнительный анализ результатов расчетов несущей системы станка, полученных в настоящей работе, и базового варианта [3]. Полученные результаты показывают, что вариант 2 имеет лучшие показатели по массе и податливости k_x .

Далее анализируем расчет отдельной базовой детали – стойки, как наиболее податливого элемента станка. Используя метод декомпозиции, рассмотренный в работе [9], выделяем подконструкцию на уровне контакта консоли и стойки (рис. 3). Для этой подконструкции в табл. 2 приведено поле перемещений, полученное на первом этапе (расчет несущей системы). Поперечное сечение подконструкции соответствует базовому варианту (рис. 2). Математическая модель подконструкции аналогична модели (1), (2) с заменой податливости k_i на перемещения δ_i по осям x, y, z . Переменной проектирования яв-

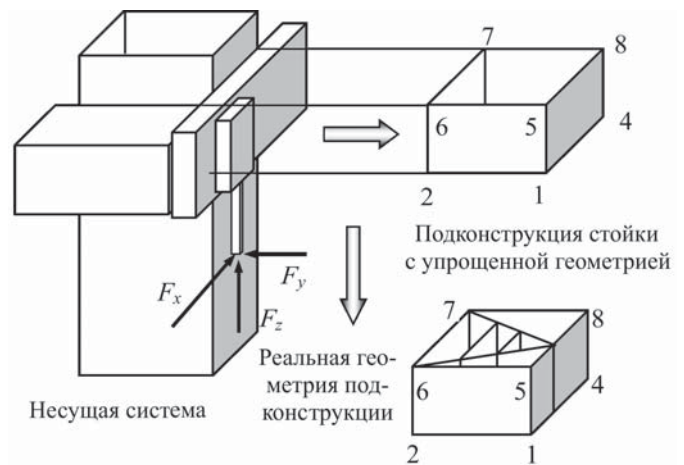


Рис. 3. Подконструкция стойки

Таблица 2

Поле перемещений подконструкции стойки в составе несущей системы

Узел	$\delta_x, 10^{-4}, \text{ м}$	$\delta_y, 10^{-4}, \text{ м}$	$\delta_z, 10^{-4}, \text{ м}$
1	0,1408	0,5201	0,1798
2	0,2325	0,5131	-0,0296
3	0,2175	0,3041	-0,1607
4	0,1357	0,3018	0,0405
5	0,2726	0,7821	0,1769
6	0,3867	0,7810	-0,0155
7	0,3883	0,6088	-0,1717
8	0,2711	0,6080	0,0462

ляется толщина стенки, ребра, горизонтальных пластин. В табл. 3 для заданных перемещений узлов подконструкции (см. табл. 2) приведены результаты для оптимальной стойки. Результаты расчета качественно согласуются с результатами работы [3].

Количественные расхождения в значениях параметров вызваны неполнотой исходных данных в [3]. Так, нет данных по вылету ползуна, контактными деформациям, линейным размерам. Приведенные в табл. 4 результаты расчета несущей системы станка для базового варианта стойки с разными вылетами ползуна показывают существенное влияние этого параметра на податливость станка.

Таблица 1

Результаты расчета несущей системы

Вариант	Параметр		Показатели качества			
	L_1	L_2	k_x	k_y	k_z	Масса
	м		мкм/кН			т
Базовый [3]	1,8	1,6	1,065	1,295	1,075	89,5
1	1,9	1,5	1,013	1,313	1,075	87,9
2	2,0	1,4	0,964	1,339	1,074	86,2

Таким образом, показана возможность расширения разработанной нами технологии рационального проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков на проектирование станков других типов. Если при проектировании конструкций станка имеется возможность сформу-

Параметры оптимальной стойки

Вариант	Толщина, мм			Масса, т
	стенка	ребро	пластина	
Базовый [3]	20/40	не варьировалась		32,9
Оптимальный	16,4	16,4	29,6	19,2

Таблица 4

Влияние вылета ползуна на податливость несущей системы

Вылет ползуна, м	k_x	k_y	k_z
	мкм/кН		
0,1	0,448	0,424	1,075
0,4	1,065	1,295	1,075

лизовать целевую функцию в явном виде, то применение прямых методов оптимизации приводит к более быстрым и адекватным решениям.

2. Горизонтальный координатно-расточный станок

Постановка задачи. В работе [10] рассматривается параметрическая оптимизация несущей системы горизонтального координатно-расточного станка мод. 2458 (рис. 4) на основе обобщенного критерия, учитывающего массу несущих конструкций и составляющие относительного перемещения инструмента и заготовки под действием силы резания. Обобщенный критерий оптимальности имеет вид

$$Q = \lambda_1 \frac{f - f_{\text{нл}}}{f_{\text{нх}} - f_{\text{нл}}} + \lambda_2 \frac{V - V_{\text{нл}}}{V_{\text{нх}} - V_{\text{нл}}},$$

где f – перемещение точки приложения силы F_x в результате собственных деформаций стойки под действием только этой силы; V – объем металла деформируемой части стойки; индексами «нл» и «нх» отмечены соответственно наилучшее и наихудшее значения f и V ; λ_i – весовые коэффициенты. Аналитические зависимости для f и V записываются на основе результатов работы [11]. Для одного из расчетов стойки приведены графики (рис. 5) при следующих исходных данных: $h_0 = 2,75$ м, $h = 0,5$ м, $c = 0,3$ м, $H_{\text{max}} = B_{\text{max}} = 0,91$ м, $\delta_{\text{min}} = 0,014$ м, $\delta_{\text{max}} = 0,027$ м, $F_x = 10$ кН.

Таблица 3

Рассмотрим расчет стойки в соответствии с предложенной технологией рационального проектирования несущих конструкций. Дополнительно к исходным данным, приведенным выше, принимаем размер $H_1 = 0,64$ м [10, см. таблицу]. Конечноэлементная схема стойки имеет 66 узлов, 48 пластинчатых КЭ, шпиндельная бабка считается абсолютно твердым телом.

Математическая модель для оптимального проектирования конструкции имеет следующий вид:

минимизировать

$$\Psi_0 = \rho \sum_{i=1}^k V_i$$

при ограничениях на перемещение:

$$\Psi_1 = 1 - \frac{u}{[u]} \geq 0,$$

на переменные проектирования:

$$\Psi_2 = V_i \geq 0, i = 1, \dots, k,$$

где k – число пластинчатых конечных элементов (КЭ), $u, [u]$ – расчетное и допускаемое перемещение точки O , V_i – объем i -го конечного элемента. Переменной проектирования является толщина стенки при заданном ограничении на перемещение точки O согласно графику для f (рис. 5).

Результаты и обсуждение. В табл. 5 приведены результаты расчета для двух типоразмеров стойки, выбранных в соответствии с графиком, представленным на рис. 5. Полученные результаты качественно и количественно согласуются с результатами работы [10]. Так, для типоразмера стойки $H \times B = 0,91 \times 0,91$ (м) и соответствующего этому типоразмеру ограничению на перемещение т.О (рис. 5, график f) в результате нашей оптимизации получена толщина стенки $\delta = 0,028$ м, что близко к верхней границе толщины стенки по графику $\delta_{\text{граф}} = 0,027$ м (рис. 5, график δ). Аналогичные результаты получены и для другого типоразмера $H \times B = 0,91 \times 0,58$ (м).

Отметим следующее обстоятельство. В работе [10] результаты достигаются путем варьирования весовых коэффициентов λ_i . Однако эти коэффициенты априорно неизвестны и пути их выбора не вполне очевидны. Согласно нашему подходу подобные результаты достигаются за

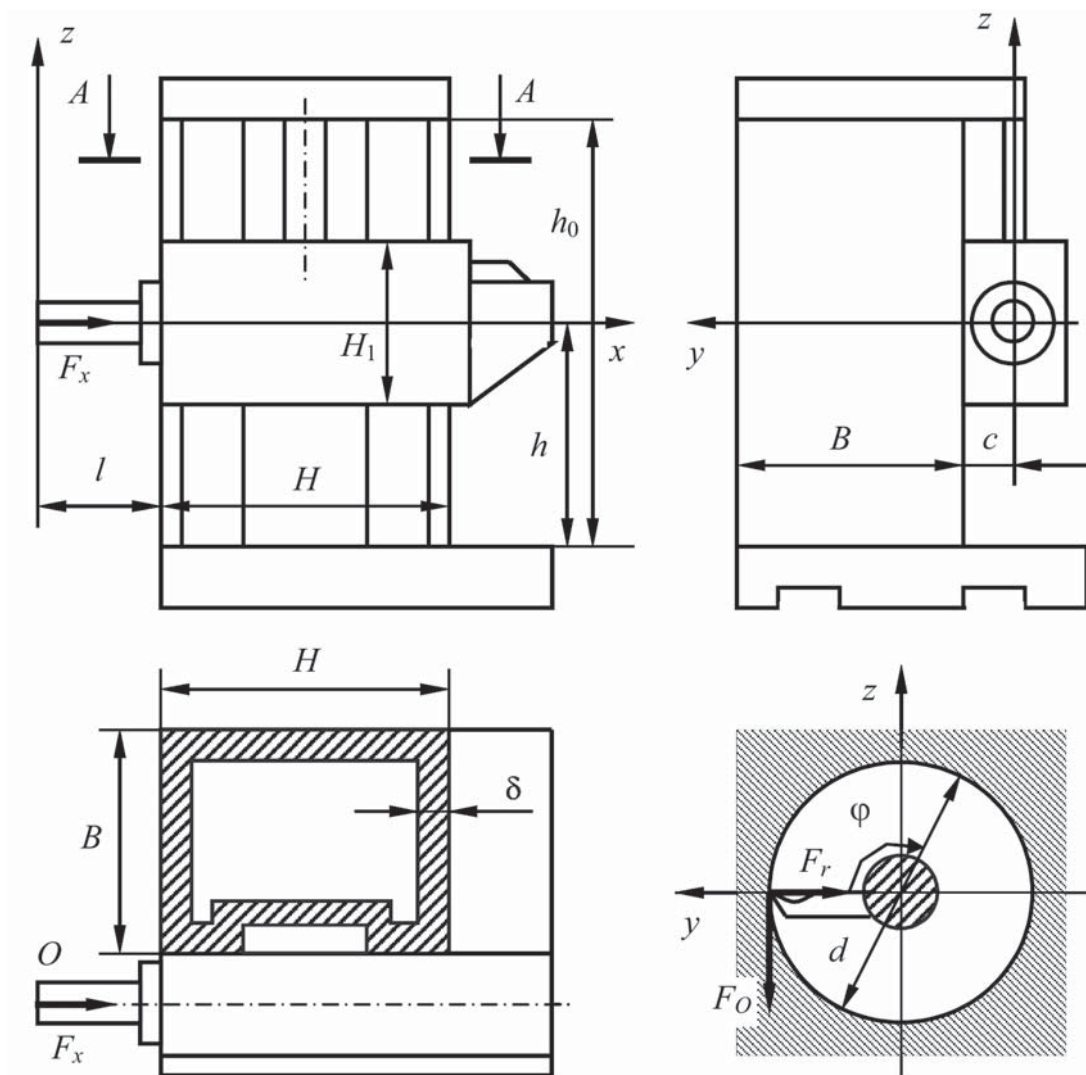


Рис. 4. Расчетная схема горизонтального координатно-расточного станка

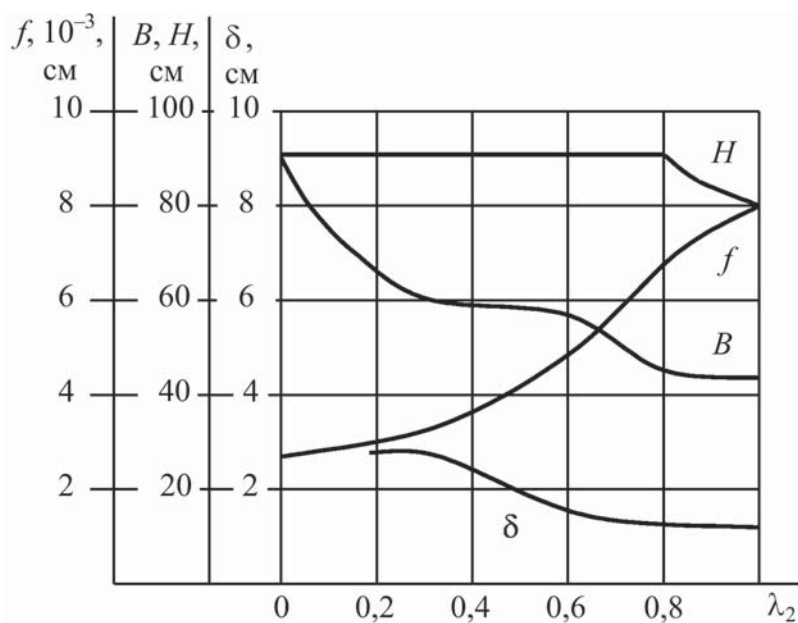


Рис. 5. Изменение параметров, соответствующих оптимальной конструкции стойки, в зависимости от весовых коэффициентов λ_2 и $\lambda_1 = 1 - \lambda_2$ ([5], рис. 4, б)

Таблица 5

Оптимальные параметры стойки

Параметр	Значение параметра	
H , м	0,91	0,91
B , м	0,91	0,58
Ограничение на перемещение т. O (рис. 5, график f), 10^{-5} , м	2,7	5,0
Начальная толщина стенки, м	0,03	0,03
Расчетное перемещение т. O , 10^{-5} , м	2,686	4,993
Оптимальная толщина стенки, м	0,028	0,016
Масса, т	2,19	1,03

счет назначения ограничений, в частности, по жесткости. Назначение этого ограничения более строго, так как связано с точностью механической обработки. Следовательно, при использовании нашей технологии проектирования несущих конструкций станков подтверждается возможность проектирования станков минимально возможной массы на требуемую точность механической обработки.

Наша технология проектирования оптимальных несущих конструкций позволяет также решать и другие вопросы проектирования, в частности, исследовать влияние габаритных размеров H , B , δ на перемещение Δ_y инструмента в направлении по радиусу обрабатываемого отверстия (по оси y), например, при $\varphi = 0$ (см. рис. 4). В связи с отсутствием данных по контактными деформациям в стыках станка и ряда геометрических параметров здесь проведем качественное сравнение полученных результатов с результатами работы [10]. Принимаем соотношение $F_o : F_r : F_x = 1 : 0,5 : 1$

[5], где F_o , F_r , F_x – соответственно окружная, радиальная и осевая составляющие силы резания. В табл. 6 приведены результаты расчета. Анализ полученных результатов показывает, что минимальное значение Δ_y обеспечивается, как и в работе [10], при максимальных размерах H, B сечения и толщине δ стенки стойки, т. е. качественно результаты двух работ совпадают.

Таблица 6

Влияние габаритных размеров стойки на ее жесткость

Параметр	Исходное значение	Границы изменения параметра		Текущее значение параметра		
		min	max			
H , м	0,74	0,60	0,80	0,80	0,80	0,70
B , м	0,66	0,50	0,70	0,70	0,70	0,80
δ , м	0,018	0,01	0,018	0,01	0,018	0,018
Δ_y , 10^{-3} , м	0,165	–	–	0,282	0,145	0,152

Вывод

Проведенные исследования показали, что рассмотренная технология рационального проектирования несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков, реализующая совместную работу метода конечных элементов и методов оптимизации, может успешно применяться при проектировании других типов металлорежущих станков. В условиях, когда задача проектирования может быть сведена к одной целевой функции и ограничениям, данная технология рационального проектирования позволяет быстро и с достаточной точностью получать рабочий вариант конструкции.

Список литературы

1. Атапин В.Г. Проектирование несущих конструкций тяжелых многоцелевых станков с учетом точности, производительности, массы // Вестник машиностроения. – 2001. – № 2. – С. 3 – 6.
2. Атапин В.Г. Оптимизация несущей системы стола тяжелого многоцелевого станка // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2006. – № 4(33). – С. 30–32.
3. Хомяков В.С., Яцков А.И. Оптимизация несущей системы одностоечного токарно-карусельного станка // Станки и инструмент. – 1984. – №5. – С.14–16.
4. Haug E. J., Choi K. K., Komkov V. Design Sensitivity Analysis of Structural Systems. Volume 177 of Mathematics in Science and Engineering, Academic Press, Orlando, FL, 1986. 381 p.

5. *Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M.* Engineering Optimization: methods and applications. New York, Wiley, 1983. 684 p.

6. *Bunday B.D.* Basic optimization methods. Edward Arnold, London. 1984.

7. *Витес Б.И., Гроссман В.М., Кравцов О.А.* Проектирование корпусных деталей металлорежущих станков с использованием метода конечных элементов // Станки и инструмент. – 1991. – № 5. – С. 13–14.

8. *Пахмутов В.А., Шалдыбин А.Я.* Использование метода конечных элементов для анализа конструкций базовых деталей тяжелых станков // Станки и инструмент. – 1992. – № 2. – С. 11–13.

9. *Атапин В.Г.* Метод декомпозиции в проектировании многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 1 (62). – С. 61–68.

10. *Каминская В.В., Гильман А.М., Егоров Ю.Б.* Об автоматизированных расчетах оптимальных размеров деталей и узлов станков // Станки и инструмент. – 1975. – № 3. – С. 2–5.

11. *Каминская В.В., Левина З.М., Решетов Д.Н.* Станины и корпусные детали металлорежущих станков – М.: Машгиз, 1960. – 362 с.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 83–90

Intelligent design of carrying systems of serial metal-cutting machines

Atapin V.G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: metal_working@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Questions of practical use of the technology of intelligent design of carrying systems of heavy multi-purpose machines developed by us and design of other types of metal-cutting machines – horizontal coordinate-boring machine, single-standard turning-merry-go-round machine are considered. The technology has four stages: 1) calculation of all external forces and loads, 2) formation of the boundary conditions (force, kinematics) for individual carrier constructions, 3) solution to the problem of final optimal distribution of a material by the individual supporting constructions with the real cross-section, 4) dynamic analysis. Results of calculation are compared to known literature data for these machines, received by other methods. Divergences in results of calculation are a consequence of not full basic data on these machines, presented in literature. Possibility of spread of technology of heavy multi-purpose machines carrying systems design on other types of machines is confirmed. It is shown that in case of possibility of objective function formation in an explicit form, usage of the direct optimization methods leads to faster and adequate decisions.

Keywords:

Intelligent design; Horizontal coordinate-boring machine; Single-standard turning-merry-go-round machine; Carrying system; Finite elements method; Optimization methods.

References

1. *Atapin V.G.* Proektirovanie nesushchikh konstruktivnykh tiazhelykh mnogotsel'nykh stankov s uchetom tochnosti, proizvoditel'nosti, massy [The structural design of heavy machining centers based on accuracy, productivity, mass]. *Vestnik Mashinostroeniya - Russian Engineering Research*, 2001, no 2, pp. 3–6.

2. *Atapin V.G.* Optimizatsiya nesushchei sistemy stola tiazhelogo mnogotsel'evogo stanka [Optimization of the support system of the heavy machining center table]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2006, no. 4 (33), pp. 30–32.

3. *Khomikov V.S., Iatskov A.I.* Optimizatsiya nesushchei sistemy odnostoechnogo tokarno-karusel'nogo stanka [Optimization of the support system of single-column vertical turning and boring lathe]. *Stanki i instrument – Russian Engineering Research*, 1984, no. 5, pp. 14–16.

4. Haug E. J., Choi K. K., Komkov V. *Design Sensitivity Analysis of Structural Systems*. Volume 177 of Mathematics in Science and Engineering, Academic Press, Orlando, FL, 1986. 381 p.
5. Reklaitis G.V., Ravindran A., Ragsdell K.M. *Engineering Optimization: methods and applications*. New York, Wiley, 1983. 684 p.
6. Bunday B.D. Basic optimization methods. Edward Arnold, London. 1984.
7. Vites B.I., Grossman V.M., Kravtsov O.A. Proektirovanie korpusnykh detalei metallovezhushchikh stankov s ispol'zovaniem metoda konechnykh elementov [Design of body parts of machine tools using finite element method]. *Stanki i instrument - Russian Engineering Research*, 1991, no. 5, pp. 13–14.
8. Pakhmutov V.A., Shaldybin A.Ya. Ispol'zovanie metoda konechnykh elementov dlia analiza konstruktsii bazovykh detalei tiazhelykh stankov [Using the finite element method for the analysis of structures of basic parts of heavy machines]. *Stanki i instrument - Russian Engineering Research*, 1992, no. 2, pp. 11–13.
9. Atapin V.G. Metod dekompozitsii v proektirovanii mnogotsel'nykh stankov [Decomposition method in design of multifunctional machines]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2014, no. 1 (62), pp. 61–68.
10. Kaminskaja V.V., Gil'man A.M., Egorov Yu.B. Ob avtomatizirovannykh raschetakh optimal'nykh razmerov detalei i uzlov stankov [An automated calculation of the optimum sizes of parts and assemblies of machine tools]. *Stanki i instrument - Russian Engineering Research*, 1975, no. 3, pp. 2–5.
11. Kaminskaja V.V., Levina Z.M., Reshetov D.N. *Staniny i korpusnye detali metallo-rezhushchikh stankov* [Machine beds and case parts of machine tools]. Moscow, Mashgiz Publ., 1960. 362 p.

Received 10 Mart 2014

Revised 6 May 2014

Accepted 15 May 2014

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСУЩИХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН*

*Ю.И. ПОДГОРНЫЙ^{1,2}, доктор техн. наук, профессор
В.Ю. СКИБА¹, канд. техн. наук, доцент
А.В. КИРИЛЛОВ^{1,3}, канд. техн. наук, доцент
В.Н. ПУШНИН¹, аспирант, И.А. ЕРОХИН¹, аспирант
Д.Ю. КОРНЕВ¹, магистрант
(¹НГТУ, г. Новосибирск,
²НТИ (филиал) «МГУДТ», г. Новосибирск,
³НГПУ, г. Новосибирск)*

Поступила: 10 февраля 2014
Рецензирование: 26 марта 2014
Принята к печати: 3 апреля 2014

Скиба В.Ю. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Рассматриваются вопросы моделирования несущих систем технологических машин с учетом упругих колебаний, вызванных податливостью звеньев, при учете ограничений величин амплитуд частот. Целью данной работы является разработка расчетной модели несущей системы технологической машины (на примере ткацкого станка СТБ) и подтверждение адекватности расчетной модели результатами экспериментальных исследований. Доказано, что расчетная модель несущей системы для станка с заправочной шириной 190 см может быть рекомендована для определения первой частоты свободных колебаний для всей гаммы станков данного типа. Показано, что при проектировании станины станков следует учитывать скоростные режимы рабочих частот главного вала, закладывая при их проектировании отсутствие возможных резонансов. На основе проведенного анализа конструктивных схем гаммы ткацких станков СТБ проведен расчет частотного спектра изгибно-крутильных колебаний несущей системы ткацкого станка СТБ-190. Разработанная расчетная модель является универсальной для гаммы технологического оборудования заправочной шириной 180, 190, 216, 220, 250, 330 см.

