

Том 4 № 1 2017

ISSN 2313-1020

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

**МАТЕРИАЛЫ ЧЕТВЕРТОЙ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

г. Новосибирск, 29 марта 2017 г.

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL ARTICLES

**Proceedings of the Fourth International
Scientific and Practical Conference**

Novosibirsk, 29 March 2017

НОВОСИБИРСК



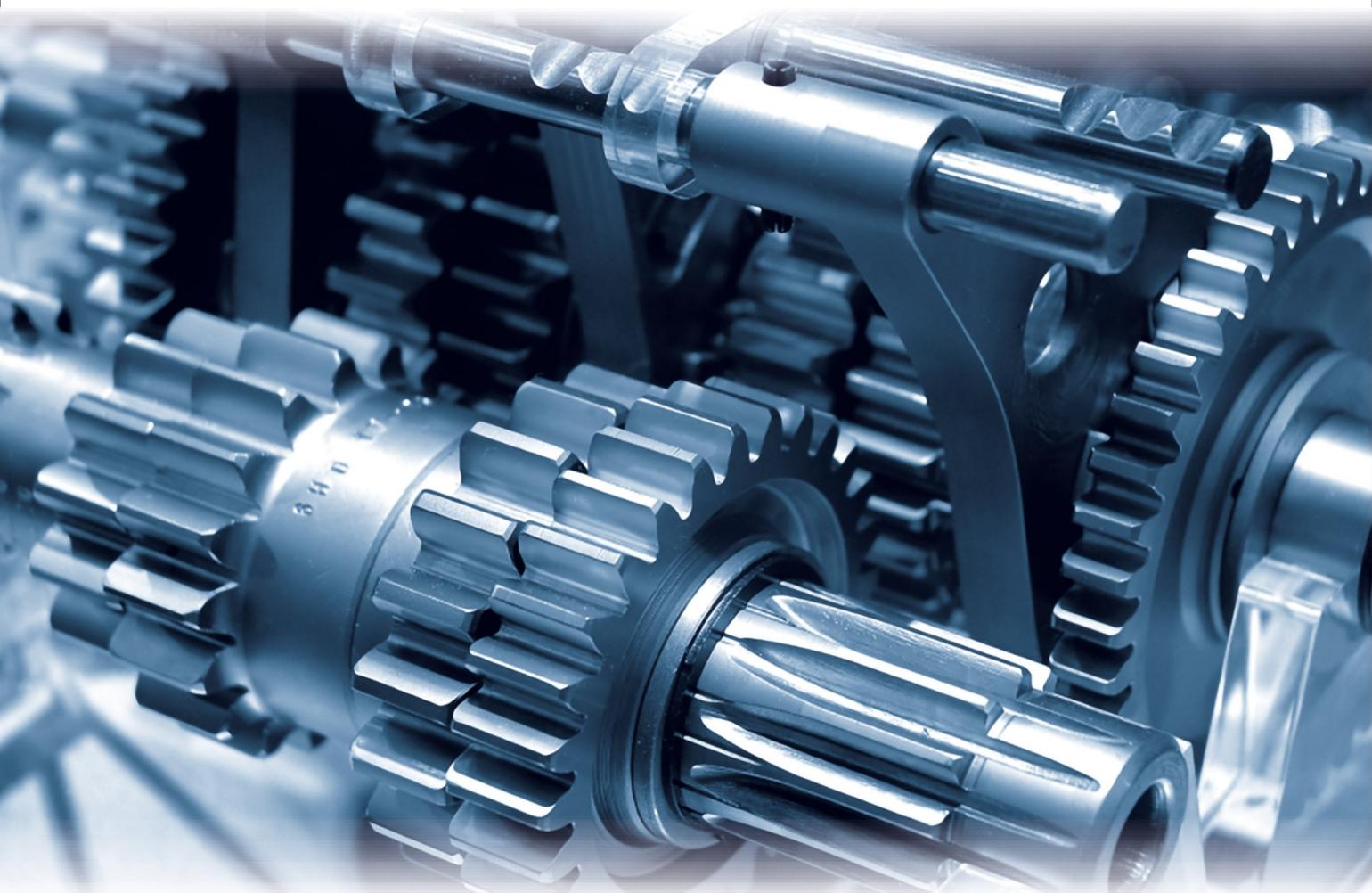


Выставка оборудования
для металлообработки
и сварки

28–31 марта 2017

Место проведения: МВК «Новосибирск Экспоцентр»

Получите электронный билет
mashex-siberia.ru



Организатор
ITE Сибирь

Россия, Новосибирск
ул. Станционная, 104

Тел.: (383) 363-00-36
www.ite-siberia.ru

Генеральный
информационный партнер

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ЖУРНАЛ
**СТАНОЧНЫЙ
ПАРК**

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ISSN 2313-1020

Том 4 №1 2017 г. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Батаев Анатолий Андреевич - доктор технических наук, профессор, почётный работник высшего профессионального образования, 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, Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Российская Федерация: **Анисименко Г.Е.**, директор производственно-технической фирмы «Сигма-инструмент», г. Новосибирск, **Атапин В.Г.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, 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, **Буров В.Г.**, 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., ИФМ УрО РАН, г.Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Рахимянов Х.М.**, доктор техн. наук, профессор, НГТУ, г. Новосибирск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, г. Барнаул, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, БрГУ, г. Братск

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Скиба Вадим Юрьевич - доцент, канд. техн. наук

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Лобанов Дмитрий Владимирович - профессор, доктор техн. наук

Мартынова Татьяна Геннадьевна - доцент, канд. техн. наук

Плотникова Наталья Владимировна - доцент, канд. техн. наук

Перепечатка материалов из журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

ИЗДАЕТСЯ С 2014 г.

Периодичность – 1 Том в год

ИЗДАТЕЛЬ ЖУРНАЛА

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Журнал зарегистрирован 31.10.2016 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-67566.

Журнал зарегистрирован в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

Адрес редакции:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137ВЦ, Скиба В.Ю. Тел. (383) 346-17-79

Сайт журнала:

<http://journals.nstu.ru/machine-building>
E-mail: machine-building@mail.ru

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

ISSN 2313-1020

Volume 4 Number 1 2017 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

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

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Dmitry V. Lobanov, D.Sc. (Engineering), Professor,
Department of Machine-building technology,
Bratsk State University, *Bratsk*, Russian Federation

Tatyana G. Martynova, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design, Novosibirsk State
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

Natalia V. Plotnikova, Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Department of Material Science in Mechanical Engineering,
Novosibirsk State Technical University, *Novosibirsk*, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

CHAIRMAN:

Anatoliy A. Bataev, 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 Sao Carlos, *Sao Carlos*

The Federal Republic of Germany:

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

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

Thomas Hassel, Dr.-Ing., Head of Underwater Technology Center Hanover, Leibniz Universitat 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, Donbass State Engineering Academy, *Kramatorsk*

The Russian Federation:

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

Vladimir G. Atapin, D.Sc. (Engineering), Professor, Novosibirsk State Technical University, *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*;

Vladimir G. Burov, 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, M.N. Miheev Institute of Metal Physics,
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*;

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

The magazine is issued since 2014

Publication frequency - 1 volume a year

Data on the magazine are published in eLIBRARY.RU

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

Tel.: (383) 346-17-79

<http://journals.nstu.ru/machine-building>; E-mail: machine-building@mail.ru

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

ЧЕТВЕРТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

г. Новосибирск, 29 марта 2017 г.

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- Новосибирский государственный технический университет, научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», г. Новосибирск, Россия
- Выставочная компания «ГТЕ Сибирь», г. Новосибирск, Россия

СООРГАНИЗАТОРЫ

- Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук, г. Рюссельсхайм, Федеративная Республика Германия;
- Ганноверский университет Вильгельма Лейбница, г. Гарбсен, Федеративная Республика Германия;
- Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск, Украина;
- Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь;
- ОАО НПТ и ЭИ «Оргстанкинпром», г. Новосибирск, Россия;
- ООО НПКФ «Машсервисприбор», г. Новосибирск, Россия;
- Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия;
- Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия;
- Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия;
- Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Бийск, Россия;
- Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия;
- Томский политехнический университет, г. Томск, Россия;
- Братский государственный университет, г. Братск, Россия

ПОЧЕТНЫЙ КОМИТЕТ

Члены комитета: *Монико Грайф*, профессор, доктор, Высшая школа Рейн-Майн, Университет прикладных наук (г.Рюссельсхайм), *Томас Хассел*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Флориан Нюрнбергер*, профессор, доктор, Ганноверский университет Вильгельма Лейбница (г.Гарбсен), *Ковалевский С.В.*, профессор, д.т.н., ДГМА (г.Краматорск), *Пантелеенко Ф.И.*, профессор, д.т.н., член-корреспондент НАН Беларуси, БНТУ (г. Минск), *Афанасьев В.К.*, академик РАЕН, профессор, д.т.н., зав. каф. СибГИУ (г. Новокузнецк), *Буров В.Г.*, профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Вандакуров А.Н.*, ген. директор АО "Новосибирский механический завод "Искра", (г.Новосибирск), *Герасенко А.Н.*, директор ООО НПФК «Машсервисприбор» (г.Новосибирск), *Гурьев А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г. Барнаул), *Кирсанов С.В.*, профессор, д.т.н., ТПУ (г.Томск), *Марков А.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. АлтГТУ (г.Барнаул), *Овчаренко А.Г.*, профессор, д.т.н., зав.каф. БТИ АлтГТУ (г. Бийск), *Рассохин В.А.*, ген. директор АО "Швабе - Оборона и Защита", *Рахмянов Х.М.*, профессор, д.т.н., зав. каф. НГТУ (г. Новосибирск), *Сараев Ю.Н.*, д.т.н, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, *Ситников А.А.*, д.т.н., профессор, АлтГТУ (г.Барнаул), *Стецовский А.С.*, директор подразделения ООО «АйТиИ Экспо» (г. Новосибирск), *Янюшкин А.С.*, профессор, д.т.н., член- корреспондент САН ВШ, академик МАН ВШ, зав. каф. БГУ (г. Братск).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

- *Батаев А.А.*, главный редактор научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., ректор НГТУ, (г. Новосибирск), **председатель;**
- *Коротков А.Н.*, академик РАЕ, профессор, д.т.н., КузГТУ (г. Кемерово), **сопредседатель.**
- *Атапин В.Г.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», профессор, д.т.н., НГТУ (г.Новосибирск), **сопредседатель;**

Члены программного комитета: *Иванцовский В.В.*, , профессор, д.т.н., НГТУ (г. Новосибирск), *Ленивцева О.Г.*, к.т.н., (г.Новосибирск), *Лобанов Д.В.*, д.т.н., профессор, БГУ (г. Братск), *Трегубчик П.В.*, гл. технолог ОАО «Новосибирский стрелочный завод», (г. Новосибирск), *Янюльский В.В.*, к.т.н., доцент, декан МТФ НГТУ (г.Новосибирск).

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

- *Скиба В.Ю.*, зам. главного редактора журнала «Обработка металлов», доцент, к.т.н., НГТУ (г. Новосибирск);
- *Волкова М.В.*, Руководитель дирекции отраслевых выставок ООО «АйТиИ Экспо» (г. Новосибирск).

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Инновационные технологии в машиностроении;
- Технологическое оборудование, оснастка и инструменты;
- Материаловедение в машиностроении;
- Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении.

ACTUAL PROBLEMS IN MACHINE BUILDING

Proceedings of the Fourth International Scientific and Practical Conference Novosibirsk, 29 March 2017

CONFERENCE ORGANIZERS

- Novosibirsk State Technical University, Scientific, Technical and Industrial Journal "Obrabotka Metallov", Novosibirsk, Russian Federation
- Exhibition company "ITE Siberia", Novosibirsk, Russian Federation

CO-ORGANIZERS

- Hochschule RheinMain University of Applied Sciences, Rüsselsheim, Germany;
- Leibniz Universität Hannover, Garbsen, Germany;
- Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine;
- Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus;
- JSC Novosibirsk Technological, Designing and Experimental Institute "Orgstankinprom", Novosibirsk, Russian Federation;
- LLC Research-and-production and commercial company "Mashservispribor", Novosibirsk, Russian Federation;
- Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russian Federation;
- Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation;
- I.I. Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation;
- Biysk Technological Institute, Branch of Polzunov Altai State Technical University, Biysk, Russian Federation;
- Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation;
- National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation;
- Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation.

HONORARY COMMITTEE

COMMITTEE MEMBERS: *Monico Greif*, Professor, DSc, High School of the Rhine-Main, University of Applied Sciences (Rüsselsheim, Germany), *Thomas Hassell*, Professor, DSc, Wilhelm Leibniz University of Hannover (Garbsen, Germany), *Florian Nürnberger*, Professor, DSc, Hanover Wilhelm Leibniz University (Garbsen, Germany), *Kovalevsky S.V.*, Professor, DSc, DSEA (Kramatorsk, Ukraine), *Panteleenko F.I.*, Professor, DSc, member of the National Academy of Sciences of Belarus, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus), *Afanasyev V.K.*, Academy of Natural Sciences, Professor, DSc, SibSIU (Novokuznetsk, Russia), *Burov V.G.*, Professor, DSc., NSTU (Novosibirsk, Russia), *Gerasenko A.N.*, Director of the LLC Research-and-production and commercial company "Mashservispribor" (Novosibirsk, Russia), *Guriev A.M.*, Professor, DSc, AltSTU (Barnaul, Russia), *Kirsanov S.V.*, Professor, DSc, TPU (Tomsk, Russia), *Markov A.M.*, Professor, DSc, Vice Rector of AltSTU (Barnaul, Russia), *Ovcharenko A.G.*, Professor, DSc, Head of Department in BTI AltSTU (Biysk, Russia), *Rassohin V.A.*, General director of the JSC "Shvabe - defense and protection", *Rakhimyanov Kh.M.*, Professor, DSc., Head of Department in NSTU (Novosibirsk, Russia), *Saraev Yu.N.*, Professor, DSc., ISPMS SB RAS (Tomsk, Russia), *Sitnikov A.A.*, Professor, DSc, AltSTU (Barnaul, Russia), *Stetsovsky A.S.*, Exhibition Director, «ITE Siberia» (Novosibirsk, Russia), *Yanyushkin A.S.*, Professor, DSc, Corresponding Member SAN VSH, Academician IHEAS, Head of Department in BSU (Bratsk, Russia).

PROGRAMME COMMITTEE

- *Bataev A.A.*, editor in chief of Scientific, Technical and Industrial Journal "Obrabotka Metallov", Professor, D.Sc. (Engineering), Rector of Novosibirsk State Technical University (Novosibirsk, Russia), Chairman;
- *Korotkov A.N.*, Academician of RAE, Professor, D.Sc. (Engineering), KuzSTU (Kemerovo, Russia), co-chair;
- *Atapin V.G.*, Deputy Chief Editor of "Obrabotka Metallov", Professor, D.Sc. (Engineering), NSTU (Novosibirsk, Russia), co-chair.

COMMITTEE MEMBERS: *Ivancivsky V.V.*, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), *Lenivtseva O.G.*, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia), *Lobanov D.V.*, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, BSU (Bratsk, Russia), *Tregubchak P.V.*, Manufacturing manager, JSC "Novosibirsk Switch Plant" (Novosibirsk, Russia), *Yanpolskiy V.V.*, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Dean, Faculty of Mechanical Engineering and Technologies, NSTU (Novosibirsk, Russia).

ORGANIZING COMMITTEE

- *Skeeba V.Yu.*, Deputy Chief Editor of "Obrabotka Metallov", Ph.D. (Engineering), Associate Professor, NSTU (Novosibirsk, Russia);
- *Volkova M.V.*, Head of Directorate Industry Exhibitions, «ITE Siberia» (Novosibirsk, Russia).

SUBJECT OF THE CONFERENCE

- Innovative Technologies in Mechanical Engineering;
- Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments;
- Materials Science in Machine Building;
- Economics and Organization of the Business Innovative Processes in Engineering.

СОДЕРЖАНИЕ

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Жаргалова А.Д., Еремейкин П.А. Программная система автоматизированного выбора режимов механической обработки тонкостенных деталей	9
Маркова М.И., Дронова О.Б. Управление технологической подготовкой механической обработки партий деталей в условиях серийного производства	15
Маликов А.Г. Разработка метода модифицирования сварного шва скандием, при лазерной сварке сплавов системы Al-Cu-Li и Al-Mg-Li	20
Буслаева В.В., Герасимов Н.В., Демешко П.В., Проскурин Р.С. Особенности обработки керамических материалов на станке с ЧПУ	25
Алфёрова Е.А., Дзян Дилун Возможности конфокальной микроскопии при оценке микрогеометрии поверхности	30
Бычков Н.В., Безнедельный А.И., Гилета В.П. Выбор методов финишной обработки для повышения усталостной прочности деталей двигателя автомобиля	35
Эдигаров В.Р. Исследование температурных полей в рабочей зоне фрикционно-электрического контакта	41

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ОСНАСТКА И ИНСТРУМЕНТЫ

Рычков Д.А., Попов В.Ю. Износостойкость твердосплавного фрезерного инструмента при варьировании скорости резания стеклотекстолитов	47
Павлов Л.Н., Шамина О.Б. Проектирование пресс-формы для термопластавтомата	53
Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А. Системный анализ и синтез рациональных методов профилирования некруглых поверхностей	59
Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Сидоренко С.А. Программное обеспечение для формирования базы данных сборного токарного инструмента	65
Бабаев А.С., Чарторийский В.П., Лаптев Н.В. Исследование влияния условий буксирного полирования режущих инструментов на изменение микрогеометрии режущих кромок	75
Нейман Л.А., Щуров Н.И. Анализ динамических характеристик синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка	81
Беляева И.А., Глушников В.А., Пыльцын А.М., Косолапова А.Ю. Штамп для реализации комбинированной технологии «вытяжка-обрезка припуска»	88

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Кукареко В.А. Концентрационная неоднородность азотированных слоев в газотермических покрытиях, подвергнутых ионно-лучевой обработке	93
---	----

Максимов А.Б., Ерохина И.С. Влияние предварительной схемы деформации на ударную вязкость низколегированной стали	99
Петров М.Г. Ползучесть и усталость металлов с позиций кинетической концепции разрушения	105
Попова М.В., Малюх М.А., Лаврова Н.Б. Совместное влияние легирования и условий кристаллизации на технологичность и тепловое расширение литых алюминиевых сплавов	112
Кормышев В.Е., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Батаев В.А., Кондратова О.А., Никитина Е.Н. Повышение свойств поверхности стали наплавкой и последующей электронно-пучковой обработкой	119
Бережная Е.В. Технологические особенности термообработки деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой	126
Рекомендации по написанию научной статьи	131
Подготовка аннотации	133
Правила для авторов	135

CONTENTS

Innovative Technologies in Mechanical Engineering

Zhargalova A.D., Eremeykin P.A. Integrated decision support system for thin-walled parts cutting conditions assignment	9
Markova M.I., Dronova O.B. Management of technological preparation of machining parts of detail in serial production	15
Malikov A.G. Development of the method of scandium modification of the welded joint during the laser welding of Al-Cu-Li and Al-Mg-Li alloys	20
Buslaeva V.V., Gerasimov N.V., Demesko P.V., Proskurin R.S. Specific features of ceramic materials CNC	25
Alfyorova E.A., Jiang Dilong Possibility of confocal microscopy when assessing microgeometry of surface	30
Bychkov N.V., Gileta V.P., Beznedelnyy A.I. The choice of method of finishing processing to improve the fatigue strength of the car engine parts	35
Edigarov V.R. Probe of temperature fields in the working zone of the frictional electric contact	41

Technological Equipment, Machining Attachments and Instruments

Rychkov D.A., Popov V.Yu. The wear resistance of carbide cutting tools by varying the speed of cutting glass textolite	47
Pavlov L.N., Shamina O.B. Tool's modeling for thermoplastics during injection molding	53
Panteleyenkov F.I., Danilov A.A. System analysis and synthesis of rational methods of shaping non-circular surfaces	59
Lobanov D.V., Rychkov D.A., Sidorenko S.A. The software for formation of the database of the combined turning tool	65
Babaev A.S., Chartoriyskiy V.P., Laptev N.V. Research of influence cutting tools drag finishing process to change cutting edges microgeometry	75
Neyman L.A., Schurov N.I. Analysis of dynamic characteristics of synchronous electromagnetic machines shock actions with reversing the springs peen	81
Belyaeva I.A., Glushenkov V.A., Pyltsin A.M., Kosolapova A.Y. Stamp for the implementation of combined technology "Hood-Trim the Seam Allowance"	88

Materials Science in Machine Building

Belotserkovskii M.A., Grigorichik A.N., Kukareko V.A. Concentration inhomogeneity of the nitriding layers in thermal sprayed coatings subjected ion-beam treatment	93
---	----

Maksimov A.B., Yerohina I.S. The effect of preliminary scheme of deformation on the toughness of low alloy steel	99
Petrov M.G. Creep and fatigue of metals from the standpoint of the kinetic concept of fracture	105
Popova M.V., Malyuh M.A., Lavrova N.B. The combined effect of alloying and crystallization conditions for manufacturability and thermal expansion of cast aluminum alloys	112
Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Bataev V.A., Kondratova O.A., Nikitina E.N. Increase of steel surface properties of surfacing and following electron beam treatment	119
Berezhnaya O.V. Technological features of the heat treatment of details restored with electric contact surfacing	126
Guidelines for Writing a Scientific Paper	131
Abstract requirements	133
Rules for authors	135

УДК 621.941.01

**ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА РЕЖИМОВ
МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ**

*А.Д. ЖАРГАЛОВА¹, ст. преподаватель
П.А. ЕРЕМЕЙКИН², аспирант
(¹ МГТУ им. Баумана, г. Москва,
² ИМАШ РАН, г. Москва)*

Жаргалова А.Д. – 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
e-mail: azhargalova@bmstu.ru

В статье рассмотрены вопросы, связанные с изготовлением тонкостенных деталей. Основное внимание уделено автоматизации нового подхода обработки, основанного на назначении рациональных режимов с учетом деформаций, возникающих в процессе обработки. В статье выделены проблемы, возникшие при проектировании автоматизированной системы и предложены способы их решения с использованием современных программных средств и библиотек. Описаны технические способы реализации модульной структуры, а также состав модулей и характерные особенности каждого из них. Указаны слабые стороны системы и предложены меры для их устранения.

Ключевые слова: токарная обработка, деформация, тонкостенная деталь, разработка программной системы, численное моделирование, метод конечных элементов (МКЭ).

Введение

Современная промышленность на пути своего развития сталкивается с проблемой обеспечения высокого качества продукции в условиях жестких ограничений. Значительное влияние на качество готового изделия оказывает точность выполнения заданных геометрических параметров. Известно, что существует ряд факторов, препятствующих достижению размеров, определенных конструкторской документацией. К таким факторам относят, например, погрешности станка, приспособлений, погрешности закрепления детали, износ инструмента, неоднородности обрабатываемого материала [1]. В ряде отраслей производства, таких как энергомашиностроение и авиационная промышленность, в силу особенностей конфигурации изделий на первый план выходят погрешности, связанные с деформацией заготовки в процессе изготовления [2].

Известно несколько технологических приемов, позволяющих снизить влияние деформаций детали на достигаемое качество: применение технологического заполнителя, закрепление в сырых кулачках или разжимной оправке [3]. С развитием аддитивных технологий открывается перспектива их применения для решения рассматриваемой проблемы. Однако, на данном этапе аддитивные технологии ещё не отвечают требованиям для их широкого внедрения в машиностроении. Например, существенными недостатками аддитивного способа являются: высокая шероховатость поверхности детали, нестабильность качества и структуры детали, остаточные напряжения [4].

Таким образом, в настоящее время для решения проблемы податливости заготовки подбирают наиболее подходящую для заданных условий совокупность рассмотренных мер. Недостатки технологического процесса по возможности устраняют после изготовления

пробных партий деталей, что ведет к повышению затрат и увеличению времени выполнения заказов [5]. В данной статье предлагается рассмотреть новый способ обеспечения качества при разработке технологических процессов изготовления нежестких деталей.

Предлагаемый подход уделяет основное внимание назначению режимов обработки и закрепления заготовки. Назначение рациональных (“мягких”) режимов резания позволяет управлять технологической деформацией и ограничивать её в допустимых пределах [6]. Как продемонстрировано в [7], широкие возможности современных систем инженерного анализа (CAE - Computer-aided engineering) позволяют определить величину отклонения профиля заготовки от номинального без необходимости проведения экспериментов. Функционал инженерных программных комплексов с открытым интерфейсом взаимодействия может быть использован в системе поддержки принятия решения. Такая система с дружелюбным пользовательским интерфейсом позволит сократить трудоемкость применения метода “мягких” режимов резания. В статье рассмотрены основные вопросы разработки системы.

Методика исследования

На практике перед технологами возникают задачи изготовления деталей различной конфигурации. Часто каждая технологическая задача обладает определенной спецификой, которую невозможно учесть заранее при разработке программного продукта. В связи с этим изначально структура программы была спланирована таким образом, чтобы позволить её расширение подключаемыми модулями.

На рисунке 1 показан эскиз обработки тонкостенной заготовки. В процессе точения заготовка деформируется под действием сил закрепления F_k и сил резания (рисунок 1а). Также в деформацию детали вносят вклад тепловые процессы, которые в статье не рассматриваются. Обработка деформированной детали приводит к значительному отклонению от заданных размеров Δ , вызванному неравномерным снятием припуска (рисунок 1б).

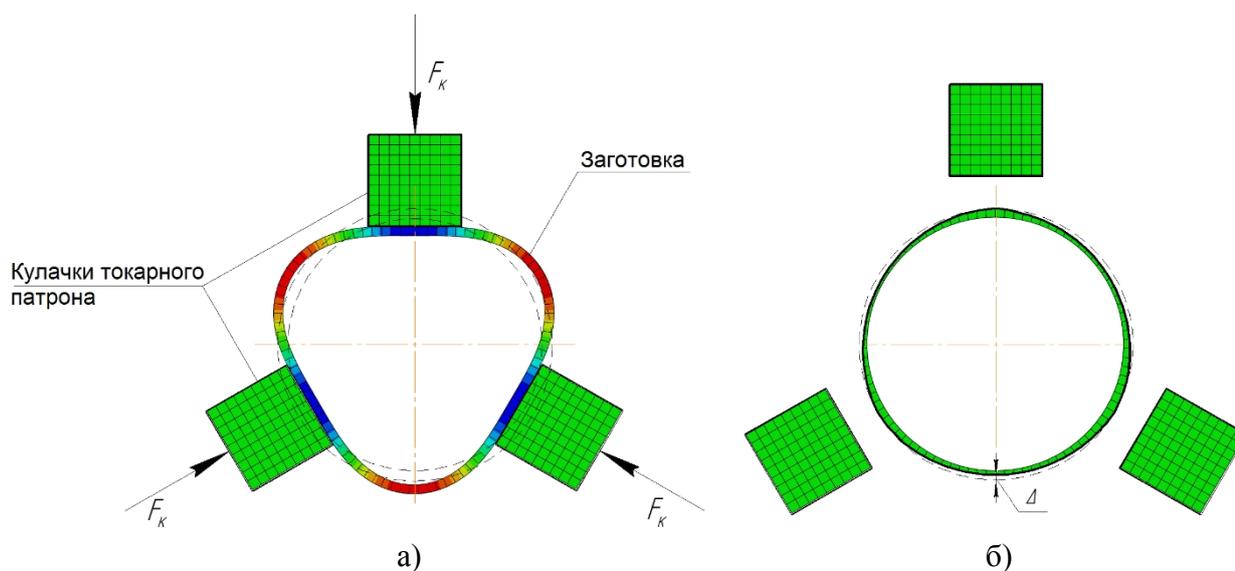


Рис. 1. Эскиз точения тонкостенной детали

Разработанная система позволяет произвести моделирование процесса резания и определить возникающие отклонения, благодаря чему технолог получает информацию о допустимости

обработки при заданных режимах. Моделирование осуществляется при использовании метода конечных элементов (МКЭ) [8], реализованного в программном продукте *Abaqus*.

Технически система поддержки принятия решения представляет собой Java программу, основанную на платформе NetBeans Platform. NetBeans Platform представляет собой совокупность библиотек, классов и реализаций шаблонов проектирования, предназначенных для решения самых разнообразных задач, возникающих при программировании сложных систем [9]. Существенным доводом в пользу применения NetBeans платформы является продуманная модульная инфраструктура. Модуль может быть загружен в уже готовую систему без необходимости её перекомпиляции [10]. Таким образом может быть осуществлена доработка системы под технологические задачи конкретного производства с учетом их особенностей.

В состав системы поддержки входят 5 основных модулей, выделенных по функциональному признаку:

1. Модуль расчета режимов резания.
2. Загрузчик моделей.
3. Графический редактор параметров.
4. Модуль взаимодействия с САЕ системой.
5. Модуль визуализации и построения отчетов.

Модуль расчета режимов резания предназначен для первичного определения режимов резания по стандартным таблично-аналитическим методикам [11]. Результаты расчета, полученные в данном модуле могут быть использованы как исходная оценка для итерационного определения рациональных режимов.

Особенность реализации данного модуля заключается в применении механизма продукционного вывода. При анализе литературы, посвященной расчету режимов резания [11, 12], было выявлено, что традиционные методики ориентированы на применение человеком, и их формализация затруднена большим числом неявных зависимостей. Для решения задач такого рода хорошо зарекомендовали себя экспертные системы, основанные на продукционных правилах [13]. Java библиотека Drools [14] предлагает разработчикам необходимый функционал для работы со знаниями, представленными в виде продукционных правил. Продукционное правило в нотации библиотеки записывается в следующем виде:

```
1   rule "name"
2       attributes
3       when
4           LHS
5       then
6           RHS
7   end
```

Первая строка служит для присвоения правилу имени, следующая строка содержит атрибуты, модифицирующие поведение правила (подробнее см. [15]) Ключевые слова *when* и *then* маркируют антецедент и консеквент правила. При помощи таких правил таблично-аналитическая методика была реализована в программном коде.

Функция загрузчика моделей – чтение файла, содержащего описание расчетного случая. Расчетный случай описывается в 3 аспектах: параметризованный сценарий, список параметров и база данных табличных коэффициентов и значений физических величин. Параметризованный сценарий, написанный на языке программирования Python, используется для построения МКЭ модели внутри САЕ системы. Все параметры сценария должны быть описаны в соответствующей секции. К такому описанию относится, например,

информация о названии и предназначении параметра, его зависимости от других параметров. База данных служит для получения значения табличных параметров. Например, для работы CAE системы необходимо указать модуль упругости материала. Однако пользователь не обязан помнить его значение для выбранного материала и вводить вручную. Вместо этого (если для параметра “модуль упругости” выставлена соответствующая зависимость) система поддержки автоматически загрузит необходимое значение из базы данных.

Графический редактор параметров служит для обеспечения пользовательского ввода. В окне этого модуля (изображено на рисунке 2) выведены все группы параметров, которые доступны для редактирования или определяются автоматически.

Заданные значения параметров совместно с исполняемым сценарием передаются посредством интерфейса командной строки CLI (Command Line Interface) в систему Abaqus, которая вычисляет значение узловых перемещений. При этом за запуск внешнего процесса и взаимодействие с ним отвечает отдельный модуль, который инкапсулирует характерные для Abaqus особенности. Замена этого модуля теоретически позволяет адаптировать систему к использованию другого комплекса инженерных расчетов, например, ANSYS.

Результаты вычислений, полученные CAE системой, в соответствии с принятыми соглашениям должны сохраняться в файлы определенного формата. Эти файлы могут быть загружены в модуль визуализации и построения отчетов. Таким образом пользователю предлагается проанализировать графики отклонения профиля от идеального и принять решение о изменении режимов резания или их утверждении. Во втором случае пользователь имеет возможность сохранить отчет с указанием значений всех заданных параметров и результатами моделирования (например, в отчет могут быть включены поля перемещений/напряжений).

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 показан графический интерфейс системы поддержки принятия решения. Верхнюю левую область занимает окно редактора параметров, ниже которого находится окно вывода графической информации.