Ключевые слова: несущая система, технологическая машина, метод конечных элементов, модальный анализ, собственная частота колебаний.

Введение

Совершенствование существующего и создание нового высокопроизводительного оборудования является одной из основных тенденций развития современного машиностроения. На отечественных предприятиях в различных отраслях промышленности насчитывается множество наименований технологического оборудования. Ряд технологических машин работает в условиях повышенных динамических режимов,

связанных с возникновением значительных динамических нагрузок. Для быстроходных машин и машин с повышенными силовыми нагрузками необходимо учитывать упругие колебания, вызванные податливостью звеньев, амплитуды которых в отдельных случаях бывают соизмеримыми с величинами перемещений от сил инерции. В условиях эксплуатации значения амплитуд и частот колебаний должны быть ограничены технологическими требованиями и требованиями безопасности при эксплуатации оборудования.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 13-08-01102 а.

В связи с этим был проведен анализ работ по исследованию несущих систем текстильных машин, посвященных разработке методик определения и расчету жесткостных характеристик и характеристик колебательного процесса, оценке влияния работы отдельных механизмов ткацких станков на работу несущих систем, а также экспериментальным исследованиям.

Несмотря на то что исследованиям несущих систем ряда технологических машин уделяется значительное внимание, вопросы динамики остовов, определения амплитудно-частотных характеристик, а также выбора режимов эксплуатации освещены недостаточно полно. Основные принципы моделирования несущих систем технологических машин текстильной промышленности изложены в работах отечественных (Белов Ю.В., Захаров Б.М., Хак А.И., Иванов С.М. и др.) и зарубежных авторов (Голец З., Кубяк Х., Томарек З. и др.) [1–4]. Анализ указанных работ показывает:

- несущие системы текстильных машин моделируются регулярной стержневой системой, довольно приближенно отражающей реальную конструкцию, и в ряде случаев расчетные модели не предусматривают учета податливости отдельных конструктивных элементов;

- проблемы, связанные с динамическими характеристиками несущих систем технологических машин текстильной промышленности, недостаточно изучены и нуждаются в дальнейшей разработке;

- создание высокопроизводительного оборудования сдерживается из-за недостаточной разработки методов расчета технического состояния машин в целом и их отдельных узлов, в частности конструкций несущих систем.

В связи с этим целью данной работы является разработка расчетной модели несущей системы технологической машины (на примере ткацкого станка СТБ) и ее апробация на адекватность с результатами экспериментальных исследований.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- дан анализ конструктивных схем гаммы ткацких станков СТБ с заправочной шириной 180, 190, 220, 250 и 330 см и подготовлены исходные данные для разработки расчетной модели;

- проведен расчет частотного спектра изгибно-крутильных колебаний несущей системы ткацкого станка СТБ-190;

- подтверждена адекватность разработанной расчетной модели результатам экспериментальных исследований;

- проведен анализ отношений частот вынужденных и свободных колебаний гаммы остовов ткацких станков при частотах вращения главного вала: 200...420 мин⁻¹.

Расчетная модель

На основе проведенного анализа конструктивных схем предлагается расчетная модель несущей системы технологической машины на примере ткацкого станка типа СТБ. Общий вид машины показан на рис. 1, а модель несущей системы – на рис. 2, где основные элементы конструкции станка представлены в упрощенном виде.

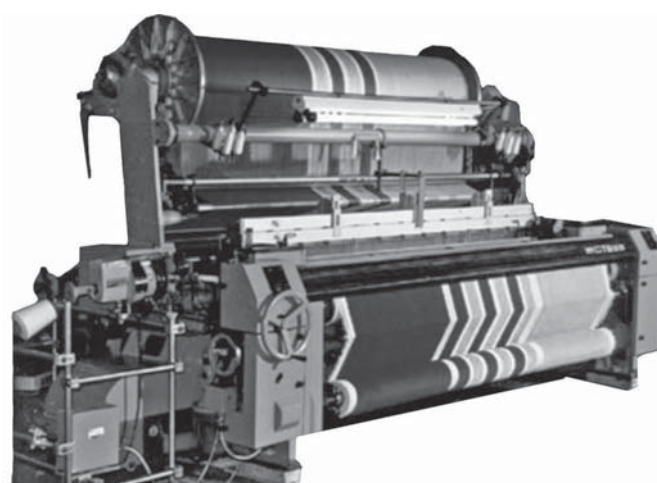


Рис. 1. Общий вид бесчелночного станка СТБ

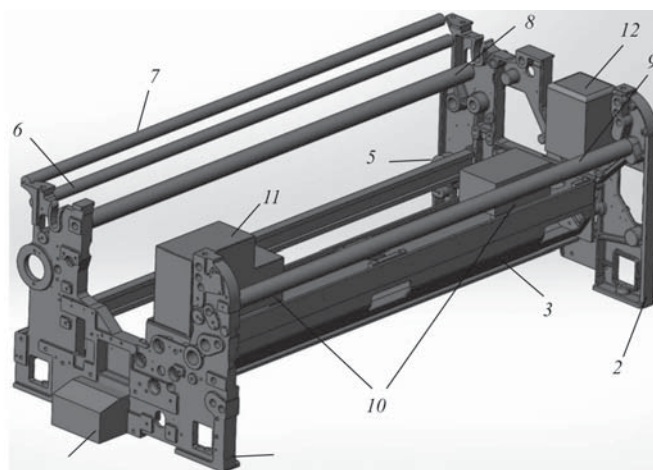


Рис. 2. Физическая модель несущей системы ткацкой машины типа СТБ с основными конструктивными элементами:

1 – рама левая; 2 – рама правая; 3 – передняя связь; 4 – задняя связь; 5 – навой; 6 – подвижное скало; 7 – неподвижное скало; 8 – подскальная труба; 9 – вальян; 10 – батанные коробки; 11 – уточно-боевая коробка; 12 – приемная коробка; 13 – коробка ремизного движения

Для определения частот свободных колебаний остова ткацкого станка необходимо иметь инерционно-массовые характеристики элементов и их расположение относительно принятой системы координат.

Значения нагрузок от собственного веса конструктивных элементов приведены в табл. 1.

Главными элементами расчетной модели, изображенной на рис. 2, являются правая и левая рамы машины, передняя и задняя связи. Рамы

представляют собой континуальные системы с большим количеством ребер жесткости и бобышек, поэтому для расчета несущей системы использован метод конечных элементов (МКЭ) как один из наиболее гибких и универсальных современных методов, применяемых при прочностных расчетах конструкций [5–7].

Ввиду того что конструкции правой и левой рам у ткацких машин СТБ различных заправочных ширин не меняются, а конструкции несущих

Таблица 1

Значения нагрузок от собственного веса и длин конструктивных элементов для гаммы ткацких станков СТБ с заправочной шириной 180...330 см

Наименование конструктивного элемента	Наименование характеристики	Заправочная ширина				
		180	190	220	250	330
Рама левая	Вес, Н	1500	1500	1500	1500	1500
	(с кареткой)	1492	1491,7	1491,7	1491,7	1491,7
Рама правая	Вес, Н	1350	1350	1350	1350	1350
Передняя связь серийного станка	Вес, Н	1490	—	1750	1750	2453
	Длина, мм	2320	—	2725	2735	3820
Передняя связь нового типа	Вес, Н	2028	2160,8	2781,7	—	3839,2
	длина, мм	2328	2458	2733	—	3828
Задняя связь	Вес, Н	421	421	496	558	697,4
	Длина, мм	2290	2290	2695	3030	3790
Навой	Вес, Н	783,9	783,9	917,9	1021	1298
	Длина, мм	2335	2235	2770	3065	3865
Подвижное скало	Вес, Н	546,2	546,2	628	684,2	854
	Длина, мм	2668	2660	3073	3408	4168
Неподвижное скало	Вес, Н	654	654	766	860	1070
	Длина, мм	2500	2500	2905	3240	4000
Подскальная труба	Вес, Н	600	600	691	765	932
	Длина, мм	2805	2805	3210	3545	4305
Вальян	Вес, Н	576	576	682	644	926
	Длина, мм	2282	2282	2687	3022	3782
Батанный механизм	Вес, Н	1770	1770	1925	2600	3016
Уточно-боевая коробка	Вес, Н	2859,3	2859,3	2859,3	2859,3	2859,3
Приемная коробка	Вес, Н	1183	1183	1183	1183	1183
Коробка ремизного движения	Вес, Н	1753,3	1753,3	1753,3	1753,3	1753,3
Зевообразовательный механизм	Вес, Н	790	790	912	1016	1358
Транспортер	Вес, Н	578,6	578,6	665,2	801	1056
Грудница	Вес, Н	210	210	255	280	380
Телескопические валы	Вес, Н	143	143	156,6	183,6	131,6
	Длина, мм	1353	1353	1758	2058	1203

щих систем отличаются только величинами длин передней и задней связей, разработанная расчетная модель, представленная на рис. 2, является универсальной для гаммы ткацких машин СТБ с заправочной шириной 180, 190, 216, 220, 250, 330 и 390 см, в которых были предусмотрены следующие изменения: удалены задняя связь 4, навой 5, подвижное скало 6, неподвижное скало 7, подскальная труба 8, вальян 9, коробка ремизного движения 13.

На основе данных в техническом описании [8] и рабочей документации на ткацкие станки типа СТБ в программном комплексе *SolidWorks* были подготовлены 3D модели базовых элементов ткацких машин. Подготовка геометрии в формате *ANSYS* осуществлялась посредством модуля *ANSYS DesignModeler* [9, 10]. Составление математической модели выполнялось с использованием расчетной платформы *ANSYS Workbench*. На данном этапе работ для проведения конечно-элементного моделирования были выбраны следующие модели: *Static Structural* – статический прочностной анализ (расчет абсолютных/относительных деформаций, напряжений, коэффициента запаса); *Modal* – модальный анализ [11–13].

При подготовке конечноэлементной модели с использованием сеточного генератора *ANSYS Meshing* применялась сетка с использованием следующих типов конечных элементов: *Solid bodies* – твердые тела моделировали 10-узловыми тетраэдрами и 20-узловыми гексаэдрами – *Solid 87* и *Solid 90*; *Surface bodies* поверхностные тела моделировали 4-узловыми 4-угольными оболочковыми элементами – *Shell 57*; *Line bodies* – линейные тела моделировали 2-узловыми линейными элементами *Link 33*. Размер конечных элементов колебался от 10 до 40 мм. Общее количество узлов (*Nodes*) модели составило 390 987, а элементов (*Elements*) – 205 659 (рис. 3). Граничные условия приняты в виде жесткой заделки опорной плоскости левой и правой рам. По всем контактным поверхностям определено неподвижное соединение «*Bonded*». В опции «*Inertial*» выбором «*Standard Earth Gravity*» учтено влияние на конструкцию силы тяжести.

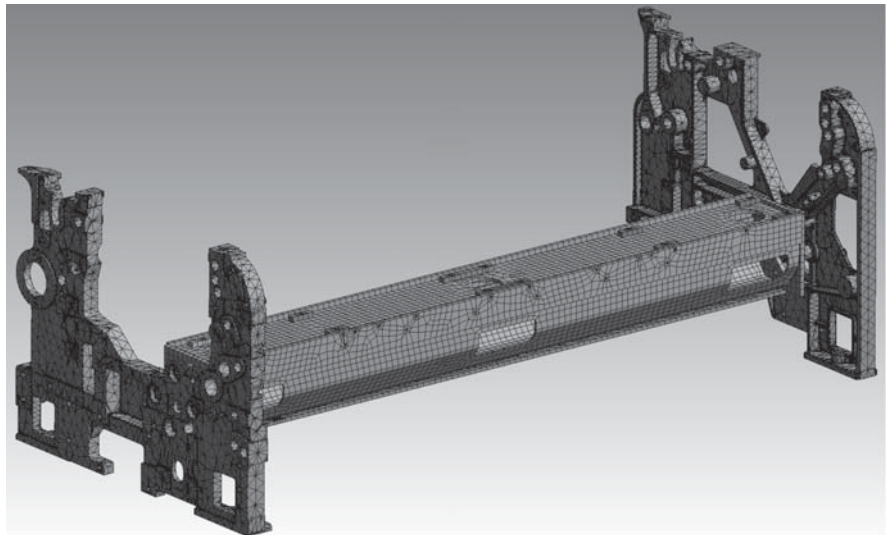


Рис. 3. Конечноэлементная модель базовых элементов станка

Результаты и обсуждение

Для доказательства адекватности разработанной расчетной модели проведены экспериментальные исследования. Для проведения эксперимента в научно-исследовательской экспериментальной лаборатории ВНИИЛТехмаш (Москва) разработан, изготовлен и смонтирован стенд, имитирующий остов ткацкой машины СТБ с заправочной шириной 190 см с передней связью новой конструкции, на которой были установлены уточно-боевая, приемная коробки и батанный механизм (рис. 4). Испытания проводились в режиме работы главного вала с частотой вращения 360 мин^{-1} [14].

Работа основных механизмов ткацкого станка типа СТБ сопровождается значительными знакопеременными ударными нагрузками, вызывающими деформацию как самих элементов механизмов, так и присоединенных связей станка. Под действием ударного возбуждения весь остов и отдельные элементы (корпуса коробок, пластины, стержни) резонируют на собственных частотах. Рамы с жесткой передней связью и установленной на ней уточно-боевой коробкой колеблются как единое целое.

При проведении эксперимента по определению собственных частот колебаний остова использовался комплект виброизмерительной аппаратуры фирмы «Briel & Kjoer» (Дания):

- датчики-акселерометры;
- интегратор типа 2650;
- анализатор типа 2112;
- согласующий усилитель типа 2607;

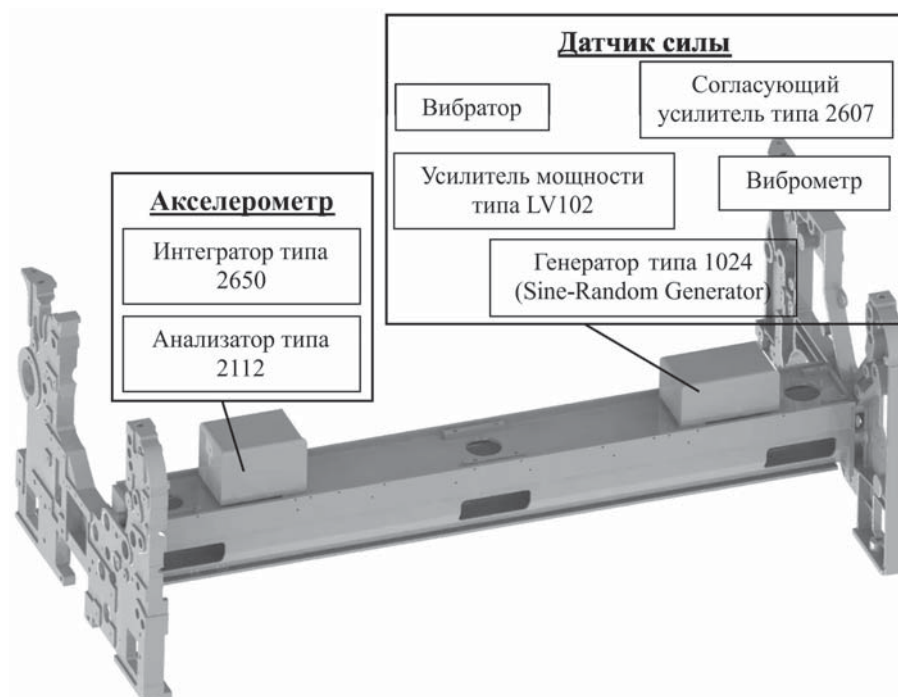


Рис. 4. Схема вибровозбуждения остова станка СТБ-190 и приборное обеспечение эксперимента по определению спектра собственных частот колебаний несущей системы

- усилитель мощности типа LV102;
- генератор типа 1024 (Sine-Random Generator).

Калибровка датчиков осуществлялась при помощи возбудителя вибраций – электродинамического эталонного стола 11 032 (ЕЕТ 101) фирмы «Robotron» (Германия), подающего известное виброускорение. Калибровка датчиков и эксперименты проведены в соответствии со стандартной методикой, достаточно подробно изложенной в имеющейся по данному вопросу литературе.

Для более точной оценки вибрационных процессов, возникающих в остова станка СТБ, важно иметь информацию о собственных частотах всего остова. При исследовании собственных частот колебаний остова станка СТБ-190 использовался метод вибродинамического возбуждения (метод импедансов), позволяющий одновременно получать информацию о динамических податливостях (жесткостях) отдельных элементов остова, выявить возможные формы колебаний поперечных связей станка под действием заданных динамических нагрузок, а также элементы повышенной виброактивности остова [15].

В основном нас интересовал отклик остова станка при приложении нагрузок от батанного механизма. В различных точках конструктивных элементов остова прикладывалась с помощью вибратора гармоническая сила в горизонтальном

направлении, тем самым воспроизводились изгибно-крутильные колебания остова. Наиболее полная характеристика собственных частот получена при непосредственном вибродинамическом возбуждении поперечной связи станка, при приложении нагрузок к опорам батанного вала на коробках. При этом был получен отклик изгибно-крутильных деформаций конструктивных элементов остова.

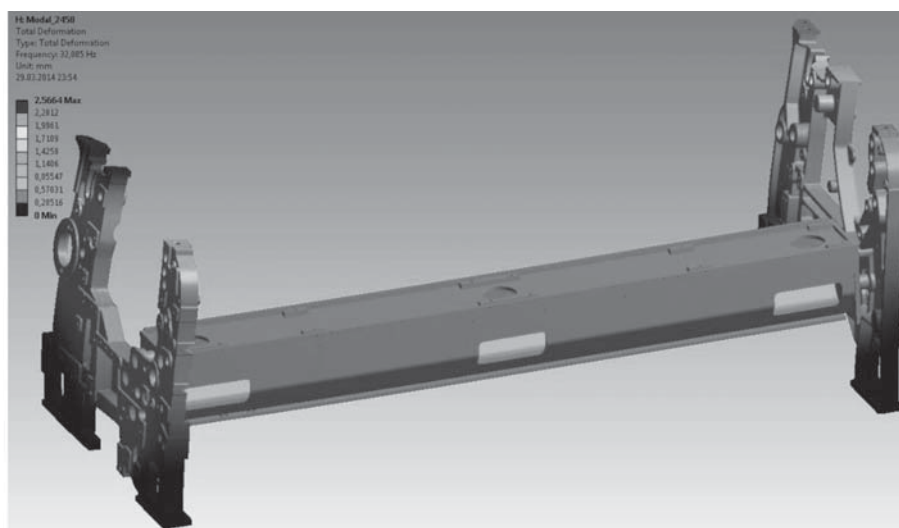
В результате проведенного эксперимента установлено, что несущая система откликается на частоте 32 Гц [14], что достаточно хорошо согласуется с данными теоретического расчета спектра собственных частот изгибно-крутильных колебаний остова в горизонтальном направлении (1-я частота – 32,005 Гц, 2-я частота – 40,069 Гц (рис. 5)). Расхождение между теоретическим и экспериментальным значением первой собственной частоты составило 0,016 %.

Результаты моделирования собственных частот для гаммы станков СТБ с заправочной шириной от 180 до 330 см представлены в табл. 2.

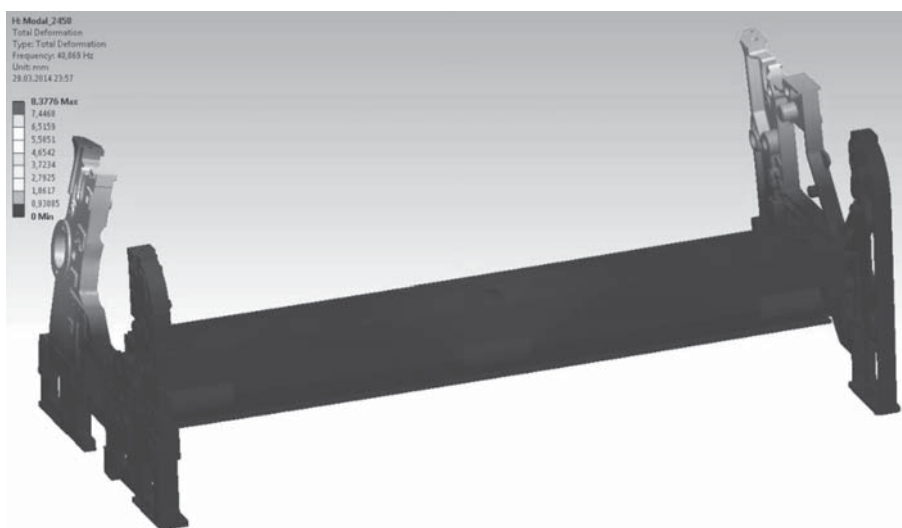
В связи с тем что рабочие частоты станков СТБ находятся в широком диапазоне – от 200 до 420 мин⁻¹, для оценки правильности выбора остова или режимов работы оборудования необходимо знать значения отношения частот вынужденных и свободных колебаний. Так, например, рабочие режимы гаммы станков могут находиться в пределах от 200 до 420 мин⁻¹, что составляет диапазон угловых частот от 21 до 44 с⁻¹. Диапазон первых частот свободных колебаний составляет от 204 до 136 с⁻¹.

Анализ отношения частот вынужденных и свободных колебаний указывает на то, что они находятся в пределах от 0,154...0,32 при ширине заправки 330 см и до 0,1...0,21 при ширине заправки 190 см.

Полученные значения частот свободных колебаний позволят в дальнейшем анализировать поведение остова бесчелночных ткацких станков СТБ и их механизмов в диапазоне частот, полученных на основании расчетной модели.