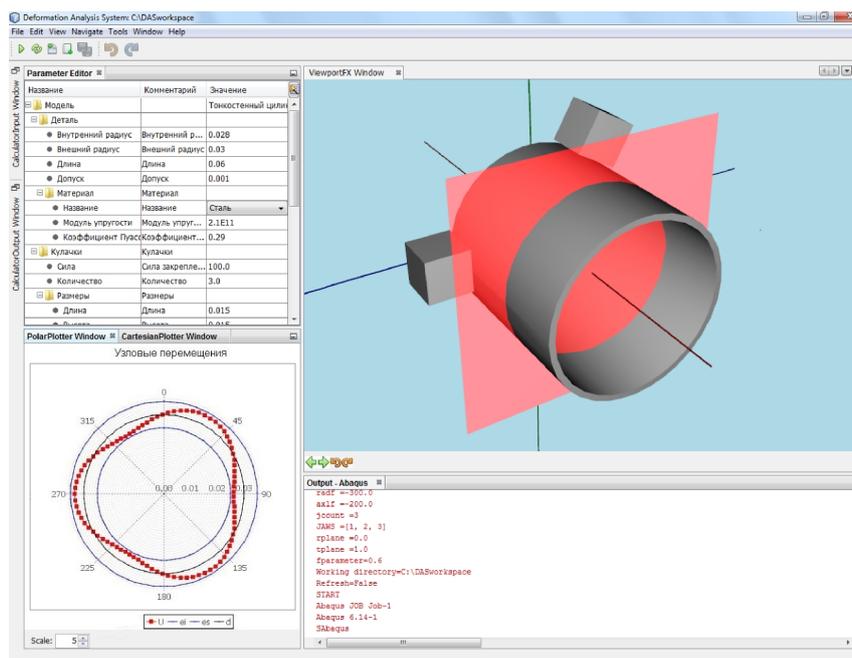


Рис. 2. Графический интерфейс пользователя

В верхней правой части находится окно просмотра геометрии детали. Четвертое открытое окно, изображенное на рисунке, служит для текстового вывода вспомогательных и отладочных сообщений а также сообщений САЕ системы.

Разработанная программа позволяет спрогнозировать деформации тонкостенных деталей и тем самым упростить задачу подбора “мягких” режимов резания. Однако, эффективность программы может быть повышена при реализации модуля автоматической многокритериальной оптимизации, который в настоящий момент не представлен в системе. Также дальнейшие исследования необходимо сконцентрировать на усовершенствовании методов моделирования процесса резания. Например, пробная модель не учитывает тепловые процессы, которые также оказывают существенное влияние на деформацию тонкостенной детали.

Выводы

Интегрированная система поддержки принятия решений представляет собой новый инструмент для эффективного внедрения метода “мягких” режимов резания. Модульная архитектура позволяет адаптировать систему под конкретные технологические задачи и расширять её возможности необходимыми функциями. При работе над системой выявлены трудности, которые могут возникнуть в процессе разработки прикладных программ в области металлообработки, а также приведены их решения с использованием современных программных библиотек. Предложен гибкий подход программной реализации таблично-аналитической методики расчета, основанный на продукционном выводе. Описан способ расчета деформаций по МКЭ модели с использованием функционала внешних САЕ систем.

Разработанная система прошла процедуру государственной регистрации программы для ЭВМ. Свидетельству о регистрации присвоен № 2016663071.

Список литературы

1. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / под общ. ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МГТУ, 1999. – 370 с.
2. *Shamsuddin K.A., Ab-Kadir A.R., Osman M.H.* A comparison of milling cutting path strategies for thin-walled aluminium alloys fabrication // *The International Journal of Engineering and Science*. – 2013. – Vol. 2, iss. 3. – P. 01–08.
3. *Кузнецов Ю.И., Мослов А.Р., Бойков А.Н.* Оснастка для станков с ЧПУ: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
4. *Machining of thin-walled parts produced by additive manufacturing technologies / A. Isaev, V. Grechishnikov, P. Pivkin, M. Kozochkin, Y. Ilyuhin, A. Vorotnikov // Procedia CIRP*. – 2016. – № 4.
5. *Milling error prediction and compensation in machining of low-rigidity parts / S. Ratchev, S. Liu, W. Huang, A.A. Becker // International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2004. – № 6.
6. К вопросу о деформации тонкостенных деталей при обработке на станках токарной группы / *Е.В. Арбузов, А.Д. Жаргалова, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // Наука и образование*. – 2014. – № 2.
7. Метод определения условий механической обработки тонкостенных деталей / *С.С. Гаврюшин, А.Д. Жаргалова, Г.П. Лазаренко, В.И. Семисалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2015. – № 1. – С. 53-60.

8. Гаврюшин С.С., Барышников О.О., Борискин О.Ф. Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 479 с.
9. Böck H. The definitive guide to NetBeans Platform 7. – New York: Apress, 2012. – 558 p.
10. NetBeans Platform learning trail // NetBeans. – 2016. – URL: <https://netbeans.org/features/platform/all-docs.html> (accessed: 28.02.2017).
11. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 418 с.
12. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.
13. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
14. Amador L. Drools developer's cookbook. – Gardners Books, 2012. – 312 p.
15. Drools documentation // JBossDeveloper. – 2016. – URL: <http://docs.jboss.org/drools/release/6.4.0.Final/drools-docs/html/> (accessed: 28.02.2017).

INTEGRATED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THIN-WALLED PARTS CUTTING CONDITIONS ASSIGNMENT

Zhargalova A.D.¹, Senior lecturer, e-mail: azhargalova@bmstu.ru

Eremeykin P.A.², Post-graduate Student, e-mail: eremeykin@gmail.com

¹ Bauman Moscow State Technical University, 5 Baumanskaya 2-ya, Moscow, 105005, Russian Federation

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, 4 Maly Kharitonievskiy Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation

Abstract

This paper considers issues related to thin-walled parts processing. The authors pay attention to a new “soft” processing modes approach, based on rational cutting modes assignment. The approach takes into consideration the deformations occurring during processing. The paper highlights the issues encountered in the automated system development and offers solutions with using modern software and libraries. In addition, the article describes the technical ways to implement modular structure and clarifies its composition. The authors indicate weaknesses of the system and measures to eliminate it.

Keywords

lathing, deformation, thin-walled part, software development, numerical simulation, finite element analysis (FEA)

УДК 629.932

**УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ ПАРТИЙ ДЕТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*М.И. МАРКОВА, канд. техн. наук, доцент
О.Б. ДРОНОВА, канд. экон. наук, доцент
(АлтГТУ, г. Барнаул)*

Дронова О.Б. – 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
e-mail: suholga.08@mail.ru

В статье приведены практические рекомендации по выбору очередности запуска партий деталей в производство и методика определения количества задействованного оборудования по операциям на основании минимизации длительности производственного цикла изготовления сменного задания. На примере приведен графический расчет длительности производственного цикла обработки при последовательном варианте запуска партии деталей.

Ключевые слова: размер партии деталей, сменное задание, последовательный запуск партий деталей в производство, параллельно-последовательный запуск партий деталей в производство.

Введение

Вопросы управления технологической подготовкой производства при широкой номенклатуре изделий предприятия в условиях быстрой сменяемости продукции машиностроения являются актуальными и их решение позволяет перераспределять свои ресурсы при внедрении нового изделия [1].

На этапе конструирования изделий для планирования подготовки производства и оценки себестоимости, когда нет еще полностью разработанной технологической документации вызывает сложность разработка календарно-плановых нормативов. Подетальная месячная производственная программа цехов, график запуска и выпуска партий деталей, подетально-пооперационный календарный план-график позволяют провести взаимную увязку календарных планов и согласование работы взаимосвязанных рабочих мест. В работе представлена методика определения очередности запуска партий деталей в производство в течение смены в условиях заданной производственной программы по выпуску *k*-той номенклатурной позиции на декаду месяца по участку. При этом группирование деталей производится на основании присвоенного им кода ЕСКД, а размер партий соответствует сменному заданию.

Теория и методы

В соответствии с теорией квалиметрии на величину трудоемкости влияют факторы, характеризующие конструктивно-технологические особенности изделий и организационно-технические факторы производства, отраженные в общем квалиметрическом показателе изделия [2].

Базируясь на методике укрупненного расчета трудоемкости на основе квалиметрического анализа деталей, получаемых обработкой резанием [2] разработана методика квалиметрического анализа деталей при прогнозировании временных затрат на производство широкой номенклатуры изделий предприятия [2, 4].

Для определения очередности запуска-выпуска групп деталей в производство детали группируются на основании сходного технологического маршрута, массы, трудоемкости и месячной программы выпуска. Выбор партий деталей, имеющих одинаковый технологический маршрут для одновременной обработки в одну смену формируется на основании заказов потребителей. Задача распределения заданий по выпуску изделий в различные месяцы ориентирована на директивные сроки выпуска.

Для сокращения номенклатуры одновременно изготавливаемых изделий необходимо разделить месячное задание по декадам с целью загрузки станков в одну декаду ограниченной номенклатурой, например, не более 5 наименований, соблюдая правило одинакового технологического маршрута (одинаковой последовательности и количества операций m). При заданной программе по k -той номенклатурной позиции на декаду месяца по участку (N_k) можно рассчитать сменное задание, которое находится делением задания на декаду (N_k) на рабочее число дней (при 5 дневной рабочей неделе и односменном режиме работы предприятия): $N_{ксм.} = N_k/8$, где 8 – число рабочих дней в декаду.

Отправным критерием при установлении нормативной величины партии должна служить непрерывность выполнения каждой операции обрабатываемой партии, по меньшей мере в течение смены. В этом случае, целесообразно принять размеры партий по k -тым номенклатурным позициям (n_k), обрабатываемым одновременно, равными ($n_k = n$) и наложить ограничение на размер партии - он должен быть не менее сменного задания, и разница между ними должна быть минимальна.

Первый вариант запуска – последовательный запуск партий деталей. Предварительно партии деталей ранжируются по трудоемкости обработки: первой в запуск идет самая трудоемкая деталь, потом менее трудоемкая и т.д. (рисунок 1).

Предполагается, что в течение смены k -е количество партий разных номенклатурных позиций будет обрабатываться одновременно на одном и том же наборе оборудования с переналадкой при переходе от одной партии к другой. При этом варианте загрузка оборудования будет максимальной, что снизит количество оборудования, но будет иметь место переналадка в течение смены.

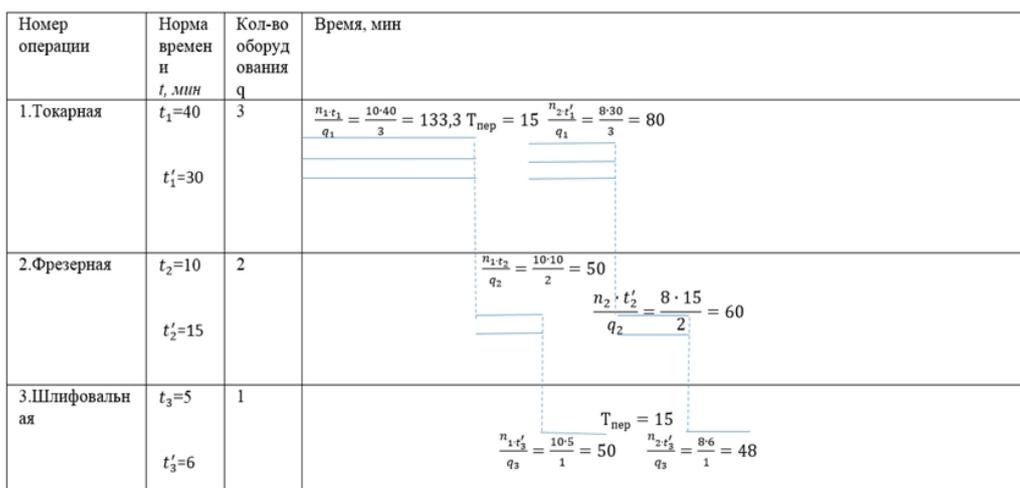


Рис. 1. Последовательный запуск партий деталей в производство [3]

В первом варианте для определения количества задействованного оборудования по операциям выбираются самые продолжительные по времени операции по ходу

технологического процесса из каждого технологического процесса закрепленных k -тых номенклатур. Например, самая продолжительная токарная из всех токарных, самая продолжительная фрезерная и т.д.- в результате получается скомпонованный технологический процесс.

Для осуществления одновременной обработки на разных операциях необходимо, чтобы операционные циклы обработки были равны по времени. Расчет этих циклов ведется по нормам времени скомпонованного технологического процесса:

$$\frac{t_{\text{ток}} \cdot n}{q_{\text{ток}}} = \frac{t_{\text{фрез}} \cdot n}{q_{\text{фрез}}} = \frac{t_{\text{шл}} \cdot n}{q_{\text{шл}}} = \dots = \frac{t_m \cdot n}{q_m} \quad \text{или} \quad \frac{t_{\text{ток}}}{q_{\text{ток}}} = \frac{t_{\text{фрез}}}{q_{\text{фрез}}} = \frac{t_{\text{шл}}}{q_{\text{шл}}} = \dots = \frac{t_m}{q_m} \quad (1)$$

Где $t_{\text{ток}}$, $t_{\text{фрез}}$, $t_{\text{шл}}$, t_m – время обработки соответственно на токарном, фрезерном шлифовальном, m -ном станке; $q_{\text{ток}}$, $q_{\text{фрез}}$, $q_{\text{шл}}$, q_m – количество соответственно токарных, фрезерных шлифовальных, m -ных станков; n – размер партии деталей.

При целом значении количества станков q по операциям достигнуть такого равенства можно только приблизительно. Необходимо остановиться на таком наборе q , чтобы разница между дробями $\frac{t}{q}$ не превышала самого низкого значения времени из скомпонованного технологического процесса. При этом должно выполняться условие ограничения по количеству станков на каждой операции технологического процесса.

Эту задачу необходимо решать при ограничениях не превышения всего производственного цикла обработки сменного резерва времени (480 мин, что составляет 8 ч по 60 мин.). Тогда при двух сменной работе:

$$(k \cdot n - n) \cdot \left(\frac{t_m}{q_m}\right)_{\max} + n \left(\frac{t_1}{q_1} + \frac{t_2}{q_2} + \dots + \frac{t_m}{q_m}\right) + T_{\text{пер}} \cdot m \leq 960, \quad (2)$$

где k – количество одновременно обрабатываемых партий в течение смены на протяжении всей декады месяца; m – количество операций техпроцесса; $\left(\frac{t_m}{q_m}\right)_{\max}$ – максимальное частное от деления нормы времени скомпонованного технологического процесса на соответствующее количество станков; $T_{\text{пер}}$ – время на переналадку при переходе с обработки одной партии деталей на другую.

Второй вариант – параллельно-последовательный запуск партий деталей.

Здесь возможны также несколько вариантов запуска групп на отдельную операцию в зависимости от количества оборудования на данной операции.

а) Если количество оборудования на операции технологического процесса равно количеству партий. В этом варианте это же количество партий будет обрабатываться одновременно, но на разном оборудовании, т.е. переналадка оборудования в течение обработки будет отсутствовать. Например, как на фрезерной операции на рисунке 2.

б) Если количество оборудования на операции технологического процесса больше количества групп. Этот вариант предполагает одновременное задействование разного набора оборудования для обработки каждой из k партий. Это не потребует переналадки оборудования в течение обработки, но предполагает задействование большего количества оборудования. Например, как на токарной операции на рисунке 2.

в) Если количество оборудования на операции менее количества партий, то организация аналогична первому варианту запуска. Деталь, имеющая самый продолжительный операционный цикл, запускается первой на имеющееся количество оборудования. Остальные детали запускаются после переналадки. Например, как на шлифовальной операции на рисунке 2.

Номер операции	Норма времени t	Кол-во оборудования q	Время, мин
1.Токарная	$t_1=40$ $t'_1=30$	3	$\frac{n_1 t_1}{q_1} = \frac{10 \cdot 40}{2} = 200$ $\frac{n_2 t'_1}{q_1} = \frac{9 \cdot 30}{1} = 240$
2.Фрезерная	$t_2=10$ $t'_2=15$	2	$\frac{n_1 t_2}{q_2} = \frac{10 \cdot 10}{1} = 100$ $\frac{n_2 t'_2}{q_2} = \frac{9 \cdot 15}{1} = 120$
3.Шлифовальная	$t_3=5$ $t'_3=6$	1	$\frac{n_1 t'_3}{q_3} = \frac{10 \cdot 5}{1} = 50$ $\frac{n_2 t'_3}{q_3} = \frac{9 \cdot 6}{1} = 48$ $T_{пер} = 15$

Рис. 2. Параллельно-последовательный запуск партий деталей в производство [3]

Результаты и обсуждение

На основании методики запуска партий деталей в производство была разработана программа в Office Excel для графического расчета длительности производственного цикла обработки при последовательном запуске деталей. На рисунке 3 представлена циклограмма обработки двух деталей по партиям из 3 единиц каждая на трех токарных (норма времени 10 мин.) и двух фрезерных (норма времени 12 мин.) станках. Время переналадки станка при переходе от обработки партии одной детали к другой 2 мин. Длительность производственного цикла обработки появляется автоматически на горизонтальной оси графика Excel. Изменяя исходные данные график Excel позволяет интерактивно перестраивать длины отрезков и соответственно пересчитывать продолжительность цикла.

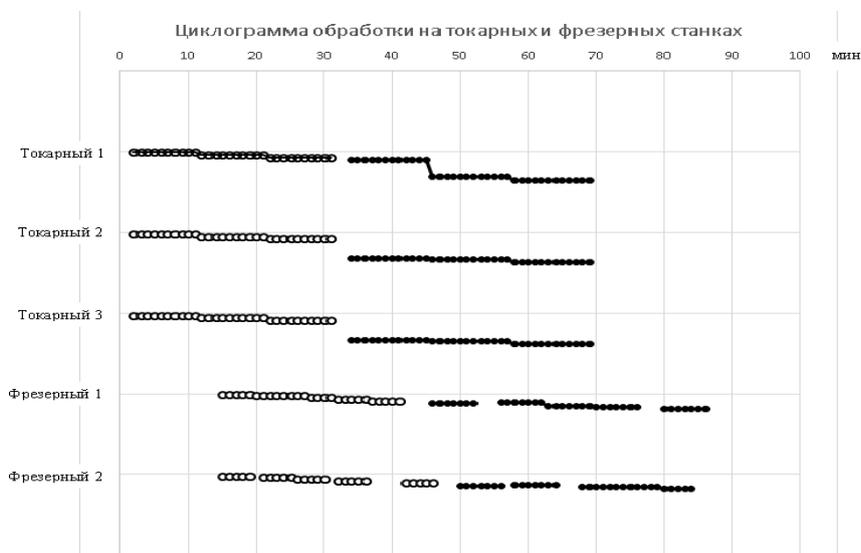


Рис. 3. Циклограмма обработки партий двух деталей на токарных и фрезерных станках при последовательном запуске (белым – график обработки первой детали; черным – график обработки второй детали)

Выводы

Установлено, что для определения очередности запуска-выпуска партий деталей в производство необходимо сгруппировать детали на основании сходного технологического

маршрута, массы, трудоемкости и месячной (декадной) программы выпуска. Для определения количества задействованного оборудования по операциям выбираются самые продолжительные по времени операции по ходу техпроцесса из каждого техпроцесса обработки закрепленных деталей. Возможны несколько вариантов запуска партий деталей на отдельную операцию в зависимости от количества оборудования на данной операции. Можно выделить два основных варианта – последовательный и параллельно-последовательный запуск партий деталей.

Список литературы

1. Дронова О.Б. Методические основы планирования ресурсов организации при процессном подходе к управлению // Вестник алтайской науки. – 2014. – № 2/3. – С. 249–254.
2. Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Методика квалиметрического анализа деталей при прогнозировании временных затрат на производство широкой номенклатуры изделий предприятия // Инновации в машиностроении: сборник трудов VII Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово: КузГТУ, 2015. – С. 14–18.
3. Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Управление технологической подготовкой механической обработки // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 511–516.
4. Марков А.М., Маркова М.И., Дронова О.Б. Определение прогнозной трудоемкости изделий на основе квалиметрического анализа деталей // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2015. – № 2. – С. 126–131.

MANAGEMENT OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF MACHINING PARTS OF DETAIL IN SERIAL PRODUCTION

Markova M. I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: margarita-markova@inbox.ru
Dronova O. B., Ph.D. (Economics), Associate Professor, e-mail: suholga.08@mail.ru

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

Abstract

The article gives practical advice on choosing the next run parts of detail in production and method of determining the amount of equipment involved in operations on the basis of minimizing the duration of the shift task of manufacturing production cycle. The example shows the calculation of the duration of the graphic production process cycle sequential starting parts of detail in manufacture.

Keywords

the size of the party details, job change, sequential starting parts of detail in manufacture, launch serializer starting parts of detail in manufacture

УДК 621.791

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА МОДИФИЦИРОВАНИЯ СВАРНОГО ШВА СКАНДИЕМ,
ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Cu-Li И Al-Mg-Li*****А.Г. МАЛИКОВ, канд. техн. наук, с.н.с.
(ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск)****Маликов А.Г.** – 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1,
Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН,
e-mail: smalik@ngs.ru

Проведены экспериментальные исследования по оптимизации процесса лазерной сварки алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Li и Al-Mg-Li с модифицированием сварного шва скандием. Разработана методика применения скандия в процессе лазерной сварки. Изучено влияния скандия на микро и макроструктуру сварных соединений. Установлено, что применения скандия в процессе лазерной сварки, изменяет микроструктуру сварного соединения, особенно для системы Al-Cu-Li.

Ключевые слова: Лазерная сварка, алюминиевые сплавы, модифицирование, скандий, микроструктура, макроструктура.

Введение

При создании авиационно-космической техники применяются современные высокопрочные Al-Li сплавы [1]. Применение Li позволяет уменьшить удельную массу алюминиевых сплавов. Высокими механическими характеристиками обладают термоупрочняемые сплавы системы Al-Cu-Li, сплавы системы Al-Mg-Li, обладают средней прочностью и являются сверхлёгкими [1-3].

В настоящее время производятся детальные исследования как свойств этих сплавов [4-5], так и возможности создания различных методов получения неразъемных соединений, исследуются перспективы сварки трением с перемешиванием, аргонодуговой сварки, лазерной сварки [6-13] с прочностью, близкой к прочности основного материала. Анализ результатов по лазерной сварке сплавов системы Al-Cu-Li и Al-Mg-Li показал, что относительная прочность сварных соединений алюминиевых сплавов составляют $k=0,75-0,85$ от прочности основного материала в зависимости от системы легирования и технологии подготовки поверхности [6], без дополнительной обработки сварного соединения. Для повышения прочностных характеристик сварных соединений сплавов систем Al-Cu-Li и Al-Mg-Li необходимо проводить дополнительную механическую и термическую обработку шва. Так, в работах [11] исследовано влияние различных видов деформирования сварного соединения на его прочность. Показано, что для алюминиевого сплава 1424 (системы Al-Mg-Li) прочность сварного соединения после деформационной обработки составила 0,95 прочности основного сплава. В работе [9] проведены комплексные экспериментальные исследования механических свойств лазерной сварки алюминий-литиевого сплава (системы Al-Cu-Li) В-1469. Установлено, что применение термообработки (отжиг, закалка и искусственное старение) позволяет получить прочность сварного соединения 0,85 от прочности основного сплава в состоянии поставки Т1. Дополнительная пост обработка

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК -5749.2016.8.

сварного шва приводит к увеличению времени и усложнению технологического процесса изготовления деталей из алюминиевых сплавов.

В последние годы вызывает большой интерес по модифицированию сварных соединений нанодисперсными тугоплавкими частицами, редкоземельными химическими элементами, различными по составу присадочными проволоками [10, 12-14] с целью изменение химического состава и управление микроструктурой сварного шва и повышению прочностных свойств. Использование редкоземельных элементов является наиболее перспективными в модифицировании сварного шва.

Редкоземельный элемент скандий (Sc) оказывает значительное влияние на изменения механических свойств алюминия. Упрочняющее действие скандия объясняется его большой способностью пересыщать твердый раствор алюминия при кристаллизации сплава. Высокая эффективность модифицирующего действия Sc объясняется размерно-структурным соответствием кристаллической решетке алюминия и первичных частиц Al_3Sc , которые образуются в пред кристаллизационный период и служат зародышами зерен алюминиевого твердого раствора [15]. Известно, что Sc в качестве легирующего элемента, при создании лигатуры алюминиевых сплавов повышает прочностные характеристики для Al-Mg сплавов и Al-Cu сплавов [16]. Наличие Sc в Al-Mg сплаве заметно уменьшает растворимость магния в алюминии. Исследование структуры слитков при литье Al-Cu сплавов показало, что добавки скандия сильно измельчают зерно и повышают прочность сплава.

Целью данной работы является разработка метода модифицирование шва редкоземельным элементом Sc при лазерной сварке сплавов системы Al-Cu-Li и Al-Mg-Li. Изучение макро и микроструктуры сварного шва.

Материалы и методика эксперимента

В работе использовались высокопрочные промышленные авиационные алюминиевые сплавы (производство ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод») системы Al-Mg-Li сплав 1420 и Al-Cu-Li сплав 1441. Химический состав (% , масса) сплавов 1420 и 1441 приведен в таблице 1

Таблица 1

Химический состав алюминиевых сплавов

Наименование сплава	Cu	Mg	Li	Zn	Zr	Mn	Ti
Al-Mg-Li(1420)		5,8-6,2	1,8-2,2	0.05	0,01	0,1-0,25	
Al-Cu-Li(1441)	1,6-1,9	0.7-1,1	1,7-2,0		0.26	0.04	0.07

Лазерная сварка (ЛС) алюминиевых сплавов толщиной 1,4 мм осуществлялась на АЛТК «Сибирь-1», включающем непрерывный CO_2 -лазер с мощностью до 8 кВт, разработанный в ИТПМ СО РАН. Лазерное излучение фокусировалось на поверхности сплава с помощью $ZnSe$ -линзы с фокусным расстоянием 254 мм. Для защиты сварного шва и корня использовался инертный газ гелий. Макро- и микроструктура сварных швов исследованы на оптическом микроскопе Olympus LEXT OLS3000.

Результаты экспериментов и обсуждение

На первоначальном этапе для выбранных алюминиевые сплавы системы Al-Mg-Li (1420) и Al-Cu-Li (1441) производилась оптимизация процесса ЛС по энергетическим параметрам: мощность лазерного излучения, положение фокального пятна лазерного

излучения относительно поверхности заготовки скорость сварки, для получения без внешних дефектов в виде трещин, не проваров, подрезов сварных соединений.

В результате были найдены оптимальные энергетические параметры лазерного воздействия для получения без внешних дефектов сварных соединений. Оптимальные параметры без внешних дефектов в виде трещин, не проваров, подрезов сварных соединений ЛС составили для сплава системы Al-Mg-Li (1420) мощность излучения $W = 3$ кВт, сплав системы Al-Cu-Li (1441) $W = 3$ кВт, скорость сварки $V = 4$ м/мин и заглубление фокуса от верхней границы листа -3 мм для обеих систем.

На оптимальных режимах ЛС была изучена макроструктура сварных соединений двух систем Al-Mg-Li и Al-Cu-Li. Были измерены ширины шва сверху и снизу так же были изготовлены шлифы для расчета площади и объема сварного соединения.

Разработка технологии подготовки и активации частиц скандия для нанесения на алюминиевые сплавы перед процессом сварки. Для оптимизации технологии нанесения была выбрана фракция порошка Sc 40-80 мкм. Далее происходила активация и дробление частиц Sc в планетарной мельнице АГО-2, время активации, составило 60 с. На рис. 1 представлены частицы Sc (увеличение 10^X) серебристого цвета с жёлтым отливом, до активации и после. Произошло дробление крупных частиц.

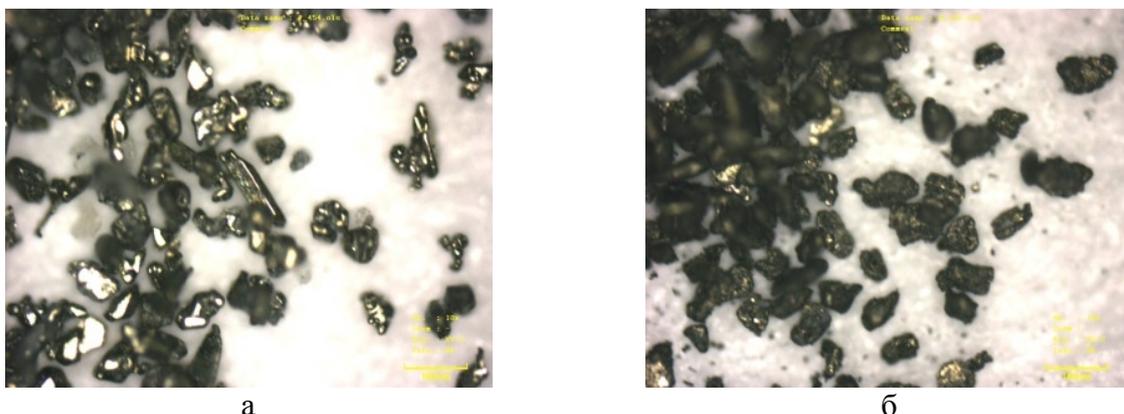


Рис. 1. Фотография частиц Sc: а) до активации; б) после активации

Технологии нанесения частиц Sc на алюминиевые сплавы, осуществлялся методом аддитивности. Sc наносился на поверхность с помощью изготовленного, жесткого калибра с прорезью, толщиной 100 мкм, материал нержавеющей сталь. Масса нанесения составляла $\approx 0,6-0,8\%$ от массы сварного шва. Частицы Sc разравнивались с помощью титановой пластинки по поверхности сплавов. Практически делался моно слой. Закрепление частиц осуществлялось с помощью слабого раствора БФ-6 на бутаноле. Образец с закрепленными частицами Sc незначительно нагревался для испарения спирта.

Далее осуществлялся процесс сварки на ранее найденных оптимальных режимах без Sc, при мощности излучения 3 кВт и скорости сварки 4 м/мин. на данном режиме ЛС произошло интенсивное кипение и разрушение сварного шва. Для предотвращения разрушения сварного шва мощность излучения уменьшили. Процесс ЛС далее осуществлялся при мощностях 1,6; 2; 2,4 кВт, и скорости сварки 4 м/мин. С ростом мощности в сварном шве наблюдается крупные поры, приводящие к охрупчиванию сварного шва. На мощности 1,6 кВт наблюдается не провар. Оптимальная мощность без разрушения сварного шва и отсутствие не провара составило 2 кВт, при этом наблюдалась пористость. Было сделано предположение, что скорость процесса высока. Частицы Sc не успевают взаимодействовать с другими элементами и не происходит равномерного перемешивания Sc в сварном шве. При выбранной мощности 2 кВт, скорость процесса лазерной сварки уменьшили в 2 раза. Стоит заметить, что скорость ЛС 4 м/мин для образцов без Sc является

оптимальной, при более низких скоростях сварной шов не качественный. В результате уменьшения скорости сварки в 2 раза получили без внешних дефектов сварной шов.

На данном режиме ЛС сравнили микро и макроструктуры сварного шва со Sc и без Sc. Применение Sc повлияло на макроструктуру сварного шва, исчезла чешуйчатость характерная для классической лазерной сварки.

На рис. 2 представлены микроструктуры поперечных шлифов сварных швов без Sc и с Sc, на оптимальных режимах процесса лазерной сварки.

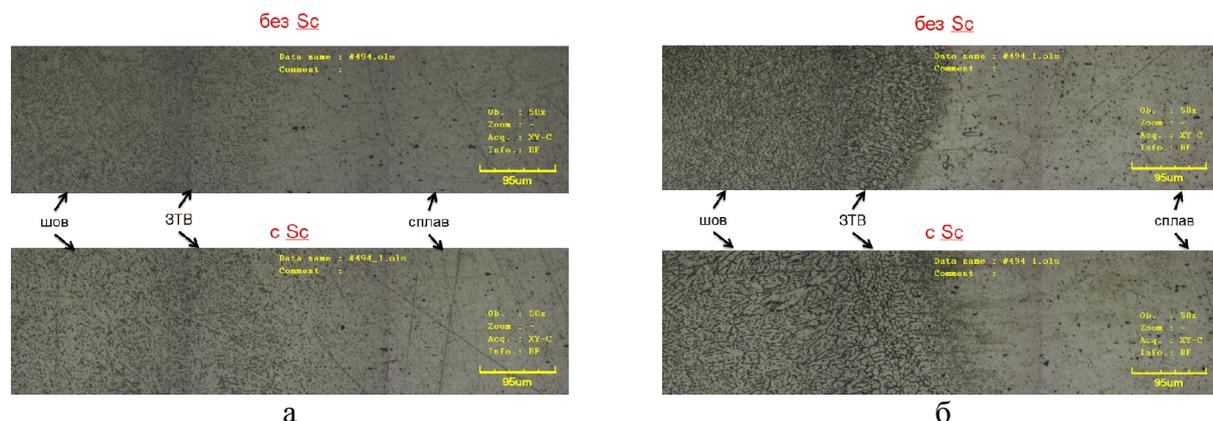


Рис. 2. Фотография поперечного шлифа сварного шва и основного сплава без Sc и с Sc: а) система Al-Mg-Li, сплав 1420; б) система Al-Cu-Li, сплав 1441.