а



б

Рис. 5. Расчетные значения первой и второй собственных частот колебаний:

а – первая частота – 32,005 Гц; б – вторая частота – 40,069 Гц

Расчетные значения собственных частот колебаний для гаммы станков

Собственные частоты колебаний, Гц	Заправочная ширина			
	180	190	220	330
Первая частота	32,637	32,005	30,665	21,672

Выводы

1. Предложена расчетная модель несущей системы ткацкого станка СТБ 190, адекватность которой подтверждается незначительным расхождением значения первой частоты свобод-

ных колебаний, полученной расчетом и экспериментально. Так, теоретическое значение частоты свободных колебаний остова составило 32,005 Гц, а полученное экспериментально 32 Гц.

2. Впервые предложена универсальная расчетная модель несущей системы для гаммы бесчелночных станков СТБ, которую можно рекомендовать для определения первых частот свободных изгибно-крутильных колебаний для всей гаммы станков данного типа с заправочными ширинами 180, 190, 220, 330 см. Значения первых частот свободных колебаний для гаммы станков с указанными заправочными ширинами, полученных

теоретически на основании предложенной расчетной модели, составили 32,637; 32,005, 30,665; 21,672 Гц соответственно.

3. Диапазон рабочих угловых частот гаммы станков находится в пределах от 21 до 44 с⁻¹, а диапазон первых частот свободных колебаний – от 204 до 136 с⁻¹. Отношения частот вынужденных и свободных колебаний составляют от 0,154...0,32 при ширине заправки 330 см и до 0,1...0,21 при ширине заправки 190 см, что указывает на удовлетворительные отношения частот свободных и вынужденных колебаний по сравнению с возможными отношениями при резонансах.

Список литературы

1. *Иванов С.М.* Динамическое моделирование текстильных машин ротационного типа // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1991. – № 6. – С. 94–97.
2. *Расчет остова иглопробивной машины с учетом усилий прокалывания* / Б.М. Захаров, Ю.В. Белов, А.Р. Мартма, А.И. Хак // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1993. – № 5. – С. 81–85.
3. *Минасян С.Р., Белецкий Л.К.* Определение форм мод изгибных колебаний элементов конструкции остовов крутильных и тростильно - крутильных машин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 1993. – № 3. – С. 83–85.
4. *Zastosowanie metody elementow skonczonej (MES) w dynamicznej analizie krosna.* / Golec Zbigniew, Kubiak Henryk, Strzalko Jaroslaw, Tomarek Zygmunt // Przegląd Włokienniczy. - 1989. - 43, NO 1. – pp. 26 - 28.
5. *Bathe K., Вилсон Е.* Численные методы анализа и метод конечных элементов / пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.
6. *Bathe K.-J.* Finite element procedures / K.-J. Bathe. USA: Prentice Hall, Pearson education, Inc., 2006. – 1037 p.
7. *Атапин В.Г., Скиба В.Ю.* Численное моделирование бескаркасных арочных покрытий // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2012. – № 4(57). – С. 23–27.
8. *Станки ткацкие бесчелночные с малогабаритными прокладчиками утка СТБ: техническое описание и инструкция по эксплуатации, настройке, регулировке и ремонту.* – М.: Техмашэкспорт, 1991. – 115 с.
9. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Ч. 1: учеб. пособие* / В.А. Бруяк, В.Г. Фокин, Е.А. Солдунов, Н.А. Глазунов, И.Е. Адвянов. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.
10. *Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Ч. 2: учеб. пособие* / В.А. Бруяк, В.Г. Фокин, Я.В. Кураева. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.
11. *Cheng L.L.* The finite element and experimental analysis of the natural frequency of the cantilever sheet and model verification based on levy method // Applied Mechanics and Materials – 2013. – V. 344. – pp. 132–135.
12. *Michalak B., Wirowski A.* Dynamic modelling of thin plate made of certain functionally graded materials // Meccanica – 2012. – Vol. 47, Iss. 6 – pp. 1487–1498.
13. *Zhang X., Chen Y., Yao W.* Relationship between bridge natural frequencies and foundation scour depth based on IITD method // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology – 2013. – Vol. 6, Iss. 1 – pp. 102–106.
14. *Кириллов А.В.* Исследование и разработка конструктивных элементов остовов ткацких станков СТБ [Текст]; дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13: защищена 25.04.2002.: утв. 12.07.2002. – М., 2002. – 187 с.
15. *Подгорный Ю.И., Афанасьев Ю.А., Кириллов А.В.* Исследование и выбор параметров при синтезе и эксплуатации механизмов технологических машин: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 196 с.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 91–99

Modeling of the technological machines support systems

Podgornyj Yu. I.^{1,2}, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: pjui@mail.ru

Skeeba V. Yu.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: skeeba_vadim@mail.ru

Kirillov A.V.^{1,3}, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kirillovalvs@mail.ru

Pushnin V.N.¹, Post-graduate Student

Erohin I.A.¹, Post-graduate Student

Kornev D.Yu.¹, Undergraduate Student

¹Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

²Novosibirsk Technological Institute (branch) Moscow State University of Design and Technology, 35 Krasny prospect (5 Potaninskaya st.), Novosibirsk, 630099, Russian Federation

³Novosibirsk State Pedagogical University, 28 Viluiskaya st., Novosibirsk, 630126, Russian Federation

Abstract

The issues of modeling of the technological machines support systems with allowance for technological machines elastic vibrations caused by the compliance of units and limitations of amplitude values of frequencies are considered in the article. The aim of the work is to develop computational models of the technological machine support systems (for example, loom STB) and confirm the proposed computational model by experimental results. It is proved that the computational model of the support system for a loom filling the width of 190 cm may be recommended to determine the first frequency of natural oscillations for the whole range of machines of this type. It is shown that while designing of the machines' frame works, speed modes of the main shaft operating frequencies and absence of possible resonances should be taken into account. Based on the analysis of machine arrangements of range looms STB the frequency spectrum of the flexural-torsional oscillations of the loom STB-190 support systems is calculated. Developed computational model is a universal range of technological equipment filling the width of 180, 190, 216, 220, 250, 330 cm.

Keywords:

support system, technological machine, finite element method, modal analysis, natural frequency.

References

1. Ivanov S.M. Dinamicheskoe modelirovanie tekstil'nykh mashin rotatsionnogo tipa [Dynamic modeling of textile machinery rotary type]. *Izvestiia vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 1991, no. 6, pp. 94–97.
2. Zakharov B.M., Belov Iu. V., Martma A.R., Khak A.I. Raschet ostova igloprobivnoi mashiny s uchetom usilii prokalyvaniia [Calculation of core needle punched machine, taking into account the efforts of picking]. *Izvestiia vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 1993, no. 5, pp. 81–85.
3. Minasian S.R., Beletskii L.K. Opredelenie form mod izgibnykh kolebani elementov konstruktssii ostovov krutil'nykh i trostil'no – krutil'nykh mashin [Determination of mode shapes of bending vibrations of structural elements and cores torsional and doubling-and-twisting machines]. *Izvestiia vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti – The News of higher educational institutions. Technology of Light Industry*, 1993, no. 3, pp. 83–85.
4. Zbigniew G., Henryk K., Jaroslaw S., Zygmunt T. Zastosowanie metody elementow skonczonech (MES) w dynamicznej analizie krosna. *Przegląd Wlokienniczy*, 1989. Vol. 43, no. 1, pp. 26–28.
5. Bathe K.J., Wilson E.L. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*. Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall, 1976. (Bate K., Wilson E. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1982. 448 p.)
6. Bathe K.J. *Finite Element Procedures*. USA, Prentice-Hall, Pearson Education, Inc, 2006. 1037 p.
7. Atapin V.G., Skeebe V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4(57), pp. 23–27.
8. Shuttleless looms with small-size plotters weft STB: technical description and user's manual, setup, adjustment and repair. Moscow, Tekhmasheksport Publ., 1991. 115 p. (In Russ.)
9. Bruiak V.A., Fokin V.G., Soldusov E.A., Glazunov N.A., Advianov I.E. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench. Chast' 1: Uchebnoe posobie* [Engineering analysis in ANSYS Workbench. Part 1: Textbook]. Samara, Samara State Technical University, 2010. 271 p.
10. Bruiak V.A., Fokin V.G., Kuraeva Ya.V. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench. Chast' 2: Uchebnoe posobie* [Engineering analysis in ANSYS Workbench. Part 2: Textbook]. Samara, Samara State Technical University, 2013. 149 p.
11. Cheng, L.L. The finite element and experimental analysis of the natural frequency of the cantilever sheet and model verification based on levy method. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, Vol. 344, pp. 132–135.
12. Michalak, B., Wirowski, A. Dynamic modelling of thin plate made of certain functionally graded materials. *Meccanica*, 2012, Vol. 47, Iss. 6, pp. 1487–1498.

13. Zhang, X., Chen, Y., Yao, W. Relationship between bridge natural frequencies and foundation scour depth based on IITD method. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, Vol. 6, Iss. 1, pp. 102–106.

14. Kirillov A.V. *Issledovanie i razrabotka konstruktivnykh elementov ostovov tkatskikh stankov STB*. Diss. kand. tekhn. nauk [Research and development of structural elements cores looms STB. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2002. 187 p.

15. Podgornyi Yu.I., Afanas'ev Yu.A., Kirillov A.V. *Issledovanie i vybor parametrov pri sinteze i ekspluatatsii mekhanizmov tekhnologicheskikh mashin: monografiia* [Research and selection of parameters in the synthesis and operation mechanisms of technological machines: Monograph]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2002. 196 p.

Funding

The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 13-08-01102 a.

Received 10 February 2014

Revised 26 March 2014

Accepted 3 April 2014

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА АД0 В ИНТЕРВАЛЕ ПОДСОЛИДУСНЫХ ТЕМПЕРАТУР*

А.В. КОНОВАЛОВ¹, доктор техн. наук, профессор

А.С. СМЕРНОВ¹, канд. техн. наук

В.В. ЧЕРНОМАС², доктор техн. наук, профессор

Ю.В. СУБАЧЕВ¹, канд. техн. наук

Г.М. СЕВАСТЬЯНОВ², канд. физ.-мат. наук

(¹Институт машиноведения УрО РАН,

г. Екатеринбург

²Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,

г. Комсомольск-на-Амуре)

Поступила 2 апреля 2014

Рецензирование 5 мая 2014

Принята к печати 7 мая 2014

Коновалов А.В. – 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,

Институт машиноведения УрО РАН,

e-mail: avk@imach.uran.ru

Исследуется сопротивление деформации алюминиевого сплава АД0 при деформировании в интервале подсолидусных температур 540...640 °С и скоростей деформаций 0,06...1,2 с⁻¹. Установлено, что сопротивление деформации увеличивается с ростом степени деформации, что может объясняться активным прохождением динамического возврата, который препятствует началу динамической рекристаллизации. В диапазоне температур 560...640 °С у сплава наблюдается аномальное поведение кривой сопротивления деформации, выражаемое в обратной скоростной зависимости сопротивления деформации от скорости деформации. Результатом такого поведения может служить барьерный эффект блокирования свободных дислокаций примесями атомами внутри диапазона скоростей деформаций 0,06...0,1 с⁻¹.

Ключевые слова: алюминий, сопротивление деформации, вязкопластические свойства, температура солидуса.

Введение

Обработка давлением металлов и сплавов, находящихся в твердотеловом состоянии, является относительно новым методом производства металлоизделий сложной формы. Этот метод был предложен в 70-е годы прошлого столетия на основе обнаруженного эффекта тиксотропии металлических материалов, находящихся

в твердотеловом состоянии и обладающих глобулярной микроструктурой [1]. Основным преимуществом тиксотропного производства изделий, по сравнению с технологиями горячей обработки металлов давлением, является то, что за один технологический переход при относительно небольшой силе деформирования сплав в твердотеловом состоянии полностью заполняет сложную гравюру штампа (оснастки) без об-

* Работа выполнена в рамках Программы межрегиональных и межведомственных фундаментальных исследований УрО РАН, интеграционный проект институтов ИМАШ УрО РАН (проект 12-С-1-1016) и ИМиМ ДВО РАН (проект 12-И-УО-03-005).

разования характерных для традиционных процессов видов брака (утяжин, горячих трещин и т.д.) [2–6]. В настоящее время технологии производства изделий, базирующиеся на эффекте тиксотропии сплавов, находят широкое применение в различных отраслях производства. Так, по технологии тиксоштамповки алюминиевых и магниевых сплавов компании из Италии, США и Японии производят детали для автомобильной промышленности, корпусов для ноутбуков, фото- и видеокамер, мобильных телефонов [3, 7]. Для проявления свойств тиксотропности микроструктура заготовки должна быть глобулярной, в результате чего такие заготовки получают методом магнитогидродинамического перемешивания расплава в кристаллизаторе или исходные слитки подвергают высокотемпературной деформации [2–4]. Известна также технология получения металлоизделий из алюминиевых сплавов с применением установки горизонтального литья и деформации металла (УГЛДМ), позволяющая проводить рассматриваемый процесс производства изделий в непрерывном режиме в одном устройстве непосредственно из жидкого металла в одну стадию (заливка расплава – получение металлоизделия) без дополнительных операций, связанных со специальной подготовкой микроструктуры заготовки [8, 9].

Разработку новых технологических процессов изделий проводят на основе физического или компьютерного моделирования процесса. Преимуществами компьютерного моделирования над физическим являются значительно меньшие сроки и стоимость разработки технологического процесса. Для осуществления компьютерного моделирования тиксотропного производства изделий необходимо знать реологическое поведение сплава в интервале подсолидусных температур. Реологическое поведение сплава при заданной температуре испытания характеризуется зависимостью сопротивления деформации от изменения скорости и степени деформации.

Цель данной работы – установить на базе пластометрических испытаний основные закономерности изменения сопротивления деформации алюминиевого сплава АД0 в зависимости от скорости и степени деформации в интервале подсолидусных температур.

Материал и методика экспериментального исследования

Из заготовки в виде полосы, полученной совмещенным методом литья и прокатки на установке УГЛДМ Института машиноведения и металлургии ДВО РАН из алюминиевого сплава АД0 ГОСТ 4784–97 сечением 5×55 мм, были изготовлены опытные образцы диаметром $4 \pm 0,1$ мм и высотой $6 \pm 0,1$ мм. Образцы вырезались поперек направления прокатки исходной заготовки. Соответствие химического состава образцов ГОСТ 4784–97 определялось на анализаторе химического состава модели SPECTROMAXx.

Температуру точки солидуса и ликвидуса сплава АД0 определяли на dilatометре модели Linseis L75VD1400C по изменению приращения длины образца. Для этого изготавливали цилиндрические образцы из исследуемого сплава диаметром 4 мм и высотой 30 мм. В результате экспериментов температура солидуса составила 654°C , а температура ликвидуса 657°C .

Сопротивление деформации сплава АД0 при температурах 540 , 560 , 570 и 640°C изучали с помощью экспериментов на сжатие образцов на автоматизированной пластометрической установке, созданной в Институте машиноведения УрО РАН [10]. Установка обеспечивает максимальную силу деформирования 30 кН и изменение скорости деформации в диапазоне $0,005 \dots 10 \text{ с}^{-1}$. При сжатии образцов чувствительность датчика силы составляла 3 Н, погрешность измерения силы сжатия ± 50 Н, а погрешность перемещения захватов установки ± 20 мкм при их перемещении на 10 мм.

Для предотвращения тепловых потерь в процессе испытания образец термоизолировался с помощью огнеупорной муллитокремнеземистой ваты МКРР-130 по ГОСТ 23619–79 и вместе с бойками помещался в металлический контейнер. Контейнер с образцом нагревали в электропечи до температуры испытания и затем переносили из печи в рабочее пространство установки, где проводили деформацию образца. Контроль температуры образца в процессе нагрева и ее изменения внутри контейнера в ходе испытания осуществляли с помощью термопары градуировки ХА(К) по ГОСТ Р 8.585–2001 с диаметром проволоки 0,5 мм. Для компенсации

тепловых потерь в процессе выноса контейнера из печи до начала сжатия образцы перегревали на $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительно предполагаемой температуры испытания. В результате гарантированная температура начала деформации образца была $540 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $560 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $570 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $640 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В процессе деформации измеряли силу сжатия образца и перемещение деформирующей плиты установки. Полученные первичные экспериментальные данные изменения силы сжатия P от высоты образца Δh обрабатывали с учетом упругих деформаций узла нагружения и станины установки. Для этого из значений, отображаемых на экспериментальной кривой в координатах « $P-\Delta h$ », вычитали значения, отображаемые на кривой податливости установки в тех же координатах. Эта кривая была получена при сжатии на установке бойков без образца путем замера изменения расстояния между захватами и силы сжатия. Для уменьшения силы трения между образцом и бойками использовали смазку Графитол-В2 (ТУ 2100-001-034352058-2003).

Экспериментальные данные сопротивления деформации сплава АД0

Методика получения и обработки экспериментальных данных для сопротивления деформации сплавов подробно описана в работе [11].

На рис. 1 представлены зависимости скорости деформации $\dot{\epsilon}$ образцов от времени t .

Для каждой такой зависимости и температуры нагрева образца выполнили деформацию трех образцов и усреднили полученные кривые сопротивления деформации σ_s в зависимости от степени деформации ϵ . Эти кривые приведены на рис. 2, из которого видно, что для диапазона температур $540\ldots 640\text{ }^{\circ}\text{C}$ сопротивление деформации растет с увеличением степени деформации. Такое реологическое поведение материала в данном диапазоне температур является характерным для технически чистого алюминия [12] и может быть объяснено отсутствием прохождения динамической рекристаллизации в результате активного протекания динамического возврата [13–15].

При температурах 560 , 570 и $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ при степенях деформации, больших некоторой величины ϵ^* , сопротивление деформации уменьшается с ростом скорости деформации, т. е. имеет ме-

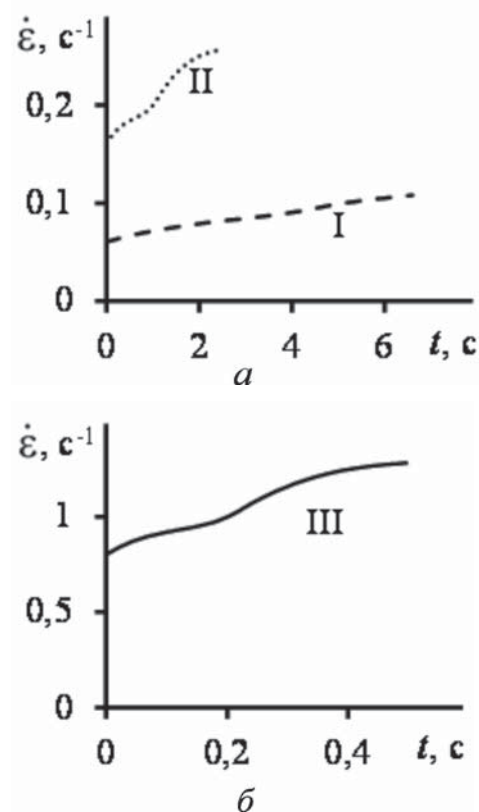


Рис. 1. Зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$ образцов от времени t

сто обратная скоростная зависимость сопротивления деформации. В данном температурном диапазоне $560\ldots 640\text{ }^{\circ}\text{C}$ кривые сопротивления деформации, соответствующие кривым I и II на рис. 1, пересекаются (см. рис. 2).

На рис. 3 представлены значения (маркеры) степени деформации ϵ^* в зависимости от температуры деформирования. Из рисунка видно, что с увеличением температуры точка пересечения кривых сопротивления деформации смещается в область меньших значений степеней деформаций. При температуре $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ пересечения кривых сопротивления деформации отсутствуют в исследованном диапазоне скоростей деформаций (см. рис. 2, ϵ). При увеличении степени деформации относительно величины ϵ^* расхождение кривых сопротивления деформации растет (см. рис. 2).

Похожую особенность реологического поведения при околосolidусных температурах высоколегированного алюминиевого сплава (аналог российского сплава АМг6) наблюдали авторы работ [13, 16]. Однако авторы данной работы не акцентируют внимание на таком аномальном реологическом поведении сплава и не объясняют причин его проявления.

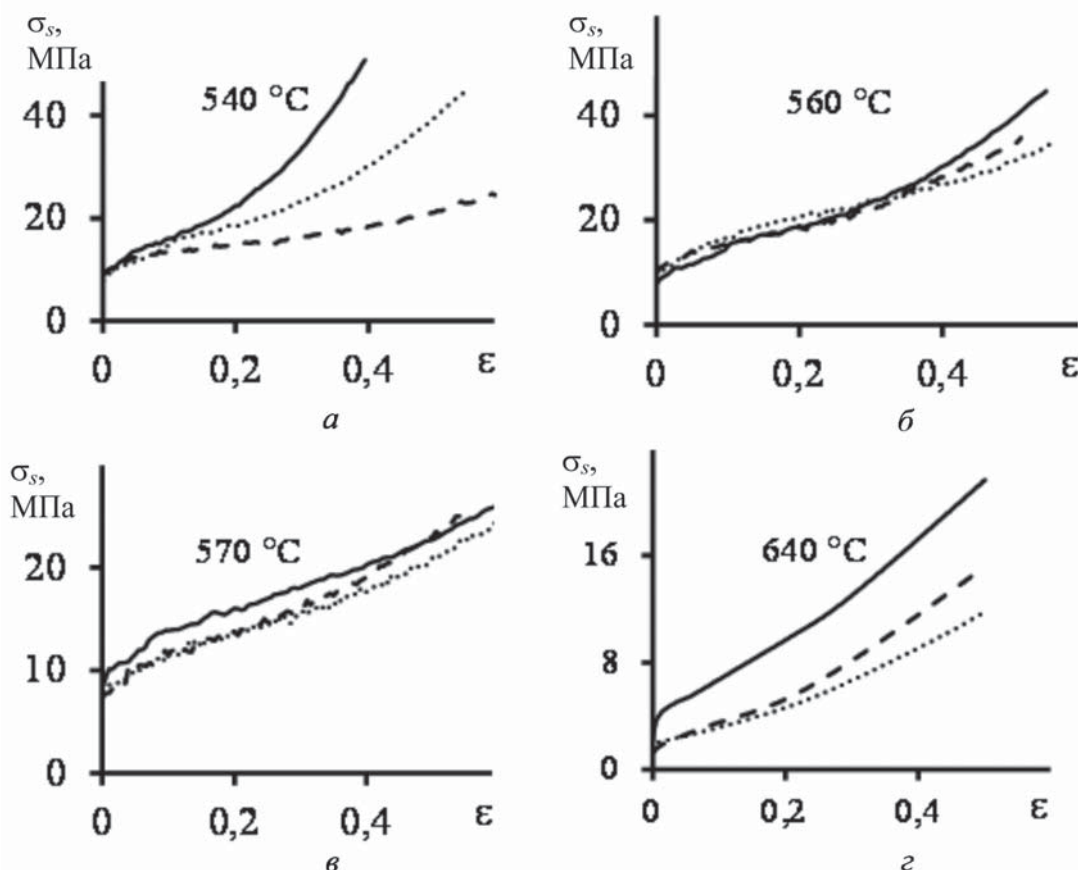


Рис. 2. Зависимость сопротивления деформации σ_s от степени деформации ε при температурах начала деформации, °C:

540 (а), 560 (б), 570 (в) и 640 (г). Сплошная кривая соответствует зависимости I, пунктирная – зависимости II, а кривая с точками – зависимости III, представленных на рис. 1

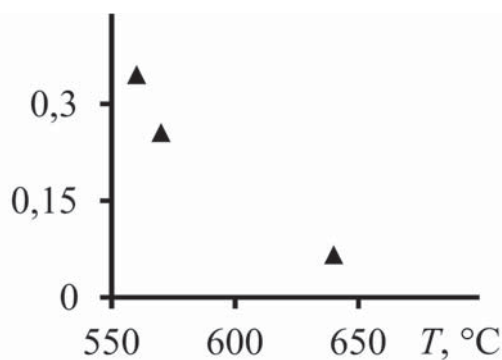


Рис. 3. Зависимость степени деформации ε^* от температуры T , при которой происходит пересечение кривых сопротивления деформации

Наличие обратной скоростной зависимости у исследуемого сплава АД0 в диапазоне температур 560...640 °C можно объяснить блокированием движения свободных дислокаций примесными атомами в определенных температурно-скоростных условиях деформации [17–19]. Возможно данный процесс активней всего

происходит в диапазоне скоростей деформаций $0,06... 0,1\text{с}^{-1}$ (закон нагружения I на рис. 1), которому соответствует пунктирная кривая сопротивления деформации, изображенная на рис. 2.

Выводы

1. Экспериментальные исследования алюминиевого сплава АД0 в диапазоне температур 540...640 °C и скоростей деформаций $0,06... 1,2\text{с}^{-1}$ показали, что сопротивление деформации увеличивается с ростом степени деформации, что может объясняться активным прохождением динамического возврата, который препятствует началу динамической рекристаллизации.

2. Экспериментально установлено, что для исследуемого сплава АД0 в диапазоне температур испытаний 560...640 °C (рис. 2) кривые сопротивления деформации, полученные при малых скоростях деформаций (закон нагружения I), имеют точку пересечения с кривой сопротивления деформаций, полученную при больших

скоростях деформаций (закон нагружения II). Объяснением такого феномена может служить наличие эффекта блокирования свободных дислокаций примесными атомами в определенных температурно-скоростных условиях деформирования, который наиболее явно проявляется в диапазоне скоростей деформаций $0,06 \dots 0,1 \text{ с}^{-1}$. Такое аномальное поведение кривой сопротивления деформации не наблюдается при температуре 540°C во всем исследуемом интервале скоростей деформаций $0,06 \dots 1,2 \text{ с}^{-1}$.

Список литературы

1. *Spencer D.B., Mehrabian R., Flemings M.C.* Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range // *Metallurgical Transactions*. – 1972. – Т. 3, № 7. – С. 1925–1932.
2. *Fan Z.* Semisolid metal processing // *International Materials Reviews*. – 2002. – Т. 47, № 2. – С. 49–85.
3. *Atkinson H.* Modelling the semisolid processing of metallic alloys // *Progress in Materials Science*. – 2005. – Т. 50, № 3. – С. 341–412.
4. *Jiang J.-f., Luo S.-j.* Preparation of semi-solid billet of magnesium alloy and its thixoforming // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2007. – Т. 17, № 1. – С. 46–50.
5. *Курдеев Ю.П., Белоусов И.Я., Ракогон А.И.* Изготовление деталей с высокими тонкими стенками штамповкой кристаллизующегося алюминия // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – 2002. – № 3. – С. 9–11.
6. *Семенов Б.И., Бочаров Ю.А., Куштаров К.М., Гладков Ю.А.* Современные технологии формообразования в твердожидком состоянии // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*. – 2006. – № 10. – С. 33–43.
7. *Chiarmetta G., Giordano P.* STAMPAL: A family of cutting-edge technologies. Comparison of applications in automotive engineering // *STAMPAL: Une famille de technologies a l'avantgarde. Comparison des applications dans la domaine de l'automobile*. – 2002. – № 217. – С. 21.
8. *Черномас В.В., Ловизин Н.С., Соснин А.А.* Критерии устойчивости технологического процесса получения металлоизделий на установке горизонтального литья и деформации металла // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2012. – Т. 2. – С. 71–77.
9. *Черномас В.В., Саликов С.Р., Коновалов А.В.* Оптимизация технологических параметров процесса получения полосы совмещенным методом литья и деформации металла // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты*. – 2012. – № 2. – С. 7–13.
10. *Коновалов А.В., Смирнов А.С.* Экспериментальная база и методика идентификации определяющих соотношений упруговязкопластической среды // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. – 2010. – № 1. – С. 198–201.
11. *Коновалов А.В., Смирнов А.С.* Вязкопластическая модель сопротивления деформации стали 08X18H10T при температуре горячей деформации // *Металлы*. – 2008. – № 2. – С. 55–59.
12. *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник*. – 2-е изд. / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.
13. *Mostafaei M.A., Kazeminezhad M.* Hot deformation behavior of hot extruded Al–6Mg alloy // *Materials Science and Engineering: A*. – 2012. – Т. 535. – С. 216–221.
14. *Рекристаллизация металлов и сплавов*. – 3-е изд. / С.С. Горелик, С.В. Добаткин, Л.М. Капусткина. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
15. *Rokni M.R., Zarei-Hanzaki A., Roostaei A.A., Abedi H.R.* An investigation into the hot deformation characteristics of 7075 aluminum alloy // *Materials & Design*. – 2011. – Т. 32, № 4. – С. 2339–2344.
16. *Mostafaei M.A., Kazeminezhad M.* Analyses on the flow stress of an Al-Mg alloy during dynamic recovery // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2013. – Т. 22, № 3. – С. 700–705.
17. *Zhongjun W., Weiping J., Jianzhong C.* Study on the Deformation Behavior of Mg-3.6% Er Magnesium Alloy // *Journal of Rare Earths*. – 2007. – Т. 25, № 6. – С. 744–748.
18. *Wang C., Xu Y., Han E.* Serrated flow and abnormal strain rate sensitivity of a magnesium–lithium alloy // *Materials Letters*. – 2006. – Т. 60, № 24. – С. 2941–2944.
19. *Zhu S.M., Nie J.F.* Serrated flow and tensile properties of a Mg-Y-Nd alloy // *Scripta Materialia*. – 2004. – Т. 50, № 1. – С. 51–55.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April–June 2014, Pages 100–106

**Experimental studies of strain resistance of aluminum alloy АД0
in the undersolidus temperature range****Konovalov A.V.**¹, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: avk@imach.uran.ru**Smirnov A.S.**¹, Ph.D. (Engineering)**Chernomas V.V.**², D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mail@imim.ru**Subachev Y.V.**¹, Ph.D. (Engineering)**Sevastyanov G.M.**², Ph.D. (Physics and Mathematics)¹Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Yekaterinburg, 630049, Russian Federation²Institute of Machinery and Metallurgy, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Branch), 1 Metallurgov st., Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russian Federation**Abstract**

The strain resistance of the aluminum alloy АД0 during deformation in near solidus temperatures ranging between 540 and 640 °C and strain rates ranging between 0.06 and 1.2 s⁻¹ are studied in the article. It is found that the strain resistance increases with the growth of strain. It can be due to the passing dynamic recovery that inhibits the start of the dynamic recrystallization. At the temperature ranging from 560 to 640 °C, the АД0 alloy has an abnormal behavior of the strain resistance curve. It is expressed in an inverse strain-rate dependence of strain resistance. This behavior may result in the barrier effect of blocking free dislocations by dopant atoms in the strain-rate range from 0.06 to 0.1 s⁻¹.

Keywords:

aluminium, strain resistance, viscoplastic properties, solidus temperature

References

1. Spencer D.B., Mehrabian R., Flemings M.C. Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range. *Metallurgical Transactions*, 1972, Vol. 3, no.7, pp. 1925–1932.
2. Fan Z. Semisolid metal processing. *International Materials Reviews*, 2002, Vol. 47, no.2, pp. 49–85.
3. Atkinson H. Modelling the semisolid processing of metallic alloys. *Progress in Materials Science*, 2005, Vol. 50, no. 3, pp. 341–412.
4. Jiang J.-f., Luo S.-j. Preparation of semi-solid billet of magnesium alloy and its thixoforming. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, Vol. 17, no. 1, pp. 46–50.
5. Kirdeev Yu.P., Belousov I.Ya., Rakogon A.I. Izgotovlenie detalei s vysokimi tonkimi stenkami shtampovkoi kristallizuiushchegosia aliuminiia [Manufacture of parts with high thin-walled extruded aluminum crystallizing]. *Kuznechno-Shtampovnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem) – Press-forging production. Metal Forming*, 2002, no. 3, pp. 9–11.
6. Semenov B.I., Bocharov Yu.A., Kushtarov K.M., Gladkov Yu.A. Sovremennye tekhnologii formoobrazovaniia v tverdozhidkom sostoianii [Modern technology in shaping solid-liquid state]. *Kuznechno-Shtampovnoe Proizvodstvo (Obrabotka Metallov Davleniem) – Press-forging production. Metal Forming*, 2006, no. 10, pp. 33–43.
7. Chiarmetta G., Giordano P. STAMPAL: A family of cutting-edge technologies. Comparison of applications in automotive engineering. STAMPAL: Une famille de technologies a l'avantgarde. Comparison des applications dans la domaine de l'automobile. 2002, no. 217, 21 p.
8. Chernomas V.V., Lovizin N.S., Sosnin A.A. Kriterii ustoychivosti tekhnologicheskogo protsessa polucheniia metalloizdelii na ustanovke gorizonta'nogo lit'ia i deformatsii metalla [Stability criteria for manufacturing metal products on a horizontal metal casting and deformation plant]. *Problemy Mashinostroeniya i Nadezhnosti Mashin – Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2012, Vol. 2, pp. 71–77.

9. Chernomas V.V., Salikov S.R., Konovalov A.V. Optimizatsiia tekhnologicheskikh parametrov protsessa polucheniia polosy sovmeshchennym metodom lit'ia i deformatsii metalla [Optimization of technological parameters of the process of obtaining a combined method of strip casting and deformation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2012, Vol. 2, pp. 7–13.
10. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Eksperimental'naya baza i metodika identifikatsii opredelivayushchikh sootnoshenii uprugoviazkoplasticheskoi sredy [Experimental base and technique of constitutive equation identification of elasticviscoplastic medium]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike*, 2010, no. 1, pp. 198–201. (In Russ.) Available at: <http://chemphys.edu.ru/media/files/010-01-12-028.pdf>. (accessed 24.04.2014)
11. Konovalov A.V., Smirnov A.S. Viazkoplasticheskaya model' soprotivleniya deformatsii stali 08Kh18N10T pri temperature goriachei deformatsii [Viscoplastic model for the strain resistance of 08Kh18N10T steel at a hot-deformation temperature]. *Metally – Russian Metallurgy (Metally)*. 2008, no. 2, pp. 55–59.
12. Polukhin P.I., Gun G.Ya., Galkin A.M. *Soprotivlenie plasticheskoi deformatsii metallov i splavov. 2-e izd. Spravochnik* [Resistance to plastic deformation of metals and alloys. 2nd ed. Handbook]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 352 p.
13. Mostafaei M. A., Kazeminezhad M. Hot deformation behavior of hot extruded Al–6Mg alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, Vol. 535, pp. 216–221.
14. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov. 3-e izd* [Recrystallization of metals and alloys. 3rd ed.]. Moscow, MISIS, 2005. 432 p.
15. Rokni M. R., Zarei-Hanzaki A., Roostaei A. A., Abedi H. R. An investigation into the hot deformation characteristics of 7075 aluminum alloy. *Materials & Design*, 2011, Vol. 32, no.4, pp. 2339–2344.
16. Mostafaei M. A., Kazeminezhad M. Analyses on the flow stress of an Al–Mg alloy during dynamic recovery. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, Vol. 22, no. 3, pp. 700–705.
17. Zhongjun W., Weiping J., Jianzhong C. Study on the Deformation Behavior of Mg–3.6 % Er Magnesium Alloy. *Journal of Rare Earths*, 2007, Vol. 25, no. 6, pp. 744–748.
18. Wang C., Xu Y., Han E. Serrated flow and abnormal strain rate sensitivity of a magnesium–lithium alloy. *Materials Letters*, 2006, Vol. 60, no. 24, pp. 2941–2944.
19. Zhu S. M., Nie J. F. Serrated flow and tensile properties of a Mg–Y–Nd alloy. *Scripta Materialia*, 2004, Vol. 50, no. 1, pp. 51–55.

Funding

Work performed within the framework of the inter-regional and inter-departmental Basic Research RAS, integration project institutions Institute of Engineering Science Ural Branch of Russian Academy of Sciences (Project No. 12-C-1-1016) and Institute of Machinery and Metallurgy, Russian Academy of Sciences (Far Eastern Branch) (Project No. 12-II-RO-03-005).

Received 2 April 2014

Revised 5 May 2014

Accepted 7 May 2014

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА НА ПАРАМЕТРЫ МИКРОСТРУКТУРЫ И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ СИЛУМИНОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ КРЕМНИЯ

*М.В. ПОПОВА, доктор техн. наук, профессор
Н.В. КИБКО, соискатель
(СибГИУ, г. Новокузнецк)*

Поступила 12 февраля 2014
Рецензирование 15 апреля 2014
Принята к печати 18 апреля 2014

Попова М.В. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: m.popova@rdtc.ru

Проведено исследование влияния обработки шихты и расплава на параметры микроструктуры и температурный коэффициент линейного расширения доэвтектических, эвтектических и заэвтектических силуминов. Используются следующие способы обработки расплава: наводороживание влажными асбестовыми тампонами, продувка воздухом, продувка водородом, кипячение в щелочном растворе. Дополнительно проведена продувка шихтового кремния воздухом. Установлено, что обработка шихты и расплава по изученным режимам способствует модифицированию структуры, увеличению объемной доли эвтектики и снижению температурного коэффициента линейного расширения силуминов. Обработка расплава приводит к уменьшению размера дендритных ветвей сплавов Al-3 % Si, Al-5 % Si и Al-15 % Si и диспергированию кремния в составе эвтектики силуминов эвтектического и заэвтектического состава. Наиболее эффективное влияние обработки расплава на снижение температурного коэффициента линейного расширения и уменьшение аномалии теплового расширения наблюдается для доэвтектических силуминов с содержанием кремния в количестве 3 и 5 %.

Ключевые слова: силумины, обработка расплава, водород, микроструктура, температурный коэффициент линейного расширения.

Введение

Применение сплавов на основе системы Al-Si в промышленности как конструкционных материалов, а также в виде сплавов специального назначения во многом определяется параметрами их микроструктуры. Кремний, введенный в расплав, уже в количестве 6-7 % склонен к ликвации и образованию первичных выделений кремнистой фазы, как правило, в виде крупных частиц. Поэтому свойства сплавов Al-Si зависят не только от их химического состава, но и от размеров, формы и характера распределения частиц кремнистой фазы.

Для сплавов Al-Si обязательной технологической операцией является модифицирование как метод улучшения структуры и механических

свойств. В настоящее время разработано большое количество способов модифицирования силуминов: использование натрийсодержащих смесей, введение модификаторов в виде солей и лигатур, фосфорсодержащих соединений, кислородсодержащих реагентов, добавок и присадок на основе высокодисперсных компонентов. Одни модификаторы лучше измельчают эвтектический кремний, другие – первичные кристаллы кремнистой фазы. Эффективными модификаторами эвтектики являются поверхностно-активные вещества, прежде всего, натрий, а также литий, калий и кальций, хотя их действие значительно слабее, чем натрия [1]. Однако в более поздних исследованиях показано, что стронций по сравнению с натрием не только обеспечивает повышение прочностных и пластических

свойств доэвтектических силуминов, но и улучшает их жидкотекучесть при большей длительности сохранения эффекта модифицирования [2, 3]. Наиболее эффективным модификатором первичных кристаллов кремния является фосфор, который вводят в расплав либо в чистом виде, либо в виде сплавов, различных соединений и смесей [4–6]. Об измельчении структуры силуминов тугоплавкими частицами соединений переходных металлов, прежде всего, титана и циркония, сообщается во многих работах [7–9]. Разработаны и более сложные комплексные модификаторы на основе системы Al-P-Ti-iC с добавкой Nd [10] и оксида лантана [11], позволяющие существенно улучшить механические свойства заэвтектических силуминов.

Многие исследователи уделяют особое внимание влиянию газов на процесс модифицирования сплавов Al-Si. В работах [12, 13] показано, что эффективным модификатором силуминов, оказывающим положительное влияние на их микроструктуру и свойства, является водород. Установлено [14–16], что обработка расплава силуминов водородом не только модифицирует их структуру, улучшая механические свойства, но и влияет на их тепловое расширение. Таким образом, величина температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР, α) силуминов, так же как и механические свойства, во многом определяется параметрами их микроструктуры. Весьма важно, что положительный эффект обработки зависит от правильного выбора способа введения водорода в расплав, а также от длительности и температуры наводороживания. Однако вопрос о влиянии режимов и способов наводороживания на количественные параметры микроструктуры силуминов и их ТКЛР остается слабо изученным.

В настоящей работе исследовано влияние различных способов и режимов обработки расплава, предусматривающей наводороживание, на параметры микроструктуры и температурный коэффициент линейного расширения силуминов с содержанием кремния 3...15 %.

Материалы и методика экспериментальных исследований

В качестве объекта исследования были выбраны двойные сплавы Al – (3...15) % Si. В расплав алюминия вводили кристаллический крем-

ний в количестве 3, 5, 7, 11 и 15 %. Затем расплав подвергали наводороживанию влажными асбестовыми тампонами. Дополнительно использовали следующие виды обработки: продувка расплава Al-5 % Si подогретым или горячим воздухом при температуре 900 °С в течение 30 мин или кипячение его в щелочном растворе (KOH); для сплава Al-11 % Si – продувка шихтового кремния воздухом при температуре 1100 °С в течение 30 мин. Для сплава Al-15 % Si продувку расплава водородом, получаемым при взаимодействии алюминия и щелочи NaOH, проводили по четырем режимам: при температуре 860 °С в течение 1 и 5 мин и при температуре 900 °С в течение 10 и 20 мин. Сплавы заливали в холодный металлический кокиль. Из полученных слитков вырезали образцы для металлографического и дилатометрического анализа.

Металлографические исследования проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX51 с программным обеспечением компании СИАМС в диапазоне увеличений 100–1000 и микроскопа Carl Zeiss EVO50 XVP с микроанализатором EDS X-Act при ускоряющем напряжении 20 кВ. Температурный коэффициент линейного расширения определяли с помощью фоторегистрирующего оптического дилатометра системы Шевенара. Содержание атомарного водорода определяли на лабораторной установке В-1 методом нагрева образца в токе инертного газа-носителя (аргона).

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе изучено влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на содержание водорода и параметры микроструктуры силуминов с содержанием кремния от 3 до 15 %. В результате обработки расплава указанным способом наблюдается увеличение содержания водорода, находящегося в твердом растворе (табл. 1), что оказывает модифицирующее влияние на микроструктуру силуминов. Влияние наводороживания на морфологию и размеры структурных составляющих оценивали по результатам металлографического анализа исследованных сплавов.

Количественный металлографический анализ наводороженных малокремнистых силуминов Al-3 % Si и Al-5 % Si показал, что обработка

Влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на содержание водорода и размер структурных составляющих силуминов с 3–15 % кремния

Сплав	Способ приготовления	Размер структурных составляющих, мкм				Содержание водорода [H], см ³ /100 г Ме
		Первичные кристаллы кремнистой фазы	Дендриты твердого раствора	Эвтектический кремний		
				округлой формы	игольчатой формы	
Al-3 % Si	Обычный	—	62...415	0,5...2,4	—	1,2
	Обработка расплава	—	91...257	0,4...3,8	—	1,7
Al-5 % Si	Обычный	—	120...1433	0,5...2,8	—	1,3
	Обработка расплава	—	115...304	1,8...18,4	—	1,9
Al-7 % Si	Обычный	—	77...549	0,5...4,0	—	1,3
	Обработка расплава	—	186...1240	0,3...3,1	—	2,6
Al-11 % Si	Обычный	—	183...1592	1,6...4,2	12,3...75,0	1,4
	Обработка расплава	8,7...22,3	216...1957	1,7...4,3	18...61	2,1
Al-15 % Si	Обычный	12...170	133...441	0,2...1,9	34...87	1,6
	Обработка расплава	79...190	214...315	0,4...2,3	12,3...57,9	2,4

расплава приводит к диспергированию дендритов α -твердого раствора и увеличению размеров эвтектического кремния. Обработка расплава Al-7 % Si, напротив, способствует увеличению размеров дендритов α -твердого раствора (рис. 1, б, г, е и табл. 1). Возможно, это связано с тем, что в отличие от сплавов Al-3 % Si и Al-5 % Si наводороживание сплава Al-7 % Si по изученному режиму резко увеличило содержание водорода в нем по сравнению с исходным уровнем (см. табл. 1), что привело к так называемому эффекту перемодифицирования [1].

Установлено, что наводороживание усиливает неравновесность структуры, которая обусловлена кристаллизацией в металлический кокиль. Наиболее ярко это проявляется для сплавов Al-7 % Si и Al-11 % Si. После обработки расплава у силумина с 7 % кремния наблюдается отклонение от нормальной структуры, проявляющееся в увеличении объемной доли эвтектики, присутствии внутри дендритов α -твердого раствора игл кремния и скелетообразных кристаллов железосодержащей фазы (рис. 1, е).