Как видно из рис. 2, на оптимальном режиме ЛС, Sc повлиял на микроструктуру сварного шва, особенно для системы Al-Cu-Li сплав (1441).

Выводы

Разработана методика применения скандия в сварных соединениях и получены сварные соединения без дефектов. Изучено влияния скандия на структуру сварных соединений. Результаты проведенных экспериментов показали, что применения скандия в процессе лазерной сварки, изменяет микро и макроструктуру сварного соединения, особенно для системы Al-Cu-Li.

Список литературы

1. Rioja R.J., Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2012. – Vol. 43. – P. 3325–3337.
2. High-strength structural silver-alloyed underdensity Al-Cu-Li-Mg alloy / I. Fridlyander, O. Grushko, V. Shamrai, G. Klochkov // Metal Science and Heat Treatment. – 2007. – Vol. 49. – P. 279–283.
3. Thermally stable aluminum-lithium alloy 1424 for application in welded fuselage / I. Fridlyander, L. Khokhlatova, N. Kolobnev, K. Rendiks, G. Tempus // Metal Science and Heat Treatment. – 2002. – Vol. 44. – P. 3–8.
4. Ber L.B., Teleshov V.V., Ukolova O.G. Phase composition and mechanical properties of wrought aluminum alloys of the system Al-Cu-Mg-Ag-Xi // Metal Science and Heat Treatment. – 2008. – Vol. 50. – P. 220–227.
5. Gazizov M., Kaibyshev R. Effect of pre-straining on the aging behavior and mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy // Materials Science & Engineering. – 2015. – Vol. 625. – P. 119–130.
6. Olatunji O.O., Taban E. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys // Welding in the World. – 2016. – Vol. 60. – P. 415–457.

7. Fatigue lifetime and tearing resistance of AA2198 Al–Cu–Li alloy friction stir welds: effect of defects / T. Le Jolu, T.F. Morgeneyer, A. Denquin, A.F. Gourgues-Lorenzon // *International Journal of Fatigue*. – 2015. – Vol. 70. – P. 463–472.
8. *Drits A.M., Ovchinnikov V.V.* Weldability and properties of welds of high-strength aluminum alloys of the Al–Cu–Li system // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2012. – Vol. 53. – P. 445–449.
9. Комплексное исследование лазерной сварки высокопрочного сплава В-1469 / Б.Д. Аннин, В.М. Фомин, Е.В. Карпов, А.Г. Маликов, А.М. Оришич // *Авиационные материалы и технологии*. – 2016. – № 3. – С. 9–16.
10. *Zhang X., Yang W., Xiao R.* Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al–Li alloy 2060 with Al–Mg filler wire // *Materials and Design*. – 2015. – Vol. 88. – P. 446–450.
11. Исследование технологии лазерной сварки алюминиевого сплава 1424 / Б.Д. Аннин, В.М. Фомин, В.В. Антипов, Е.Н. Иода, Е.В. Карпов, А.Г. Маликов, А.М. Оришич, А.Н. Черепанов // *Доклады Академии наук*. – 2015. – Т. 465. – С. 419–424.
12. Влияние добавок скандия на свариваемость сплавов системы Al–Mg / В.И. Лукин, А.А. Скупов, М.Д. Пантелеев, Е.Н. Иода // *Сварка и диагностика*. – 2016. – №1. – С. 3–5.
13. *Скупов А.А., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д.* Новые присадочные материалы для сварки высокопрочных алюминий-литиевых сплавов // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 9. – С. 30–37.
14. Наномодифицирование сварных соединений при лазерной сварке металлов и сплавов / А.М. Оришич, А.Н. Черепанов, В.П. Шапеев, Н.Б. Пугачева. – Новосибирск: Сибирское научное издание, 2014. – 229 с.
15. The scandium effect in multicomponent alloys / S. Riva, K.V. Yussenko, N.P. Lavery, D.J. Jarvis, S.G.R. Brown // *International Materials Reviews*. – 2016. – Vol. 61. – P. 203–228.
16. Легкие и жаропрочные сплавы и их обработка: к 80-летию со дня рождения А.Ф. Белова. – М.: Наука, 1986. – 304 с.

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF SCANDIUM MODIFICATION OF THE WELDED JOINT DURING THE LASER WELDING OF Al-Cu-Li AND Al-Mg-Li ALLOYS

Malikov A.G., Ph.D. (Engineering), Senior researcher, e-mail: smalik@ngs.ru

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str.,
Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Abstract

Experimental research was carried out to optimize the process of laser welding of aluminum alloys (systems Al–Cu–Li and Al–Mg–Li) with scandium modification of the welded joint. The method of scandium utilization for the laser welding process has been developed. The effect of scandium on the micro- and macro-structure of welded junctions has been studied. It is found that scandium applied at the laser welding changes the micro-structure of the welded joint, especially for the Al–Cu–Li system.

Keywords

laser welding, aluminum alloys, modification, scandium, micro-structure, macro-structure

Funding

The work is supported by the President's Grant MK -5749.2016.8.

УДК 621.91.01, 666.3

**ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА СТАНКЕ С ЧПУ**

В.В. БУСЛАЕВА, магистрант
Н.В. ГЕРАСИМОВ, магистрант
П.В. ДЕМЕШКО, магистрант
Р.С. ПРОСКУРИН, магистрант
(НГТУ, г. Новосибирск)

Буслаева В.В. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: nika9400@inbox.ru

Актуальность работы состоит в том, что изделия из керамических материалов (КМ) широко распространены, но отсутствие нормативных документов по их механической обработке, заставляют искать решения для ряда проблем. Данная работа посвящена возможности обработки КМ на фрезерном станке с числовым программным управлением (ЧПУ), с использованием управляющей программы (УП) созданной в программном продукте *Powermill*. Показаны экспериментальные результаты обработки плоских и цилиндрических поверхностей. Определены основные вопросы при обработке КМ, такие как: особенности крепления керамической заготовки в приспособление, факторы, влияющие на износ инструмента, особенности обработки поверхностей, выбор оптимальной траектории и схемы обработки. Описаны рекомендации по выбору схемы обработки, выбору инструмента, снижению износа инструмента, а также по использованию оборудования для обработки КМ.

Ключевые слова: Керамика, станки с ЧПУ, фрезерная обработка, износ инструмента, разрушение, *Powermill*, режимы резания.

Введение

В настоящее время в машиностроении возникла потребность в конструкционных материалах, которые наряду с низкой плотностью обладают высокими эксплуатационными свойствами, что сложно реализовать при использовании традиционных металлических материалов. КМ привлекают к себе повышенное внимание, т.к. обладают высокой твердостью, прочностью на сжатие, износостойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и низкой плотностью. Но они не работают в условиях изгибных, растягивающих и ударных нагрузок [1]. Изделия из керамических материалов широко распространены не только в машиностроении, а также в приборостроении, медицине, радиотехнике и т.д.

Основной метод получения заготовок из КМ — прессование с последующим спеканием. Из-за высокой твердости после спекания, обработка изделий возможна только шлифованием. Простые поверхности изделия обрабатывают алмазными шлифовальными кругами, производят доводку алмазными пастами [2]. Но для получения изделий со сложным профилем данные методы обработки не пригодны, поэтому предлагается для таких деталей проводить фрезерную черновую обработку «сырой» либо слегка «подспеченной» керамики на станках с ЧПУ.

Методика экспериментального исследования

Для проведения экспериментальных исследований использовалось оборудование фирмы Roland MDX 540S (Япония) станок с ЧПУ (рис.1) и программное обеспечение Powermill 2016. В таблице 1 представлены режимы, использованные при обработке керамики. В качестве режущего инструмента применялись концевая твердосплавная фреза $\varnothing 6$ мм и перовое сверло $\varnothing 8$ мм.



Рис. 1. Станок с ЧПУ Roland MDX 540S

Таблица 1

Режимы резания			
Геометрический элемент	N, об/мин	V, мм/мин	S, мм
Плоскость	8000	360	0,3
Отверстие	400	10	-

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов были определены вопросы, связанные с обработкой керамических материалов.

- *Особенности крепления керамических заготовок в приспособление*

Для зажима заготовки не требуется большого усилия зажима т.к. «сырая» или «подспеченная» керамика находится в состоянии, когда нет сильных взаимосвязей между частицами, поэтому не требуется больших сил чтобы разделить их в процессе обработки. При установке заготовки в приспособление следует учитывать площадь контакта. Не значительный перекося или недостаток площади соприкосновения может спровоцировать процесс разрушения заготовки или зарождения трещин.

- *Износ инструмента*

Керамика в «сыром» виде есть не что иное, как абразив. При ее обработке инструмент изнашивается за очень короткий промежуток времени, вследствие чего инструмент в зоне обработки начинает разогревать материал, что приводит к дефекту керамики в виде прижога. Это может привести к изменению структурного состояния материала. Структурные изменения могут сказаться на механических свойствах изделия.

В процессе обработки в зоне резания материал удаляется в виде абразивных частиц, которые налипают на инструмент и на обрабатываемую деталь, что негативно влияет на

износ инструмента. Для предотвращения трения абразивных частиц об режущие кромки инструмента, следует постоянно удалять частицы из зоны обработки в процессе резания.

- *Обработка отверстий*

Механическая обработка отверстий в сплошном КМ возможна при помощи перового сверла или концевой фрезы. И в том и другом случае обработка идет на малых подачах и оборотах шпинделя.

При обработке отверстий фрезой происходит выдавливание «доньшка» материала (рис.2,а), что приводит к зарождению трещин, появлению больших сколов и разрушению заготовки и как следствие порче последней. При обработке перовым сверлом на кромках отверстия возникают незначительные сколы (рис.2,б).

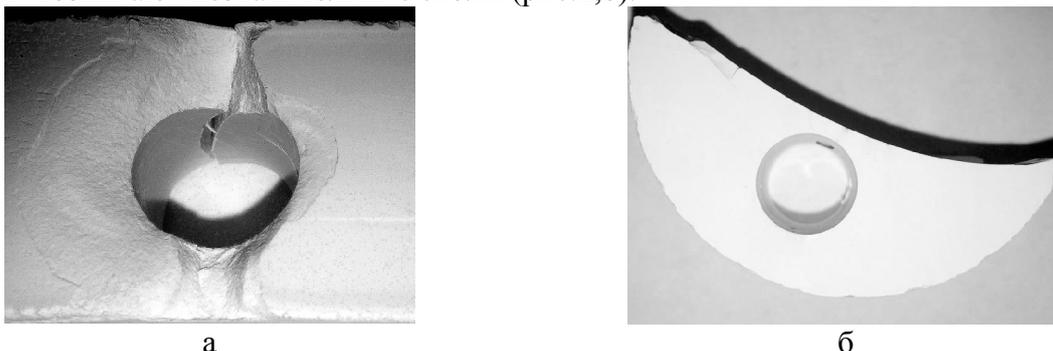


Рис. 2. Дефекты при обработке отверстий:

а - сколы и разрушения после фрезерования; б - незначительные сколы после сверления

- *Схема обработки*

При написании управляющей программы (УП) в программном продукте *Powermill* возможно три варианта траектории обработки.

Траектория «*сместить все*» характеризуется врезанием инструмента в центре заготовки. Обработка происходит по эквидистанте. Такой способ негативно влияет на инструмент (трёхсторонняя схема резания), приводит к большому количеству сколов на поверхности заготовки, что ухудшает качество поверхности (рис. 3, а).

При использовании траектории «*растр*» обработка происходит ступенчато, что в корне ухудшает качество поверхности и приводит к большому количеству сколов на кромках детали в процессе врезания инструмента (рис. 3, б). Траектория «*сместить модель*» характеризуется тем, что врезание инструмента происходит с наружного контура и постепенно углубляется в центр по эквидистанте (рис. 4, в). Для уменьшения количества сколов и выбоин необходимо использовать попутную схему фрезерования.

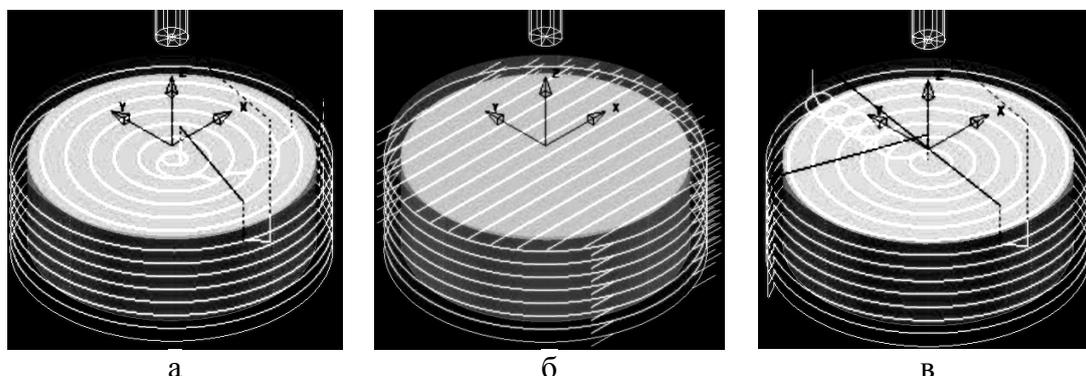


Рис. 3. Траектории движения инструмента:

а – траектория «сместить все»; б – траектория «растр»; в – траектория «сместить модель»

Качество поверхности также зависит от того какой частью работает концевая фреза. При обработке торцевой частью на поверхности видны выбоины (рис. 4, а), тогда как при работе цилиндрической частью поверхность не имеет видимых дефектов (рис. 4, б).

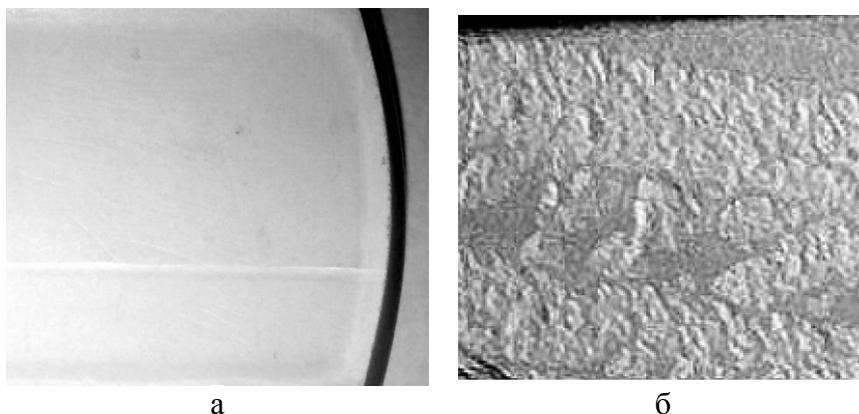


Рис. 4. Качество поверхности после обработки:

а - обработка цилиндрической частью фрезы; б - обработка торцевой частью фрезы

Выводы

Механическую обработку КМ нужно проводить в «сыром» или «подспеченном» состоянии с учетом усадки и припуска под шлифование, если эта операция необходима. При фрезеровании наиболее качественная поверхность получается при обработке цилиндрической частью фрезы. Для уменьшения дефектов при обработке необходимо использовать траекторию «сместить модель» и попутную схему фрезерования. Обработку отверстий следует производить при помощи сверления перовым сверлом.

Список литературы

1. Панова И.М. Особенности конструирования изделий из керамических материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2013. – № 4 (45). – С. 45–50.
2. Механическая обработка деталей из керамики и ситалов / В.А. Хрульков, В.А. Тародей, А.Я. Головань, Ю.М. Буки. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 352 с.

SPECIFIC FEATURES OF CERAMIC MATERIALS CNC

Buslaeva V.V., Master's Degree Student, e-mail: nika9400@inbox.ru

Gerasimov N.V., Master's Degree Student, e-mail: gnv93@yandex.ru

Demeshko P.V., Master's Degree Student, e-mail: petr-demeshko@mail.ru

Proskurin R.S., Master's Degree Student, e-mail: roma_proskurin@mail.ru

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

Abstract

Relevance of the work lies in the fact that the products of the ceramic materials (SM) are widespread, but the lack of regulations for their machining is the reason for seeking solutions for a number of problems. This paper is devoted to investigate the CM processing capabilities on a milling machine with numerical control (CNC) with the use of the control program (CP) established by *Powermill* software product. The experimental results of the processing of flat and cylindrical surfaces are shown in this paper. The main issues of CM processing, such as a ceramic preform features of attachment into the tool, the factors affecting the wear of the tool, features of surface treating, the choice of the optimal path and processing circuitry are identified. Recommendations for choosing the processing circuit, the choosing instrument, reduction of tool wear as well as for using of processing CM equipment are given.

Keywords

Ceramics, CNC machines, milling, tool wear, destruction, Powermill, cutting conditions

УДК 538.9

**ВОЗМОЖНОСТИ КОНФОКАЛЬНОЙ МИКРОСКОПИИ ПРИ ОЦЕНКЕ
МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ***

*Е.А. АЛФЁРОВА, канд. физ.-мат. наук, доцент
ДЗЯН ДИЛУН, магистрант
(НИ ТПУ, г. Томск)*

Алфёрова Е.А. – 634050, г. Томск, проспект Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: katerina525@mail.ru

На сегодняшний день в мировых стандартах отсутствует единый подход к оценке параметров шероховатости поверхности. Самих же параметров с одной стороны очень много, а с другой не всегда достаточно для описания и оценки поверхностей с особыми свойствами. Вместе с тем сегодня появилось множество новых средств измерения и методик. Все это приводит к вопросу о сопоставимости результатов, полученных разными способами. В работе приводится сравнение результатов измерений двухмерного параметра шероховатости R_a (среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости) и его трехмерного аналога S_a (значение арифметического среднего значения высоты поверхности ограниченного масштаба), полученных методом конфокальной микроскопии с указанной на образцах шероховатости величиной. Показано, что на получаемый результат влияют характеристики используемых объективов. Рассматриваются причины рассогласования результатов и приводятся рекомендации по выбору увеличения объектива. Обсуждаются возможности применения конфокальной микроскопии в технических измерениях и научных исследованиях.

Ключевые слова: конфокальная микроскопия, двухмерные и трехмерные параметры шероховатости.

Введение

Шероховатость поверхности является одной из важнейших нормируемых характеристик деталей. Она оказывает влияние на различные эксплуатационные свойства деталей машин. Кроме того, параметры рельефа очень важны для ученых, которые по деформационному рельефу могут судить о процессах, протекающих в кристаллах при деформации.

На сегодняшний день в Российской Федерации основным документом по нормированию параметров шероховатости является ГОСТ 2789, который устанавливает шесть параметров и распространяется только на контактные методы. Очевидно, что их не всегда достаточно для оценки ряда поверхностей с особенными свойствами и научных целей. Кроме того, в современных условиях необходимость контроля параметров шероховатости поверхности требует использования современных средств измерений, оснащенных соответствующим программным обеспечением. Однако, требования высокой точности, воспроизводимости, чувствительности по-прежнему актуальны. Сегодня ассортимент

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60007 мол_а_дк

средств измерений шероховатости и как следствие методик значительно расширился. Средства измерения имеют в своей основе различные физические принципы и требуют применения различных методик, следовательно, могут присутствовать несоответствия в измеряемых параметрах. Дополнительной проблемой становится то, что в мировых стандартах отсутствует единый подход к оценке параметров шероховатости поверхности, а самих параметров с одной стороны очень много, а с другой не всегда достаточно [1-2].

Одним из современных методов по оценки параметров является конфокальная микроскопия (КМ). Благодаря ей у исследователей и контролёров появилась возможность оценивать двух и трехмерные параметры шероховатость, а также получать 3D-модель рельефа поверхности. Этот метод является бесконтактным, что сохраняет поверхность от повреждений.

В настоящей работе приводится сравнение результатов измерений среднеарифметического отклонения профиля шероховатости (R_a), полученных методом конфокальной микроскопии при использовании объективов с различным увеличением с указанной на образцах шероховатости величиной (ГОСТ 9378, ISO2632-1, ISO2632-2).

Методика

В работе использовали образец шероховатости, соответствующий способу обработки «полирование», для которого допускаемое отклонение среднего значения R_a от номинального составляет +12%, -17%, допускаемое среднеквадратическое отклонение 9%. Определение среднеарифметического отклонения профиля шероховатости проводили на базовых длинах, указанных в ГОСТ 9378, ISO2632-1, ISO2632-2 для соответствующих величин R_a . Были измерены образцы с R_a : 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 мкм. Численные значения параметров шероховатости получали с использованием программного комплекса Gwyddion.

В работе также представлено значение арифметического среднего значения высоты поверхности ограниченного масштаба S_a (ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014), которое является трехмерным аналогом двумерного параметра R_a .

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy$$

значение на оси ординат $z(x, y)$ – это высота поверхности с ограниченным масштабом в положении x, y .

Измерения проводили на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Используемые объективы и их разрешение по высоте приведены в таблице.

Таблица

Параметры объективов

Увеличение объектива	×10	×20	×50	×100
Разрешение по высоте, мкм	2	0,2	0,06	0,06

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены график зависимости параметров R_a и S_a от увеличения объектива.

Видно, что при увеличении объектива $\times 10$ величина Ra указанная на образце и полученная КМ отличаются на порядок, что является ожидаемым, т.к. разрешение по высоте у данного объектива составляет 2 мкм. Это разница тем более значительна, чем меньшую шероховатость необходимо измерить. При использовании большего увеличения объективов мы видим приближение к значению 0,1 мкм. Вместе с тем, при пятидесяти и стократном увеличении, получаемые значения практически совпадают, однако разница во времени сканирования ощутимая. Аналогичные результаты были получены нами и для других образцов шероховатости. Поэтому для измерения параметров шероховатости наиболее предпочтительным является объектив с увеличением $\times 50$. Отличия значений шероховатости,

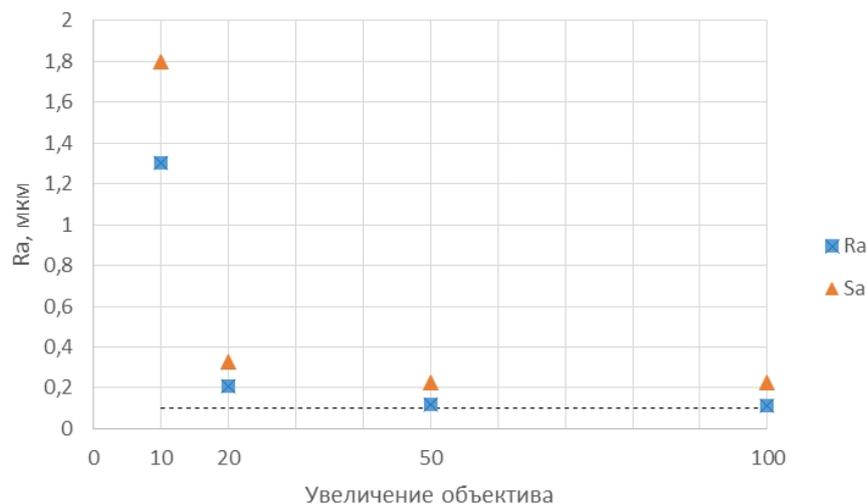


Рис. 1. Зависимость значений параметров шероховатости от увеличения объектива, пунктирной линией указано значение для образца шероховатости $Ra=0,1$ мкм

полученных одним типом объективов, с разным увеличением обусловлено разницей в оптическом разрешении и в размерах поля зрения. Кроме того, в связи с множественным рассеянием света на плоскостях, не лежащих в плоскости фокусировки оптические методы могут преувеличивать значение шероховатости.

Значение параметров шероховатости существенно зависят от используемого объектива, причем не только от его увеличения, но и от рабочего расстояния. Об этом сообщается также, например, в работе [3]. Расхождение значений параметров шероховатости, полученных объективами с разными рабочими расстояниями объясняется тем, что при его увеличении числовая апертура обычно уменьшается, а это в свою очередь ведет к уменьшению латерального разрешения и разрешения по глубине.

Разница в значениях двух- и трехмерных параметрах объясняется тем, что при трехмерном анализе топографии поверхности резко изменяется объем участвующих в расчете данных. Если при расчете параметра Ra мы оцениваем только срезы поверхности, то при расчете Sa используется вся площадь рассматриваемой области. Об отличии параметров Ra и Sa также сообщается в работах [4-5]. Использование трехмерных параметров повышает достоверность получаемых результатов. Во многих случаях, особенно при исследовании микротопографии поверхностей приоритет отдается трехмерным параметрам в сравнении с двухмерными [6-8]. Это весомое достоинство конфокальной микроскопии позволяет наглядно исследовать морфологию поверхностей, полученных тем или иным видом обработки [9]. Также получение трехмерных изображений поверхностей дает обширные возможности для исследователей [10-15].

Таким образом, конфокальная микроскопия является простым, быстрым способом получения двух и трехмерной информации о микрогеометрии поверхности. При контроле параметров шероховатости КМ необходимо правильно выбирать увеличение и рабочее расстояние объектива. При сравнении результатов важно учитывать с помощью какого метода была проведена оценка шероховатости.

В заключении авторы выражают благодарность к.т.н., м.н.с. ИФПМ СО РАН А.В. Филиппову за помощь в получении экспериментальных результатов.

Список литературы

1. Ардашников Б.Н., Витенберг Ю.Р. Исследование влияния шероховатости и наклепа на износостойкость // Технологические методы повышения качества поверхности деталей машин. – Л., 1978. – С. 112–117.
2. Privilin I.C., Morgan A., Mairey D. The influence of surface polishing on the oxidation of the pure nickel // Acta Metallurgica. – 1984. – Vol. 32, N 12. – P. 2203–2212.
3. Исследование шероховатости поверхности подложек CdZnTe различными методами измерения нанометровой точности / И.Д. Бурлаков, И.А. Денисов, А.Л. Сизов, А.А. Силина, Н.А. Смирнова // Прикладная физика. – 2014. – № 4. – С. 80–84.
4. Порошин В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: монография. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 196 с.
5. Дьяченко С.С., Пономаренко И.В. Топографические особенности поверхности стальных изделий после различных технологических воздействий // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2014. – № 1 (47). – С. 128–138.
6. Paradigm shifts in surface metrology. Part I. Historical philosophy / X. Jiang, P.J. Scott, D.J. Whitehouse, L. Blunt // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2007. – Vol. 463. – P. 2049–2070.
7. Paradigm shifts in surface metrology. Part II. The current shift / X. Jiang, P.J. Scott, D.J. Whitehouse, L. Blunt // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2007. – Vol. 463. – P. 2071–2099.
8. Stout K.J., Blunt L. Three-dimensional surface topography. – 2nd ed. – London: Perton Press, 2000. – 285 p.
9. Особенности использования 3D топографических характеристик поверхности в инженерном деле / В.К. Белов, Д.О. Беглецов, Е.В. Губарев, С.В. Денисов, М.В. Дьякова, К.В. Смирнов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2014. – № 1. – С. 73–80.
10. Алферова Е.А., Лычагин Д.В., Сопрунов Д.В. Складчатые структуры в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах никеля // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 468–474.
11. Alferova E.A., Lychagin D.V. Characterization of deformation pattern structure elements generated in uniaxial compression of nickel single crystals // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 379. – P. 66–70.
12. Lychagin D.V., Alfyorova E.A. Folding in FCC metal single crystals under compression // Physics of the Solid State. – 2015. – Vol. 57. – P. 2034–2038.
13. Strain-induced folding on [111] copper single crystals under uniaxial compression / D.V. Lychagin, S.Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskii, E.A. Alfyorova // Applied Surface Science. – 2016. – Vol. 371. – P. 547–561.
14. Macrosegmentation and strain hardening stages in copper single crystals under compression / D.V. Lychagin, S.Yu. Tarasov, A.V. Chumaevskii, E.A. Alfyorova // International Journal of Plasticity. – 2015. – Vol. 69. – P. 36–53.

15. *Filippova E.O., Filippov A.V., Shulepov I.A.* Experimental study of sliding friction for PET track membranes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 125.

POSSIBILITY OF CONFOCAL MICROSCOPY WHEN ASSESSING MICROGEOMETRY OF SURFACE

Alfyorova E.A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, e-mail: katerina525@mail.ru

Jiang Dilong, Master's Degree student, e-mail: 408912814@qq.com

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

Abstract

Today in the world there is no single standard approach to evaluating the surface roughness. On the one hand, we have too much parameters, and on the other, they are not always sufficient for describing and evaluating the surfaces with special properties. Today, however, many new measurement tools and methods appear. All this leads to the question of the comparability of the results obtained in different ways. The paper compares the results of the measurement of two-dimensional roughness parameter Ra (arithmetic mean deviation of the assessed profile) and its three-dimensional analogue of Sa (arithmetical mean height of the scale limited surface), obtained by confocal microscopy with the value indicated on the samples roughness. We have demonstrated that the characteristics of the lens affect to the obtained result. The causes of results mismatch are considered and recommendations on the choice of the lens zoom offers. The possibility of using confocal microscopy in the technical measurements and scientific research are discussed.

Keywords

confocal microscopy, two-dimensional and three-dimensional roughness parameters

Funding

The reported study was funded by RFBR, according to the research project No. 16-32-60007 mol_a_dk

УДК 621.9.048.6

**ВЫБОР МЕТОДОВ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ДВИГАТЕЛЯ АВТОМОБИЛЯ**

*Н.В. БЫЧКОВ, магистрант
А.И. БЕЗНЕДЕЛЬНЫЙ, канд. тех. наук, доцент
В.П. ГИЛЕТА, канд. тех. наук, доцент
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Бычков Н.В. - 630073, г. Новосибирск, пр. К Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: buchon93@mail.ru

В статье приводится анализ деталей двигателя, работающих на усталость при циклических нагрузках. Выявлено, что основной деталью двигателя работающего на циклическую усталость является шатун, который воспринимает усилие со стороны газов при рабочем ходе от поршневого пальца и передает его кривошипу коленчатого вала, а также обеспечивает перемещение поршневой группы при совершении промежуточных процессов (тактов). Произведен анализ методов повышения усталостной прочности шатуна автомобиля. Выявлено, что наиболее рационально использовать метод поверхностного пластического деформирования. Выбран метод повышения усталостной прочности в ультразвуковом стакане. Описаны приспособления для упрочнения шатуна автомобиля. Представлены профилограммы образцов до обработки и после. Установлено, что после обработки в ультразвуковом стакане получают детали с остаточным напряжением сжатия, повышенной микротвердостью, шероховатостью препятствующей зарождению усталостной трещины.

Ключевые слова: изготовление шатунов, усталостное разрушение, виды обработки, рациональный выбор, поверхностное пластическое деформирование, шероховатость, ультразвук.

Введение

Физические причины усталостного разрушения материалов достаточно сложны и еще не до конца изучены. Одной из основных причин усталостного разрушения принято считать образование и развитие трещин.

Некоторые детали машин (коленчатые валы, поршневые пальцы, шатуны, качалки, лопатки турбин и др.) в процессе работы подвергаются нагрузкам, изменяющимся по величине и направлению, в частности шатун подвергается растяжению и сжатию, цикличность которых, определяется режимами работы двигателя. При таких повторно переменных напряжениях металл постепенно разрушается от усталости [1].

Разрушение шатуна начинается с поверхностного слоя. Усталостное разрушение проявляется в возникновении повреждений, и его необходимо учитывать при проектировании и изготовлению деталей для современных двигателей.

Шатун воспринимает усилие со стороны газов при рабочем ходе от поршневого пальца и передает его кривошипу коленчатого вала, а также обеспечивает перемещение поршневой группы при совершении тактов.

К шатунам предъявляются следующие требования:

- высокая усталостная прочность при динамических нагрузках;

- высокая жесткость головок и стержня;
- минимальная масса и габариты (размеры шатуна не должны препятствовать его проходу через цилиндр при сборке двигателя);
- простота и технологичность конструкции.

Для изготовления шатунов бензиновых двигателей используются углеродистые или легированные стали 45, 45Г2, 40Г, 40Х, 40ХН, 40Р, а для дизельных двигателей – высокопрочные легированные стали 18Х2Н4МА, 18Х2Н4ВА, 40ХН3А, 40Х2МА и др.

Шатуны могут отливаться, также, из высокопрочных титановых сплавов или композитных материалов.

При многократном действии нагрузок в местах, где имеется резкое повышение напряжений вследствие наличия отверстий, выточек пустот, включений, трещин и т. д., происходят внезапные изломы усталостного разрушения.

Основными дефектами шатунов являются трещины, изгиб и скручивание тела шатуна, износ отверстий в головках шатуна под втулку и вкладыши, повреждения плоскостей разъема шатуна и опорных поверхностей под головки и гайки шатунных болтов, дефекты резьбовых отверстий в теле шатуна, износ втулок верхних головок и баббитовой заливки нижних головок шатуна.

Выносливость металлов и сплавов зависит от их природы, характера обработки, состояния поверхности, условий эксплуатации и т. п. На предел выносливости большое влияние оказывает неоднородность металла. В металле всегда могут присутствовать трещины, неметаллические включения, газовые пузыри, пустоты, которые при нагрузках вызывают общую концентрацию напряжений [2].

Кроме указанных факторов на долговечность деталей также влияют:

1) структурное состояние, термическая обработка; 2) состояние поверхностного слоя; 3) температурой и средой испытания; 4) масштабным фактором; 5) частотой нагружения; 6) концентрацией напряжений; 7) асимметрией цикла нагружения; 8) вида напряженного состояния; 9) контактного трения.

Качество поверхностного слоя во многом определяется технологией изготовления деталей. Среди финишных методов обработки, позволяющих сформировать сочетание микрогеометрии и физико-механических свойств, являются методы поверхностного пластического деформирования.

Теория

Поверхностное пластическое деформирование

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) — это метод обработки деталей без снятия стружки, при котором пластически деформируется только поверхностный слой деталей. В результате ППД уменьшается шероховатость поверхности, увеличивается твердость (микротвердость) металла, в поверхностном слое детали возникают сжимающие остаточные напряжения.

Достоинством ППД является технологическая универсальность и экономичность метода. По характеру взаимодействия инструмента с деталью методы ППД подразделяется на статические и ударные.

Статическое ППД осуществляется перемещением инструмента вдоль обрабатываемой поверхности с постоянной или закономерно изменяющейся силой деформирования или глубиной внедрения.

Ударное ППД осуществляется нанесением инструментом случайно распределенных или регулярных ударов по детали.

Применение ППД позволяет уменьшить эффективный коэффициент концентрации напряжений и обеспечить равнопрочность конструкции по всем участкам поверхности. Упрочнение деталей методом ППД базируется на закономерностях упругопластического деформирования поверхностного слоя твердым телом.

Механизм упрочнения ППД состоит в лавинообразном развитии дислокаций, скапливающихся вблизи линии сдвигов, и последующей их остановке различными препятствиями. В первый момент происходит дробление зерен на блоки с образованием мозаической структуры. Далее, из-за развития сдвигов по плоскостям скольжения образуются новые, более мелкие зерна. Кристаллы, теряя первоначальную форму, сплющиваются и вытягиваются в направлении деформирования с формированием волокнистой структуры с анизотропными свойствами. При неправильно выбранных, «завышенных» режимах упрочнения может произойти перенаклеп металла, который проявляется в образовании микротрещин, снижении начальных остаточных напряжений сжатия, увеличении шероховатости. Перенаклеп снижает эксплуатационные свойства конструкций, не поддающиеся термообработке.

Существует множество методов поверхностного пластического деформирования.

Виброударный метод

Виброударный метод упрочнения основан на использовании колебаний не связанных друг с другом частиц упрочняющего тела (стальных шариков или абразивных гранул) и обрабатываемой детали. Упрочняющее тело и деталь помещаются в контейнер, находящийся в состоянии вибрации.

Дробеструйный метод

Этот метод основан на использовании кинетической энергии обрабатывающих сред, которые могут подаваться на обрабатываемую поверхность с помощью сжатого воздуха, жидкости под давлением, вращающихся лопаток дробеструйных аппаратов.

Ударно-барабанный метод

Этот метод применяется для упрочнения деталей из алюминиевых сплавов типа панелей, обшивок, лонжеронов, поясов, нервюр, стрингеров, шпангоутов с гладкими и ребристыми поверхностями. Ударно-барабанный метод может применяться также для крупногабаритных корпусных деталей, располагаемых в центральной части многогранного или цилиндрического барабана, и для крупногабаритных внутренних полостей, когда обрабатываемая деталь сама является барабаном.

Обкатывание (раскатывание)

Метод обкатывания рекомендуется для обработки деталей, имеющих гладкие наружные цилиндрические и конические поверхности и концентраторы напряжений типа галтелей, канавок, надрезов, резьб. Процесс обкатывания основан на вдавливании твердого металлического инструмента (шарика, ролика) в обрабатываемую поверхность при их взаимном перемещении. Шероховатость поверхности в результате обкатывания снижается.

Алмазное выглаживание

Этот метод рекомендуется для упрочнения поверхностей деталей в узлах, воспринимающих статические, ударные и повторно-переменные нагрузки при нормальных и повышенных температурах.

С точки зрения кинематики некоторые изложенные методы являются нецелесообразными для обработки поверхностей деталей имеющих сложную форму они являются наиболее трудоемкими и энергозатратными.

Повышение усталостной прочности сводится к выбору оптимальной формы детали, улучшению шероховатости поверхности и применению различных методов упрочнения поверхностного слоя.

Целью исследования является выбор метода обработки, обеспечивающего формирование в поверхностном слое остаточных напряжений и микрогеометрии с большими радиусами вершин и впадин.

Наилучший эффект дают методы поверхностного пластического деформирования (ППД), а именно метод упрочнения детали в ультразвуковом стакане стальными шариками [3, 4].

Методика экспериментального исследования

Упрочнение шатуна в ультразвуковом стакане

Упрочнение производится с помощью магнитострикционного преобразователя (рис. 1) и ультразвукового генератора УЗГ5-4.0/18 (рис. 2). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.



Рис. 1.

Магнитострикционный преобразователь



Рис. 2. Ультразвуковой генератор

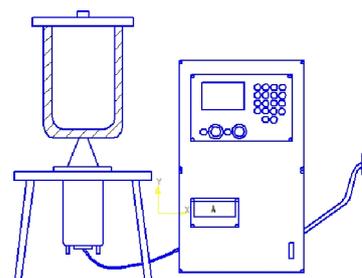


Рис. 3. Схема установки

Установка (рис. 3) состоит из стакана, изготовленного из титанового сплава, крышки, магнитострикционного преобразователя и УЗГ5-4.0/18.

Описание работы установки

Деталь помещается внутрь стакана (подвешивается к крышке), в котором находятся стальные шарики. При включении УЗГ электрические высокочастотные колебания преобразуются в механические продольные колебания магнитострикционным преобразователем, к торцу которого подключен стакан. Стакан преобразует продольные колебания магнитострикциона в изгибные колебания стенок. Под действием продольных

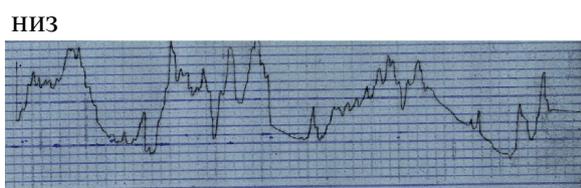
колебаний дна стакана шарики поднимаются и заполняют пространство внутри стакана, затем ударяясь об боковые стенки стакана получают кинетическую энергию, разгоняясь до установления стационарного режима. Скорость с которой движутся шарики, может достигать 50м/с. и более. При столкновении шариков с деталью происходит пластическое деформирование поверхности обрабатываемой детали, сопровождаемое деформационным упрочнением и созданием на поверхности специфического микрорельефа [5].

В ходе эксперимента шатун подвергался обработке в ультразвуковом стакане стальными шариками диаметром 1 мм, время обработки 3 минуты. Оценивалась шероховатость поверхностей с помощью профилографа-профилометра модели 252.

Результаты исследования

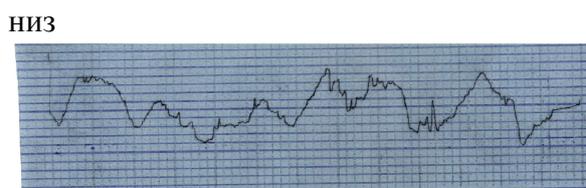
Для обработки использовались шатун из стали 45 шлифованный (исходный): среднее значение: Ra-1 мкм. Шатун из стали 45 обработанный в ультразвуковом стакане стальными шариками диаметром 1мм.: среднее значение: Ra-1.84 мкм.

Среднее значение Ra определялось по 10 измерениям. Профилограммы исходной и обработанной поверхности приведены на рис (рис.4, 5), из которых видно, что после обработки в ультразвуковом стакане шероховатость формируется без острых впадин.



верх

Рис. 4. Исходный образец



верх

Рис. 5. Обработанный образец

Вертикальное увеличение: 5000раз
Горизонтальное увеличение: 100раз

Выводы

Ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование формирует на детали микрогеометрию с большими радиусами скругления, после обработки получают детали с остаточным напряжением сжатия, а также шероховатостью препятствующей зарождению усталостной трещины, которая приводит к повышению усталостной прочности шатунов.

Список литературы

1. Семенов И.Л., А.М. Поляков, Е. Плужнова. Учебник по устройству легкового автомобиля. – М.: Мир автокниг, 2011. – 80 с.
2. Рахимьянов Х.М. Теоретические основы комбинирования высокоинтенсивных термических и деформационных процессов в поверхностной обработке: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Тула, 1998. – 35 с.
3. Лопухов Ю.И., Лахина М.А. Ультразвуковое поверхностное пластическое упрочнение стали 14X17H2 // Технические науки – от теории к практике. – 2015. – № 45. – С. 51–59.

4. Рахимьянов Х.М., Семенова Ю.С. Прогнозирование геометрического состояния поверхности цилиндрических деталей из стали 45 при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2011. – № 3. – С. 11–17.

5. Гилета В.П., В.Б. Асанов, А.И. Безнедельный. Обработка шеек коленвалов ультразвуковым инструментом // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. – Брянск: БГИТА, 2007. – Вып. 7. – С. 8–12.

THE CHOICE OF METHOD OF FINISHING PROCESSING TO IMPROVE THE FATIGUE STRENGTH OF THE CAR ENGINE PARTS

Bychkov N.V., Master's Degree student, e-mail: buchon93@mail.ru

Gileta V.P., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: gileta.viktor@yandex.ru

Beznedelnyy A.I., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: beznedelnyy@corp.nstu.ru

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

Abstract

The article provides an analysis of the engine parts working in fatigue under cyclic loads. It is revealed that the main part of the engine working on cyclic fatigue is the rod that takes the force from the gases at a working course from the piston pin and passes it to the crank of the crankshaft and moves the piston when performing intermediate processes (cycles). The analysis of methods of increasing the fatigue strength of the connecting rod of the vehicle conducted. It is revealed that the method of surface plastic deformation is more streamlined and has several advantages in comparison with other methods. The method of increasing the fatigue strength in the ultrasonic container selected. Paper discuss the algorithm of processing in an ultrasonic container steel balls, describes the adaptations made by means of hardening of the connecting rod of the vehicle. Profilograms of samples before processing and after are presented. It is found that after processing in an ultrasonic container work parts which have residual stress of compression, increased microhardness and low roughness, prevents the nucleation of fatigue fissure.

Keywords

production rods, treatments, endurance failure, surface plastic deformation, rational choice, roughness, ultrasound

УДК 621.7.011

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ
ФРИКЦИОННО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА****В.Р. ЭДИГАРОВ, канд. техн. наук, доцент
(ОАБИИ, г. Омск)****Эдигаров В.Р.** – 644098, г. Омск, 14 военный городок,
Омский автобронетанковый инженерный институт,
e-mail: edigarovs@mail.ru

В работе теоретически исследована зона фрикционно-электрического контакта инструмента и обрабатываемой поверхности детали при фрикционно-электрическом модифицировании, предложены математические зависимости для расчета температуры определяемой суммарным воздействием механической и электрической энергий в зоне обработки. Произведены расчеты, представлены зависимости расчетных значений температуры в микрообъеме обрабатываемого поверхностного слоя детали от технологических режимов ФЭМ.

Ключевые слова: электро-механическая обработка, фрикционно-электрическое модифицирование, структурно-фазовые превращения, поверхностный слой.

Введение

Согласно современным научным представлениям, прочностные и эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени определяются качеством поверхностного слоя.

В связи с этим большое значение в проблеме качества поверхности в настоящее время приобретает изыскание и непрерывное совершенствование технологий поверхностного упрочнения деталей.

К одному из перспективных методов отделочно-упрочняющей обработки следует отнести электромеханический способ обработки (ЭМО) [1].

Для методов обработки металлов резанием характерна нестабильность упрочняющего эффекта и возможность появления в поверхностном слое преимущественно остаточных напряжений растяжения.

Более эффективным упрочнением обладают методы обработки поверхностным пластическим деформированием, использование которых вполне надежно обеспечивает получение благоприятных остаточных напряжений сжатия.

Выдвигаемое же практикой требование дальнейшего повышения упрочняющего эффекта создает необходимость изыскания комбинированных видов воздействия, приводящих к более значительным структурным изменениям.

Перспективным является способ электромеханической обработки, и его разновидности, который заключается в деформировании поверхностного слоя с одновременным его нагревом электрическим током, проходящим через зону контакта инструмента с деталью.

Теория

Одной из разновидностей ЭМО используемой для повышения износостойкости узлов трения машин является комбинированная фрикционно-электрическая обработка – фрикционно-электрическое модифицирование (ФЭМ) [2], включающая высокоэнергетическое воздействие через промежуточную среду - модификатор, на исходную структуру поверхностного слоя. В качестве модификатора используются смеси порошков различных твердых смазок - дисперсные порошки, например, скрытокристаллического графита (СКГ), дисульфида молибдена, меди, оловянисто-свинцовой бронзы и другие, а также их смеси в различных пропорциях с поверхностно-активным веществом.

Тепловые явления, происходящие при ФЭМ, связаны с выделением теплоты вследствие прохождения электрического тока, трения инструмента об обрабатываемую деталь, деформированием металла в поверхностном слое, теплообменом между инструментом и обрабатываемой поверхностью, теплопередачей в окружающую среду и внутрь металла. Наибольшее значение имеют теплота, выделяемая при прохождении электрического тока через зону контакта детали и инструмента, а также обусловленная трением инструмента об обрабатываемую деталь. Эти два потока теплоты создают в материале микрообъемы с температурой, которая существенно влияет на упругопластические свойства материала в данном объеме, температура нагрева контактной зоны детали может превосходить критическую точку A_1 , вызывая фазовые превращения, температура завершения которых смещается вверх по температурной шкале тем выше, чем выше скорость электроконтактного нагрева. Поэтому для случая нагрева до температур подкритического интервала упрочнение может быть достигнуто за счет холодного, полугорячего или горячего наклепа. При нагреве же до температур фазовых превращений и последующей высокой скорости охлаждения, определяемой интенсивностью отвода тепла от тонкого поверхностного слоя в тело детали, к структурным изменениям, происходящим при пластической деформации, добавляются структурные изменения, вызванные фазовыми превращениями. Естественно, что оба фактора влияют на упрочнение, которое в последнем случае напоминает высокотемпературную термомеханическую поверхностную обработку. Наличие модификатора, в обоих случаях, оказывает неоднозначное влияние на технологический процесс упрочнения, однако вызывает характерные изменения в поверхностном слое способствующие повышению триботехнических характеристик.

На взаимосвязь температуры и скорости нагрева при фазовых превращениях указывают авторы работы [3]. От скорости нагрева зависит содержание углерода в закаленной структуре. Так, при закалке стали 40 при скоростях нагрева 50, 130 и 230°C/с массовая доля углерода в мартенсите составляет соответственно 1,45; 1,6 и 1,67%. При ФЭМ скорость нагрева и охлаждения значительно превышает 400°C/с, что способствует неполному аустенитному превращению, но в то же время под действием высоких давлений структура поверхностного слоя настолько измельчается, что превращение происходит даже при высоких скоростях. Наличие давления в процессе обработки замедляет развитие мартенситных игл в аустенитном зерне и приводит к получению мелкодисперсной структуры [4].

Рассматривая влияние давления при ФЭМ, следует учитывать, что основное тепловое воздействие на поверхностный слой обусловлено прохождением электрического тока. Увеличение давления понижает сопротивление контакта, соответственно уменьшая электрическую мощность и глубину упрочнения. Можно предположить, что отрицательное действие давления будет оказывать в случае, когда сила тока имеет большое значение, что характерно для упрочняющих режимов. Если сила тока имеет малое значение, то высокое давление может привести к повышению температуры у самой поверхности в связи с увеличением теплоты, выделяемой при трении, что способствует полноте фазового превращения и повышению механических свойств стали.

Результаты и обсуждение

В настоящее время большинство исследователей используют положение о независимости предела текучести обрабатываемого материала от температуры и скорости деформации. Однако в работе [5] установлено, что с увеличением температуры касательные напряжения в условиях плоского сдвига существенно уменьшаются, снижается действительный предел прочности на сдвиг.

Существенное влияние на процесс теплообразования при ФЭМ оказывает размер области взаимодействия детали и инструмента. Для оценки области пластического деформирования необходимо определить ее длину и высоту.

Принимая глубину поверхностного слоя, подвергшегося пластическому деформированию, равной половине высоты неровностей, найдем длину L_d области деформации в основной плоскости из геометрических соотношений (рис. 1) [6]:

$$L_d = r \arccos\left(1 - \frac{R_z}{2r}\right) \tag{1}$$

Высота области пластической деформации определяется соотношением:

$$h_n = \rho \sin \eta = \rho \sqrt{1 - \frac{\rho - R_z/2}{\rho}} = \sqrt{\rho R_z + (R_z/2)^2} \approx \sqrt{\rho R_z} \tag{2}$$

Температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности при ФЭМ определяется суммарным воздействием механической и электрической энергий:

$$T = T_{П1} + T_э \tag{3}$$

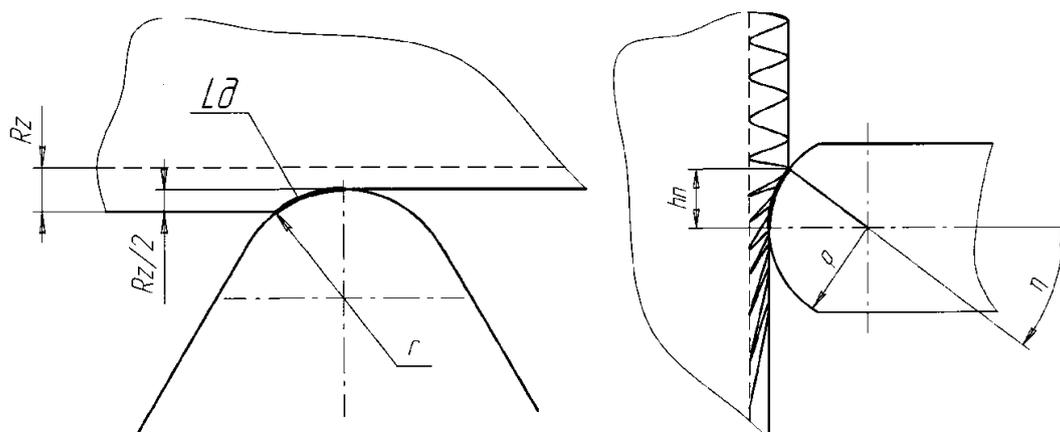


Рис. 1. Схема пластического деформирования поверхностного слоя в основной плоскости

Произведя подстановку и преобразования, получаем:

$$T = 1,13qA_1 \sqrt{\frac{V \sqrt{\rho Rz}}{\omega}} T_{пл} \left[1 + \frac{\eta IU}{qS_b \sqrt{\rho Rz} L_d V} \right] \quad (4)$$

где, I – сила тока при ФЭМ; U – напряжение; V – скорость обработки; q – безразмерный параметр - отношение предела текучести обрабатываемого материала на сдвиг к действительному пределу прочности S_b ; ω - температуропроводность обрабатываемого материала; S_b – действительный предел прочности, $T_{пл}$ – гомологическая температура плавления

На рис. 2 приведены результаты расчета температуры в зоне фрикционно-электрического контакта в зависимости от силы тока и скорости обработки, как технологических факторов оказывающих максимальное влияние на процесс упрочнения [7]. Температура структурно-фазовых превращений может быть достигнута на следующих режимах: скорости обработки $V= 2,5$ м/мин и силе тока $I=350$ А, однако она не должна превышать 1000 C^0 по условию стойкости твердосплавного инструмента (в нашем случае пластина из твердого сплава Т15К6).

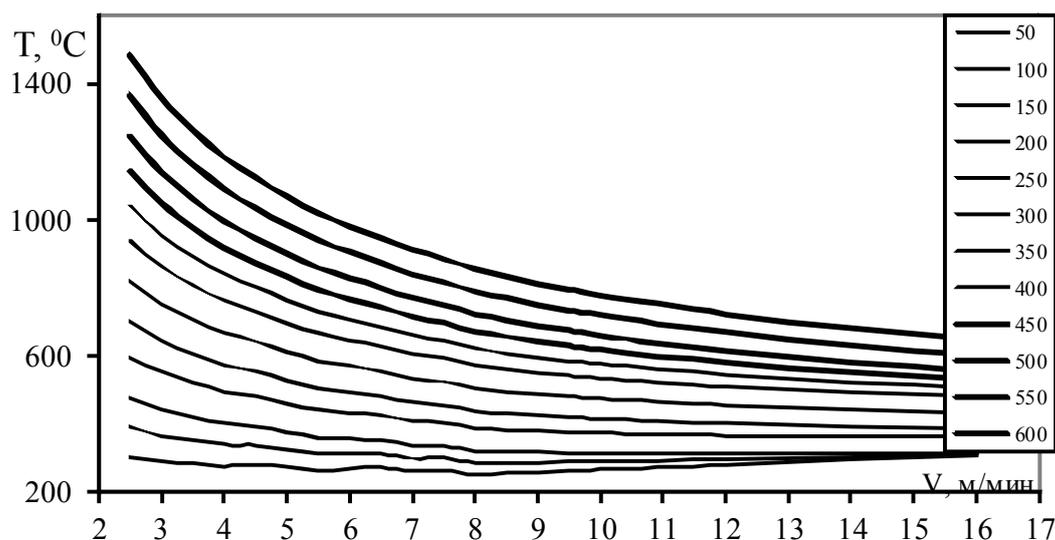


Рис. 2. Зависимость температуры обработки от скорости обработки при различных значениях силы тока (от 50А до 600А)

На рисунке 3 представлена зависимость расчетных значений температуры в микрообъеме обрабатываемого поверхностного слоя от режимов ФЭМ.

Рассчитав температуру в зоне деформации и определив свойства материала при этой температуре, можно определить минимальное усилие пластической деформации.

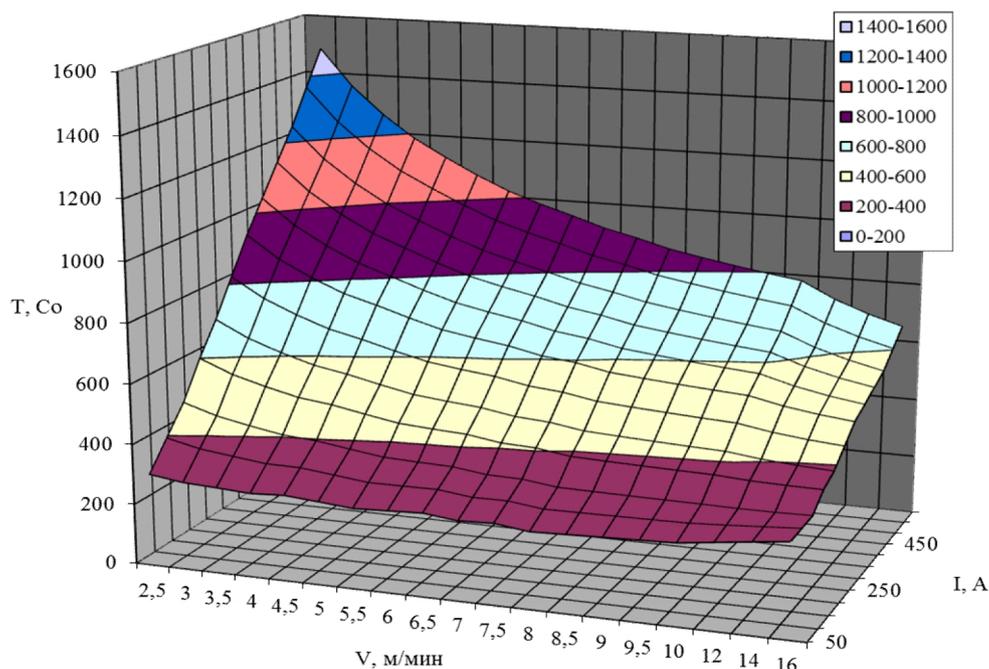


Рис. 3. Зависимость расчетных значений температуры в микрообъеме обрабатываемого поверхностного слоя от режимов ФЭМ

Выводы

Таким образом, предлагаемые зависимости и соотношения позволяют теоретически определить значения основных параметров процесса ФЭМ с учетом механических свойств обрабатываемого материала и геометрии инструмента и установить область изменения этих параметров при экспериментальном исследовании ФЭМ.

Список литературы

1. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
2. Комбинированное фрикционно-электрическое модифицирование стальных поверхностей трения / Ю.К. Машков, В.Р. Эдигаров, З.Н. Овчар, М.Ю. Байбарацкая // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 1. – С. 89–92.
3. Бернштейн М.А., Займовский В.А., Капуткина Л.М. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
4. Эдигаров В.Р., Килунин И.Ю. Рентгенографическое исследование стали 38ХС, подвергнутой фрикционно-электрическому модифицированию // Металлообработка. – 2011. – № 4 (64). – С. 23–29.
5. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: термодинамический подход к системе взаимосвязей при резании. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.
6. Эдигаров В.Р., Дегтярь В.В., Малый В.В. Математическая модель температурных параметров при фрикционно-электрическом модифицировании // Омский научный вестник. – 2013. – № 2 (120). – С. 161–165.
7. Машков Ю.К., Эдигаров В.Р., Макаренко Н.Г. Исследование поверхностного слоя стали модифицированного фрикционно-электрическим методом // Технология металлов. – 2007. – № 3. – С. 28–32.

**PROBE OF TEMPERATURE FIELDS IN THE WORKING ZONE OF THE FRICTIONAL
ELECTRIC CONTACT**

Edigarov V. R., Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, e-mail: edigarovs@mail.ru

Omsk Tank Automotive Engineering Institute, 14 Military Town, Omsk, 644098, Russian Federation

Abstract

In work the zone of a frictional electric contact of the tool and the processed detail surface at frictional and electric modifying is theoretically investigated, mathematical dependences for calculation of temperature determined by total influence of mechanical and electric energy in a processing zone are offered. Calculations are made, dependences of calculated values of temperature in the microvolume of the processed detail blanket from the FEM technological modes are presented.

Keywords

Electromechanical processing, frictional and electric modifying, structural and phase transformations, blanket

УДК 621.9

**ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА
ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ СТЕКЛОТЕКСТОЛИТОВ**

*Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент
В.Ю. ПОПОВ, канд. техн. наук, доцент
(БрГУ, г. Братск)*

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

Механическая обработка изделий из стеклотекстолитов производится для придания им формы и размеров, однако при этом происходит интенсивный износ режущего инструмента, выделение мелкодисперсной стружки и появление поверхностных дефектов. Для выяснения характера изнашивания режущего инструмента при фрезеровании полимерных стеклотекстолитовых материалов проведено лабораторное исследование с разной скоростью резания. По результатам испытаний получены кривые износа режущей кромки по задней поверхности, позволившие установить резкое падение работоспособности инструмента при увеличении скорости резания. Показано, что период приработки режущего инструмента характеризуется его интенсивным износом и при варьировании скорости резания составляет не более 8 минут. Поэтому при назначении режимов резания следует руководствоваться рациональным сочетанием работоспособности режущего инструмента, качества обработанной поверхности и производительности обработки.

Ключевые слова: стеклотекстолит, скорость резания, фрезерование, период стойкости.

Введение

Изготовление деталей из полимерных композиционных материалов, упрочненных стеклянными волокнами или тканями, производится различными методами формования [1 – 7]. Окончательную форму и размеры изделия приобретают в результате механической обработки поверхностей. Одним из распространенных технологических процессов формования деталей из стеклонаполненных полимерных композитов является фрезерование плоских поверхностей. Этот процесс сопровождается интенсивным износом режущего инструмента, выделением стружки в виде мелкой пыли, появлением поверхностных дефектов в результате неправильного подбора режимов резания и другими явлениями [8 – 14].

В настоящей работе исследован процесс износа фрезерного инструмента при варьировании скорости резания стеклотекстолита. Это позволит оценить характер изнашивания режущей кромки при обработке полимерных упрочненных композитов и разработать рекомендации по рациональным параметрам резания.

Методика экспериментального исследования

Для определения интенсивности износа режущего инструмента при обработке стеклотекстолита нами проведены лабораторные испытания для оценки параметров эксперимента при дальнейших исследованиях. Для лабораторного испытания выбрана фреза, позволяющая обрабатывать плоскую поверхность на заготовке из листового стеклотекстолита толщиной

10 мм. Режущая часть фрезы выполнена из твердого сплава марки ВК6ОМ с передним углом $\gamma = 25^\circ$ и задним углом $\alpha = 10^\circ$. Марка твердого сплава выбрана с учетом известных данных по резанию композиционных материалов, анализ которых позволил установить, что режущая часть в этом случае должна обладать высокой прочностью и твердостью [1, 4, 10, 15]. Геометрические параметры выбраны на основе ранее проведенных исследований по резанию композиционных полимерных материалов [16 – 18]. Стоит отметить, что формирование геометрии у такого режущего инструмента с углом заострения лезвия $\beta = 55^\circ$ связано с определенными сложностями получения низкой шероховатости на передней и задней поверхностях и минимизацией дефектов на главной режущей кромке. Для повышения качества затачивания применялся метод электроалмазного шлифования, позволяющий обрабатывать высокопрочные материалы с высокой производительностью [19 – 25].

Обработка стеклотекстолита проводилась с глубиной резания $t = 0,5$ мм, подачей на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб и скоростью резания, изменяющейся от 19,2 м/с до 51,5 м/с.

Модель образования стружки при фрезеровании стеклотекстолита

В процессе резания стеклотекстолита отделяется стружка в виде мелкодисперсных частиц, которая разлетается на большие расстояния от зоны обработки. В связи с этим станок для фрезерования стеклотекстолита был дооборудован системой местной вытяжной вентиляции и применялись защитные респираторные маски.

Предполагаемая модель образования стружки при фрезеровании стеклотекстолита (рис. 1) основана на гипотезе формирования нескольких зон: зоны деформации обрабатываемого материала, где происходит сжатие и сдвиг слоев под воздействием силы резания; зоны дробления обрабатываемого материала, где происходит разрушение слоев в результате их взаимодействия с передней поверхностью режущего лезвия; зоны образования мелкодисперсных частиц, где материал продолжает разрушаться, превращаясь в пыль.

Результаты и обсуждение

Характер износа режущего инструмента при обработке стеклотекстолита можно оценить по кривым износа, полученным в результате лабораторного испытания (рис. 2). Оценку износостойкости режущего инструмента проводили по критерию величины фаски износа по задней поверхности $h_3 = 0,3$ мм. Этот параметр является определяющим при обработке композиционных материалов на полимерной основе. Увеличение величины износа приводит к неудовлетворительному качеству поверхности, росту температуры в зоне резания, появлению прижогов на поверхности и значительным вибрациям оборудования.