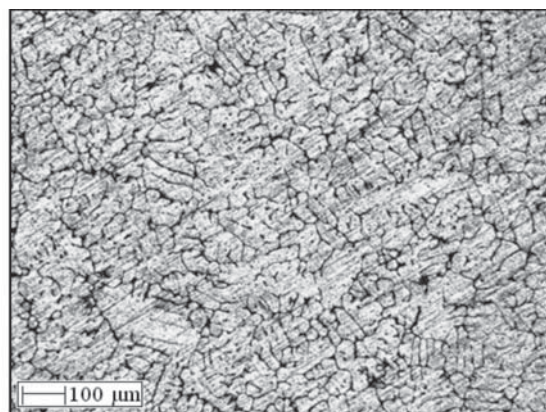
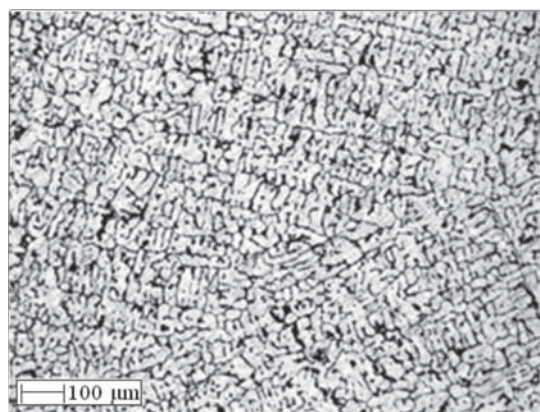
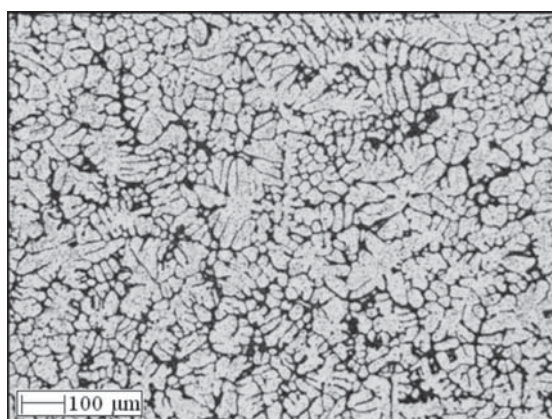
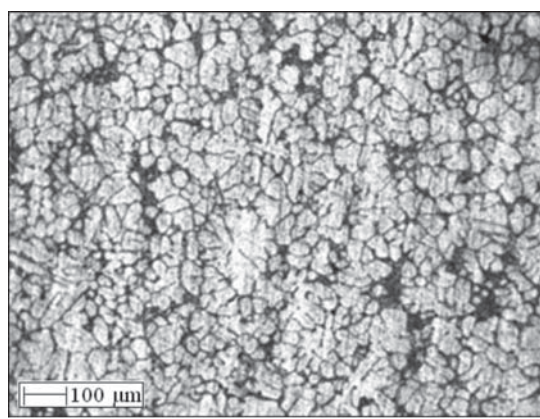
Наводороживание сплава Al-11 % Si способствует росту дендритов α -твердого раствора и диспергированию эвтектического кремния иголь-

чатой формы (см. табл. 1). Кроме того, в структуре в небольшом количестве появляются мелкие первичные кристаллы кремнистой фазы, а также расширяется область с мелкодисперсным строением эвтектики в центре образца (рис. 2, б).

Обработка расплава влажными асбестовыми тампонами способствует росту кристаллов кремнистой фазы в структуре заэвтектического сплава Al-15 % Si, наблюдающихся в местах скопления дендритов α -твердого раствора, диспергированию дендритов α -твердого раствора и эвтектического кремния игольчатой формы (рис. 2, г и табл. 1).

Как видно из приведенных данных, модифицирующее действие водорода проявляется по-разному в зависимости от содержания кремния: в структуре доэвтектических силуминов происходит диспергирование дендритов α -твердого раствора, в эвтектических и заэвтектических силуминах диспергируется в первую очередь кремний, входящий в состав эвтектики, а также увеличивается объемная доля эвтектики.

Ранее [14] нами было установлено, что такие технологические факторы, как обработка шихты и расплава, могут способствовать снижению ТКЛР силуминов. В связи с этим на следующем


a

б

в

г

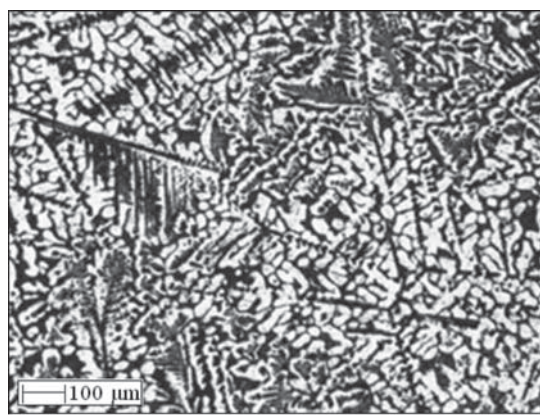
д

е

Рис. 1. Влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на микроструктуру силуминов с 5–7 % кремния:

a, б – 3 % Si; *в, г* – 5 % Si; *д, е* – 7 % Si; *a, в, д* – исходный; *б, г, е* – после обработки расплава

этапе было исследовано влияние обработки шихты и расплава, предусматривающее увеличение содержания атомарного водорода на температурный коэффициент линейного расширения силуминов с 3–15 % кремния.

Результаты определения температурного коэффициента линейного расширения приведены в табл. 2. Из табличных данных следует, что наводороживание расплава Al-3 % Si влажными

асбестовыми тампонами и продувка расплава Al-5 % Si подогретым или горячим воздухом в течение 30 мин при температуре 900 °С или кипячение его в щелочном растворе (KOH) способствуют уменьшению аномалии теплового расширения, наблюдающейся в интервале температур испытания 250...350 °С, и снижению значений температурного коэффициента линейного расширения.

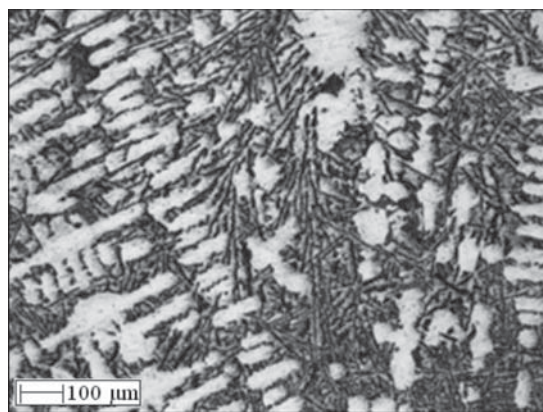
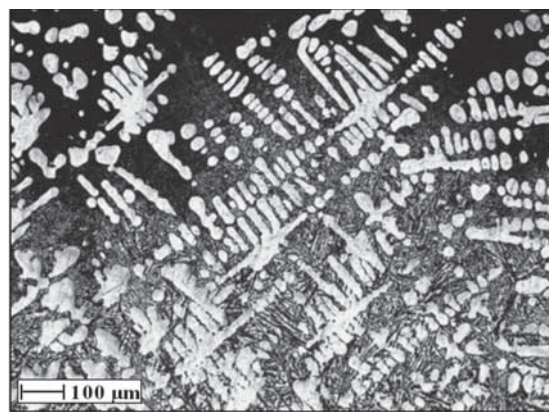
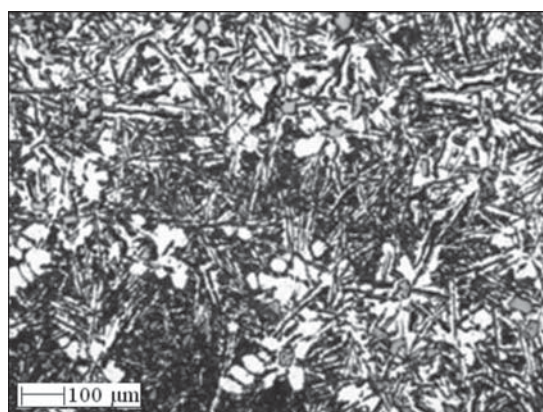
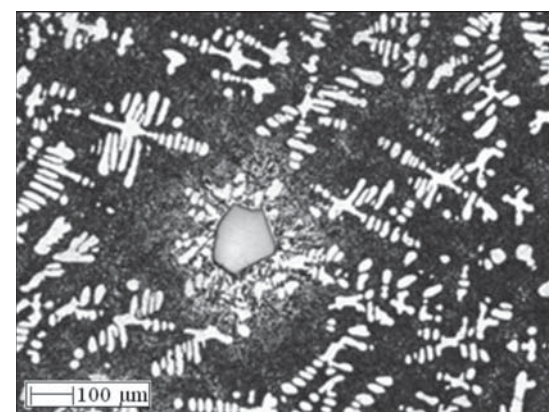
*a**б**в**г*

Рис. 2. Влияние обработки расплава влажными асбестовыми тампонами на микроструктуру силуминов с содержанием 11 и 15 % Si:

a, б – 11 % Si, *в, г* – 15 % Si; *a, в* – исходный; *б, г* – после обработки расплава

Обработка расплава Al-7 % Si влажными асбестовыми тампонами увеличивает значения ТКЛР при 100...400 °С. Аномальное повышение температурного коэффициента линейного расширения (на 34 %) наблюдается при 250...300 °С. Возникновение аномалии теплового расширения коррелирует со структурными изменениями, которые наблюдаются после обработки расплава.

Продувка шихтового кремния воздухом и обработка расплава влажными асбестовыми тампонами практически не оказывают влияния на ТКЛР силуминов эвтектического и заэвтектического состава.

Полученные результаты позволяют утверждать, что улучшение характеристик микроструктуры и повышение свойств силуминов в значительной степени зависят от правильного выбора способа и режима наводороживания. Поэтому на следующем этапе данной работы было изучено влияние продувки расплава Al-15 % Si водородом,

получаемым при взаимодействии алюминия и щелочи NaOH, в течение различного времени на параметры микроструктуры и температурный коэффициент линейного расширения. Продувку проводили по четырем режимам: при температуре 860 °С в течение 1 и 5 мин и при температуре 900 °С в течение 10 и 20 мин.

Металлографический анализ (при увеличении $\times 1000$) показал, что наводороживание указанным способом, в отличие от обработки расплава влажными асбестовыми тампонами, приводит к образованию мелкодисперсной структуры, характеризующейся тем, что эвтектика имеет тонкое строение и наблюдается измельчение выделений первичных кристаллов кремнистой фазы (табл. 3 и рис. 3).

Результаты количественного металлографического анализа показывают, что наибольший эффект модифицирования микроструктуры проявляется после продувки расплава Al-15 % Si водородом, получаемым при взаимодействии

Таблица 2

Влияние обработки расплава на температурный коэффициент линейного расширения силуминов с 3–15 % кремния

Сплав	Способ приготовления	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, град ⁻¹ при температуре испытания, °С							
		50	100	150	200	250	300	350	400
Al-3 % Si	Обычный	20,6	21,4	21,8	22,5	24,7	31,7	27,1	23,7
	Обработка расплава асбестовыми тампонами	18,9	21,0	22,0	22,8	24,6	31,0	24,1	18,2
Al-5 % Si	Обычный	18,9	21,4	22,8	24,4	28,7	38,1	24,7	23,3
	Обработка расплава подогретым воздухом	19,7	21,3	21,8	21,0	23,5	26,1	29,6	26,0
	Обработка расплава горячим воздухом	19,0	20,5	21,8	22,6	23,2	26,6	30,5	27
	Кипячение в щелочном растворе (KOH)	20,0	21,7	22,2	24,3	28,6	25,9	23,2	22,0
Al-7 % Si	Обычный	22,1	19,8	19,1	19,4	20,8	23,2	21,2	17,6
	Обработка расплава асбестовыми тампонами	19,5	21,9	22,0	22,9	27,2	31,7	23,1	19,5
Al-11 % Si	Обычный	18,3	18,8	19,7	20,3	22,1	23,9	24,4	22,8
	Продувка шихтового кремния воздухом	17,8	19,4	20,0	21,0	21,5	23,9	26,5	22,4
Al-15 % Si	Обычный	18,0	18,4	18,5	18,8	19,0	19,3	19,7	18,5
	Обработка расплава асбестовыми тампонами	17,1	18,0	18,2	18,8	19,0	20,2	20,5	20,9

Таблица 3

Влияние времени продувки расплава водородом на размер структурных составляющих сплава Al-15 % Si

Время продувки, мин	Размер структурных составляющих, мкм			
	Первичные кристаллы кремнистой фазы	Дендриты твердого раствора	Эвтектический кремний	
			округлой формы	игольчатой формы
–	12...170	133...441	0,2...1,9	34...87
1	20...100	100...652	5,4...8,2	–
5	10...135	300...600	0,9...3,2	6,0...14
10	26...150	–	0,9...5,5	–
20	20...190	184...500	1,0...5,5	–

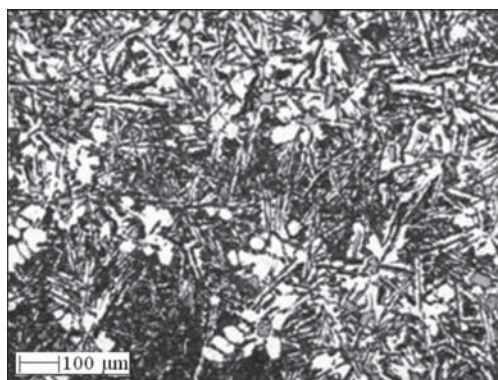
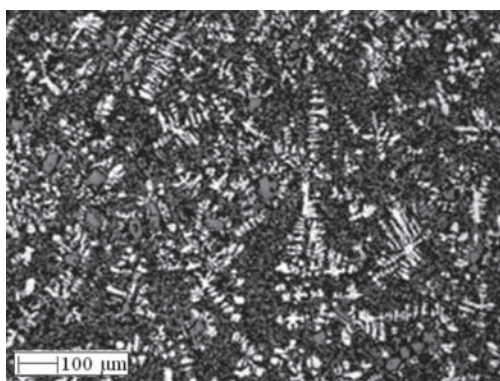
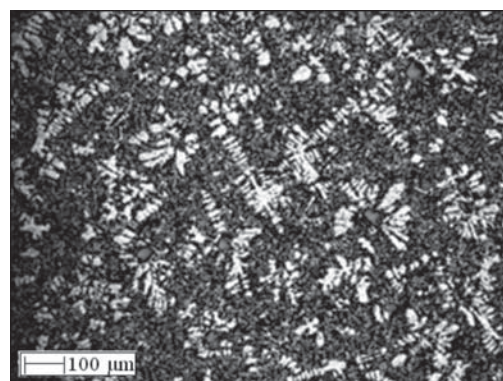
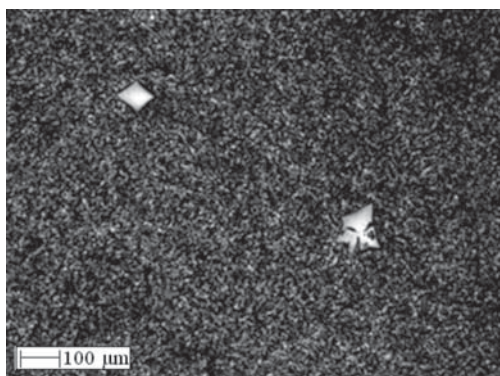
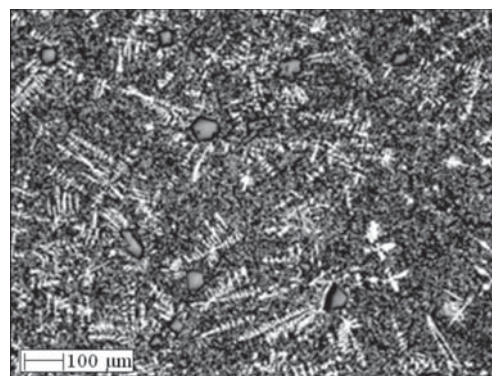
*a**б**в**г**д*

Рис. 3. Влияние времени наводороживания на микроструктуру сплава Al-15 % Si:

a – исходный; *б* – 1 мин; *в* – 5 мин; *г* – 10 мин; *д* – 20 мин

алюминия и щелочи NaOH, в течение 10 мин (табл. 3 и рис. 3, *г*). После обработки расплава по данному режиму наблюдается увеличение объемной доли эвтектической составляющей, и структура сплава состоит только из мелкодисперсной эвтектики и первичных кристаллов кремнистой фазы, присутствующих в небольшом количестве.

С помощью растровой электронной микроскопии установлено, что после этого режима наводороживания наблюдается более равномерное распределение кремния по объему сплава по сравнению с остальными способами обработки расплава.

Продувка расплава Al-15 % Si водородом в течение 10 и 20 мин в наибольшей степени положительно влияет не только на параметры микроструктуры, но и на тепловое расширение силумина. Установлено, что предварительное наводороживание в течение 10 и 20 мин снижает ТКЛР сплава Al-15 % Si при температурах испытания 50...150 °C в среднем с $18 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ до $16,5 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ (рис. 4).

Наименьшее значение температурного коэффициента линейного расширения соответствует температуре испытания 50 °C ($\alpha_{50} = 15,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹).

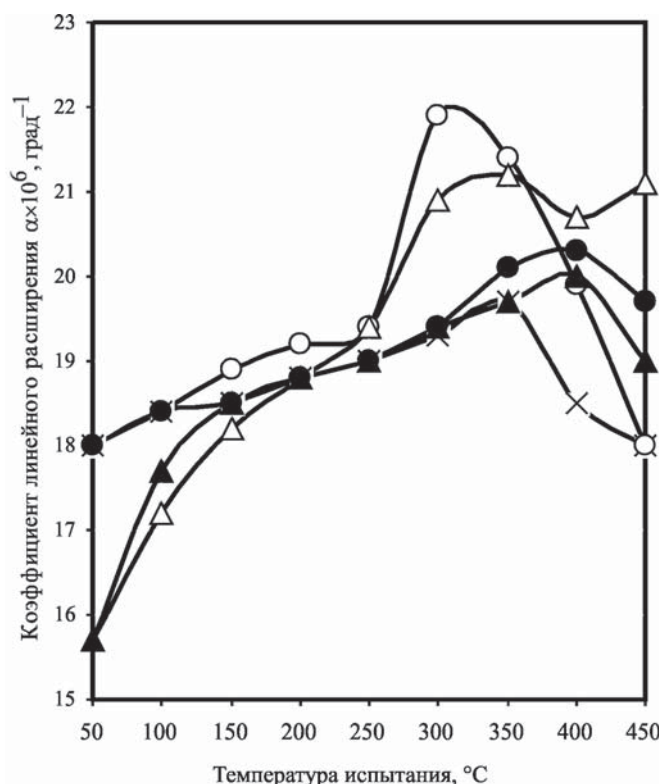


Рис. 4. Влияние времени продувки расплава водородом на температурный коэффициент линейного расширения сплава Al-15%Si:

х — х — исходный; ○ — ○ — 1 мин; ● — ● — 5 мин; Δ — Δ — 10 мин; ▲ — ▲ — 20 мин

Выводы

Обработка расплава силуминов с содержанием кремния 3...15 %, предусматривающая увеличение содержания в них атомарного водорода, оказывает модифицирующее влияние на их микроструктуру.

Модифицирующее действие водорода зависит от содержания кремния в сплаве. В случае оптимально выбранного режима наводороживания происходит не только измельчение структурных составляющих и улучшение их морфологии, но и уменьшение температурного коэффициента линейного расширения силуминов. Для сплавов Al-3...5 % Si увеличение содержания водорода в сплаве приводит к уменьшению аномалии теплового расширения в интервале 250...300 °C, характерной для малокремнистых силуминов. Продувка расплава водородом позволяет снизить ТКЛР заэвтектического сплава Al-15 % Si в интервале температур испытания 50...150 °C в среднем с $18 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$ до $16,5 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$.

Список литературы

1. Строганов Г.Б. Сплавы алюминия с кремнием / Г.Б. Строганов, В.А. Ротенберг, Г.Б. Гершман. — М.: Металлургия, 1977. — 271 с.
2. Crubes U.G. Veredelung von Aluminiumgusslegierung mit Al-Sr 3,5- Vorlegierung in Drahtform // U.G. Crubes. — Giesserei. — 1983. — 70. — № 8. — S. 257–258.
3. Абрамов А.А. О модифицировании силуминов / А.А. Абрамов // Литейное производство. — 2012. — № 7. — С. 17–19.
4. Королев С.П. Проблемы и практика модифицирования заэвтектических силуминов для поршневого сплава / С.П. Королев, В.М. Михайловский, Б.М. Немененок [и др.] // Литейщик России. — 2005. — № 10. — С. 19–22.
5. Афанасьев В.К. Использование водорода и фосфора для производства поршневых силуминов / В.К. Афанасьев В.К., А.Н. Прудников, М.В. Попова [и др.] // Водородное материаловедение и химия углеродных наноматериалов: материалы IX международной. науч. конф. ICHMS-2005.—Севастополь. — 2005. — С. 225–227.
6. Прудников А.Н. Совершенствование термической обработки поршневых деформируемых силуминов с добавками фосфора и водорода // Обработка металлов. — 2009. — № 1 (Вып. 42). — С. 8–11.
7. Стеценко В.Ю. О модифицировании доэвтектических и эвтектических силуминов / Стеценко В.Ю. // Литье и металлургия. — 2008. — №1. — С. 149–150.
8. Григорьев В.М. Влияние циркониевой лигатуры на структуру и свойства алюминия / В.М. Григорьев, Т.В. Белоус // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды V международной науч. конф. — Хабаровск, ДВГУПС, 2007. — С. 104–107.
9. Луцик П.Е. Влияние дисперсных добавок карбидов на морфологию кремния в силуминах / П.Е. Луцик, И.В. Рафальский // Ползуновский альманах. — 2011. — №4. — С. 120–121.
10. Xu C.L., Jiang Q.C., Yang Y.F., Wang H.Y., Wang J.G. Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al-Si alloy. Journal of Alloys and Compounds, 2006, Vol. 422, Issues 1–2, pp. L1–L4.
11. Xu C.L. Effect of La_2O_3 in the Al-P-Ti-TiC- La_2O_3 modifier on primary silicon in hypereutectic Al-Si alloy / C.L. Xu, H.Y. Wang, Y.F. Yang // J. Alloys and Compounds. — 2006. 421. — № 1. — P. 128–132.
12. Борисов Г.П. О роли водорода в формировании структуры и свойств алюминиевых сплавов / Г.П. Борисов // Металлургия машиностроения. — 2005. — № 5. — С. 11–20.
13. Стеценко В.Ю. О механизме модифицирования силуминов / В.Ю. Стеценко // Металлургия машиностроения. — 2008. — № 1. — С. 20–23.

14. Афанасьев В.К. Легкие сплавы с малым тепловым расширением / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.А. Ружило [и др.]. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2000. – 376 с.

15. Попова М.В. Наследственное влияние обработки шихты и расплава на терморасширение заэвтекктических силуминов / М.В. Попова, А.А. Ружило // Литейное производство. – 2000. – № 10. – С. 4–6.

16. Афанасьев В.К. Влияние обработки расплава водяным паром и термической обработки на линейное расширение алюминия с добавками 3 – 9% кремния / В.К. Афанасьев [и др.] // Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. – 2009. – Вып. 11. – С. 105–110.

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 107–116

Influence of fusion treatment on parameters of a microstructure and thermal expansion of silumin with the various content of silicon

Popova M.V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Kibko N.V., Applicant

Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

Abstract

Study of influence of fusion mixture and fusion treatment on the parameters of microstructure and temperature coefficient of linear expansion of hypoeutectic, eutectic and hypereutectoid silumin is conducted. The next ways of a fusion treatment are used: hydrogen charging by the wet fiber rock sponge, air purge, hydrogen purge, boiling in alkali solution. There was an additional air purge of silicon fusion mixture. It is established that fusion mixture and fusion treatment using studied regimes promotes structure modifying, increases volume fraction of eutectic and decreases the temperature coefficient of linear expansion of silumins. Fusion treatment leads to decrease of dendritic branches size of Al - 3 % Si, Al – 5 % Si и Al – 15 % Si alloys and to the silicium dispersion in the content of silumins eutectic of eutectic and hypereutectoid content. The most effective influence of fusion treatment oriented to decrease of the temperature coefficient of linear expansion and decrease of abnormal thermal expansion is observed for hypoeutectic silumins with carbon content of 3 and 5 %.

Keywords:

silumin, fusion treatment, hydrogen, microstructure, temperature coefficient of linear expansion.

References

1. Stroganov G.B., Rotenberg V.A., Gershman G.B. *Splavy aliuminiia s kremniem* [Alloys of aluminum with silicon]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 271 p.
2. Crubes U.G. Veredelung von Aluminiumgublegierung mit Al–Sr 3,5- Vorlegierung in Drahtform. Giesserei, 1983. Vol. 70, no. 8, pp. 257–258.
3. Abramov A.A. O modifitsirovanii siluminov [On the Inoculation of Silumins]. *Litejnoe Proizvodstvo – Foundry. Technologies and Equipment*, 2012, no. 7, pp. 17–19.
4. Korolev S.P., Mikhailovskii V.M., Nemenenok B.M. et al. Problemy i praktika modifitsirovaniia zaevtek-ticheskikh siluminov dlia porshnevogo splava [Problems and practice of modifying hypereutectic silumins for piston alloy]. *Liteishchik Rossii – Caster Russia*, 2005, no. 10, pp. 19–22.
5. Afanas'ev V.K., Prudnikov A.N., Popova M.V. Ispol'zovanie vodoroda i fosfora dlia proizvodstva porshnevnykh siluminov [The use of hydrogen for the production of phosphorus piston silumin]. *Materialy IX mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Vodorodnoe materialovedenie i khimiia uglerodnykh nanomaterialov" ICHMS-2005* [Proceedings of the IX International Scientific Conference "Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials" ICHMS-2005]. Sevastopol, 2005, pp. 225–227.

6. Prudnikov A.N. Sovershenstvovanie termicheskoi obrabotki porshnevnykh deformiruemyykh siluminov s dobavkami fosfora i vodoroda [Perfection of Thermal Processing Piston Deformable Silumins with Additives of Phosphorus and Hydrogen]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) - Metal Working and Material Science*, 2009, no. 1 (42), pp. 8–11.
7. Stetsenko V.Yu. O modifitsirovani doevtekticheskikh i evtekticheskikh siluminov [About modification of hypoeutectic and eutectic silumins]. *Lit'e i metallurgiya - Foundry and metallurgy*, 2008, no. 1, pp. 149–150.
8. Grigor'ev V.M., Belous T.V. Vliianie tsirkonievoy ligatury na strukturu i svoystva aliuminiia [Influence of zirconium addition alloy on structure and properties of aluminum]. *Trudy V mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke"* [Proceedings of the Fifth International nauchnoy konferentsii "Scientific-Technical and Economic Cooperation Asia-Pacific countries in the XXI Century"]. Khabarovsk, FESTU, 2007, pp. 104–107.
9. Lushchik P.E., Rafal'skii I.V. Vliianie dispersnykh dobavok karbidov na morfologiiu kremniia v siluminakh [Influence of additives dispersed carbides on the morphology of silicon silumins]. *Polzunovskii al'manakh – Polzunov Almanac*, 2011, no. 4, pp. 120–121.
10. Xu C.L., Jiang Q.C., Yang Y.F., Wang H.Y., Wang J.G. Effect of Nd on primary silicon and eutectic silicon in hypereutectic Al–Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, Vol. 422, Issues 1–2, pp. L1–L4.
11. Xu C.L., Wang H.Y., Yang Y.F., Wang Hong-Ying, Jiang Q.C. Effect of La_2O_3 in the Al–P–Ti–TiC– La_2O_3 modifier on primary silicon in hypereutectic Al–Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, Vol. 421, no. 1, pp. 128–132.
12. Borisov G.P. O roli vodoroda v formirovani struktury i svoistv aliuminiyevykh splavov [About the Role of Hydrogen in the Formation of Structure and Properties of Aluminum Alloys]. *Metallurgia Mashinostroyeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2005, no. 5, pp. 11–20.
13. Stetsenko V.Yu. O mekhanizme modifitsirovaniia siluminov [Inoculation Mechanisms for Silumins]. *Metallurgia Mashinostroyeniya – Metallurgy of Machinery Building*, 2008, no. 1, pp. 20–23.
14. Afanas'ev V.K., Popova M.V., Ruzhilo A.A., Frolov V.F. *Legkie splavy s malym teplovym rasshireniem* [Light alloys with low thermal expansion]. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat, 2000. 376 p.
15. Popova M.V., Ruzhilo A.A. Nasledstvennoe vliianie obrabotki shikhty i rasplava na termorasshirenie zavtekticheskikh siluminov [Hereditary influence batch processing and melt thermal expansion hypereutectic silumins]. *Litejnoe Proizvodstvo – Foundry. Technologies and Equipment*, 2000, no. 10, pp. 4–6.
16. Afanas'ev V.K. Vliianie obrabotki rasplava vodianym parom i termicheskoi obrabotki na lineinoe rasshirenie aliuminiia s dobavkami 3–9 % kremniia [Effect of melt processing steam and heat treatment on the linear expansion of aluminum with additions of 3–9 % silicon]. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie. – Herald of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2009, Issue 11, pp. 105–110.

Received 12 February 2014

Revised 15 April 2014

Accepted 18 April 2014

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ НАПЛАВКА ТИТАН- И ТАНТАЛСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ОБРАЗЦЫ ИЗ СТАЛИ 40Х*

Д.О. МУЛЬ, аспирант

Н.С. БЕЛОУСОВА, канд. техн. наук, доцент

Д.С. КРИВЕЖЕНКО, аспирант

Л.И. ШЕВЦОВА, аспирант

А.А. ЛОСИНСКАЯ, ассистент

(НГТУ, г. Новосибирск)

Поступила 7 марта 2014

Рецензирование 15 апреля 2014

Принята к печати 20 апреля 2014

Мулъ Д.О. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: ddariol@yandex.ru

С использованием ускорителя электронов ЭЛВ-6 выполнена наплавка порошковых смесей титана с графитом и тантала с графитом на толстолистовые заготовки из стали 40Х. Проведены структурные и триботехнические исследования поверхностно упрочненных материалов. Показано, что наплавка титан- и танталсодержащих порошковых смесей мощным пучком электронов, выведенным в воздушную атмосферу, приводит к формированию качественных упрочняющих покрытий. Толщина покрытий, упрочненных карбидами титана и тантала, составляет 2,2 и 1,7 мм соответственно. Объемная доля карбидов титана и карбидов тантала составляет 30 и 10 %. Максимальный уровень микротвердости наплавленных материалов достигает 10 ГПа. При проведении триботехнических испытаний по схеме трения скольжения более высокий уровень износостойкости зафиксирован на образцах, упрочненных карбидами тантала. В условиях воздействия закрепленных частиц абразива более высокой износостойкостью обладает покрытие, упрочненное карбидами титана. При воздействии нежестко закрепленных абразивных частиц покрытия «Ti+C» и «Ta+C» ведут себя одинаково.

Ключевые слова: электронно-лучевая наплавка, поверхностное упрочнение, строение покрытий, карбид титана, карбид тантала.

Введение

Проблемы, связанные с повышением износостойкости материалов, длительное время являются одними из наиболее актуальных для материаловедения. Известно, что стойкость к абразивному износу линейно зависит от твердости материала [1]. Однако увеличение твердости материалов в абсолютном большинстве случаев сопровождается снижением их трещиностойкости. Один из эффективных подходов к решению

данной проблемы заключается в поверхностном упрочнении материала. Его практическая реализация позволяет без снижения трещиностойкости повысить износостойкость деталей, а также сэкономить расход дорогостоящих легирующих материалов.

Повышению твердости и износостойкости металлических материалов способствует введение в поверхностный слой изделий высокопрочных частиц. На практике этот процесс осуществляют различными способами, в том числе

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию № 2014/138, проект № 257

методами плазменной, лазерной, дуговой, электронно-лучевой наплавки и др. [2–4]. Плазменный метод хорошо подходит для напыления керамических материалов. Толщина упрочненного слоя составляет всего 100...200 мкм. В процессе плазменной обработки поверхности металлических материалов формируется обширная зона термического влияния, обладающая низкими механическими свойствами. При дуговой наплавке покрытие формируется параллельными валиками, в результате чего в наплавленном слое наблюдается структурная и химическая неоднородность поперек валиков, а также широкая зона термического влияния. Главные недостатки такой наплавки – медленный процесс обработки и коробление деталей после нее. Лазерный метод имеет низкий КПД, так как большая часть энергии пучка отражается от металлических материалов. Электронно-лучевая наплавка требует использования вакуумной камеры, что ограничивает размеры заготовок и увеличивает стоимость процесса. В то же время наплавку покрытий можно выполнять, используя пучок электронов, выведенный в воздушную атмосферу [5–9]. Вневакуумная электронно-лучевая наплавка порошковых смесей позволяет за короткое время сформировать ультрадисперсную структуру в поверхностном слое заготовки. Высокая производительность процесса и возможность обрабатывать крупногабаритные заготовки выгодно отличают данный способ обработки от остальных [10].

Высокой твердостью обладают карбиды переходных металлов V–VII групп периодической таблицы Менделеева. Введение таких карбидов способствует повышению дюрометрических и триботехнических свойств сталей. На сегодняшний день опубликовано много работ по наплавке карбидосодержащих порошковых смесей на сталь [11–16]. В качестве наплавочных порошков использованы карбиды хрома, титана, ванадия, кремния и др. Публикаций, связанных с вневакуумной электронно-лучевой наплавкой карбидообразующих металлов, очень мало. Однако при легировании поверхности карбидами для их лучшего распределения в формируемом слое в наплавляемую смесь необходимо вводить смачивающий компонент, что, в свою очередь, уменьшает объем основных элементов в насыпке. В работе корейских исследователей показана,

что износостойкость и твердость покрытия, сформированного наплавкой титана в смеси с графитом на нержавеющей стали, выше, чем у покрытия, полученного наплавкой карбида титана на ту же основу [16].

В настоящей работе в качестве материала основы выбрана конструкционная сталь 40X. Сталь данной марки обладает высокой прочностью, пластичностью и ударной вязкостью. Легирующими материалами служат смеси порошков титана с графитом и тантала с графитом. Исследования материалов, полученных в результате такого сочетания наплавляемых составов и материала основы, не проводились.

Цель работы заключается в исследовании структуры, дюрометрических и триботехнических свойств поверхностных слоев конструкционной стали 40X, модифицированной путем вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошковых смесей титана с графитом и тантала с графитом.

1. Материалы и методы исследования

Вневакуумную электронно-лучевую наплавку выполняли в Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск). Ускоритель, разработанный российскими специалистами, позволяет разгонять пучок электронов с энергией 1,4 МэВ до релятивистских скоростей.

На пластину из конструкционной стали 40X размерами 50 × 100 × 16 мм наносили смесь порошков с насыпной плотностью 0,33 г/см². Для наплавки использовали два состава порошковых смесей: титан с графитом и тантал с графитом. В настоящей работе покрытие, сформированное наплавкой титансодержащей порошковой смеси, обозначено как «Ti+C», а покрытие с танталом – как «Ta+C». С целью формирования в поверхностном слое карбидов MeC стехиометрического состава атомное соотношение металла к углероду в насыпке было выбрано 1:1. Для защиты наплавляемых порошков и основного металла от окисления в порошковую смесь вводили 40 масс. % флюса, функцию которого выполнял фтористый кальций CaF₂.

Для наплавки упрочняющих слоев используются режимы, представленные в таблице. Размах сканирования пучка электронов соответствует ширине стальной заготовки. Столик с

расположенной на нем заготовкой перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости сканирования пучка электронов.

Режимы вневакуумной электронно-лучевой наплавки

Основные параметры	Формируемые покрытия	
	«Ti+C»	«Ta+C»
Энергия электронов, МэВ	1,4	
Диаметр пучка электронов, мм	12	
Размах сканирования, мм	50	
Скорость перемещения столика, мм/с	10	
Ток пучка электронов, мА	27	28

Структуру наплавленных покрытий исследовали методами оптической и растровой микроскопии, а также методом рентгенофазового анализа. Исследования с использованием оптического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Alm* выполняли на поперечных шлифах в режиме светлого поля. Структуру материалов выявляли трехпроцентным раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Объемную долю карбидных частиц оценивали на оптическом микроскопе с использованием программы *Multiphase*. Электронно-микроскопические исследования выполняли на растровом электронном микроскопе *Carl Zeiss EVO 50 XVP*. Фазовый состав покрытий определяли на дифрактометре *ARL X'TRA*. Шаг регистрации рентгенограмм составлял 0,05 град, время накопления импульсов – 3 с.

Для оценки дюрометрических свойств покрытий, переходных зон и основного металла на поперечных шлифах проводили измерения микротвердости в направлении от поверхности покрытия к основе. Измерения были выполнены на приборе *Wolpert Group 402MVD*. Нагрузка на индентор составляла 0,98 Н.

Триботехнические испытания осуществляли в различных условиях изнашивания: трение скольжения, трение о закрепленные и не жестко закрепленные абразивные частицы. В условиях трения скольжения покрытие испытывали на машине СМТ-1 по схеме «диск-плоскость». В качестве смазочного материала использовали минеральное масло М8В. Врезающим индентором служил диск, изготовленный из стали 45. Износостойкость покрытия оценивали по объему лунки изношенного материала.

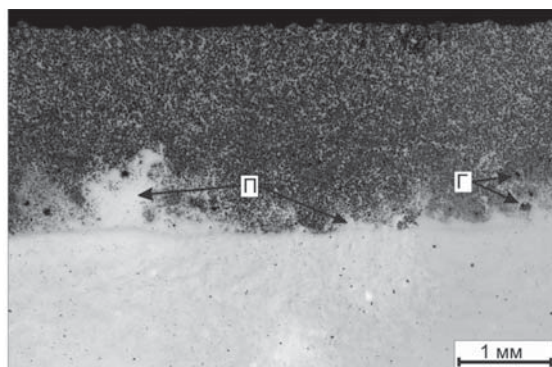
Стойкость покрытий при воздействии не жестко закрепленных абразивных частиц оценивали по ГОСТ 23.208–79. В качестве абра-

зивного материала использовали речной песок со средним размером частиц равным 200 мкм. Резиновый ролик прижимался к поверхности образца с силой 60 Н и, вращаясь, перемещал по поверхности образца поступающий из резервуара песок. Изнашивание покрытия оценивали по потере массы образца.

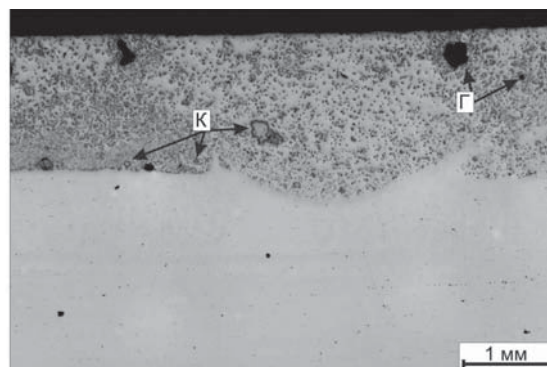
Износостойкость полученных материалов в условиях трения закреплёнными абразивными частицами оценивали по потере объема в соответствии с ГОСТ 17367-7. Абразивным материалом служила электрокорундовая шлифовальная шкурка с размерами абразивных зерен в диапазоне от 63 до 80 мкм. Цилиндрический образец с силой 3 Н прижимался к вращающемуся кругу с закрепленной на нем шкуркой. Скорость вращения круга составляла 100 об/мин. Испытания проводили в течение 35 с. Во всех проведенных триботехнических испытаниях в качестве эталонных были выбраны образцы из стали 40Х, находившейся в отожженном состоянии.

2. Результаты и обсуждение

В процессе вневакуумной электронно-лучевой наплавки на поверхности стальных заготовок формируются ровные покрытия с характерным металлическим блеском. На образце, полученном при наплавке титансодержащего порошка, толщина покрытия составляет 2,2 мм. При наплавке танталсодержащей порошковой смеси толщина поверхностно упрочненного слоя составляет 1,7 мм. Отслоений, трещин или других заметных дефектов в покрытиях не наблюдается (рис. 1). Наличие зон перемешивания (на рис. 1, а обозначены буквой П) свидетельствует о хорошем качестве соединения наплавленных слоев с основным металлом. На нетравленных шлифах поверхностных слоев наблюдаются темные области округлой формы (обозначены буквой Г на рис. 1). Такие области представляют собой поры и нерастворившиеся в ванне расплава частицы графита. Формирование карбидов по окружности некоторых областей свидетельствует о наличии в них углерода. Наиболее крупные области такого типа наблюдаются в покрытии типа «Ta+C». В нижней его части формируются зоны повышенной концентрации карбидов (обозначены буквой К на рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Строение поперечных шлифов, изготовленных из образцов типа «Ti+C» (а) и «Ta+C» (б)
Нетравленное состояние

Рентгенограммы, зафиксированные при анализе переплавленного материала, представлены на рис. 2. В покрытии типа «Ti+C» обнаруживаются фазы α -Fe, γ -Fe и TiC. В поверхностном слое образца «Ta+C» методом рентгенофазового анализа зафиксированы альфа-, гамма-железо и карбид тантала TaC.

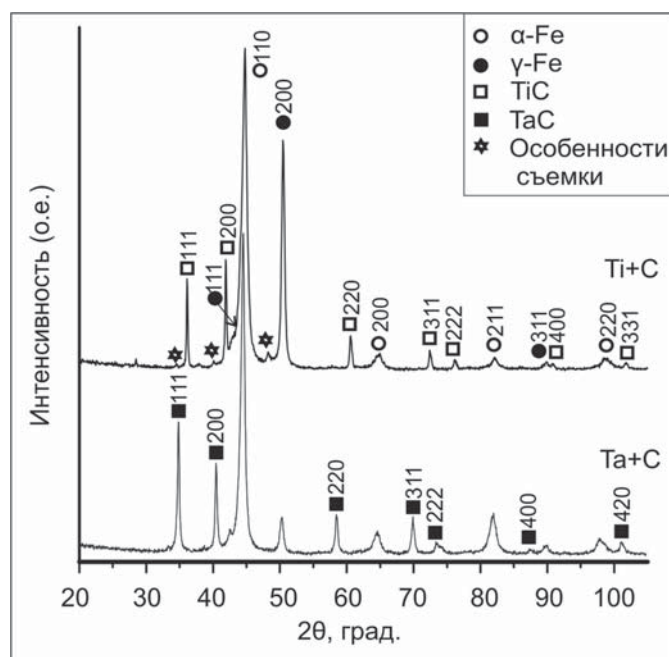


Рис. 2. Рентгенограммы наплавленных слоев

Методами оптической и электронной микроскопии в покрытии «Ti+C» выявляются шесть структурных составляющих: карбиды титана, α -фаза (кристаллы мартенсита), γ -фаза (остаточный аустенит), пластинчатый перлит, ледебурит и пластины цементита видманштеттова типа (рис. 3, а, б). Результаты исследования структуры этого материала представлены в работе [17].

Структура, сформированная в поверхностных слоях стали при наплавке танталсодержа-

щей порошковой смеси, показана на рис. 3, в, г. Карбиды тантала преимущественно имеют кубическую форму. По границам бывших аустенитных зерен в виде окаймляющей прослойки выделяется цементит (на рис. 3, г обозначен буквой Ц). На фоне наплавленного слоя четко выделяются прямолинейные ориентированные кристаллы цементита видманштеттова типа, обозначенные на рис. 3, г символом Ц_{вт}. Между пластинами видманштеттова цементита располагаются колонии пластинчатого перлита (П, рис. 3, г). Оставшийся объем занят кристаллами мартенсита и остаточного аустенита (М+А_{ост} на рис. 3, г). Рентгенофазовый анализ подтверждает наличие фаз, входящих в эти структуры.

Уровень твердости и стойкости материалов в условиях воздействия абразивных частиц зависит от количества содержащейся в нем твердой фазы, в данном случае от содержания карбидов. Объемная доля карбидов титана в покрытии «Ti+C» и карбидов тантала в покрытии «Ta+C» составляет 30 и 10 % соответственно. Разница в количестве карбидных частиц связана с тем, что атомная масса тантала в 3,75 раз выше, чем у титана, а насыпная плотность в обоих случаях одинакова. Меньшее атомное содержание тантала в исходной порошковой смеси объясняет более низкую объемную долю карбидов TaC по сравнению с покрытием «Ti+C».