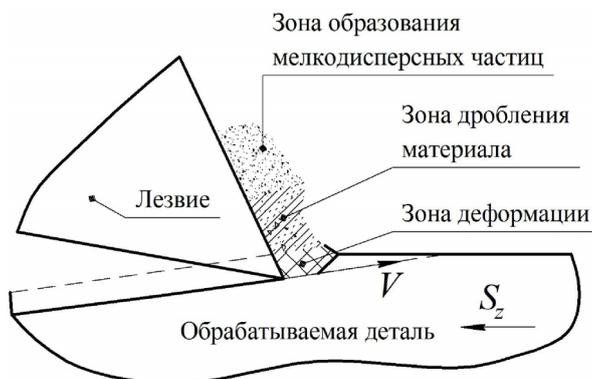


Рис. 1. Предполагаемая модель образования стружки

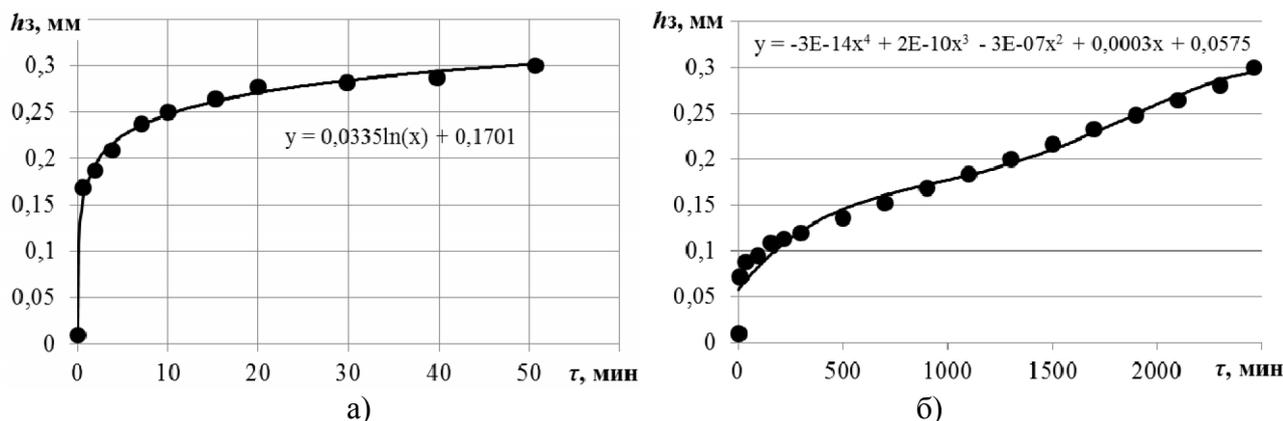


Рис. 2. Кривые износа режущего инструмента в зависимости от времени обработки:
а) при $V = 51,5$ м/с; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $t = 0,5$ мм;
б) при $V = 19,2$ м/с; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $t = 0,5$ мм

По результатам исследования при фрезеровании стеклотекстолита характерно резкое увеличение фаски износа от околонулевого значения до определенной величины, различной при разных условиях. При высокой скорости резания ($V = 51,5$ м/с) этот период приработки режущего инструмента наступает при $h_3 = 0,22$ мм и $\tau = 5$ мин (рис. 2, а). При низкой скорости резания ($V = 19,2$ м/с) период приработки составляет около 8 минут с фаской износа по задней поверхности $h_3 = 0,07$ мм (рис. 2, б).

Изменение скорости резания оказывает значительное влияние на период стойкости режущего инструмента. С уменьшением скорости резания период стойкости имеет тенденцию к резкому росту. В настоящем исследовании стойкость режущего инструмента увеличивается от 50 до 2460 минут при уменьшении скорости от 51,5 до 19,2 м/с и имеет степенную зависимость (рис. 3).

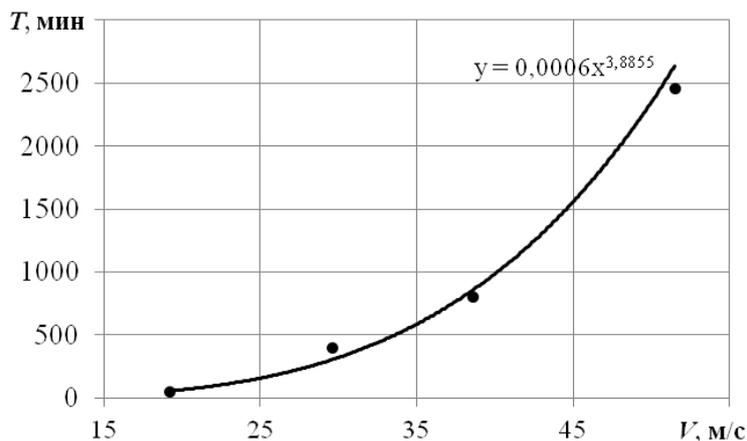


Рис. 3. Зависимость периода стойкости режущего инструмента от скорости резания

Выводы

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Конструкция фрезерного инструмента должна предполагать высокую прочность, твердость и износостойкость режущей части. Ее геометрию рекомендуется формировать с увеличенными углами резания для обеспечения качества обработанной поверхности.

2. При формировании режущей части инструмента возникают проблемы с качеством образованных поверхностей и образованием дефектов на режущей кромке. Заточивание режущего инструмента рекомендуется проводить электроалмазным способом с одновременной электрохимической правкой шлифовального круга на металлической связке и травлением обрабатываемой поверхности.

3. При фрезеровании композиционных полимерных материалов характерен износ режущего инструмента по задней поверхности с образованием фаски. С увеличением скорости резания интенсивность роста фаски износа существенно возрастает, поэтому при назначении режимов резания следует руководствоваться рациональным сочетанием работоспособности режущего инструмента, качества обработанной поверхности и производительности обработки.

Список литературы

1. Мордвин М.А., Якимов С.В., Баклушин С.М. Рекомендации по механической обработке композиционных материалов // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 2. – С. 26–29.

2. Grigoriev S.N., Krasnovskii A.N., Kvachev K.V. Investigation of impregnation fibrous materials in pultrusion process of polymer composite materials // International Polymer Science and Technology. – 2014. – Vol. 41, iss. 7. – P. 59–62.

3. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2014. – № 7 (37). – С. 3–8.

4. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, С.А. Катаева // Инновации в машиностроении (ИнМаш-2015): VII Международная научно-практическая конференция: сборник трудов / Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева и др.; под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2015. – С. 99–104.

5. Matthews F.L., Rawlings R.D. Composite materials: engineering and science. – Oxford, England: The Alden Press, 1999. – 470 p.

6. Graded polymer composites using twin-screw extrusion: a combinatorial approach to developing new energetic materials / F.M. Gallant, H.A. Bruck, S.E. Prickett, M. Cesarec // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2006. – N 6. – P. 957–969.

7. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites / V. Dhand, G. Mittal, K.Y. Rhee, S.-J. Park, D. Hui // Composites Part B: Engineering. – 2015. – N 73. – P. 166–180.

8. Matis I.G. Methods and means of inspecting the quality of composite materials // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 1991. – N 4. – P. 277–285.

9. Composite materials based on wastes of flat glass processing / A.V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, G.Yu. Gashnikova, L.P. Nikulina, S.E. Artemenko // Waste Management. – 2005. – N 7. – P. 733–736.

10. Рычков Д.А. Определение периода стойкости режущего инструмента при фрезеровании стеклотекстолита // Потенциал современной науки. – 2014. – № 2. – С. 48–52.

11. Bakulin V.N., Larin A.A., Reznichenkod V.I. Improving the quality of manufacture of polymer-composite products using computed tomography as a nondestructive-testing method // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2015. – N 2. – P. 556–560.

12. Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В. Качество поверхности композиционного материала стеклотекстолит после фрезерования // Инновационные технологии и экономика в машиностроении. – 2014. – С. 343–347.

13. *Fomin V.N., Malyukova E.B., Berlin A.A.* Criteria for optimization of processing and fabrication of polymer composite materials // *Doklady Chemistry*. – 2004. – N 4–6. – P. 39–41.
14. *Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V.* Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 942–947.
15. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А.* Технологические методы изготовления и выбора режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов на полимерной основе // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение*. – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 35–46.
16. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Н.П. Петров // *СТИН*. – 2010. – № 11. – С. 2–4.
17. *Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Ковалевский С.В.* Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // *Системы. Методы. Технологии*. – 2009. – № 1. – С. 95–98.
18. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами / Д.А. Рычков, В.А. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // *Системы. Методы. Технологии*. – 2014. – № 2 (22). – С. 42–46.
19. *Гордон М.Б., Янюшкин А.С.* Высокоэффективная электрохимическая обработка твердых сплавов в режиме самозатачивания алмазного круга и одновременного травления поверхности изделий // *Вестник машиностроения*. – 1984. – № 3. – С. 12–14.
20. *Янюшкин А.С., Архипов П.В.* Атомно-молекулярные процессы в зоне алмазного круга и обрабатываемого материала // *Технология металлов*. – 2010. – № 1. – С. 25–33.
21. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.А. Батаев, П.В. Архипов, О.И. Медведева // *Системы. Методы. Технологии*. – 2010. – № 7. – С. 87–91.
22. *Янюшкин А.С., Попов В.Ю.* Шероховатость поверхности после шлифования по методу двойного травления // *Объединенный научный журнал*. – 2002. – № 21. – С. 65–67.
23. Contact processes in grinding / A. Yanyushkin, D. Lobanov, P. Arkhipov, V. Ivancivsky // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – Vol. 788. – P. 17–21.
24. О механизме разрушения зерен алмаза в процессе электроалмазного шлифования / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, С.А. Якимов, П.В. Архипов // *Системы. Методы. Технологии*. – 2009. – № 1. – С. 34–36.
25. Перспективный метод обработки твердого сплава на плоскошлифовальном станке / А.С. Янюшкин, С.М. Кудряшов, Д.В. Сивков, Ю.Б. Лисафьев, П.В. Архипов // *Системы. Методы. Технологии*. – 2009. – № 4. – С. 71–74.

**THE WEAR RESISTANCE OF CARBIDE CUTTING TOOLS
BY VARYING THE SPEED OF CUTTING GLASS TEXTOLITE**

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

Popov V.Yu., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: berkutoff@rambler.ru

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

Abstract

Mechanical treatment of products made of glass-cloth to give them shapes and sizes, but it is an intensive wear of cutting tools, selection of the fine chips and the appearance of surface defects. To clarify the nature of the wear of the cutting tool during milling of glass-cloth of polymer materials laboratory study conducted at different cutting speeds. According to test results obtained curves of the wear of the cutting edge on a back surface, allowed to establish a sharp drop in tool performance with an increase in cutting speed. Studies show that during the running of the cutting tool is characterized by its intense wear and by varying the cutting speed is not more than 8 minutes. Therefore, the appointment of the cutting should be guided by a rational combination of performance cutting tools, surface quality and processing performance.

Keywords

glass fiber, cutting speed, cutting, durability period

УДК 678.073:621.735.073.001.6

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЕСС-ФОРМЫ ДЛЯ ТЕРМОПЛАСТАВТОМАТА

Л.Н. ПАВЛОВ, магистрант
О.Б. ШАМИНА, канд. техн. наук, доцент
(ТПУ, г. Томск)

Павлов Л.Н. – 634050, г. Томск, пр. Ленина 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: leguohep@gmail.com

Проектирование форм для литья является важнейшим этапом внедрения в производство изделий из термопластичных материалов. Форма для обработки термопластичных полимеров должна осуществлять отвод как можно большего количества тепла и одновременно обеспечивать требуемую производительность. Конфигурация изделия имеет внутренние полости, которые требуют от пресс-формы дополнительных формообразующих разъемных элементов, которые должны иметь необходимую жесткость на изгиб, что существенно усложняет процесс проектирования. Задача разработки и изготовления пресс-формы для изделий из термопластичных материалов решена с помощью прикладных *CAD / CAM* и пакета прикладных программ *LVMFlow*. Разработано несколько вариантов конструкции, в результате моделирования и натурных испытаний предложен оптимальный вариант элементов пресс-формы.

Ключевые слова: пресс-форма, проектирование, термопластичный материал, тепловой баланс, отливка, формообразование, *CAD / CAM*, *LVMFlow*.

Введение

Литьё под давлением является одним из наиболее экономичных и высокопроизводительных процессов литейного производства и находит все большее распространение в различных отраслях промышленности при крупносерийном и массовом производстве. Процесс обладает большими преимуществами перед другими способами получения высококачественных отливок повышенной точности и позволяет максимально приблизить размеры отливок к размерам готовых деталей [1].

Проектирование форм для литья – важнейший этап конструкторско-технологической подготовки и внедрения в производство изделий из термопластичных материалов [2, 3]. Качество литевых изделий в основном определяется конструкцией пресс-формы и её элементов, правильный выбор которых влияет не только на размеры и геометрическую форму готового изделия, но и на характер заполнения формы, направление потоков расплава в оформляющей полости, время охлаждения и уровень остаточных напряжений. Остаточные напряжения в свою очередь влияют на сохранение геометрической формы и размеров при длительном хранении и эксплуатации изделий [4-7].

В настоящее время на рынке предоставлен широкий спектр стандартных элементов пресс-форм разных габаритов и конфигурации [8], однако не всегда тот или иной элемент пресс-формы подходит для конкретного случая, поэтому зачастую требуется частичная доработка элементов конструкции либо полная переработка всей пресс-формы с последующим изготовлением.

Методика исследования

При конструировании пресс-формы необходимо учитывать условия теплообмена термопластов. Литьевая форма для обработки термопластичных полимеров должна обеспечить отвод как можно большего количества тепла [4, 9-12].

Тепловой поток, поступающий в форму (считается положительным), и тепловой поток, отводимый из формы (считается отрицательным), должны находиться в равновесии. Следовательно, можно составить уравнение теплового баланса [4]

$$\dot{Q}_{KS} + \dot{Q}_E + \dot{Q}_{AD} + \dot{Q}_C = 0$$

где \dot{Q}_E – теплообмен с внешней средой; \dot{Q}_{KS} – поток тепла из отливки; \dot{Q}_{AD} – добавочный тепловой поток (например, от горячих каналов), \dot{Q}_C – теплообмен с охлаждающей жидкостью. Зная размеры формы и температуру ее поверхности, можно вычислить теплообмен с внешней средой.

Тепловой баланс можно составить для отдельных деталей и узлов формы при условии, что теплопередача на границах элемента пренебрежимо мала или может быть представлена в виде добавочного потока. Если относительно крупные узлы формы для определения теплового потока делятся на меньшие элементы, то такой тепловой поток можно определить с помощью коэффициента теплового потока.

На рисунке 1 представлены детали, которые необходимо получить в соответствии с техническим заданием с помощью разрабатываемой конструкции пресс-формы.

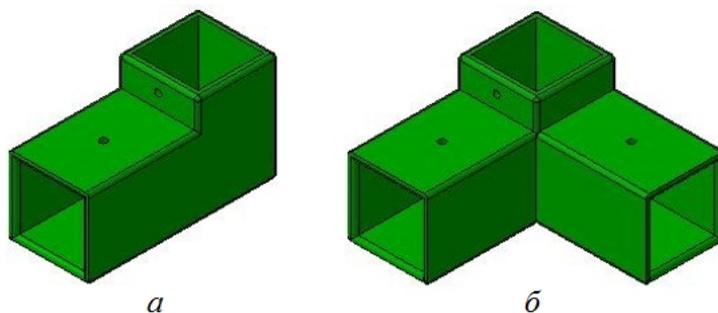


Рис. 1. Детали для изготовления: а – двойник; б – тройник

Конфигурация изделия имеет внутренние полости, которые требуют от пресс-формы дополнительных формообразующих разъемных элементов, подвижных в радиальном направлении [13]. Также необходимо обеспечить изготовление двух типоразмеров детали при помощи одной и той же конструкции пресс-формы. Для этого необходимо придать съемным формообразующим элементам необходимую жесткость на изгиб, что является сложной задачей при проектировании элементов пресс-формы, использующихся для литья под давлением [14].

Результаты и обсуждение

Для получения внутренних отверстий были разработаны разъемные подвижные элементы (так называемый Большой Знак, далее БЗ), которые при смыкании частей пресс-формы выполняют формообразование внутренней полости изделия (рис. 2, положение 1), а

при размыкании позволяют свободно вытолкнуть изделия из гнёзд (рис. 2, положение 2). Все четыре элемента идентичны.

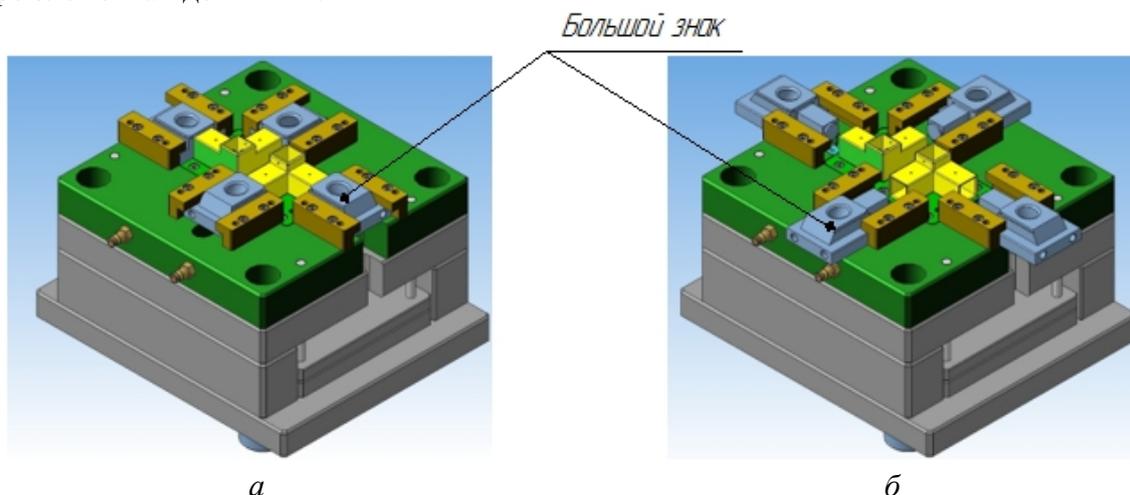


Рис. 2. Пресс-форма: а - положение 1; б - положение 2

При проектировании формообразующей полости пресс-формы установлено, что пространство, занимаемое изделием, позволяет внести в конструкцию дополнительную полость (гнездо) для еще одного изделия (рис. 3). В результате фактическая производительность пресс-формы повышается в два раза.

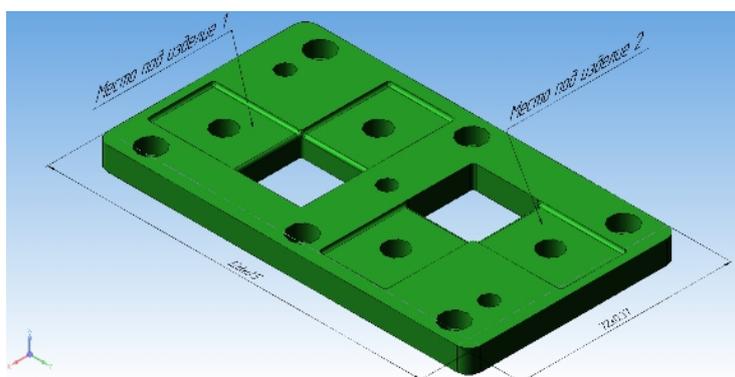


Рис. 3. Формообразующая матрица

При разработке пресс-формы необходимо учитывать тепловой баланс рабочих элементов и расплавленного материала для получения необходимой жидкотекучести расплава в процессе заполнения формообразующей полости (гнезда). В результате моделирования процесса заполнения формы с помощью пакета прикладных программ LVMFlow [15, 16] были получены условия достижения равномерной плотности и низкого уровня остаточных напряжений. Поскольку подвижный формообразующий элемент БЗ воспринимает от изделия наибольшее температурное воздействие, принято решение о создании специальных каналов для протекания охлаждающей жидкости [17].

С помощью САД системы Компас 3D [18] было разработано несколько вариантов как разъёмных, так и неразъёмных конструкции БЗ (рис. 4, 6). В результате моделирования [19] и натурных испытаний разъёмных конструкций, соединяемых с помощью сварного шва (рис. 4, 5), получено, что после обработки пресс-формой нескольких тысяч циклов сварной шов не

выдержал температурных колебаний и воздействия давления при впрыске, что привело к поломке БЗ. На рис. 6 представлена окончательная версия неразъёмной конструкции БЗ.

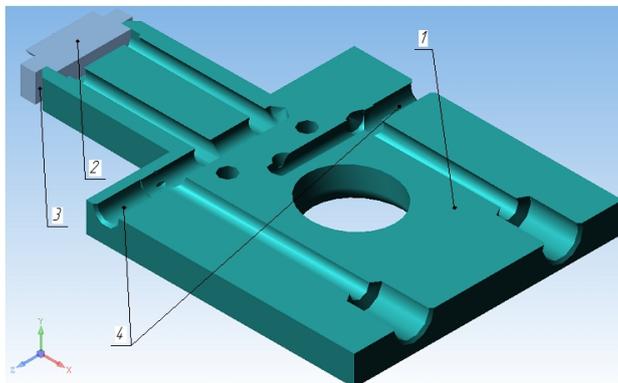


Рис. 4. Разъёмная конструкция БЗ с каналами для охлаждающей жидкости: 1 – знак большой; 2 – заглушка знака большой; 3 – место под сварку; 4 – технологические отверстия



Рис. 5. Разъёмная конструкция БЗ. Подвижные элементы конструкции перед сваркой

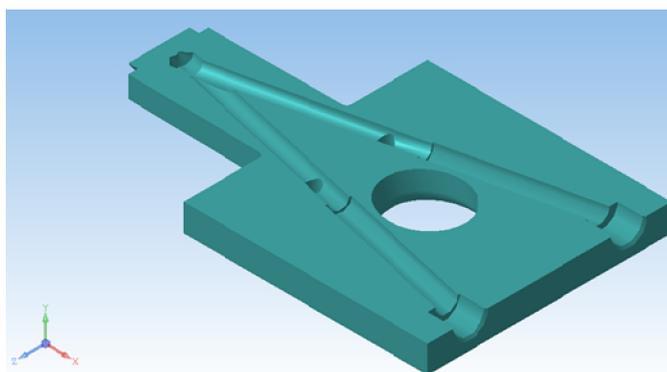


Рис. 6. БЗ в сечении, окончательная версия (показаны каналы для охлаждающей жидкости)

Выводы

Использование прикладных CAD / CAM программ позволило существенно упростить процесс проектирования и изготовления пресс-формы. Система автоматизированного проектирования CAD обеспечивает геометрическое моделирование и визуализацию изделий или их деталей в двух или трех измерениях. В результате использования современной CAD-системы осуществлено моделирование объемной конструкции пресс-формы; изготовлены и оформлены чертежи; получена текстовая конструкторская документация; заполнены технологические карты. Средства CAM позволили сократить время для написания управляющих программ для пятикоординатного фрезерного станка с ЧПУ DMU 50 при изготовлении и доработке элементов пресс-формы. В свою очередь с помощью программы LVMFlow были построены модели заполнения формы и выбраны оптимальные режимы получения деталей из термопластичного материала.

Список литературы

1. Кузьмич В.Н., Мойсейчик Д.А. Разработка технологии изготовления отливки литьем под давлением // Литье и металлургия. – 2012. – № 3. – С. 237–241.
2. Литье под давлением / М.Б. Беккер, М.Л. Заславский, Ю.Ф. Игнатенко и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
3. Ложечко Ю.П. Литье под давлением термопластов. – СПб.: Профессия, 2010. – 244 с.
4. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как делать литьевые формы / пер. с англ. 3-го изд. под ред. В.Г. Дувидзона и Э.Л. Калининцева. – СПб.: Профессия, 2007. – С. 302–306.
5. Производство полимерных материалов: учебное пособие / В.К. Крыжановский, И.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко. – СПб.: Профессия, 2004. – 464 с.
6. Computational modeling of temperature, flow, and crystallization of mold slag during double hot thermocouple technique experiments / L.W. Zhou, W. Wang, R. Liu, B. Thomas // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2013. – Vol. 44, N 5. – P. 1264–1279.
7. Фетисова Т.С. Проектирование литьевых форм для изготовления пластмассовых изделий: учебное пособие. – Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. – 102 с.
8. Калининцев Э., Саковцева М., Калининцев С. Современная организация литьевых производств // Пластикс. – 2014. – № 9. – С. 24–30.
9. Ludwig A., Kharicha A., Wu M. Modeling of multiscale and multiphase phenomena in materials processing // Metallurgical and materials transactions B. – 2014. – Vol. 45, N 1. – P. 36–43.
10. Modeling of the thermal contact resistance time evolution at polymer–mold interface during injection molding: effect of polymers' solidification / S.C. Somé et al. // Applied Thermal Engineering. – 2015. – Т. 84. – С. 150–157.
11. Yin Y.F. Modeling and analysis of process parameters for plastic injection molding of base-cover // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 602. – P. 1930–1933.
12. Three-dimensional numerical modeling of RTM and LRTM processes / L.A. Isoldi et al. // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2012. – Vol. 34, N 2. – P. 105–111.
13. Пантелеев А.П., Шевцов Ю.М., Горячев И.А. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. – М.: Машиностроение, 1986 – 399 с.
14. Казмер Д.О. Разработка и конструирование литьевых форм / пер. с англ. под ред. В.Г. Дувидзона. – СПб.: Профессия, 2011. – 464 с.
15. LVMFlow 2.92r12. Тексты справки. – ЗАО НПО МКМ, 2005.
16. Комарь С.А. Разработка технологии изготовления литейной формы с помощью специализированных САПР: дис. ... магистра техники и технологии. – Томск, 2016.
17. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: учебник для вузов. – М.: Химия, 1991. – 352 с.
18. Компас-3D. CAD [Электронный ресурс]. – URL: <http://kompas.ru/> (дата обращения: 01.02.2017).
19. A CAD/CAE-integrated injection mold design system for plastic products / I. Matin et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing plastic products Technology. – 2012. – Vol. 63, N 5–8. – P. 595–607.

TOOL'S MODELING FOR THERMOPLASTICS DURING INJECTION MOLDING

Pavlov L.N., Graduate students, e-mail: lerohep@gmail.com

Shamina O.B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: shob@tpu.ru

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

Abstract

Tool's modeling during injection molding is the most important stage of thermoplastics implementation in production. The model for plastic products machining has to dissipate a heat and simultaneously to provide production output that required. In accordance with the demands, the product's shape has inner hollows. It is necessary to create additional elements to form the appropriate tool. Elements have to provide rigidity for bending or flexural stiffness. This demand complicates considerably the tool's modeling and increases the cost of their practical realization. CAD / CAM and LVMFlow help to solve his task. Several design options were created with using of CAD / CAM systems. Modeling of the injection molding processes with LVMFlow allowed the most appropriated tool's forms finding. Comparative in-place tests gave the possibility to find the optimal variant for design of tool's elements for injection molding from thermoplastics. This design of tool's elements allows reaching necessary operational characteristics.

Keywords

Tool's modeling, injection molding, design, thermoplastics, heat balance, CAD / CAM systems, LVMFlow

УДК 621.91.04

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ
ПРОФИЛИРОВАНИЯ НЕКРУГЛЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Ф. И. ПАНТЕЛЕЕНКО, доктор техн. наук, профессор
А.А. ДАНИЛОВ, аспирант
(БНТУ, г. Минск)

Пантелеенко Ф. И. – 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65,
Белорусский национальный технический университет,
e-mail: panteleyenkofit@tut.by

На основе теории формообразования поверхностей выполнен системный анализ схем профилирования некруглых поверхностей методами следа, касания и обката. Для них определена структура исполнительного движения и дана оценка выполнимости существенных признаков, характеризующих процесс профилирования по производительности, точности, сложности реализации. Рассмотрен метод синтеза рациональной кинематики формообразования профильных поверхностей, основанный на частичном переносе ее функции на режущий инструмент. Такой подход позволил установить эффективные схемы профилирования некруглых поверхностей дисковыми и цилиндрическими фрезами, резцовыми головками внешнего и внутреннего касания, круглыми и некруглыми резцами, что важно для реализации соответствующих способов обработки некруглых поверхностей на универсальных станках и для проектирования специализированных станков.

Ключевые слова: некруглые поверхности, схемы профилирования, анализ, синтез.

Введение

Профильные моментопередающие соединения (ПМС) по сравнению с традиционными шлицевыми обладают более высокой усталостной прочностью, износостойкостью, пониженным уровнем шума и другими эксплуатационными преимуществами при меньшей себестоимости изготовления [1, 2]. Однако в отечественном машиностроении ПМС применяются редко, что обуславливает актуальность решения задач научного и конструкторско-технологического обеспечения их производства, создания соответствующего специализированного оборудования и эффективных технологий обработки некруглых поверхностей (НП) деталей ПМС, реализующих прогрессивные методы их формообразования. В этой связи, учитывая многообразие формы [2-7] и известных методов формообразования НП [7-17], актуальным является обоснованный выбор из известных или синтез рациональных методов профилирования с точки зрения простоты реализации, управляемости формообразованием [18] для обеспечения макро- и микрогеометрии НП [19], что важно для проектирования технологий, специализированного станочного оборудования и режущих инструментов.

Решение этой задачи обуславливает необходимость системного анализа и исследований методов формообразующей обработки НП на базе теорий формообразования поверхностей и резания, научных основ синтеза схем обработки и проектирования технологического оборудования [16, 20-22] с учетом геометрии моментопередающих поверхностей [2-8].

Методика исследования

Независимо от геометрии НП рассматривается как кинематическая, формируемая относительным перемещением ее производящих линий (ПЛ) – образующей и направляющей,

что соответствует определенным схемам механической и физико-технической обработки НП. При этом, согласно теории формообразования поверхностей [16, 20, 21], каждая из ПЛ поверхности может быть образована базовыми методами копирования Kn , следа $Сл$, касания Kc , обката $Об$ [20] и комбинированными методами, например $(Kn+Сл)$, $(Об+Сл)$ и др. [16].

В качестве существенных для оценки методов профилирования НП приняты признаки, определяющие исполнение производящего элемента (ПЭ) инструмента и вид формообразования ПЛ (полное или частичное), характеризующие разрешающие возможности методов по точности и производительности формообразования, сложности их реализации и позволяющие на единой основе сравнивать известные и возможные методы формообразования НП.

Исходя из этих положений, проведен анализ возможных схем профилирования НП, из которых установлены рациональные.

Обсуждение результатов исследования

Профилирование НП методом копирования. Производящим элементом при методе копирования является линия, определяющая форму или режущей кромки (при обработке лезвийным инструментом), или образующей инструментальной поверхности (при обработке вращающимся инструментом). Благодаря единовременному взаимодействию ПЭ с номинальной поверхностью изделия метод копирования обеспечивает полное формообразование ПЛ и поэтому характеризуется высокой производительностью. Однако необходимость в специальном инструменте обуславливает неуниверсальность данного метода и ограничивает область его экономически обоснованного применения обработкой некруглых отверстий протяжками, а наружных НП – фасонными инструментами [11] при периодическом движении деления, что отрицательно влияет на производительность и точность формообразования.

Профилирование НП методом следа. Производящим элементом при методе следа являются или точка или множество точек, что соответствует обработке одним резцом или резцовой головкой. Так как исполнительное движение профилирования осуществляется со скоростью резания, то наличие в его структуре реверсивного движения ограничивает производительность и отрицательно влияет на точность обработки. В этой связи к рациональным следует отнести схемы, при которых движение профилирования образовано вращательными движениями, а ПЭ представляет множество точек. Этим требованиям соответствуют две практические схемы профилирования (рис. 1), реализуемые методом полигонального точения [17] резцовой головкой внешнего (рис. 1, а) или внутреннего (рис. 1, б) касания. Более высокую производительность и лучшие условия резания обеспечивает схема обработки охватывающей резцовой головкой (схема б) [23].

Благодаря универсальности, возможности обработки на одном станке как наружных, так и внутренних НП, непрерывности процесса обработки практическое применение получила также схема профилирования, основанная на сообщении ПЭ согласованных вращательного B_1 и осциллирующего O_2 движений (рис. 1, в), реализуемая на станках для профильного точения, на токарно-затыловочных и др. станках. Ее недостатком является относительно низкая производительность из-за возвратно-поступательного движения инструмента.

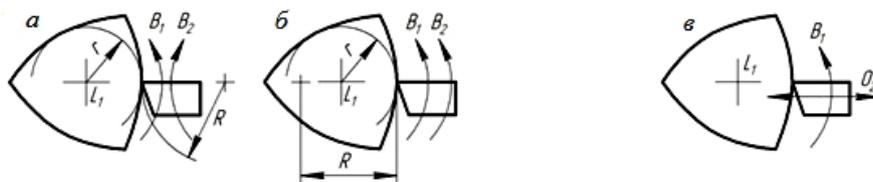


Рис. 1. Рациональные схемы профилирования НП методом следа при полигональном (а, б) и некруглом точении (в)

Профилирование НП методом касания. Движения профилирования методом касания различаются количеством и типом элементарных движений. Из множества возможных заслуживают внимания, как более простые в реализации, схемы профилирования, представленные на рис. 2.

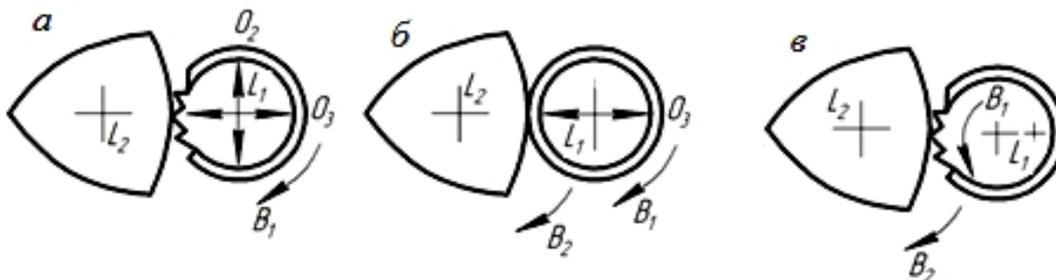


Рис. 2. Схемы профилирования некруглых поверхностей методом касания

Схема *a* применяется на фрезерных станках с ЧПУ [10], а схема *б* – на шлифовальных станках с копировальной или числовой системой управления. Простой в реализации, благодаря совмещению движений профилирования и резания в одно движение $\Phi_{vs}(B_1B_2)$, является схема *в*, при которой профилирование НП осуществляется некруглой [15] или эксцентрично установленной круглой [16] дисковой фрезой. В обоих случаях упрощается формообразующая система станка и обеспечивается возможность обрабатывать НП на универсальных станках различного назначения.

Профилирование НП методом обката. Профиль НП формируется методом обката как огибающая множества вспомогательных производящих линий. На рис. 3 представлены некоторые схемы этого класса.

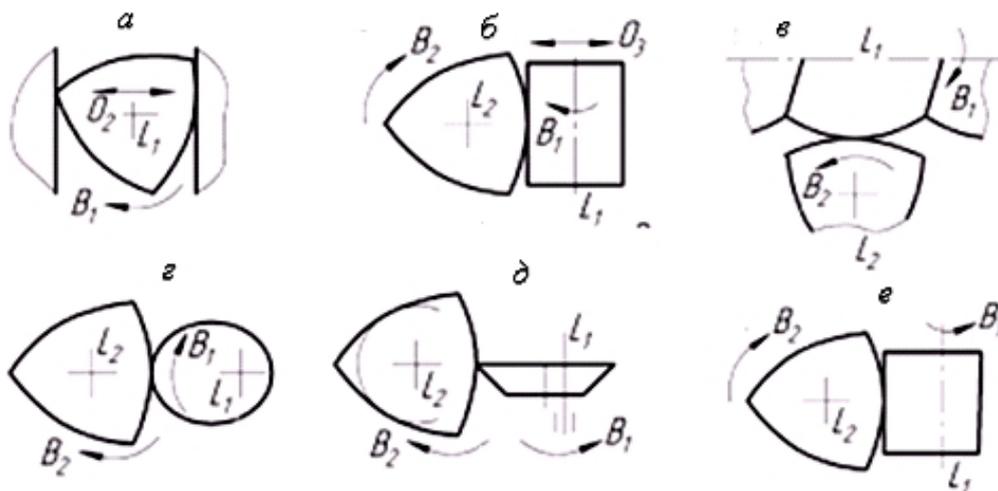


Рис. 3. Схемы профилирования методом обката при разделенных (*a, б*) и совмещенных (*в – д*) движениях профилирования и резания

Схема *a* целесообразна при профилировании НП равной ширины путем сообщения производящей плоскости относительно вращающейся заготовки осциллирующего движения O_2 . Схема *б* реализуется при обработке НП вращающимся цилиндрическим инструментом, осциллирующее движение O_3 которого функционально связано с вращением B_2 заготовки.

Характерным для схем *в-д* является совмещение движений профилирования и резания, что позволяет реализовывать их на универсальных станках. Обработка по схеме *в* осуществляется червячной фрезой [9], а по схеме *г* – специальным долбяком [14]. Формирование некруглого профиля по схеме *д* достигается некруглым или эксцентрично установлен-

ным круглым резцом [16]. Во втором случае упрощается реализация схемы обработки, при этом профиль поверхности не зависит от радиуса резца, что повышает точность формообразования. Профилирование НП по схеме *e* осуществляется некруглой или эксцентрично установленной круглой цилиндрической фрезой [16]. Схема *e*, представляющая модификацию схемы *b*, иллюстрирует метод синтеза рациональной кинематики формообразования НП, основанный на частичном перенесении ее функции на инструмент, что в данном случае реализуется при эксцентричной установке цилиндрической фрезы относительно оси L_1 ее вращения.

Выводы

1. Геометрия рабочих поверхностей ПМС допускает множество способов их обработки по схемам частичного и полного формообразования при профилировании методами копирования, следа, касания и обката.
2. Предложенная методика позволяет на единой основе выполнять системный анализ известных и возможных методов профилирования и разрабатывать прогрессивные способы обработки НП.
3. Установлены рациональные схемы частичного и полного профилирования НП, реализуемые методами некруглого, полигонального и ротационного точения, обработкой дисковыми и цилиндрическими фрезами. Предпочтительны схемы, основанные на совмещении движений профилирования и резания, что упрощает кинематику формообразования и позволяет обрабатывать НП на универсальных станках другого назначения.

Список литературы

1. Тимченко А.И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. – М., 1993. – 41 с.
2. Grossmann C. Fretting fatigue of shape optimised polygon-shaft-hub connections. – Berlin, 2007. – 156 p.
3. DIN 32711–79. Antriebsselemente Polygonprofile P3G. – Berlin: Beuth, 1979. – 3 p.
4. DIN 32712–79. Antriebsselemente Polygonprofile P4C. – Berlin: Beuth, 1979. – 3 p.
5. ОСТ 92-4742–86. Соединения профильные. Типы и размеры.
6. Синкевич В.М., Микитюк Е.П. Новый вид профильных соединений в узлах судовых механизмов // Вестник машиностроения. – 1990. – № 11. – С. 60–63.
7. Лакирев С.Г., Чиненов С.Г. Математическое моделирование и новые принципы формообразования некруглых поверхностей: в 2 ч. Ч. 1. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – 156 с.
8. Максимов С.П. Повышение эффективности формообразования профильных соединений на базе «треугольника Рело»: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Челябинск, 2005. – 184 с.
9. Волковский С.В. Повышение эффективности формообразования равноосноконтурных поверхностей посредством создания режущего инструмента, реализующего метод огибания: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Хабаровск, 2002. – 218 с.
10. Зенин Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – М., 2007. – 132 с.
11. Шитиков А.Н. Проектирование сборных фрез для обработки наружного РК-профиля: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2007. – 20 с.

12. *Ворона В.В.* Расчет оснастки и операции токарной обработки синусоидальных цилиндрических поверхностей: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. – Курск, 2008. – 202 с.
13. *Разумов М.С.* Повышение производительности формообразования наружных поверхностей посредством планетарного механизма: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. – Курск, 2011. – 158 с.
14. *Панкратов П.А.* Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Курск, 2013. – 20 с.
15. *Максименко Ю.А.* Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК и К-профилем: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Курск, 2014. – 20 с.
16. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А.М. Русецкий и др.; под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларуская навука, 2014. – 316 с.
17. *Данилов А.А.* Анализ и реализация схем полигонального течения многогранных поверхностей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 11. – С. 19–27.
18. *Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А., Спецман М.В.* Рациональные методы формообразования и упрочнения деталей профильных соединений // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы международной научно-технической конференции, Брест, 2–3 ноября 2016 г. – Брест: БрГТУ, 2016. – С. 119–122.
19. *Пантелеенко Ф.И., Данилов А.А.* Формирование топологии некруглых поверхностей с регулярным микрорельефом // Сборник материалов докладов международной научной конференции «Материалы для работы в экстремальных условиях – 6». – Киев, 2016.
20. *Федотенок А.А.* Кинематическая структура металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1970. – 403 с.
21. *Радзевич С.П.* Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. – Киев: Растан, 2001. – 592 с.
22. *Ермаков Ю.М.* Разработка высокопроизводительных способов механической обработки резанием и металлорежущих станков на основе исследования взаимосвязи способов: автореф. дис ... д-ра техн. наук: 05.03.01. – М., 1994. – 32 с.
23. *Данилов А.А.* Сравнение схем профилирования некруглых поверхностей методом следа // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тезисы докладов международной научно-технической конференции, Минск, 7–8 апреля 2016 г. / редкол.: В.К. Шелег (отв. ред.) и др. – Минск: Бизнесофсет, 2016. – С. 45–46.

**SYSTEM ANALYSIS AND SYNTHESIS OF RATIONAL METHODS
OF SHAPING NON-CIRCULAR SURFACES**

Panteleyenko F.I., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: panteleyenkofi@tut.by
Danilov A.A., Post-graduate Student, e-mail: Alexmeinadk@gmail.com

Belarusian National Technical University, 65 Nezavisimosty avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus

Abstract

Torque transmitting non-circular work surfaces have, in comparison with spline connections, substantial operational benefits and lower manufacturing costs. The geometry of non-circular surfaces allows for multiple profiling schemes. This allows to choose rational one when designing of machine tools and equipment depending on the shape surface and conditions of production. Based on the theory of surfaces formed a method of analysis of non-circular surfaces grading schemes. This allows to carry out a systematic analysis of the methods of profiling non-circular surfaces and develop innovative ways of processing. The essential features of the profiling schemes were established which are important for comparison and implementation on machine tools. These features are shape-producing elements, the result of their interaction with the nominal surface of the product, the type of formation (full, partial), and others. The structure of the executive movements for profiling schemes was examined. Circuit forming non-circular surfaces with the combined movements of the profiling and cutting are preferred. This allows to proceed with non-circular surfaces on universal machine tools with simple kinematics. Rational schemes of profiling non-circular surfaces in the processing of various disk and cylindrical cutters, cutter heads, round and non-round cutters are presented as a result of research.

Keywords

non-circular surface, profiling scheme, analysis, synthesis, implementation

УДК 621.9.02

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ДАННЫХ
СБОРНОГО ТОКАРНОГО ИНСТРУМЕНТА ***

*Д.В. ЛОБАНОВ, доктор техн. наук, профессор
Д.А. РЫЧКОВ, канд. техн. наук, доцент
С.А. СИДОРЕНКО, магистрант
(БрГУ, г. Братск)*

Лобанов Д.В. – 665709, г. Братск, ул. Макаренко, 4,
Братский государственный университет,
e-mail: mf_nauka@brstu.ru

Приведены пути повышения эффективности применения композитов, которыми предлагается заменить общепринятые конструкционные и другие материалы в области машиностроения, там, где это возможно; рассмотрены методы обработки изделий из композитов, среди которых механический принят за наиболее рациональный; отмечена возможность создания изделий из композиционных материалов с использованием режущего инструмента; описаны особенности механической обработки изделий из композиционных материалов, включающие в себя специфику резания; отмечены перспективы применения сборного режущего инструмента со сменными многогранными пластинами для обработки композиционных материалов; представлено решение проблемы выбора композиционного материала для изделия и инструмента для обработки композита; представлен программный продукт для формирования базы данных сборного токарного инструмента; приведены перспективы дальнейшей реализации результатов исследований.

Ключевые слова: композиционные материалы; режущий инструмент; механическая обработка; подготовка производства; эффективность; рациональный выбор.

Введение

Современные конструкционные материалы и сплавы не всегда в состоянии удовлетворить возросшие эксплуатационные требования в сочетании со сниженной удельной массой и стоимостью. На смену традиционным конструкционным материалам приходят композиты. К преимуществам композитов следует отнести их высокую удельную прочность, жёсткость, износостойкость, небольшую массу, стабильность размеров изготовленных изделий и конструкции. В качестве недостатков композиционных материалов можно отметить анизотропию свойств материалов, низкую ударную вязкость и обрабатываемость, высокий удельный объём, гигроскопичность и токсичность некоторых видов композитов. Изделия из композиционных материалов (шестерни, втулки, корпусные изделия, поршни, шатуны, оборудование для спорта и т.д.) широко используются в различных областях промышленности (машиностроении, авиастроении, судостроении, военной промышленности, космической индустрии и т.д.) [1].

Пути повышения эффективности использования композитов в современной промышленности сводятся к комплексному подходу решения проблемы по получению необходимой

* Работа выполнена в рамках проекта У.М.Н.И.К.-2015 № 0011203 «Разработка системы автоматизации процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов с использованием лезвийного инструмента»

формы и размеров деталей из композиционных материалов. Сопрягаемые детали из композиционных материалов должны иметь определенный размер и шероховатость, достигаемые после дополнительной обработки. Существующие методы обработки композитов можно разделить на четыре группы: механическая, струйно-абразивная, лазерная и ультразвуковая. Все они обладают определенными преимуществами и недостатками. К достоинствам струйно-абразивной обработки можно отнести: отсутствие термической деструкции матрицы; возможность резки конструкций большой толщины; высокую производительность, к недостаткам – высокую шероховатость обработанной поверхности; насыщение композита водой. К достоинствам лазерной обработки следует отнести: малую ширину реза; высокую скорость резки; обработку маложестких деталей, к недостаткам – термическую деструкцию матрицы; выделение дыма и пыли. К достоинствам ультразвуковой обработки композитов можно отнести: высокую точность; низкую шероховатость; минимальное расслоение материала, к недостаткам – низкую производительность; износ инструмента. К достоинствам механической обработки изделий из композиционных материалов следует отнести: низкую шероховатость; высокую точность обработки, к недостаткам – высокий износ инструмента и его влияние на качество обработки, расслоение, вырывание волокон, термическую деструкцию матрицы. Оценивая преимущества и недостатки вышеперечисленных методов обработки композиционных материалов, нами был выбран наиболее рациональный – механическая обработка. Механическая обработка композиционных материалов используется для доведения деталей до заданных размеров, а так же для достижения требуемой точности, качества поверхности и получения сложных конфигураций изделия. Процесс резания композиционных материалов существенно отличается от процесса резания металлов это объясняется специфическими свойствами композитов. Исходные характеристики процесса резания обусловлены рядом факторов [2, 3].

Методика экспериментального исследования

Механическая обработка изделий из композитов подразумевает две составляющие: деталь из композиционного материала и инструмент для ее обработки. При выборе режущего инструмента для обработки композитов необходимо учитывать физико-механические свойства композиционных материалов, специфику их обработки и технологию. Это, как правило, трудоемкий и длительный процесс, так как требует обработки большого массива информации, что, зачастую, останавливает, или ограничивает производителей изделий из композиционных материалов. Поэтому для повышения эффективности процесса подготовки производства, существует необходимость в структурировании, систематизации данных о композитах и инструменте, и автоматизации операций поиска, анализа и принятия синтезированного решения по выбору рационального композиционного материала и лезвийного инструмента для его обработки.

Процессу выбора композиционных материалов посвящено достаточно много времени [4, 5]. Процессу выбора сборного лезвийного инструмента ранее уделено внимание в работах [6, 7], однако требуется дополнение с учетом видов обрабатываемого и инструментального материалов, накопленной базы знаний, а также операций (сверлильная, токарная, фрезерная и т.д.), инструмента (осевой, токарный, фрезерный и т.д.), специфики и технологии лезвийной обработки композитов.

Разработка программных продуктов по систематизации и структурированию данных о режущем инструменте велась ранее, однако созданные программные продукты имеют ряд недостатков. Первая программа [8] представляет собой базу данных, структурированную в таблицах, что позволяет пользователю быстро найти нужный инструмент, однако процесс поиска инструмента не автоматизирован и осуществляется пользователем на основании его

знаний. Данные хранятся в табличной форме и отображаются все разом в ячейках, что не позволяет сосредоточить внимание на одной конструкции инструмента или ее составляющей. Вторая программа [9] также позволяет работать с базой данных сборных конструкций фрез. Исходная информация о фрезерном инструменте в данной программе систематизирована в табличной форме и хранится в отдельном файле. Однако в этой программе не предусмотрена возможность процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов с использованием лезвийного инструмента. Поэтому созданная третья программа [10], которая включает в себя четыре блок-модуля: первый блок модуль предназначен для формирования базы данных композиционных материалов; второй – для выбора рационального композит; третий – для формирования базы данных сборного фрезерного инструмента; четвертый – для выбора рациональной конструкции фрезы для обработки изделий из композиционных материалов. Данный программный комплекс позволяет пользователю в диалоговом режиме добавлять, редактировать и удалять информацию о композиционных материалах и сборном лезвийном инструменте, выбирать рациональный вариант композита и сборного лезвийного инструмента для его обработки с учетом специфики резания композиционных материалов, а также производить поиск информации по заданным параметрам и выводить информацию на печать. Данный программный комплекс имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что он может быть использован только для процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов, который связан с фрезерной обработкой, так как содержит только базу данных сборных конструкций фрез. Поэтому на данном этапе ведутся работы по расширению программного комплекса. Создаются новые блок-модули по формированию баз данных сборного лезвийного инструмента токарного и осевого, а также блок-модули по выбору рационального варианта инструмента для обработки изделий из композиционных материалов. Разработки программных продуктов ведутся на основе накопленной базы знаний, которая включает себя графовые модели сборных конструкций лезвийного инструмента, методики формирования баз данных и выбора рационального композиционного материала и инструмента для его обработки, специфику и технологию резания композитов [11].

Особенности обработки композиционных материалов [12] показывают, что в условиях непрерывного развития технологии изготовления деталей из композитов растёт необходимость в появлении специализированных инструментов, учитывающих индивидуальные особенности их механической обработки. Следовательно, требуется детально изучить конструктивные особенности инструментов для обработки композиционных материалов, а так же различные виды методов обработки композитов, свойства и возможности инструментальных материалов.

При обработке композиционных материалов с учетом режимов резания важен правильный подбор лезвийного инструмента. В современной промышленности используются инструменты из различных инструментальных материалов. По своим физико-механическим свойствам (предел прочности, модуль упругости, теплопроводность, характеризующая интенсивность отвода тепла из зоны резания), твёрдые и сверхтвёрдые сплавы являются наиболее предпочтительными для композиционных материалов. В зависимости от вида композита и содержащегося в нем армирующего компонента для обработки применяют различные инструменты: для полимерных композиционных материалов, содержащих наполнители с невысокой твердостью, используется специфичный для данных методов обработки инструмент, с углами заточки, зависящими от вида и механических свойств материалов; для стеклопластиков применяют инструменты на керамической основе или абразивные инструменты; для композиционных материалов, содержащих армидные волокна, используются инструменты на алмазной основе или оснащенные твердым сплавом [13].

Режущий инструмент для обработки изделий из композиционных материалов должен удовлетворять: обеспечению высоких и стабильных режущих характеристик; формированию

и отводу стружки; обеспечению заданных условий по точности обработки; универсальности применения для типовых обрабатываемых поверхностей различных изделий на разных моделях станков; быстросменности при переналадке на другую обрабатываемую деталь или замене затупившегося инструмента [14].

Применение сборного инструмента позволяет повысить его эксплуатационные свойства, обеспечить значительную экономию дефицитных режущих материалов. Вместе с тем создаются благоприятные условия для широкого применения более износо- и теплостойких режущих материалов. Сборный лезвийный инструмент нашел широкое применение, выпуск его постоянно увеличивается, как по объему, так по номенклатуре. Удельный вес такого инструмента сегодня составляет 35-40 % общего объема выпуска режущего инструмента [15].

Существует большое разнообразие форм и видов сборного лезвийного инструмента в зависимости от обрабатываемого материала, вида заготовок, обработки и режимов резания, а также элементов сборного инструмента, таких как режущая часть, корпусная, крепежная и другие части. В связи с этим, существует необходимость в создании моделей сборного инструмента для визуализации его составных частей, структурирования информации о нем, создания базы данных и автоматизации процессов поиска, анализа и выбора рационального режущего инструмента для обработки деталей из композиционных материалов [16].

Результаты и обсуждения

На кафедре «Технология машиностроения» БрГУ ведутся работы по созданию моделей сборного режущего инструмента. На сегодняшний день созданы графические модели сборного фрезерного и токарного инструментов. Графовой модели сборного фрезерного инструмента уделено достаточно много внимания [17], в отличие от графовой модели сборного токарного инструмента [18], поэтому рассмотрим ее более подробно.

В настоящее время широкое многообразие сборного токарного инструмента, используемого для обработки композиционных материалов, осложняет анализ и выбор рационального решения. Работа конструкторов и технологов сводится к рутинной обработке большого объема информации. Что приводит к снижению эффективности процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов с использованием лезвийного инструмента [19].

В современной промышленной индустрии существует необходимость в систематизации данных о сборном лезвийном инструменте и автоматизации операций поиска, анализа и выбора режущего инструмента для обработки изделий из композиционных материалов. Для решения данной задачи разработана графовая модель, предназначенная для визуализации сборного режущего инструмента [20].

Конструкцию сборных токарных резцов следует рассматривать как отдельные функционально связанные между собой элементы, представленные в виде ориентированного графа (рис. 1).

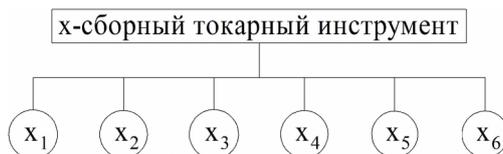


Рис. 1. Элементы сборного токарного инструмента

Данный граф состоит из шести основных частей, которые представлены в виде вершин x_1 – режущая часть, x_2 – корпусная часть, x_3 – крепёжная часть, x_4 – назначение резца, x_5 – компания-изготовитель, x_6 – другие параметры (примечания, дополнения).

Режущая часть (вершина x_1) характеризуется параметрами: x_{11} – вид конструктивного исполнения режущей части; x_{12} – ее параметрические размеры; x_{13} – материал; x_{14} – исполнение режущей кромки; x_{15} – направление подачи; x_{16} – износостойкие покрытия или упрочнения; x_{1i} – другие параметры (рис. 2).

Вид конструктивного исполнения режущей части (вершина x_{11}) характеризуется параметрами: x_{111} – цельная режущая часть; x_{112} – сборная-клееное соединение; x_{113} – сборная-паяное соединение; x_{114} – сборная с механическим креплением; x_{11i} – другие варианты исполнения.

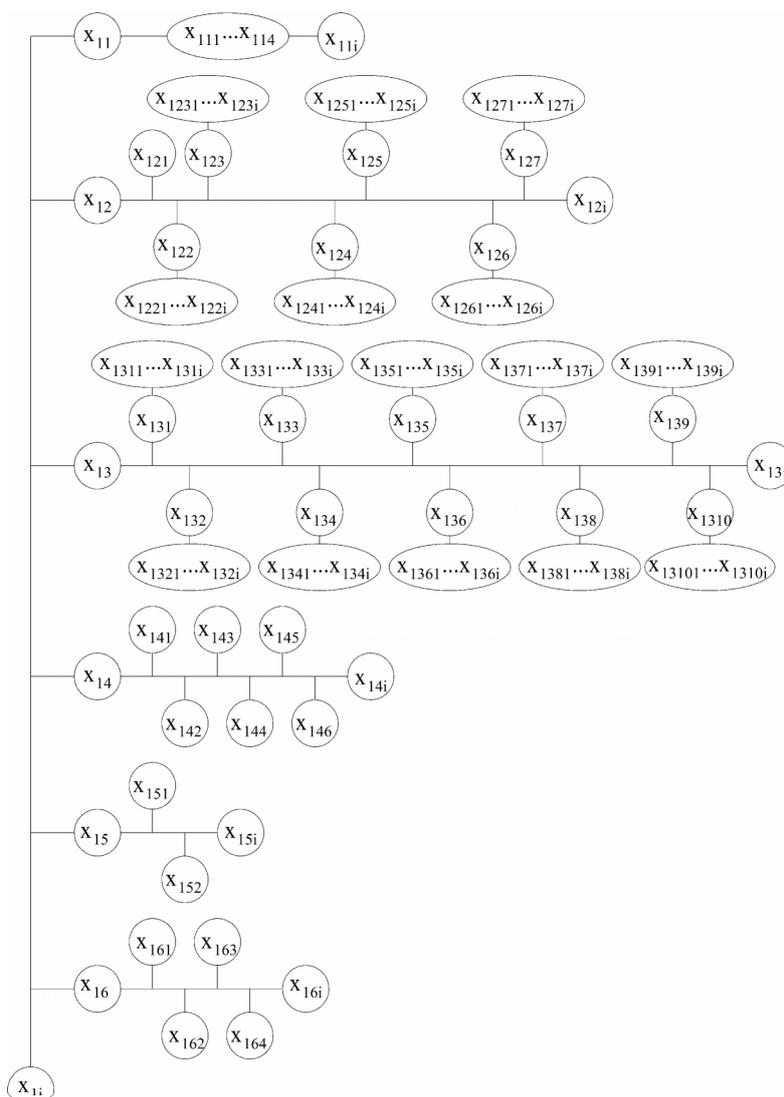


Рис. 2. Режущая часть сборного токарного инструмента

Параметрические размеры режущей части (вершина x_{12}) характеризуется параметрами: x_{121} – передний угол; x_{122} – задний угол; x_{123} – длина режущей кромки, x_{124} – радиус при вершине; x_{125} – форма пластины; x_{126} – допуски на размеры; x_{127} – толщина; x_{12i} – другие варианты.

Материал режущей части инструмента (вершина x_{13}) на модели целесообразно представить в следующих вариантах: x_{131} – углеродистая сталь; x_{132} – легированная сталь; x_{133} –

обычная быстрорежущая сталь (БРС); x_{134} – БРС повышенной прочности; x_{135} – однокарбидные вольфрам-кобальтовые твердые сплавы (ВКТС); x_{136} – двухкарбидные ВКТС; x_{137} – трехкарбидные ВКТС; x_{138} – безвольфрамовые твердые сплавы; x_{139} – минералокерамические материалы; x_{1310} – сверхтвердые материалы; x_{13i} – другие материалы.

Вид исполнения режущей кромки (вершина x_{14}), согласно системе обозначения ISO для сменных многогранных режущих пластин, классифицируется следующим образом: x_{141} – острые грани; x_{142} – грани с фаской; x_{143} – грани с двойной фаской; x_{144} – закругленные грани; x_{145} – закругленные грани с фаской; x_{146} – закругленные грани с двойной фаской; x_{14i} – другие варианты.

Направление подачи (вершина x_{15}) целесообразно представить в виде следующих вариантов: x_{151} – правые; x_{152} – левые; x_{15i} – другие варианты.

Износостойкие покрытия и упрочнения режущей части (вершина x_{16}) представлены параметрами: x_{161} – вид упрочнения; x_{162} – глубина упрочнения; x_{163} – материал покрытия; x_{164} – толщина покрытия; x_{16i} – другие варианты.

Корпусная часть сборных токарных резцов (вершина x_2) характеризуется системой параметров, являющихся вершинами ребра l_{x_2} : x_{21} – пазы в корпусной части; x_{22} – упрочнение корпусной части; x_{23} – материал корпусной части; x_{24} – форма сечения корпусной части; x_{25} – размеры корпусной части; x_{26} – отверстия под винт в корпусной части; x_{27} – конструктивное исполнение корпусной части; x_{2i} – другие параметры (рис. 3).

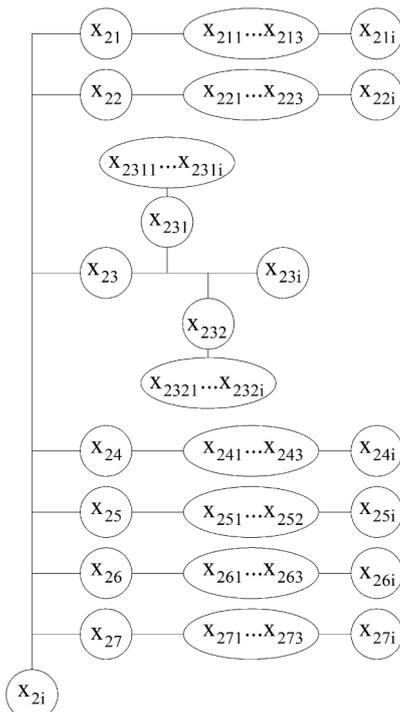


Рис. 3. Корпусная часть сборного токарного инструмента

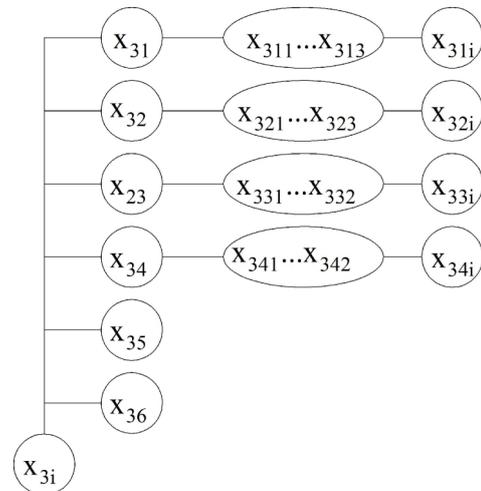


Рис. 4. Крепежная часть сборного токарного инструмента

Крепежная часть сборных токарных резцов для обработки композитов (вершина x_3) характеризуется системой параметров, являющихся вершинами ребра l_{x_3} : x_{31} – клинья крепежные, x_{311} – количество клиньев, x_{312} – линейные размеры клина, x_{313} – угол заклинивания, x_{31i} – другие варианты; x_{32} – крепежный винт, x_{321} – количество винтов, x_{322} – размеры резьбы, x_{323} – точность резьбы, x_{32i} – другие варианты; x_{33} – подвижный штифт, x_{331} – количество штифтов, x_{332} – линейные размеры штифтов; x_{34} – качающийся рычаг, x_{341} – количество ры-

чагов, x_{342} – линейные размеры рычага, x_{34i} – другие параметры; x_{35} – опорная пластина; x_{36} – узел прихвата (рис. 4).

Представленная в данной статье графовая модель позволяет описать варианты конструкций сборного токарного инструмента, разложить на элементы любую его конструкцию для получения более полного представления об устройстве инструмента, оценить его работоспособность, построить логическую схему технического решения, представить информацию в матричной форме, что позволит создать базу данных. Кроме того, модель при необходимости может быть дополнена другими конструкциями и составляющими частями сборного токарного инструмента.