ДюрOMETрические свойства покрытий, переходных зон и основного материала представлены на графике (рис. 4). Микротвердость феррито-перлитной структуры в основном металле составляет 2 ГПа (зона 3 на рис. 4). В результате ускоренного нагрева и последующего отвода тепла в глубь заготовок в верхних слоях сталь-

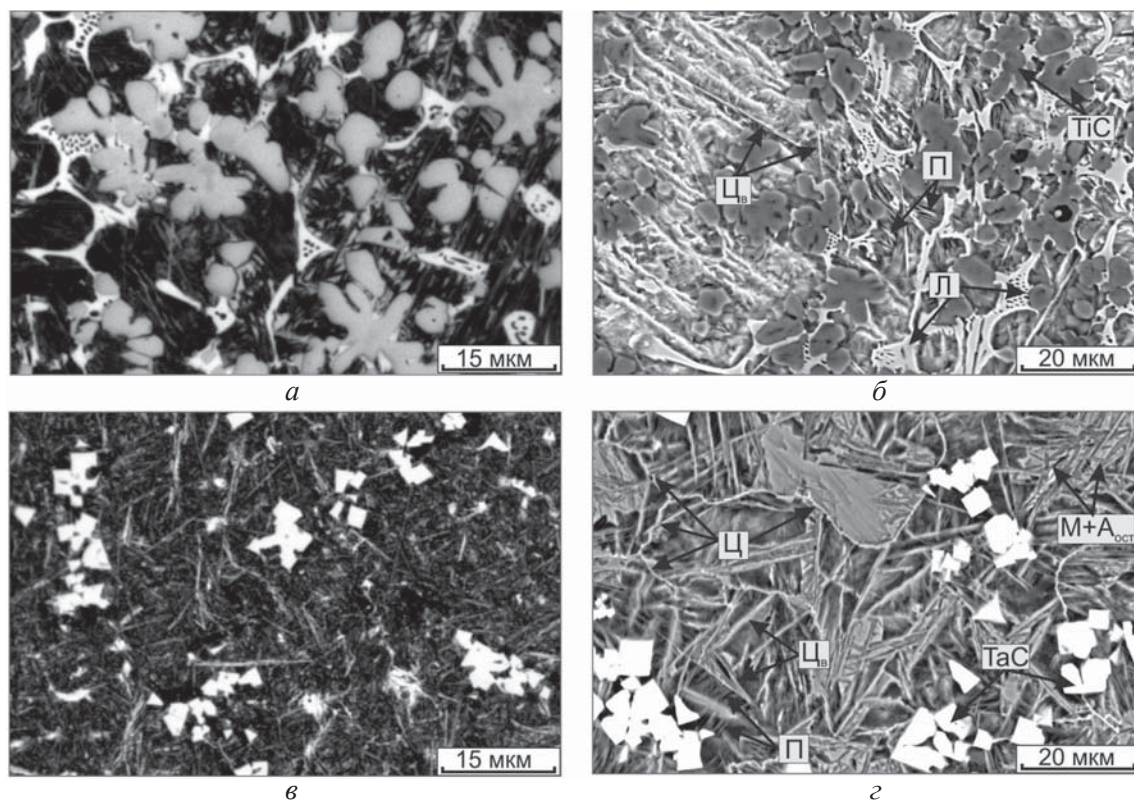


Рис. 3. Структура наплавленных слоев:

а – световая микроскопия покрытия «Ti+C», травленое состояние; *б* – растровая электронная микроскопия покрытия «Ti+C»; *в* – световая микроскопия покрытия «Ta+C», травленое состояние; *г* – растровая электронная микроскопия покрытия «Ta+C»

ных образцов возникают зоны термического влияния. Максимальный уровень микротвердости в этих зонах составляет 5 ГПа. В наплавленных слоях микротвердость достигает 8...9 ГПа. Более высокие значения микротвердости зафиксированы у границ между покрытиями и зонами термического влияния.

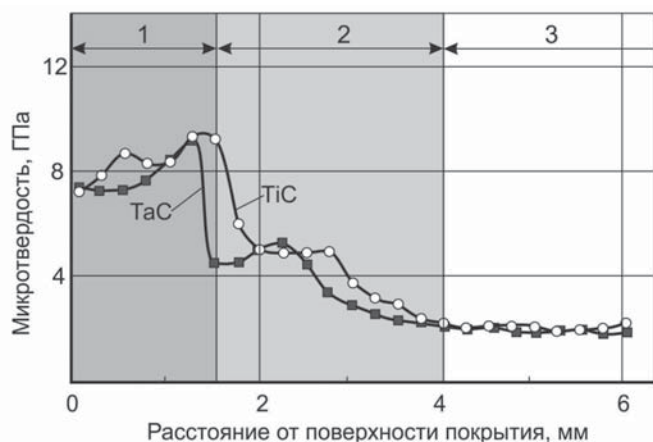


Рис. 4. Характер распределения микротвердости в поперечном сечении поверхностно упрочненных образцов:

1 – наплавленный слой; 2 – зона термического влияния; 3 – основной металл

Триботехнические испытания позволяют оценить эффективность разработанных покрытий при эксплуатации в различных условиях изнашивания.

Результаты изнашивания полученных материалов в условиях трения скольжения по схеме «диск-плоскость» представлены на рис. 5. На начальном этапе испытания скорость изнашивания максимальна вследствие малой площади и высокой удельной нагрузки в месте контакта врезающегося индентора и поверхности. Минимальными характеристиками износостойкости обладают стальные образцы без наплавленного покрытия. Наплавка покрытия «Ti+C» увеличивает показатели износостойкости поверхности в два раза. Максимальным сопротивлением изнашиванию обладают покрытия «Ta+C». Их износостойкость превышает износостойкость основного металла в четыре раза, а наплавленных слоев на основе Ti+C в два раза. Следует отметить, что интенсивность изнашивания образцов с упрочняющими покрытиями после завершения этапа приработки низка в отличие от исходного материала без покрытия, скорость изнашивания которого при установившемся режиме трения составляет $4 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{мин}$.

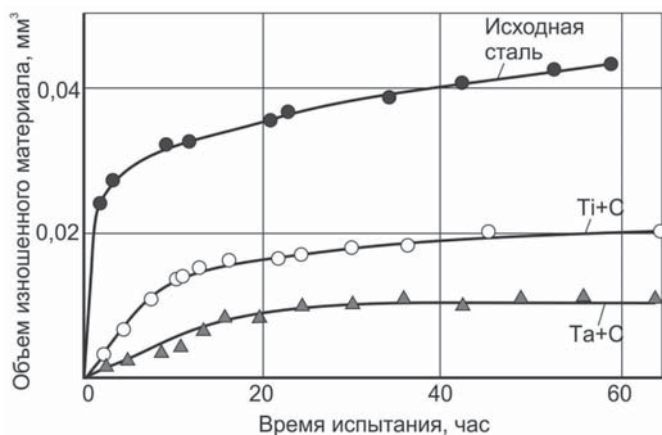


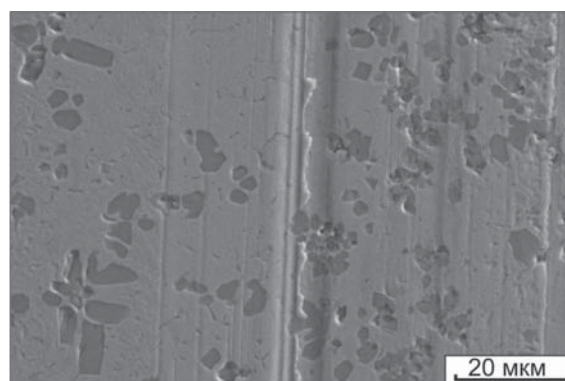
Рис. 5. Изменение объема лунок изношенного материала при проведении испытаний по схеме трения скольжения

При проведении испытаний по данной схеме реализуется режим трения, соответствующий граничной смазке, который определяется сопротивлением сдвигу материала граничного слоя и сопротивлением, обусловленным механическим взаимодействием микронеровностей исследуемого образца и контртела [18]. На начальном этапе изнашивания в месте контакта давление повышено. Под его воздействием реализуются процессы пластической деформации, разрушения микронеровностей и сглаживания поверхности. Вместе с тем механическое взаимодействие образца с индентором приводит к появлению новых микронеровностей. На рис. 6 изображены снимки лунок износа наплавленных слоев. На поверхности покрытия «Ti+C» зафиксирован характерный дефект в виде канавки (рис. 6, а), развивающейся через зону с равномерно распределенными карбидными частицами. В слое «Ta+C» зоны с повышенной концентрацией карбидов при изнашивании ведут себя как более жесткий каркас и препятствуют формированию глубоких царапин (рис. 6, б), что способствует уменьшению износа.

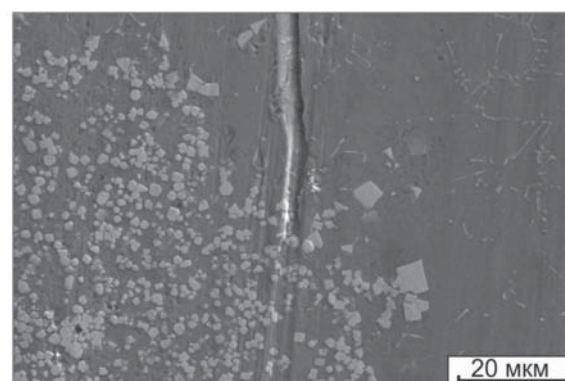
В качестве критерия стойкости покрытий в условиях трения о закрепленные частицы абразива выбрана величина потери объема образца. Результаты испытаний представлены на рис. 7. По сравнению с материалом основы (стали 40Х) износ покрытия «Ti+C» был меньше в три раза, а покрытия «Ta+C» в два раза.

При реализации данного вида испытаний основным механизмом изнашивания является микрорезание, которое в первую очередь определя-

ется глубиной внедрения абразивной частицы в поверхность образца [18]. Твердые включения, присутствующие в наплавленном слое, препятствуют внедрению абразивных частиц. Таким образом, чем больше твердость и объемная доля карбидов в покрытии, тем выше показатели его износостойкости. В покрытии «Ti+C» объемная доля упрочняющих частиц и их твердость по сравнению с покрытием «Ta+C» выше.



а



б

Рис. 6. Внешний вид покрытий «Ti+C» (а) и «Ta+C» (б), изношенных по схеме трения скольжения

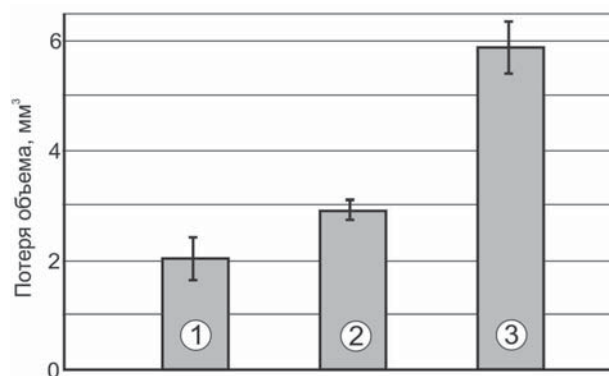


Рис. 7. Результаты испытаний материалов в условиях воздействия закрепленных частиц абразива: 1 — покрытие «Ti+C»; 2 — покрытие «Ta+C»; 3 — основа (сталь 40Х после отжига)

При изнашивании в условиях трения о не жестко закрепленные абразивные частицы оба покрытия показали примерно одинаковый уровень износостойкости, который по сравнению со сталью 40Х в четыре раза выше (рис. 8). Абразивные частицы, совершая поступательное движение относительно поверхности изнашивания, имеют возможность вращаться. При взаимодействии с высокопрочным препятствием частица перекачивается и продолжает царапание, отгесняя материал покрытия.

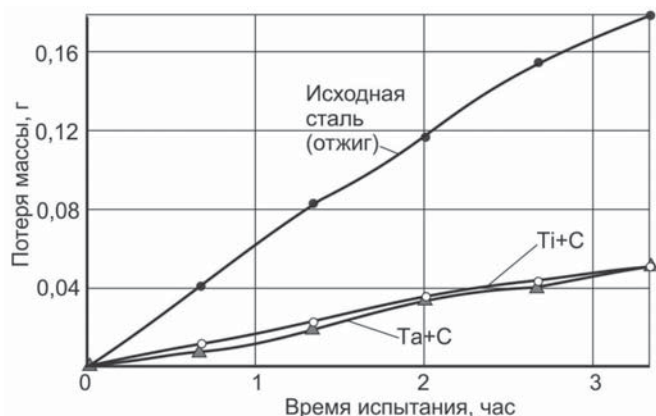


Рис. 8. Зависимость потери массы образцов от времени испытаний при воздействии не жестко закрепленных частиц абразива

Таким образом, в процессе испытаний по данной схеме изнашивание покрытий происходит по двум механизмам: микрорезанием и пластическим отгеснением материала. При испытании исходной стали доминирует механизм микрорезания, обеспечивающий более высокую интенсивность изнашивания. Особенности проявления второго механизма определяются твердостью металлической матрицы, сформированной при наплавке порошковых смесей.

Выводы

1. Результаты исследований по формированию износостойких покрытий на толстолистовых заготовках из стали 40Х свидетельствуют о высокой производительности технологии вневакуумной электронно-лучевой наплавки титанографитовой и танталографитовой порошковой смеси. Толщина покрытий, полученных за один проход электронного пучка, составляет 2,2 и 1,7 мм соответственно.

2. Объемная доля карбидов титана и карбидов тантала в наплавленных слоях составляет

30 и 10 %. Существенные различия в содержании упрочняющих частиц обусловлены более высокой плотностью тантала (при наплавке порошковых смесей с одинаковой насыпной плотностью).

3. Максимальный уровень микротвердости наплавленных материалов достигает 10 ГПа.

4. При проведении триботехнических испытаний по схеме трения скольжения более высокий уровень износостойкости, превышающий износостойкость материала основы в четыре раза, зафиксирован на образцах, упрочненных карбидами тантала.

5. При воздействии не жестко закрепленных абразивных частиц покрытия «Ti+C» и «Ta+C» ведут себя одинаково.

6. В условиях воздействия закрепленных частиц абразива более высокой износостойкостью обладает покрытие, упрочненное карбидами титана. Объем изношенного покрытия «Ti+C» за 35 с испытания составляет 2 мм³, в то время как износ основного металла достигает 6 мм³.

7. Выбор схемы поверхностного легирования сталей (титанографитовой либо танталографитовой порошковой смесью) методом наплавки электронным пучком определяется условиями эксплуатации упрочняемой конструкции.

Список литературы

1. Виноградов В.Н., Сорокин Г.М., Колокольников М.Г. Абразивное изнашивание. — М.: Машиностроение, 1990. — 224 с.
2. Сосин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Сварка, нанесение покрытий, упрочнение. — М. Машиностроение, 2008. — 406 с.
3. Baoshuai Du, Sameer R. Paital, Narendra B. Dahotre. Phase constituents and microstructure of laser synthesized TiB₂-TiC reinforced composite coating on steel // Scripta Materialia. — 2008. — V. 59. — Pp. 1147–1150.
4. Бельюк С.И., Самарцев В.П., Гальченко Н.К., Дампион Б.В., Раскошный С.Ю., Колесникова К.А. Электронно-лучевая наплавка в черной металлургии // Физическая мезомеханика. — 2006. — Т. 9. — Спец. вып. — С. 157–160.
5. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Rukhtuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum // Materials Science & Engineering A. — 2013. — V. 578. — P. 310–317.

6. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding // *Applied Surface Science*. – 2013. – V. 284. – P. 472–481.
7. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel // *Surface & Coatings Technology*. – 2012. – V. 207. – P. 245–253.
8. Golkovsky M.G., Zhuravina T.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Prikhodko E.A. Cladding of Tantalum and Niobium on Titanium by Electron Beam, Injected in Atmosphere // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vols. 314–316. – P. 23–27.
9. Bataev I., Golkovskii M., Bataev A., Losinskaya A., Dostovalov R., Popelyukh A., Drobyaz E. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing // *Surface & Coatings Technology*. – 2014. – V. 242. – P.164–169.
10. Голковский М.Г. Закалка и наплавка релятивистским электронным пучком вне вакуума. Технологические возможности метода – Saarbrücken: LAPLAMBERT Academic Publishing, 2013. – 317 с.
11. Полетика И.М., Голковский М.Г., Борисов М.Д., Салимов Р.А., Перовская М.В. Формирование упрочняющих покрытий методом наплавки в пучке релятивистских электронов // *Физика и химия обработки материалов*. – 2005. – № 5. – С. 29–41.
12. Yun Eunsub, Kim Yong Chan, Lee Sunghak, Kim Nack J. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in (TiC,SiC)/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation // *Metallurgical and materials transactions A*. – 2004. – V. 35A. – P. 1029–1038.
13. Lee Dong-Geun, Lee Kyuhong, Lee Sunghak. Effects of tempering on microstructure, hardness, and fracture toughness of VC/steel surface composite fabricated by high-energy electron beam irradiation // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – № 201, P. 1296–1301.
14. Полетика И.М., Иванов Ю.Ф., Голковский М.Г., Перовская М.В. Структура и свойств покрытий, полученных электронно-лучевой наплавкой // *Физика и химия обработки материалов*. – 2007. – № 66. – С. 48–56.
15. Полетика И.М., Голковский М.Г., Крылова Т.А., Иванов Ю.Ф., Перовская М.В. Формирование структуры металла электронно-лучевой наплавки карбидом вольфрама // *Перспективные материалы*. – 2009. – № 4. – С. 65–70.
16. Lee Jongmin, Euh Kwangjun, Oh Jun Cheol, Lee Sunghak. Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation // *Materials Science and Engineering A*. – 2002. – № 323. – P. 251–259.
17. Муль Д.О., Дробяз Е.А., Чакин И.К., Самойленко В.В., Ложкин В.С., Достовалов Р.А. Структура и свойства после вневакуумной электронно-лучевой наплавки порошков титана, тантала, молибдена и графита // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2013. – № 3(60). – С. 115–120.
18. Гаркунов Д.Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

ОБРАБОТКА METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 117–126

Electron beam cladding of powder mixtures containing titanium and tantalum on specimens of steel 40X

Mul D.O., Post-graduate Student, e-mail: ddariol@yandex.ru

Belousova N.S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: kapriz.ru@mail.ru

Krivezhenko D.S., Post-graduate Student

Shevtsova L.I., Post-graduate Student, e-mail: edeliya@ngs.ru

Losinskaya A.A., Assistant, e-mail: anna.losinskaya@mail.ru

Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Cladding of powder mixtures of titanium with graphite and tantalum with graphite on thick blanks of steel 40X was realized by electron beam accelerator. The structural and tribological investigations of surface-hardened materials were carried out. It is shown that the cladding of powder mixtures containing titanium and tantalum by high-power electron beam injected into the atmosphere leads to the formation of high-quality hardsurfacing overlays.

The thickness of coating reinforced by titanium and tantalum carbides is equal to 2.2 and 1.7 mm respectively. The volume fraction of titanium and tantalum carbides is 30 and 10 % respectively. The maximal microhardness level of clad materials is 10 GPa. The maximal wear resistance level is registered during sliding friction for specimens reinforced by tantalum carbides. Under conditions of fixed abrasive particles coating, reinforced by tantalum carbides, has a higher resistance level. Under the influence of loosely coupled fixed abrasive particles “Ti+C” and “Ta+C” coating have the similar properties.

Keywords:

electron beam cladding, surface hardening, coatings structure, titanium carbide, tantalum carbide

References

1. Vinogradov V.N., Sorokin G.M., Kolokol'nikov M.G. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 224 p.
2. Sosin N.A., Ermakov S.A., Topolianskii P.A. *Plazmennye tekhnologii. Svarka, nanesenie pokrytii, uprochnenie* [Plasma technology. Welding, coating, hardening.]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 406 p.
3. Baoshuai Du, Sameer R.P., Narendra B.D. Phase constituents and microstructure of laser synthesized TiB₂-TiC reinforced composite coating on steel. *Scripta Materialia*, 2008, Vol. 59, pp. 1147–1150.
4. Belyuk S.I., Samartsev V.P., Galchenko N.K., Dampilon B.V., Raskoshny S.Yu., Kolesnikova K.A. Elektronno-luchevaia naplavka v chernoi metallurgii [Electron-beam surfacing in ferrous metallurgy]. *Fizicheskaya mekhanika - Physical Mesomechanics*, 2006, Vol. 9, Special Issue, pp. 157–160.
5. Golkovski M.G., Bataev I.A., Bataev A.A., Ruktuev A.A., Zhuravina T.V., Kuksanov N.K., Salimov R.A., Bataev V.A. Atmospheric electron-beam surface alloying of titanium with tantalum. *Materials Science & Engineering: A*, 2013, Vol. 578, pp. 310–317.
6. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovski M.G., Krivizhenko D.S., Losinskaya A.A., Lenivtseva O.G. Structure of surface layers produced by non-vacuum electron beam boriding. *Applied Surface Science*, 2013, Vol. 284, pp. 472–481.
7. Bataev I.A., Bataev A.A., Golkovsky M.G., Teplykh A.Yu., Burov V.G., Veselov S.V. Non-vacuum electron-beam boriding of low-carbon steel. *Surface & Coatings Technology*, 2012, Vol. 207, pp. 245–253.
8. Golkovsky M.G., Zhuravina T.V., Bataev I.A., Bataev A.A., Veselov S.V., Bataev V.A., Prikhodko E.A. Cladding of Tantalum and Niobium on Titanium by Electron Beam, Injected in Atmosphere. *Advanced Materials Research*, 2011, Vols. 314–316, pp. 23–27.
9. Bataev I., Golkovskii M., Bataev A., Losinskaya A., Dostovalov R., Popelyukh A., Drobyaz E. Surface hardening of steels with carbon by non-vacuum electron-beam processing. *Surface & Coatings Technology*, 2014, Vol. 242, pp. 164–169.
10. Golkovskii M.G. *Zakalka i naplavka reljativistskim jelektronnym puchkom vne vakuumu. Tehnologicheskie vozmozhnosti metoda* (Hardening and cladding of a relativistic electron beam outside the vacuum. Technological capabilities of the method). Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 317 p.
11. Poletika I.M., Golkovsky M.G., Borisov M.D., Salimov R.A., Perovskaya M.V. Perovskaia M.V. Formirovanie uprochniaushchikh pokrytii metodom naplavki v puchke reljativistskikh elektronov [Formation of strengthening coatings fused by relativistic electron beam]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov (Physics and Chemistry of Materials Processing) - Inorganic Materials: Applied Research*, 2005, no. 5, pp. 29–41.
12. Yun Eunsub, Kim Yong Chan, Lee Sunghak, Kim Nack J. Correlation of microstructure with hardness and wear resistance in (TiC, SiC)/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron-beam irradiation. *Metallurgical and materials transactions A*, 2004, Vol. 35, Issue 3, pp. 1029–1038.
13. Lee Dong-Geun, Kyuhong Lee, Sunghak Lee. Effects of tempering on microstructure, hardness, and fracture toughness of VC/steel surface composite fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Surface and Coatings Technology*, 2006, Vol. 201, Issues 3–4, pp. 1296–1301.
14. Poletika I.M., Ivanov Iu.F., Golkovskii M.G., Perovskaia M.V. Struktura i svoistv pokrytii, poluchennykh elektronno-luchevoi naplavkoi [Structure and properties of the coatings produced by electron-beam overlaying welding]. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov (Physics and Chemistry of Materials Processing) - Inorganic Materials: Applied Research*, 2007, № 6, pp. 48–56.
15. Poletika I.M., Golkovski M.G., Krilova T.A., Ivanov Yu.F., Perovskaya M.V. Formirovanie struktury metalla elektronno-luchevoi naplavki karbidom vol'frama [Formation of metal structure by electron-beam surfacing of tungsten carbide]. *Perspektivnye materialy - Journal of Advanced Materials*, 2009, no. 4, pp. 65–70.