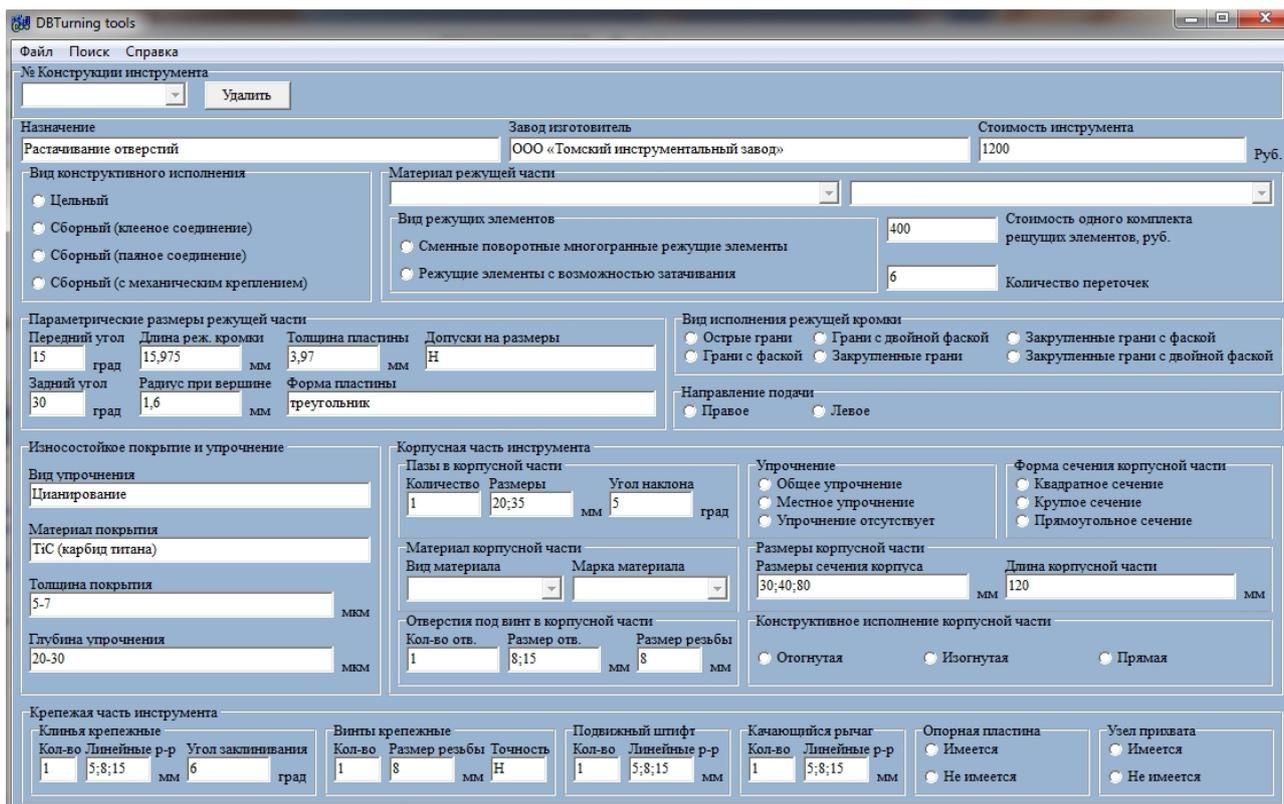


Рис. 5. Диалоговое окно программы для работы с базой данных сборного токарного инструмента

Выводы

На основе представленной модели разработан программный продукт (рис. 5), который позволил повысить эффективность процесса подготовки производства изделий из композиционных материалов, ускорить принятие синтезированного решения по выбору рационального композита технологами в условиях реального производства и тем самым увеличить применимость композиционных материалов в различных областях промышленной индустрии за счет автоматизации.

Данный программный модуль направлен на работу с базой данных сборного токарного инструмента и представляет собой инструмент, дающий возможность в диалоговом режиме вести заполнение, редактирование, правку, удаление и поиск инструмента. Исходная информация в программном модуле отражена в полях редактирования, которые содержат определенный набор данных соответствующих выбранному из списка номеру конструкции сборного токарного инструмента.

В верхней части диалогового окна располагается основное меню, позволяющее добавлять новые конструкции инструмента, производить выбор рационального инструмента из созданной базы данных, сохранять текущее состояние введенной информации, создавать и просматривать отчеты по всем параметрам, характерным для конструкций сборного токарного инструмента. В основном поле программы предусмотрена возможность в диалоговом режиме вносить, править, или удалять исходную информацию о назначении сборного токарного инструмента, заводе изготовителе, стоимости, виде конструктивного исполнения, материалах корпусной и режущей частей, способе и виде крепления режущих элементов, упрочнении и т.д. Также в основном меню программы, при необходимости, имеется возможность добавления новой конструкции сборного токарного инструмента, предусмотрены возможности составления и редактирования отчетов, вывода их на печать, также поиска композита из массива информации по задаваемым параметрам и вывода справки о программе.

С целью автоматизации процесса выбора рациональной конструкции сборного токарного инструмента для обработки композиционных материалов ведется разработка программного модуля, который, фактически, будет являться приложением к выше представленному модулю, из которого будут приниматься данные для расчета, анализа и выбора сборных конструкций инструмента.

Разработанный нами программный модуль, для формирования базы данных сборных конструкций токарного инструмента, позволяет перейти от ручной обработки информации об имеющемся инструменте к автоматизированной за счет систематизации данных. В результате автоматизации значительно повышается эффективность: подготовки производства изделий из композиционных материалов; хранения и обработки информации по видам композитов и конструкциям токарного инструмента, свойствам и показателям композитов; принятия решения по выбору рациональной конструкции сборного токарного инструмента в одном программном продукте.

Список литературы

1. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учебное пособие / М.Л. Кербер и др.; под ред. А.А. Берлина. – 3-е испр. изд. – СПб.: Профессия, 2011. – 560 с.
2. Composite materials based on wastes of flat glass processing / A.V. Gorokhovskiy, J.I. Escalante-Garcia, G.Yu. Gashnikova, L.P. Nikulina, S.E. Artemenko // Waste Management. – 2005. – Vol. 25, N 7. – P. 733–736. – doi: 10.1016/j.wasman.2004.11.007.
3. *Chung D.D.L.* Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies. – London: Springer, 2004. – 293 p.
4. *Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V.* Rationalization of polymer composite materials processing by improving production efficiency // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 942–947. – doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.067.
5. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects / L.A. Bokhoeva, V.E. Rogov, A.S. Chermoshentseva, D.V. Lobanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 142. – P. 012077. – doi: 10.1088/1757-899X/142/1/012077.
6. *Лобанов Д.В., Янюшкин А.С.* Повышение эффективности применения лезвийного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов // Проблемы механики современных машин: материалы VI Международной конференции / отв. ред. В.С. Балбаров. – 2015. – С. 183–189.

7. Nano-ag:polymeric composite material for ultrafast photonic crystal all-optical switching / X. Hu, P. Jiang, Ch. Xin, H. Yang, Q. Gong // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 94, N 3. – P. 031103.

8. Доц М.В., Марков А.М. Автоматизация проектирования токарной обработки композиционных материалов // *Инновации в машиностроении: сборник трудов 2-ой Международной научно-практической конференции* / под ред. В.Ю. Блюменштейна. – Кемерово, 2011. – С. 112–115.

9. Acoustic analysis of composite soft materials, II characterization of composite materials containing glass beads / M. Maebayashi, S. Otsuka, T. Matsuoka, S. Koda // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2003. – Vol. 42, N 5B. – P. 2939–2943.

10. Evaluation of influence of interphase material parameters on effective material properties of three phase composites / S. Kari, H. Berger, U. Gabbert, R. Guinovart-Diaz, J. Bravo-Castillero, R. Rodriguez-Ramos // *Composites Science and Technology*. – 2008. – Vol. 68, N 3–4. – P. 684–691. – doi: 10.1016/j.compscitech.2007.09.009.

11. Ярославцев В.М. Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // *Вестник МГТУ. Серия Машиностроение*. – 2005. – Спец. Вып.: Композиционные материалы, конструкции и технологии. – С. 41–62.

12. Рудых О.Л., Меламед Э.Ш. Основы систем автоматизированного проектирования строительных конструкций. Ч. 2. Виды обеспечений САПР (программно-аппаратные средства): учебное пособие. – Хабаровск: ДВГУПС, 1998. – 157 с.

13. Steady-state and transient-state optical properties of a charge-transfer composite material MO-PPV/SWNTs / S. Chu, W. Yi, S. Wang, F. Li, W. Feng, Q. Gong // *Chemical Physics Letters*. – 2008. – Vol. 451, N 1–3. – P. 116–120. – doi: 10.1016/j.cplett.2007.11.087.

14. Nano-porous Si/C composites for anode material of lithium-ion batteries / Y. Zheng, J. Yang, J. Wang, Y. NuLi // *Electrochimica Acta*. – 2007. – Vol. 52, N 19. – P. 5863–5867. – doi: 10.1016/j.electacta.2007.03.013.

15. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system / X.C. Ma, G.Q. He, D.H. He, C.S. Chen, Z.F. Hu // *Wear*. – 2008. – Vol. 265, N 7–8. – P. 1087–1092. – doi: 10.1016/j.wear.2008.02.015.

16. Li J.L., Xiong D.S. Tribological properties of nickel-based self-lubricating composite at elevated temperature and counterface material selection // *Wear*. – 2008. – Vol. 265, N 3–4. – P. 533–539. – doi: 10.1016/j.wear.2007.09.005.

17. Synthesis and electronic behaviors of ce0.5hf0.5o2/carbon clusters composite material / H. Miyazaki, H. Matsui, H. Kitakaze, S. Karuppuchamy, S. Ito, M. Yoshihara // *Materials Chemistry and Physics*. – 2009. – Vol. 113, N 1. – P. 21–25. – doi: 10.1016/j.matchemphys.2008.08.087.

18. Методика выбора композиционных материалов взамен общепринятых конструкционных / Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Ющенко, А.В. Большешапова // *Современные материалы, техника и технология: материалы 4-й Международной научно-практической конференции, 25–26 декабря 2014 г.* / редкол.: А.А. Горохов (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2014. – С. 255–261.

19. Анализ и рациональный выбор полимерных композиционных материалов для изделий по их физико-механическим свойствам / Д.В. Лобанов, С.А. Сидоренко, Д.А. Ющенко, А.В. Большешапова // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2015. – № 2. – С. 206–213.

20. Сидоренко С.А., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Программный продукт для автоматизации выбора рационального композиционного материала // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – 2016. – № 3. – С. 30–36.

THE SOFTWARE FOR FORMATION OF THE DATABASE OF THE COMBINED TURNING TOOL

Lobanov D. V., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: mf_nauka@brstu.ru

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

Sidorenko S. A., Master's Degree student, e-mail: serzh_sidorenko_1993@mail.ru

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

Abstract

Ways of increase in efficiency of application of composites which offer to replace the standard constructional and other materials in the field of mechanical engineering are given where it is possible; methods of processing of products from composites among which mechanical it is taken for the most rational are considered; the possibility of creation of products from composite materials with use of the cutting tool is noted; the features of machining of products from composite materials including specifics of cutting are described; the prospects of use of the combined cutting tool with replaceable many-sided plates for processing of composite materials are noted; the solution of the problem of the choice of composite material for a product and the tool for processing of a composite is presented; the software product for formation of the database of the combined turning tool is presented; the prospects of further realization of results of researches are given.

Keywords

composite materials; the cutting tool; machining; production preparation; efficiency; rational choice

УДК 621.923.9; 621.91.02

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ БУКСИРНОГО ПОЛИРОВАНИЯ
РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ
РЕЖУЩИХ КРОМОК**

*А.С. БАБАЕВ*¹, канд. техн. наук, доцент
*В.П. ЧАРТОРИЙСКИЙ*², ген. директор
*Н.В. ЛАПТЕВ*¹, магистрант
(¹ НИ ТПУ, г.Томск,
² ООО «ПРОМТЕХ», г. Санкт-Петербург)

Бабаев А.С. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: babaevartyom@tpu.ru

Представлены результаты экспериментального исследования влияния абразивной среды при буксирном полировании на изменение радиуса округления и шероховатости режущих кромок твёрдосплавных инструментов. В работе рассмотрено применение буксирного станка *DF-3 Tools* компании *OTEC* (Германия) для проведения экспериментов и микроскопа *MikroCAD^{Premium}* компании *LMI* (Германия) для отслеживания изменений микрогеометрии режущих кромок до и после обработки. Путём применения различных абразивных сред получены рекомендации по применению буксирного полирования режущих инструментов (на примере концевых фрез).

Ключевые слова: режущие инструменты, буксирное полирование, радиус округления, шероховатость, режущая кромка.

Введение

Современные инструментальные производства развиваются по мере роста требований в повышении стойкости и надёжности при эксплуатации режущих инструментов. Традиционные технологические процессы состоят, как правило, из двух основных операций – формообразование (заточка) режущей части и нанесения износостойкого покрытия. Многочисленные исследования и практический опыт по изучению этих технологических подходов на этих уже исчерпывают свой ресурс. Всё чаще на зарубежных инструментальных заводах находят своё место применение новые технологий, которые в технологических процессах встраиваются после операций заточки или дополнительно после нанесения покрытий. К числу таких инновационных технологий можно отнести применение методов контролируемого взаимодействия специальной абразивной среды, частицы которой находятся в незакреплённом состоянии, с режущими инструментами путём строго определённого движения последних. Так например, широкое распространение имеет технология буксирного полирования (*drag finishing*), которая применяется после операции заточки или нанесения износостойкого покрытий [3]. В случае применения буксирного полирования после заточки одновременно решаются несколько задач: 1) равномерное прогнозируемое округление режущих кромок; 2) полирование стружечных канавок с учётом угла наклона; 3) уменьшение концентраторов напряжений по длине режущей кромки, имеющих место после заточки. Известно, что нанесение покрытия на режущие инструменты в той или иной мере сопровождается образованием капельной фазы, что неблагоприятно влияет на отвод тепла из зоны резания и, как след-

стве, на снижение эксплуатационных характеристик инструментов. Использование буксирного полирования после осаждения покрытия позволяет удалить капельную фазу и при этом оставить его без повреждений целостности.

Рассмотрим реализацию движений при буксирном полировании. Режущие инструменты закрепляются держатели, роль которых выполняют стандартные цанги, патроны или специальные приспособления. Жёсткое закрепление инструментов исключает соударения в процессе обработки. Путём погружения в абразивную среду и тройного вращения реализуется сложное планетарное движение путём «протягивания» заготовок через абразивную смесь. При этом траектория такого движения описывается кривой из семейства циклоид (рис. 1).

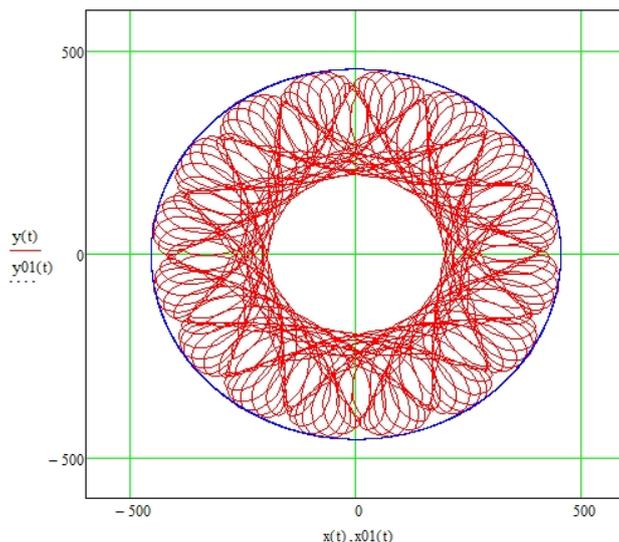


Рис. 1. Пример траектории движения заготовки, воспроизводимой при буксирном полировании

Установлено, что такое движение в значительной мере определяет равномерность обработки в радиальном направлении. По общим рекомендациям в качестве абразивных сред, применяемых для буксирного полирования режущих инструментов, наиболее часто используются: а) гранулят скорлупы грецкого ореха, пропитанный специальной шлифовальной или полировальной пудрой (марка «Н»); б) гранулят кукурузных волокон, пропитанный специальным полировальным порошком (марка «М»); в) смесь, состоящая из гранулятов скорлупы грецкого ореха и карбида кремния мелкой дисперсности (марка «HSC»). Так, например, марка «Н» используется главным образом для удаления микрозаусенцев с инструментов из инструментальных сталей и обработки паяных соединений. Этот гранулят образует минимальное количество пыли, сохраняет свои свойства в течение 150-200 часов эксплуатации и может обеспечить шероховатость Ra 0,03 мкм. Применение марки «М» оправдано при необходимости полирования стружечных канавок инструментов (метчики, фрезы, свёрла) из твёрдых сплавов и быстрорежущих сталей при незначительном округлении режущих кромок. Такая необходимость возникает при обработке алюминиевых и титановых сплавов, склонных при резании к налипанию, а также для повышения подачи и обеспечения стабильного отвода стружки. Смесь марки «HSC» чаще всего используется для повышения производительность при округлении режущих кромок с одновременным полирование рабочих поверхностей, а также для удаления капельной фазы с износостойких покрытий. Однако, эффект полирования в этом случае несколько слабее, чем при использовании гранулята кукурузы или грецкого ореха из-за повышенной абразивности карбида кремния.

Экспериментальная часть

На первом этапе для исследования влияния воздействия абразивных сред марок «М» и «HSC» на формирование радиуса округления и изменение шероховатости режущих кромок были подготовлены образцы из твёрдых сплавов согласно таблице 1.

Таблица 1

Состав и физико-механические характеристики некоторых твёрдых сплавов

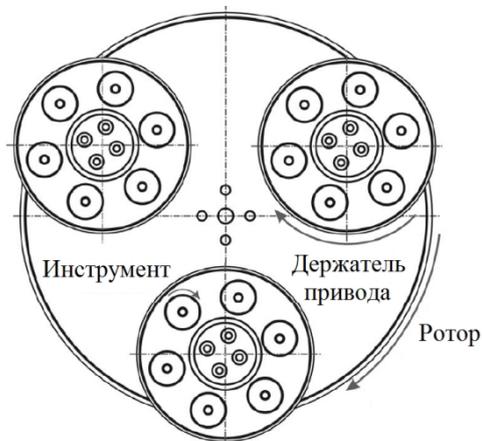
№, п/п	Марка твёрдого сплава	Содержание Со, % мас.	Размер зерна карбида вольфрама d_{wc} , мкм	Изготовитель (страна)
1	ВК8	8	1...2 >50%	КЗТС (Россия)
2	ВК6-ОМ	6	До 1 >60%	
3	K40UF	10	0,6	Konrad Friedrichs (Германия)

Указанные образцы имели форму призматических пластин (тип 13 исполнение 1 по ГОСТ 17163-90), которые затачивали на универсально-заточном станке модели 3В642 алмазным кругом АС4 28/20 К5 формы 11V9. При заточке обеспечивали постоянные значения углов $\gamma=0^\circ\pm 1^\circ$ и $\alpha=30^\circ\pm 1^\circ$. Измерения радиусов округления и контроль шероховатости режущих кромок выполняли в условиях лаборатории ООО «ПРОМТЕХ» (г. Санкт-Петербург) на специальном микроскопе *MikroCAD^{Premium}* компании LMI (Германия) [4]. На данном приборе время сканирования кромки составляет не более 2-5 секунд с точностью по вертикальной оси 0,1 мкм и по горизонтальной – 1,5 мкм. С применением программного обеспечения ODSCAD происходит построение трёхмерной и цветоимитационной модели режущей кромки. По специальному алгоритму происходит идентификация режущей кромки, а затем её разбиение на 300-400 сечений в нормальном направлении [1]. Данные с сечений анализируются в автоматическом режиме и происходит вычисление радиуса округления, шероховатости на кромке и ряд других параметров [2].

Указанные выше образцы обрабатывали на станке буксирного полирования мод. DF-3 Tools компании OTEC (Германия) (рис. 2). Одновременно на станке данной модели можно обрабатывать 18 образцов диаметром до 55 мм, 9 образцов – до 80 мм и 3 образца – до 250 мм. На каждый эксперимент было отведено по 3 образца каждого твёрдого сплава. Режимы обработки: частота вращения ротора $n_p=45 \text{ мин}^{-1}$ и держателя $n_d=96 \text{ мин}^{-1}$; время – 2,5 мин вращение по часовой стрелке и 2,5 мин против; глубина погружения от уровня абразива 150 мм.



а)



б)

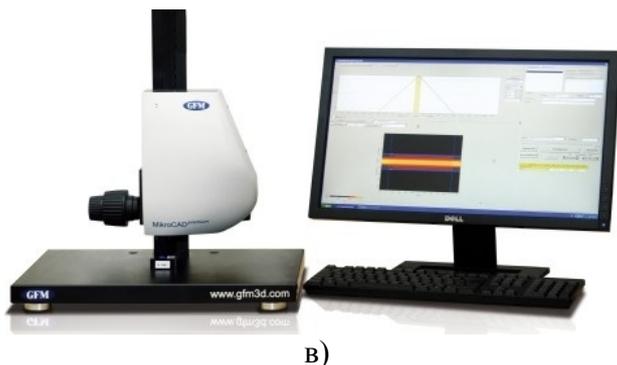


Рис. 2. Общий вид станка *DF-3 Tools* (а), схема вращения образцов (б) и внешний вид рабочего места и микроскопа *MikroCAD^{Premium}* (в)

В результате буксирной обработки и после измерений параметров режущей кромки были получены данные, приведённые на рис. 3.

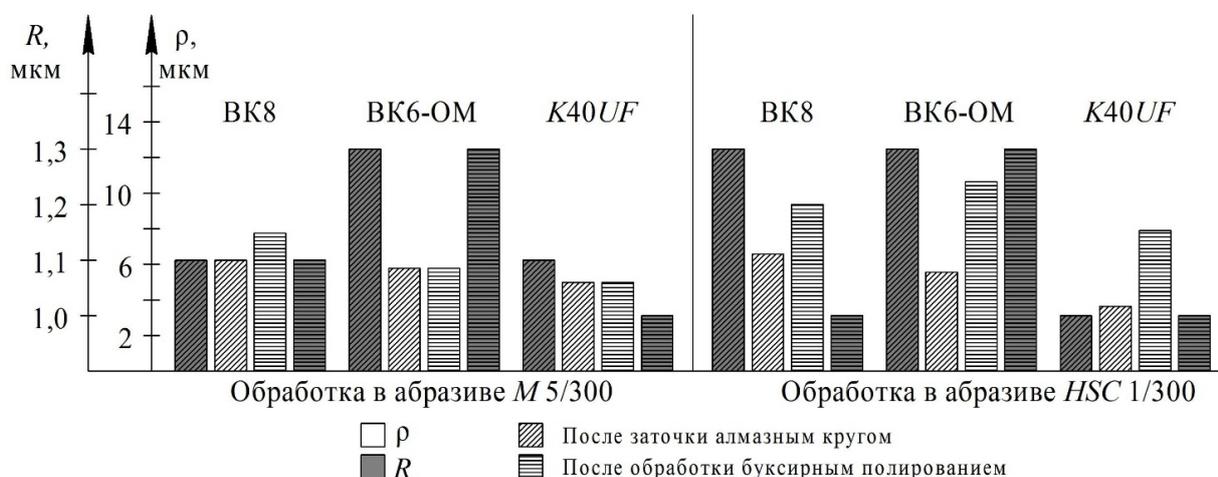


Рис. 3. Изменение радиуса округления ρ и шероховатости R режущих кромок твёрдосплавных пластин

На втором этапе исследовали изменения аналогичных параметров микрогеометрии режущих кромок на концевых фрезах, предназначенных для высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов. Для этого были использованы четыре двузубые фрезы диаметром 10 мм с длиной рабочей части 35 мм и хвостовика 50 мм. Инструменты были изготовлены из твёрдого сплава марки *HB10F*. Производитель прутков-заготовок из твёрдого сплава *Boehlerit* (Австрия). Согласно табл. 1 $d_{wc}=0,5$ мкм, содержание Со 5% (мас.). Указанные инструменты обрабатывали в абразиве марки *M 5/300* с целью сохранения исходного радиуса округления режущих кромок (остроты) и полирования стружечной канавки. Последнее объясняется повышением эффективности отвода стружки при фрезеровании алюминия, склонного к налипанию. Для обеспечения усиленного полирования стружечных канавок фрезы устанавливали в наклонные держатели под углом 20° к оси вращения ротора. Остальные режимы аналогичные твёрдосплавным пластинам.

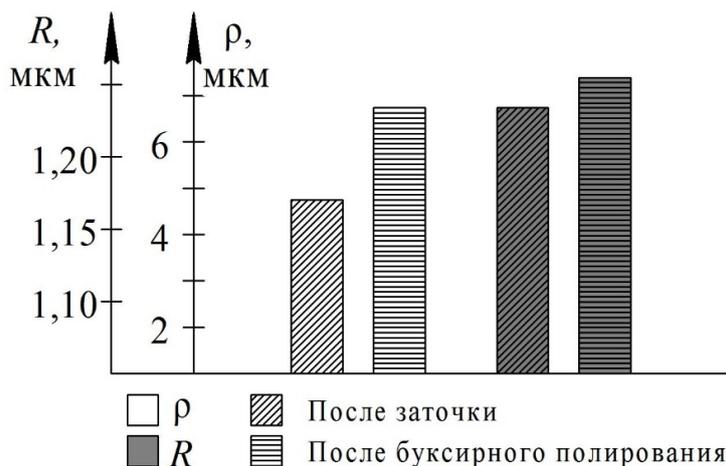


Рис. 4. Изменение радиуса округления и шероховатости режущих кромок концевых фрез после буксирного полирования в абразиве $M 5/300$

Результаты и обсуждение

Из приведённого графика (см. рис. 3) следует, что наименьшие величины радиуса округления достигаются путём применения твёрдого сплава марки $K40UF$ с последующей обработкой в абразиве марки $M 5/300$. При этом было замечено, что максимальное значение шероховатости R на кромке гарантировано уменьшается на 20-30%, а среднее – на 10-15%. Использование абразивной смеси марки $HSC 1/300$ позволяет с высокой стабильностью округлять режущую кромку на величину 2,7 мкм для пластин из $VK8$, на 4,8 мкм – $VK6-OM$ и на 5,1 мкм – $K40UF$. Данная разница в приросте радиуса округления после буксирного полирования различных твёрдых сплавов может иметь зависимость от величины исходного радиуса. При этом за непродолжительное время обработки в абразивах $HSC 1/300$ и $M 5/300$ шероховатость режущих кромок на всех пластинах уменьшается незначительно на величину 0,1...0,3 мкм.

Данные, полученные в ходе измерений режущих кромок концевых фрез, представленные на графике (см. рис. 4), свидетельствуют об увеличении радиуса округления на 2,0 мкм и стабилизации шероховатости режущих кромок по длине. При этом при визуальном осмотре и сравнении с необработанными фрезами было замечено, что обеспечивается полирование стружечной канавки. Также отчётливо наблюдается граница перехода между обработанной и необработанной частью хвостовика, вызванная закреплением инструментов в цангу.

Таким образом переход от экспериментальных образцов в виде пластин к реальным конструкциям режущих инструментов (на примере концевых фрез) позволяет сделать заключение о корреляции получаемых результатов и упрощении проведения эксперимента с точки зрения подготовки и измерений режущих кромок образцов.

Выводы

Применение технологии буксирного полирования оказывает влияние на формирования радиуса округления и шероховатости режущих кромок. При этом достигается высокая стабильность и повторяемость качественных параметров от применения данной технологии. Путём подбора абразивной среды и режимов для обработки режущих инструментов можно обеспечить прогнозируемое изменение радиуса округления и шероховатости режущих

кромки. Абразивную среду марки *HSC 1/300* необходимо использовать при обработке режущих инструментов, применяемых для обработки высокопрочных материалов, а *M 5/300* – для усиленного полирования стружечных канавок. Возможно последовательное применение данных абразивных сред с целью снижения времени на подготовку радиуса округления и дополнительное полирование стружечных канавок. Таким образом, на станке *DF-3 Tools* путём замены контейнера с абразивной средой можно обеспечить обработку режущих инструментов под различные обрабатываемые материалы – сталь, алюминий и титановые сплавы. Одновременная обработка 18 инструментов на предлагаемых в данной работе режимах может обеспечить производительность до 756 инструментов в смену.

Список литературы

1. Frankowski G., Chen M., Huth T. Real-time 3D shape measurement with digital stripe projection by Texas instruments Micro Mirror devices (DMD) // Proceedings of SPIE. – 2000. – Vol. 3958. – P. 90–106.
2. Rodriguez C. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. – Kassel: Kassel University press GmbH, 2009. – 205 p.
3. Denkena B., Biermann D. Cutting edge geometries. CIRP Annals // Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 631–653.
4. Бабаев А.С., Чарторийский В.П. Изучение микрогеометрии режущих кромок ружейных сверл с использованием микроскопа MikroCAD // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 2. – С. 309–312.

RESEARCH OF INFLUENCE CUTTING TOOLS DRAG FINISHING PROCESS TO CHANGE CUTTING EDGES MICROGEOMETRY

Babaev A.S.¹, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: babaevartyom@tpu.ru
Chartoriyskiy V.P.², General Director, e-mail: info@otecru.com
Laptev N.V.¹, Graduate students, e-mail: temkams@mail.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

² Ltd. «PROMTECH», 25 Tsvetochayaya st., Saint Petersburg, 196084, Russian Federation

Abstract

The results of experimental studies of the effect of the abrasive medium at the drag polishing to change the radius of rounding and the roughness of the cutting edges of carbide tools are presented. The paper deals with the application of the drag finishing machine DF-3 Tools company OTEC (Germany) for experiments and microscope MikroCAD^{Premium} company LMI (Germany) for tracking change microgeometry cutting edges before and after processing. By applying various abrasives media recommendations for the use of the drag polishing cutting tools (for example, end mills).

Key words

Cutting tools, drag finishing (polishing), rounding radius, roughness, cutting edge

УДК 621.313.282.2

**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЙ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАШИНЫ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ
С ПРУЖИННЫМ РЕВЕРСОМ БОЙКА**

*Л.А. НЕЙМАН, канд. техн. наук, доцент
Н.И. ЩУРОВ, доктор техн. наук, профессор
(НГТУ, г. Новосибирск)*

Неyman Л.А. – 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Новосибирский государственный технический университет,
e-mail: neyman@ngs.ru

Электромеханические колебательные ударные системы, основным структурным звеном которых является электромагнитный привод, применяются в различных областях промышленности для обеспечения многих технологических процессов и производств. Перспективным направлением исследований в данной области является совершенствование машин и механизмов с повышенной энергией удара на базе электромагнитного привода колебательного движения, работающего в околорезонансных и резонансных режимах с частотой до 100 Гц. Повышение эффективности работы электропривода возможно только при условии рационального выбора взаимосвязанных параметров электрической, магнитной и механической подсистем, для анализа работы которых еще на стадии проектирования возникает необходимость проведения динамического расчета. Выполнен анализ динамических характеристик синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой. Предложен алгоритм расчета и рассмотрен пример численной реализации математической модели электромагнитного ударного узла, содержащего многомассовую колебательную систему с упругими связями и получающего питание от источника напряжения промышленной частоты.

Ключевые слова: ударный узел, синхронная электромагнитная машина, математическая модель, механическая колебательная система, упругие связи, уравнения Лагранжа

Введение

Электромеханические колебательные ударные системы, основным структурным звеном которых является электромагнитный привод, применяются в различных областях промышленности для обеспечения многих технологических процессов и производств [1-8].

Перспективным направлением исследований в данной области является совершенствование машин и механизмов с повышенной энергией удара на базе электромагнитного привода колебательного движения, работающего в околорезонансных и резонансных режимах с частотой до 100 Гц, что позволяет добиваться некоторого снижения энергопотребления [9-14]. Повышение эффективности работы подобных электроприводов возможно только при условии рационального выбора взаимосвязанных параметров электрической, магнитной и механической подсистем, для анализа работы которых еще на стадии проектирования возникает необходимость в проведении динамического расчета.

Существующие в настоящее время рекомендации и методики для проектирования подобных систем основаны в своем большинстве на статических подходах, что ограничивает

возможности анализа рабочих процессов электромеханических колебательных систем, работающих в переходных и квазиустановившихся режимах [15-19].

Целью работы является разработка математической модели динамического состояния двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка, обеспечивающей возможности в проведении всестороннего анализа взаимосвязанных электромеханических процессов в переходных и квазиустановившихся режимах работы.

Решение поставленной проблемы

В качестве объекта исследований рассматривается конструкция электромагнитного ударного узла двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия (рис. 1) [20, 21], содержащая независимые катушки прямого 1 и обратного хода 2, размещенные внутри магнитопровода 3 и обеспечивающие поочередно разгон ударной массы бойка 4 электромагнитными силами в прямом и обратном направлении. Боек 4, совершая возвратно-поступательные движения, поочередно взаимодействует с буферной пружиной 5, осуществляющей его остановку и реверс, и рабочим инструментом 6, взаимодействующим с деформируемой средой 7. Устойчивая связь электромагнитного ударного узла с рабочим инструментом и с деформируемой средой обеспечивается усилием нажатия F_H . Реализация рабочего цикла осуществляется при постоянном воздействии электромагнитных сил катушек, получающих питание от однофазного источника напряжения по однополупериодной схеме выпрямления.

Полный рабочий цикл электромагнитного ударного узла осуществляется за время одного периода напряжения питающего источника, что при частоте $f=50\text{Гц}$ обеспечивает синхронную частоту ударов бойка $n_{\text{уд}}$ и длительность времени рабочего цикла $t_{\text{ц}}$:

$$n_{\text{уд}} = \frac{60f}{2p} = 3000 \text{ уд/мин}; t_{\text{ц}} = \frac{2p}{f} = 0,02 \text{ с},$$

где $2p = 1$ - число периодов напряжения в течение времени рабочего цикла.