16. Jongmin Lee, Kwangjun Euh, Jun Cheol Oh, Sunghak Lee. Microstructure and hardness improvement of TiC/stainless steel surface composites fabricated by high-energy electron beam irradiation. *Materials Science and Engineering: A*, 2002, Vol. 323, Issues 1–2, pp. 251–259.

17. Mul D.O., Drobyaz E.A., Chakin I.K., Samoylenko V.V., Lozhkin V.S., Dostovalov R.A. Struktura i svoistva posle vnevakuumnoi elektronno-luchevoi naplavki poroshkov titana, tantala, molibdena i grafitu [Structure and properties of steel under non-vacuum electron-beam welding deposition of titanium, tantalum, molybdenum and graphite powders]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2013, no. 3(60), pp. 115–120.

18. Garkunov D.N. Tribotekhnika [Tribological engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 424 p.

Funding

The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (The public contract no. 2014/138, project no. 257).

Received 7 March 2014

Revised 15 April 2014

Accepted 20 April 2014

Рекомендации по написанию научной статьи

Оформление русскоязычной части статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)», должно соответствовать по стилю и содержанию определенным минимальным требованиям еще до того, как она будет принята на рассмотрение для публикации. Статьи, не соответствующие этим минимальным требованиям, получают мотивированный отказ редактора – их даже не отправляют на рассмотрение в редакционный совет. Вопросы новизны и оригинальности исследования решаются авторами статьи.

Отметим одно необходимое условие, сформировавшееся за время работы в журнале, – нельзя подавать на рассмотрение работу, которая предварительно не прошла оценки качества самим автором (и научным руководителем в случае недостаточного опыта автора в подготовке научных статей). Кроме того, текст должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

1. Общие комментарии

Пишите доходчивым и простым языком – абстрактные формулировки и излишне длинные фразы трудны как для чтения, так и для понимания.

Статья не должна быть слишком длинной, даже если журнал не указывает максимального объема статьи. Пишите лаконично и грамотно, соблюдая правила написания по русскому языку.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;

- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь определенную структуру, которая описана ниже.

2. Заглавие и сведения об авторах

Используйте лаконичное описательное название, содержащее основные ключевые слова темы статьи.

Перед заглавием обязательно указывается УДК.

После заглавия по порядку следуют И.О. ФАМИЛИЯ авторов, их ученая степень, ученое звание, в скобках указываются сокращенное название организации, город. Ниже – данные для переписки: Фамилия И.О. основного автора, почтовый адрес и полное название организации, e-mail.

3. Аннотация (реферат)

Аннотация содержит ключевые слова и представляет собой сжатый обзор содержания работы, указывает на основные проблемы, к которым обращается автор, на подход к этим проблемам и на достижения работы (не менее 10 строк).

4. Ключевые слова

Ключевые слова должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

5. Введение

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подхода, данных или анализа). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в данном разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию данной отрасли науки. Не следует пренебрегать книгами и статьями, которые были написаны, например, раньше, чем пять лет назад. В конце раздела «Введение» формулируются цели работы и описывается стратегия для их достижения.

6. Описание экспериментальной части и теоретической/вычислительной работы

6.1. Материал, испытываемые образцы и порядок проведения испытаний

Приводится обоснование выбора данного материала (или материалов) и методов описания материала (материалов) в данной работе.

При необходимости приводятся рисунки образцов с единицами измерения (единицы измерения только в системе СИ). При испытании стандартных образцов достаточно ссылки на стандарт. Для большой программы испытаний целесообразно использовать таблицу матричного типа. Если образцы взяты из слитков, заготовок или компонентов, то описывается их ориентация и нахождение в исходном материале, используются стандартные обозначения по ГОСТу.

При проведении испытаний приводится следующая информация.

1. Тип и условия испытаний, например, температура испытаний, скорость нагружения, внешняя среда.
2. Описываются переменные параметры, измеряемые величины и методы их измерения с точностью, степенью погрешности, разрешением и т.д.; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

6.2. Результаты экспериментов

Результаты предпочтительно представлять в форме графиков и описывать их словесно. Не следует писать о том, что ясно видно по графику.

6.3. По теоретической/вычислительной работе

Вышеперечисленные рекомендации актуальны также и для теоретической и вычислительной работы. В статьях, основанных на вычислительной работе, необходимо указать тип конечного элемента, граничные условия и входные параметры. Численный результат представляется с учетом ограничений (точности) в применяемых вычислительных методах.

В статьях, основанных на аналитической работе, при изложении длинного ряда формул необходимо давать поясняющий текст, чтобы была понятна суть содержания работы. Правильность вычислений необходимо подтверждать промежуточными вычислениями. Так же как и в случае с экспериментальной работой, простого описания числовых или аналитических преобразований без рассмотрения теоретической (физической) первопричины обычно недостаточно, для того чтобы сделать публикацию такой статьи оправданной. Простой отчет о числовых результатах в форме таблиц или в виде текста, как и бесконечные данные по экспериментальной работе, без попытки определить или выдвинуть гипотезу о том, почему были получены такие результаты, без попытки выявить причинно-следственные связи, не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Но оно ничего не ДОКАЗЫВАЕТ. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

7. Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел для того, чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов. Настоящий раздел упорядочивает и интерпретирует результаты. Цель раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, а также перспективу полученных результатов, сравнив их с существующим положением в данной области, описанным в разделе «Введение». Большое количество графиков и цветных иллюстраций не дает научного результата, это не презентация в PowerPoint. Обязанностью автора является упорядочивание данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

8. Выводы

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

10. Список литературы

Прежде чем составить список литературы, необходимо ознакомиться с правилами оформления ссылок в журнале «Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)» на сайте www.nstu.ru (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания).

В списки литературы обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %, исключение – публикации по региональной тематике); число цитируемой литературы чаще всего от 15 до 30 ссылок. Списки литературы (References) – это демонстрация вашей эрудиции, информированности о текущих исследованиях в данной области, поэтому цитируемые публикации должны быть как можно более новыми (но и увеличивать их чрезмерно, без причины тоже не следует). Ссылки на свои работы приветствуются, но проявляйте умеренность.

В.Г. Атапин, В.Ю. Скиба,
заместители главного редактора журнала
«Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)»

ПОДГОТОВКА АННОТАЦИИ

(структура, содержание и объем авторского резюме (аннотации) к научным статьям в журнале; фрагменты из работы **О. В. Кирилловой «Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. – Москва, 2012»**, кандидата технических наук, заведующей отделением ВИНТИ РАН, члена Консультативного совета по формированию контента (Content Selection and Advisory Board – CSAB) SciVerse Scopus, Elsevier)

Авторское резюме должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Результаты работы описывают предельно точно и информативно. Приводятся основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, обнаруженные взаимосвязи и закономерности. При этом отдается предпочтение новым результатам и данным долгосрочного значения, важным открытиям, выводам, которые опровергают существующие теории, а также данным, которые, по мнению автора, имеют практическое значение. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в статье.

Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте авторского резюме. Следует избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, если они не составляют основное содержание документа, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в авторском резюме, не приводятся.

В тексте авторского резюме следует употреблять синтаксические конструкции, свойственные языку научных и технических документов, избегать сложных грамматических конструкций. В тексте авторского резюме следует применять значимые слова из текста статьи. Текст авторского резюме должен быть лаконичен и четок, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих и незначащих формулировок. Текст должен быть связным, разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого. Сокращения и условные обозначения применяют в исключительных случаях или дают их расшифровку и определения при первом употреблении в авторском резюме. В авторском резюме не делаются ссылки на номер публикации в списке литературы к статье.

Объем текста авторского резюме определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), но не менее 100–250 слов (для русскоязычных публикаций – предпочтительнее больший объем).

Пример авторского резюме на русском языке

Значительная часть инновационных планов по внедрению изменений, содержащих в своей основе нововведения, либо не доходит до практической реализации, либо в действительности приносит гораздо меньше пользы, чем планировалось. Одна из причин этих тенденций кроется в отсутствии у руководителя реальных инструментов по планированию, оценке и контролю над инновациями. В статье предлагается механизм стратегического планирования компании, основанный на анализе как внутренних возможностей организации, так и внешних конкурентных сил, поиске путей использования внешних возможностей с учетом специфики компании. Стратегическое планирование опирается на свод правил и процедур, содержащих серию методов, использование которых позволяет руководителям компаний обеспечить быстрое реагирование на изменение внешней конъюнктуры. К таким методам относятся: стратегическое сегментирование; решение проблем в режиме реального времени; диагностика стратегической готовности к работе в условиях будущего; разработка общего плана управления; планирование предпринимательской позиции фирмы; стратегическое преобразование организации. Процесс стратегического планирования представлен в виде замкнутого цикла, состоящего из 9 последовательных этапов, каждый из которых представляет собой логическую последовательность мероприятий, обеспечивающих динамику развития системы. Результатом разработанной автором методики стратегического планирования является предложение перехода к «интерактивному стратегическому менеджменту», который в своей концептуальной основе ориентируется на творческий потенциал всего коллектива и изыскание путей его построения на основе оперативного преодоления ускоряющихся изменений, возрастающей организационной сложности и непредсказуемой изменчивости внешнего окружения.

Это же авторское резюме на английском языке

A considerable part of innovative plans concerning implementation of developments with underlying novelties either do not reach the implementing stage, or in fact yield less benefit than anticipated. One of the reasons of such failures is the fact that the manager lacks real tools for planning, evaluating and controlling innovations. The article brings forward the mechanism for a strategic planning of a company, based on the analysis of both inner company's resources, and outer competitive strength, as well as on searching ways of using external opportunities with account taken of the company's specific character. Strategic planning is based on a code of regulations and procedures containing a series of methods, the use of which makes it possible for company's manager to ensure prompt measures of reaction to outer business environment changes. Such methods include: strategic segmentation; solving problems in real-time mode; diagnostics of strategic readiness to operate in the context of the future; working out a general plan of management; planning of the business position of the firm; strategic transformation of the

company. Strategic planning process is presented as a closed cycle consisting of 9 successive stages, each of them represents a logical sequence of measures ensuring the dynamics of system development. The developed by the author strategic planning methods result in the recommendation to proceed to “interactive strategic management” which is conceptually based on the constructive potential of the collective body, on searching ways of its building on the basis of effective overcoming accelerating changes, increasing organizational complexity, and unpredictable changeability of the environment.

Пример структурированного авторского резюме из иностранного журнала в Scopus

Purpose: Because of the large and continuous energetic requirements of brain function, neurometabolic dysfunction is a key pathophysiologic aspect of the epileptic brain. Additionally, neurometabolic dysfunction has many self-propagating features that are typical of epileptogenic processes, that is, where each occurrence makes the likelihood of further mitochondrial and energetic injury more probable. Thus abnormal neurometabolism may be not only a chronic accompaniment of the epileptic brain, but also a direct contributor to epileptogenesis.

Methods: We examine the evidence for neurometabolic dysfunction in epilepsy, integrating human studies of metabolic imaging, electrophysiology, microdialysis, as well as intracranial EEG and neuropathology.

Results: As an approach of noninvasive functional imaging, quantitative magnetic resonance spectroscopic imaging (MRSI) measured abnormalities of mitochondrial and energetic dysfunction (via ^1H or ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ^{31}P MR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

Discussion: Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.
2. Кратко излагая основные факты работы, необходимо помнить следующие моменты:
 - следовать хронологии статьи и использовать ее заголовки в качестве руководства;
 - не включать несущественные детали;
 - вы пишете для компетентной аудитории, поэтому можете использовать техническую (специальную) терминологию вашей дисциплины, четко излагая свое мнение и имея также в виду, что вы пишете для международной аудитории;
 - текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» и т. д. («consequently», «moreover», «for example», «the benefits of this study», «as a result» etc.), либо разрозненные излагаемые положения должны логично вытекать один из другого;
 - необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т. е. “The study tested”, но не “It was tested in this study” (частая ошибка российских аннотаций);
 - стиль письма должен быть компактным (плотным), поэтому предложения, вероятнее всего, будут длиннее, чем обычно.

Примеры, как не надо писать реферат, приведены на сайте издательства

(<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=3&>).

На сайте издательства также приведены примеры хороших рефератов для различных типов статей (обзоры, научные статьи, концептуальные статьи, практические статьи):

<http://www.emeraldinsight.com/authors/guides/write/abstracts.htm?part=2&PHPSESSID=hdac5rtkb73ae013ofk4g8nrv1>.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» публикует статьи, содержащие новые и оригинальные результаты исследований по следующим научным направлениям (рекомендованные ВАК): 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.08 – Технология машиностроения, 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Статью с приложениями и их электронные версии на CD можно направлять в редакцию **по почте** либо **по электронной почте** (metal_working@mail.ru). Одновременно со статьей высылается **оригинал экспертного заключения** о возможности открытого опубликования статьи на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора *Атапин В.Г.*

При принятии рукописи к печати дополнительно на почтовый адрес редакции высылается авторский лицензионный договор.

Все рукописи рецензируются.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению рукописей

Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word 97-2003**. Формат оригиналов – **A4**. Шрифт – **Times New Roman**, размер шрифта основного текста – **14 пт**, параметры страницы – все поля **2 см**. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал **полуторный**. Абзацный отступ – **1,25 см**. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть четкими и понятными, могут быть включены в текст статьи.

Научная публикация должна иметь следующую структуру.

1. **Заглавие** (должно быть как можно короче и отражать содержание текста).

2. **Аннотация**:

на русском языке на основе ГОСТ 7.995 – сжатый обзор содержания работы (по ГОСТ **не менее 10 строк, 850 знаков**), указывает на ключевые проблемы, на подход к этим проблемам и на достижения работы; следует применять значимые слова из текста статьи;

на английском языке – по объему больше аннотации на русском языке и включает **не менее 150–250 слов**, рекомендуется следовать хронологии статьи, использовать англоязычную специальную терминологию, не включать несущественные детали и использовать активный, а не пассивный залог, избегать сложных грамматических конструкций (не применимых в научном английском языке).

3. **Ключевые слова** (должны отображать содержание работы). На английском языке – использовать термины из контролируемых словарей.

4. **Введение** (1-2 стр., краткий обзор по состоянию проблемы с цитатами или ссылками на актуальную литературу; в конце раздела необходимо сформулировать цель или задачу нового исследования и то, как вы это сделали).

5. **Теория** (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

6. **Результаты и обсуждение**.

7. **Выводы** (по результатам работы, описанной в данной статье; следует быть лаконичным).

8. **Список литературы**: в среднем 15-25 наименований (оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка»).

Краткие требования к набору рукописей

Единицы физических величин. При подготовке рукописи необходимо руководствоваться Международной системой единиц (СИ).

Таблицы нумеруются, если их число более одной. Заголовок необходим, когда таблица имеет самостоятельное значение, без заголовка дают таблицы вспомогательного характера.

Математические формулы. Сложные и многострочные формулы должны быть целиком набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. Используется только сквозная нумерация.

Рисунки представляются в форматах TIFF, PNG, JPEG, BMP, WMF. *Рисунки, сканированные откуда-либо, не принимаются.* Рекомендуемые размеры рисунков: 60 × 150, 60 × 70 мм.

Библиографический список, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка», составляется по ходу упоминания литературы в тексте и приводится в конце рукописи. Ссылки в тексте на литературу даются в квадратных скобках, например [1], [2, 3], [4–7], [4, стр. 23–28].

Пример оформления статьи

УДК 621.9.06:518.4

ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

*В.Г. ИВАНОВ, доктор техн. наук, профессор,
....., канд. техн. наук, доцент,
В.С. ПЕТРОВ, аспирант,, магистрант,
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Иванов В.Г. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский
государственный технический университет, e-mail: metal_working@mail.ru

Аннотация (не менее 10 строк, 850 знаков)

Ключевые слова

<текст статьи с четко выраженной структурой>

1. Введение
2. Теория или методика экспериментального исследования или материалы и методы и др.
3. Результаты и обсуждение
4. Выводы
5. Список литературы (15–25 наименований)

Choice of design parameters of base details at the design stage

V.G. Ivanov,, V.S. Petrov,

Abstract (не менее 150–250 слов)

Key words

На отдельном листе приводится информация для РИНЦ (исполнение обязательно).

Пример оформления сведений для РИНЦ:

УДК
621.9.06

Расчетная оценка упругих деформаций фундамента многоцелевого станка

Иванов Владимир Григорьевич, Петров Виктор Сергеевич,

Новосибирский государственный технический университет, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

Аннотация

Рассматривается расчет упругих деформаций фундамента тяжелого многоцелевого станка на абсолютно жестком основании и на упругом винклеровом основании. Показано, что от толщины фундамента существенно зависит деформирование его поверхности.
..... (не менее 10 строк, 850 знаков)

Ключевые слова

фундамент, многоцелевой станок, упругие деформации, метод конечных элементов.

Литература

1. Каминская В.В., Решетов Д.Н. Фундаменты и установка металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1975. – 208 с.
2. Атапин В.Г. Проектирование рациональных несущих конструкций многоцелевых станков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2008. – №4(41). – С. 18–25.
3. Атапин В.Г. Оценка параметров несущих конструкций тяжелого многоцелевого станка на этапе проектирования // Вестник машиностроения. – 2007. – № 2. – С. 61–64.
..... (в среднем 15-25 наименований)

Calculation of elastic deformations the base of the multi-purpose machine tool

V.G. Ivanov, V.S. Petrov,

The calculation of the elastic deformations of the heavy multi-purpose machine for absolutely rigid basis and on an elastic basis is considered. It is shown that the thickness of substantially depends on the deformation of its surface. ...

Keywords

foundation, machining center, elastic deformations, finite element method.

МЕДИАКИТ ЖУРНАЛА

О ЖУРНАЛЕ

МЕДИАКИТ



Ежеквартальный научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» публикует:

- материалы о прогрессивном оборудовании и инструментах для металло- и деревообработки, слесарно-монтажных, строительных и малярных работах, о достижениях в области их разработки и авангардных технологиях производства, а также о проблемах экономики и организации производства, подготовки специалистов и повышения их квалификации;

- результаты научных исследований докторов и кандидатов наук, аспирантов, магистров техники и технологии по следующим научным направлениям: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка

металлов и сплавов; 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение). Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Труды конференции», «Научно-техническая информация» и др.

Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

Публикация статей **бесплатная**.

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 2 марта 2012 года № 8/13).

Дата основания:

1998 г. – Инструмент Сибири; с 2001 г. – Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты).

Свидетельство о регистрации средств массовой информации ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г. ISSN 1994-6309.

Учредители журнала:

- ОАО Новосибирский проектно-технологический и экспериментальный институт «Оргстанкинпром»;
- Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»;

- ООО Научно-производственная коммерческая фирма «Машсервисприбор».

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

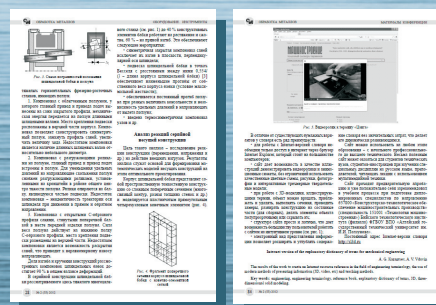
«Новосибирский государственный технический университет»;

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.



Технические характеристики журнала:

- Периодичность – 4 раза в год (1 раз в квартал)
- Язык – русский
- Объем – до 200 страниц
- Формат – А4 (210 × 297 мм)
- Тираж – до 1000 экз



Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др.)	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

Журнал представлен:

- на сайте: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov;
- на сайте НГТУ: www.nstu.ru (раздел «Научная и инновационная деятельность»; научные издания)

- электронная версия журнала доступна на платформе eLIBRARY.RU.

График выхода журнала в течение текущего года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 274, зам. гл. редактора – В. Г. Атапин, В. Ю. Скиба.

Тел.: Атапин В.Г. (383) 346-17-77,
Скиба В.Ю. (383) 346-17-79
E-mail: metal_working@mail.ru



С 2014 научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки машиностроения и металлообработки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

Тематика работы конференции:

- Инновационные технологии в машиностроении
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты
- Материаловедение в машиностроении
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении»

Официальный сайт конференции:

<http://machine-building.conf.nstu.ru/>



Рекламные материалы должны соответствовать тематике научно-технического и производственного журнала по машиностроению. Для размещения рекламы предоставляется площадь трех страниц обложки (цветная).

Цветная реклама на обложке (формат А4):

- 2 страница 18 000 руб.
- 3 страница 15 000 руб.
- 4 страница 20 000 руб.