Механическая и магнитная подсистемы связаны функциональной зависимостью электромагнитного усилия $f_{\text{эм1}} = f(i_1, x_1)$ и $f_{\text{эм2}} = f(i_2, x_1)$ от величины протекающего по обмотке тока i_1, i_2 и координаты положения бойка x_1 , а электрическая и магнитная подсистемы – функциональной зависимостью величины потокосцепления $\Psi_1 = f(i_1, x_1)$ и $\Psi_2 = f(i_2, x_1)$.

Связь электрической и магнитной подсистем описывается уравнением электрического равновесия

$$u_1(t) = i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1(i_1, x_1)}{dt}, \quad (1)$$

$$u_2(t) = i_2 r_2 + \frac{d\Psi_2(i_2, x_1)}{dt}, \quad (2)$$

где $u_1(t), u_2(t)$ - напряжение на обмотке первой и второй катушки; r_1, r_2 - активное сопротивление обмотки первой и второй катушки.

В соответствии с установленными связями в конструкции ударного узла (рис. 1) и действующими в системе обобщенными силами на рис. 2 представлена расчетная динамическая схема механической колебательной системы.

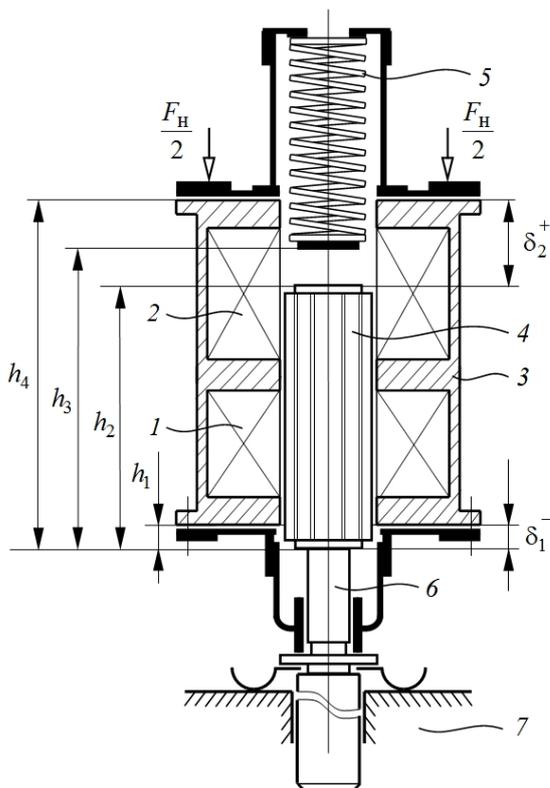


Рис. 1. Электромагнитный ударный узел

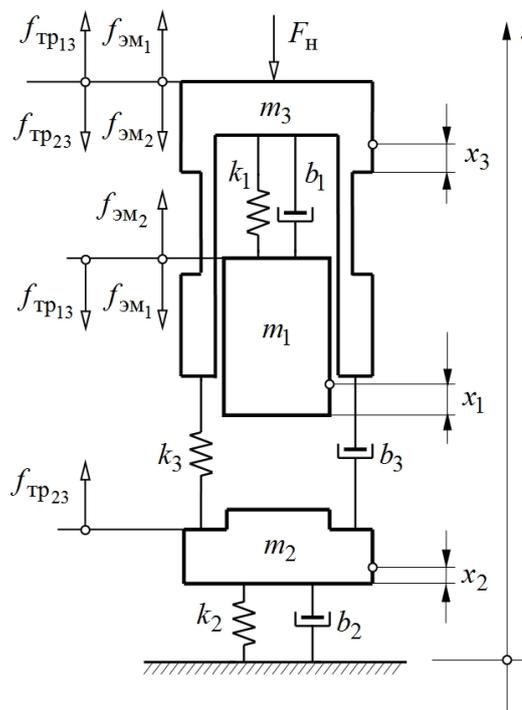


Рис. 2. Расчетная динамическая схема механической системы

Уравнения движения механической системы получим на основании уравнения Лагранжа второго рода [22]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial \Pi}{\partial x_i} - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i} + Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где T - кинетическая энергия системы; Π - потенциальная энергия системы; Φ - диссипативная функция системы (функция Релея); Q_i - обобщенные силы внешних воздействий, соответствующие i -й обобщенной координате.

Положение устойчивого статического равновесия колебательной механической системы принимаем за начало отсчета и за нулевой уровень потенциальной энергии. В качестве обобщенных координат, определяющих положение механической системы в пространстве, принимаем линейные перемещения центра масс бойка x_1 массой m_1 , рабочего инструмента x_2 массой m_2 , электропривода x_3 массой m_3 . Под действием внешних периодических сил $f_{ЭМ1} = f(i_1, x_1)$ и $f_{ЭМ2} = f(i_2, x_1)$ в механической системе возникают сложные механические колебания.

Рассматривая реальный процесс движения, как результат совместного действия сложных колебаний механической системы и периодических ударных импульсов сил, авторами разработана обобщенная модель динамического состояния электромеханической системы (рис. 1) [23]. Построение структурной модели динамики ударного узла и разработка алгоритма расчета производились в соответствии с имеющимися рекомендациями [24]. Решение полевой части задачи выполнялось при использовании стандартной программы конечно-элементного моделирования магнитного поля [25-27], с помощью которой определялся массив значений опорных точек статических параметров потокоцепления $\Psi_1 = f(i_1, x_1)$, $\Psi_2 = f(i_2, x_1)$ и электромагнитного усилия $f_{ЭМ1} = f(i_1, x_1)$, $f_{ЭМ2} = f(i_2, x_1)$. Составляющие тока потерь $i_{П1}$ и $i_{П2}$ учтены в соответствии с рекомендациями [28-29].

Результаты анализа динамической модели

Реализация математической модели выполнялась методами и средствами структурного моделирования в Matlab Simulink. Результаты моделирования в виде временных диаграмм процесса включения модернизированного варианта электромагнитного ударного узла СЦ-2 представлены на рис. 3 [20, 21].

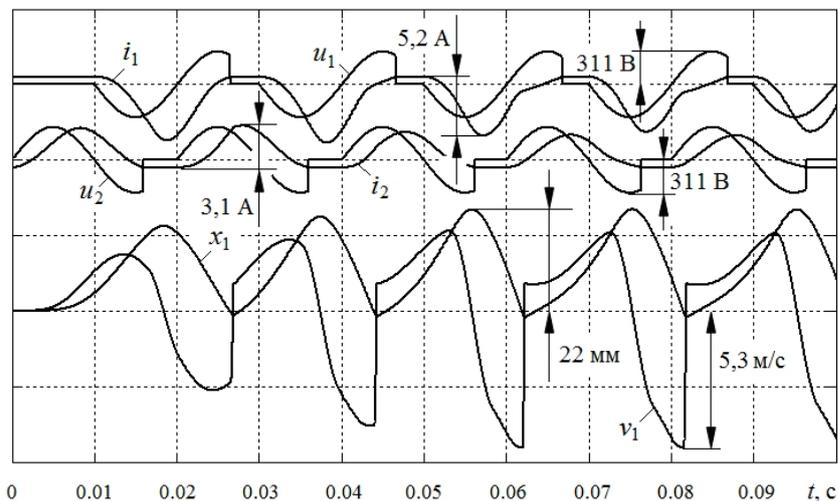


Рис. 3. Временные диаграммы процесса включения ударного узла

В качестве исходных данных модели использовались следующие параметры ударного узла: $m_1 = 0,394$ кг; $m_2 = 0,32$ кг; $m_3 = 0,39$ кг; $k_1 = 120 \cdot 10^3$ Н/м; $b_1 = 8$ Н·с/м; $k_2 = 12 \cdot 10^6$ Н/м; $b_2 = 0$; $k_3 = 16 \cdot 10^3$ Н/м; $b_3 = 35$ Н·с/м; $f_{тр13} = 3$ Н; $f_{тр23} = 8$ Н; $F_H = 350$ Н. Магнитопровод выполнен из электротехнической стали, близкой по магнитным свойствам к стали марки 1212. Боек – цельнометаллический из конструкционной стали 40 ХН. Количество витков катушки рабочего хода $w_1 = 1290$, активное сопротивление $r_1 = 12,9$ Ом. Количество витков катушки обратного хода $w_2 = 1540$, активное сопротивление $r_2 = 23,2$ Ом. Действующее значение напряжения однофазного источника $U = 220$ В.

Диаграммы, представленные на рис. 3, отражают процесс включения двухкатушечного ударного узла с пружинным реверсом бойка.

Таблица

Сравнение результатов моделирования

Значения показателя	$A_{уд}$, Дж	I , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт	к.п.д., %	$\cos \varphi$
Расчет:	5,6	4,42	737	280	0,38	0,44
Эксперимент:	5,8	4,68	783	290	0,37	0,42

Относительно небольшое расхождение между количественными результатами расчетов и экспериментальными данными, которое составляет 4 ... 6 %, позволяет сделать вывод об адекватности модели.

Относительно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных показателей во многом зависит от точности учета аналогов механических характеристики модели, в особенности демпфирующих свойств упругих связей и сил сухого трения скольжения, которыми большинство разработчиков пренебрегают с целью упрощения модели.

Выводы

Получены диаграммы, отражающие процесс включения двухкатушечного ударного узла синхронной электромагнитной машины с пружинным реверсом бойка, обеспечивающие широкие возможности для всестороннего анализа взаимосвязанных электромеханических процессов при возбуждении периодических ударных импульсов сил и взаимодействии с деформируемой средой.

Выполнена верификация математической модели сравнением расчетных значений выходных показателей с результатами, полученными на физической модели. Разница между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 4... 6 %, что общепринято для инженерной практики.

Список литературы

1. Импульсные линейные электромагнитные двигатели / В.И. Мошкин, В.Ю. Нейман, Г.Г. Угаров. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2010. – 220 с.
2. Нейман В.Ю. Интегрированные линейные электромагнитные двигатели для импульсных технологий // Электротехника. – 2003. – № 9. – С. 25–30.
3. Угаров Г.Г., Нейман В.Ю. Анализ показателей электромагнитных ударных машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1996. – № 2. – С. 72–80.
4. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Певчев В.П. Электромагнитные привода для импульсных и виброимпульсных технологий // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 1. – С. 72–75.
5. Ряшенцев Н.П., Угаров Г.Г., Львицин А.В. Электромагнитные прессы. – Новосибирск: Наука, 1989. – 216 с.
6. Усанов К.М., Угаров Г.Г., Мошкин В.И. Линейный импульсный электромагнитный привод машин с автономным питанием. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2006. – 284 с.
7. Нейман В.Ю. Режимы форсированного аккумулярования магнитной энергии в импульсных линейных электромагнитных двигателях // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2003. – № 1. – С. 105–112.
8. Нейман В.Ю., Петрова А.А. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 47а–50.
9. Угаров Г.Г. Тенденции развития и применения ручных ударных машин с электромеханическим преобразованием энергии / Г.Г. Угаров, В.Ю. Нейман // Известия вузов. Электромеханика. – 2002. – № 2. – С. 37–43.
10. Саттаров Р.Р., Исмагилов Ф.Р. Периодические режимы в электромагнитных вибрационных преобразователях // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 1 (36). – С. 50–55.
11. Ряшенцев Н.П., Тимошенко Е.М., Фролов А.В. Теория, расчет и конструирование электромагнитных машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1970. – 260 с.
12. Нейман В.Ю. К вопросу о рационализации рабочих процессов и выбора конструктивных схем электромагнитных ударных машин // Автоматизированные электромеханические системы: коллективная монография / Новосибирский государственный технический университет; под ред. В.Н. Аносова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 155–169.
13. Нейман В.Ю., Нейман Л.А. Оценка конструктивного совершенства систем принудительного охлаждения синхронных электромагнитных машин ударного действия // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 2. – С. 166–175.

14. *Исмагилов Ф.Р., Саттаров Р.Р., Гумерова М.Б.* Математическое моделирование динамических режимов электромагнитных демпфирующих элементов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – Т. 14, № 5 (40). – С. 86–90.
15. *Нейман В.Ю.* Анализ процессов энергопреобразования линейных электромагнитных машин с предварительным аккумулярованием магнитной энергии в динамических режимах // Электротехника. – 2003. – № 2. – С. 30–36.
16. *Татевосян А.А., Татевосян А.С.* Расчет оптимальных параметров электромагнитного привода колебательного движения // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, №4. – С.121–132.
17. *Мошкин В.И.* Сравнение магнитных циклов импульсного линейного электромагнитного двигателя с учетом мощности потерь в его обмотке // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 4. – С. 93–96.
18. *Нейман В.Ю., Нейман Л.А.* Повышение точности аналитического расчета радиальных сил одностороннего магнитного притяжения некоаксиальных элементов магнитопровода // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 1 (58). – С. 246–256.
19. *Нейман В.Ю., Нейман Л.А., Петрова А.А.* Влияние соотношений главных размеров электромагнитов на значения конструктивного фактора и показателя экономичности // Автоматизированные электромеханические системы: сборник научных трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – С. 177–187.
20. Электропривод с линейными электромагнитными двигателями / Н.П. Ряшенцев, Г.Г. Угаров, В.Н. Федонин, А.Т. Малов. – Новосибирск: Наука, 1981. – 150 с.
21. *Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н.* Электромагнитный привод линейных машин. – Новосибирск: Наука, 1985. – 153 с.
22. *Добронравов В.В., Никитин Н.Н.* Курс теоретической механики. – М.: Высшая школа, 1983. – 576 с.
23. *Нейман Л.А., Щуров Н.И., Обухов К.А.* Математическая модель динамики двухкатушечной синхронной электромагнитной машины ударного действия с пружинным реверсом бойка // Омский научный вестник. – 2016. – № 6 (150). – С. 100–104.
24. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Динамическая модель электромагнитного привода колебательного движения для систем генерирования низкочастотных вибраций // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2015. – № 3 (28). – С. 75–87.
25. *Буль О.Б.* Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие. – М.: Академия, 2005. – 336 с.
26. *Татевосян А.С., Татевосян А.А.* Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ ELCUT: учебное пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 96 с.
27. *Петрова А.А., Нейман В.Ю.* Моделирование в FEMM магнитного поля для расчета тяговых характеристик электромагнитных двигателей постоянного тока // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 2. – С. 101–108.
28. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Моделирование процессов в электромагнитном вибрационном преобразователе с потерями энергии в магнитопроводе // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 73–78.
29. *Нейман Л.А., Нейман В.Ю.* Моделирование динамических процессов в электромагнитных преобразователях энергии для систем генерирования силовых воздействий и низкочастотных вибраций // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326, № 4. – С. 154–162.

**ANALYSIS OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SYNCHRONOUS
ELECTROMAGNETIC MACHINES SHOCK ACTIONS
WITH REVERSING THE SPRINGS PEEN**

Neyman L.A., Ph.D. (Engineering), Assistant Professor, e-mail: neyman@ngs.ru
Schurov N.I., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: ni_schurov@mail.ru

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

Abstract

Electromechanical vibration shock system, the basic structural unit of which is an electromagnetic actuator, used in various industries for many technological processes and production. A promising area of research in this area is to improve the machinery with high energy impact on the basis of the electromagnetic actuator of the vibrational motion, working in near-resonance, and resonant modes with a frequency up to 100 Hz. Improving the efficiency of the electric drive is possible only if a rational choice of interrelated parameters of the electrical, magnetic and mechanical sub-systems for the analysis of which is still at the design stage there is a need for dynamic analysis. The analysis of the dynamic characteristics of a synchronous electromagnetic percussion machine with spring reversing the striker when excited periodic shock pulse strength and interaction with deformable media. An algorithm for the calculation and considered an example of numerical implementation of a mathematical model of the electromagnetic shock assembly containing multimass oscillating system with elastic links and receiving power from the power frequency voltage.

Keywords

stroke unit, a synchronous electromagnetic machine, mathematical model, the mechanical oscillation system, elastic ties, Lagrange equations

УДК 621.98.044.7:621.757.002

**ШТАМП ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ
«ВЫТЯЖКА-ОБРЕЗКА ПРИПУСКА»**

*И.А. БЕЛЯЕВА, канд. техн. наук, доцент
В.А. ГЛУЩЕНКОВ, канд. техн. наук, профессор
А.М. ПЫЛЬЦЫН, ведущий инженер
А.Ю. КОСОЛАПОВА, магистрант
(Самарский университет, г. Самара)*

Беляева И.А. – 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
e-mail: Belyaeva-ommr@yandex.ru

В статье приводится технологическая схема комбинированной операции «вытяжка – обрезка припуска», осуществляемой воздействием на обрабатываемую заготовку несколькими источниками нагружения (статическими и динамическими). На протяжении действия статического нагружения осуществляют однократное динамическое воздействие. В качестве динамического воздействия рассматривается использование импульсных магнитных полей. Приведена конструкция штампа, позволяющая реализовывать предложенную комбинированную операцию. Дается краткое описание приведенной схемы, необходимое для понимания нового технического решения, его особенностей и преимуществ.

Ключевые слова: листовая штамповка, комбинированная операция, магнитно – импульсное нагружение, вытяжка, обрезка припуска, инструментальный штамп.

Введение

Большое количество деталей в машиностроении получают с использованием операции вытяжки, это различные цилиндрические или прямоугольные коробочки от аэрокосмического назначения до товаров народного потребления [1,2].

В процессе вытяжки образуется неровный край вытянутых деталей: из-за анизотропии свойств листовых заготовок; погрешностей изготовления и сборки деталей штампа, вызывающих неравномерность зазора между пуансоном и матрицей; несимметричностью приложения усилий прижима или вытяжки; сложности геометрии детали и других конструктивно – технологических факторов детали, штампа, технологии. И поэтому при определении размеров исходной заготовки в расчёты закладывают припуск, подлежащий после выполнения операции вытяжки обрезке. Вот почему, для выполнения технических требований, т.е. соответствия детали чертёжной документации, применяется дополнительная операция – обрезка припуска [3-5].

Существуют различные технологии обрезки припуска (обрезка секторами клинового штампа, обрезка в штампе с планетарно движущейся матрицей, обрезка сдвигом по Я.В. Боровинскому и др.) но, к сожалению, ни одна из них не является совершенной: либо весьма трудоёмки, либо не обеспечивают требуемое качество поверхности разделения. А иногда для её выполнения создается весьма сложное технологическое оснащение.

Кроме того, с экономической точки зрения, такая двухоперационная технология (вытяжки, обрезки припуска) получения готового изделия является не оптимальной, т.к. увели-

чивает трудоемкость процесса, длительность производственного цикла, необходимость использования двух комплектов оснащения.

Предлагаемое техническое решение

Для совмещения операций вытяжки и обрезки припуска была предложена комбинированная технология, сочетающая статическое и динамическое нагружения [6-8]. Под действием статического нагружения осуществляется операция вытяжки, а под действием динамического – обрезка припуска (рис. 1).

Т.к. время действия динамического воздействия составляет микросекунды, то обрезка припуска осуществляется без остановки пресса и без разгрузки материала вытянутой детали.

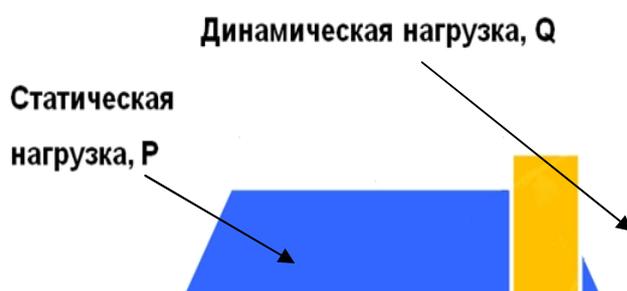


Рис. 1. Циклограмма комбинированной технологии

Схема такого процесса приведена на рисунке 2.

В качестве динамической нагрузки предлагается использовать импульсное магнитное поле [9,10].

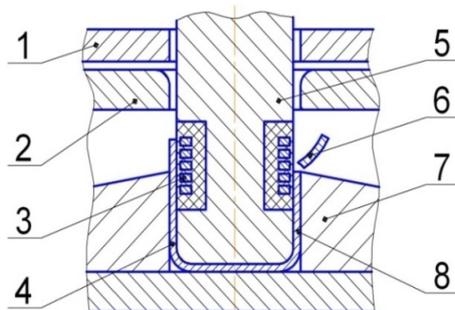


Рис. 2. Схема процесса вытяжки и обрезки припуска:

- 1 – прижим; 2 – вытяжная матрица; 3 – встроенный индуктор;
- 4 – заготовка после вытяжки; 5 – пуансон; 6 – обрезанный припуск;
- 7 – обрезная матрица; 8 – готовая деталь

Реализация комбинированной технологии стала возможна благодаря размещению в пуансоне (5) индуктора (3), соединенного с магнитно-импульсной установкой, и составной матрице (7), имеющей вытяжную (2) и обрезную части (7).

В конце рабочего хода вытяжного пуансона, когда из листовой заготовки полностью произведена вытяжка детали на заданную глубину и припуск находится между режущей кромкой обрезной матрицы и витками индуктора, осуществляется разряд батареи конденсаторов на индуктор. В результате бесконтактного воздействия возникших при этом электродинамических сил происходит обрезка припуска. При обратном ходе пресса происходит съем готовой детали с пуансона.

Преимуществами этого динамического метода нагружения являются: бесконтактное воздействие и микро или миллисекундный диапазон приложения нагрузки, обеспечивающих требуемое качество поверхности разделения.

Штамп для реализации комбинированной технологии

В конструкцию обычного инструментального штампа для реализации операции вытяжки внесены следующие изменения:

- Пуансон выполнен ступенчатой формы: нижняя-рабочая – реализует процесс вытяжки, а над ней размещаются витки индуктора, выводы которого проходят через специально профрезерованный паз.

- Матрица выполнена из двух частей: вытяжной (10) и обрезной (11). Спроектированный штамп изготовлен и опробован в лабораторных условиях. Индуктор подключался к магнитно – импульсной установке МИУ-10[11-14]. На рисунке 3 приведен чертеж штампа для реализации комбинированной технологии[15].

На рисунке 4 показан его внешний вид, а на рисунке 5 внешний вид полученных деталей.

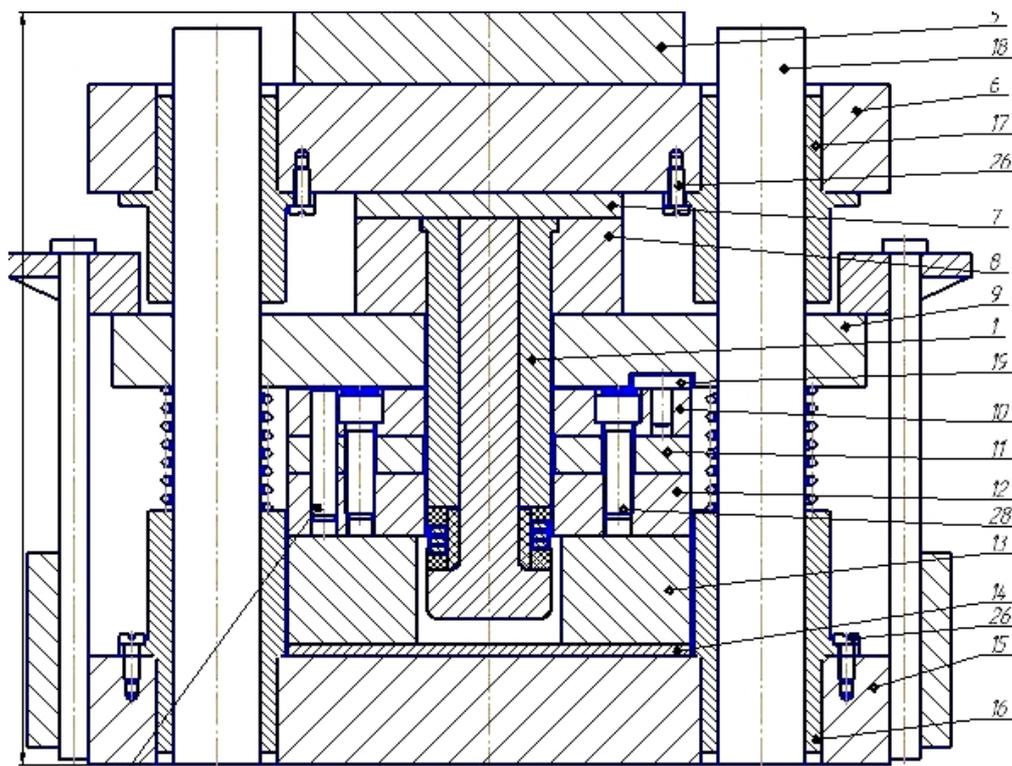


Рис. 3. Сборочный чертеж штампа для операции «вытяжка – обрезка припуска»:

- 1 – пуансон; 5 – подпятник; 6 – плита верхняя; 7 – плитка подкладная;
8 – пуансонодержатель; 9 – прижим; 10 – матрица вытяжная; 11 – нож разрезной;
12 – матрица обрезная; 13 – проставка; 14 – плитка подкладная; 15 – плита нижняя;
16 – втулка направляющая; 17 – втулка направляющая; 18 – колонка; 19 – упор;
26 – винты М6; 28 – винты М12



Рис. 4. Внешний вид штампа для реализации комбинированной технологии «вытяжка – обрезка припуска»



Рис. 5. Внешний вид детали: после операции вытяжки, без обрезки припуска – слева, и с магнитно-импульсной обрезкой - справа

Вывод

Разработка комбинированных технологий с использованием статического и динамического (магнитно-импульсного) нагружения является новым научным направлением.

Новая комбинированная технология повышает качество готовой продукции, технико – экономические показатели производственного процесса, снижают себестоимость готового изделия.

Список литературы

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
2. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.
3. Билибин К.И., Григорьев В.П. Холодная штамповка: учебное пособие по курсу «Технология электронных средств». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 68 с.
4. Боровинский Я.В. Разработка и исследование процесса резки полых заготовок сдвигом: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.03.05 / Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина. – Л., 1975. – 19 с.
5. Зуев Р.Н., Шпунькин Н.Ф. Вытяжка облицовочных деталей кузова автомобиля. – М.: МГТУ «МАМИ», 2006. – 152 с.
6. Assembly of parts by flanging method combining static and dynamic loading / V.A. Glushchenkov, M.V. Hardin, O. Al-Erhayem, I.A. Belyaeva // Proceedings of the JOM-17 Conference. – Helsingor, Denmark, 5–8 May 2013. – Helsingor, 2013. – P. 1–7.
7. Сапожникова Ю.А., Черников Д.Г. Гибридные и комбинированные технологии в процессах обработки металлов давлением // Труды МАИ. – 2011. – № 45. – С. 1–11.
8. Глушченков В.А., Беляева И.А. Последовательность компьютерного моделирования комбинированных (статико-динамических) технологий машиностроения // Известия Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 76–81.
9. Беляева И.А. Математическое моделирование комбинированных технологий // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – № 6 (30). – С. 53–59.

10. *Kyrlayev N.V., Stupnikov V.P.* The effect of magnetic-pulse processing on frame and durability of aluminum alloys // Proceeding of the 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology KORUS 2005, Novosibirsk, 26 June – 2 July 2005. – Novosibirsk: NSTU, 2005. – Vol. 1. – P. 484–486.
11. *Стрижаков Е.Л., Нескромный С.В., Минько Д.В.* Разрядно-импульсная обработка материалов: монография. – Ростов н/Д.: ДГТУ, 2016. – 201 с.
12. *Глушечков В.А.* Индукторы для магнитно-импульсной обработки материалов : учебное пособие. – Самара: Учебная литература, 2013. – 146 с.
13. *Юсупов Р.Ю., Глушечков В.А.* Энергетические установки для магнитно-импульсной обработки материалов: монография. – Самара: Федоров, 2013. – 128 с.
14. Патент 75598 Российская Федерация, В 21 D 26/14. Установка для магнитно-импульсной обработки металлов / Р.Ю. Юсупов, В.А. Глушечков.; заявитель и патентообладатель СГАУ и ООО «НТФ «Заряд». – № 2008109607/22; опубл. 20.08.2008, Бюл. № 23. – 3 с.
15. Патент 156540 Российская Федерация. Штмп комбинированный для вытяжки-обрезки припуска / В.А. Глушечков, И.А. Беляева; заявитель и патентообладатель Самарский университет. – № 2015127817; заявл. 11.08.15; опубл. 15.10.15, Бюл. № 23. – 2 с.

STAMP FOR THE IMPLEMENTATION OF COMBINED TECHNOLOGY "HOOD-TRIM THE SEAM ALLOWANCE"

Belyaeva I.A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: Belyaeva-ommr@yandex.ru
Glushenkov V.A., Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: vgl@ssau.ru
Pyltsin A.M., Principal engineer, e-mail: staub84@mail.ru
Kosolapova A.Y., Master's Degree student, e-mail: nastas941104@mail.ru

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, 34 Moskovskoye Shosse, Samara, 443086, Russian Federation

Abstract

The paper presents technological scheme of the combined operations undertaken by the impact on the workpiece multiple sources of loading (static and dynamic).

For the duration of the static load implement a single dynamic effect. As dynamic effects are considered using pulsed magnetic fields.

The design of the stamp allows you to implement the proposed combined operation.

A brief description is given of the schema necessary for understanding of a new technical solution, its features and benefits.

Keywords

stamping, combined operation, magnetic-impulse loading, trim the seam allowance, draw, tool stamp

УДК 621.793:621.785.532

**КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ АЗОТИРОВАННЫХ СЛОЕВ
В ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ,
ПОДВЕРГНУТЫХ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКЕ***М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, доктор техн. наук, доцент
А.Н. ГРИГОРЧИК, с.н.с.**В.А. КУКАРЕКО, доктор физ.-мат. наук, доцент
(Объединенный институт машиностроения
НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)*

Кукареко В.А. – 220072, г. Минск, ул. Академическая, 12,
Государственное научное учреждение "Объединенный институт машиностроения
Национальной академии наук Беларуси",
e-mail: v_kukareko@mail.ru

Исследовано структурно-фазовое состояние газотермического покрытия из высокохромистой мартенситной стали 40X13 в исходном состоянии и после ионно-лучевого азотирования при 870 К. Установлено, что ионно-лучевая обработка азотом приводит к формированию в поверхностных слоях газотермических покрытий модифицированных слоев переменной глубины, повторяющих рельеф напыленных частиц. Сделано заключение, что оксидные прослойки, расположенные на границах напыленных частиц, являются барьерами для диффузии азота в глубокие слои покрытия, что приводит к появлению неоднородности распределения азота в поверхностных слоях покрытия и разбросу в значениях микротвердости.

Ключевые слова: газотермическое покрытие, ионно-лучевое азотирование, концентрация азота, оксидные прослойки

Введение

Около 85-90 % машин и механизмов выходит из строя по причине износа деталей [1]. В свою очередь на их ремонт и обслуживание тратится средств в несколько раз больше первоначальной стоимости. В связи с этим, аддитивные технологии позволяющие создавать и восстанавливать детали машин имеют большую практическую значимость. Одной из перспективных технологий изготовления и восстановления изношенных поверхностей является гиперзвуковое газотермическое напыление покрытий. К отличительным особенностям гиперзвуковой металлизации можно отнести высокую скорость распыления частиц ($\approx 400-500$ м/с), обеспечивающую формирование плотных покрытий с низкой пористостью ($\approx 3-5$ об.%). Вместе с тем, износостойкость газотермических покрытий существенно ниже, чем монолитных материалов. Для повышения износостойкости газотермических покрытий перспективно использование методов инженерии поверхности. Современными и интенсивно развивающимися методами, позволяющими существенно повысить износостойкость и микротвердость поверхностных слоев металлических материалов, являются способы ионного азотирования. В частности, метод низкоэнергетического ионно-лучевого азотирования основан на обработке материалов пучками ионов азота с энергией $\sim 10^3$ эВ и с большими плотностями ионного тока ($\sim 1 \div 10$ мА/см²). При этом в поверхностном слое обрабатываемого материала развиваются процессы радиационно-стимулированной диффузии, обеспечивающей высокую скорость и глубину насыщения покрытий атомами азота, придающими поверхностным слоям высокую микротвердость и износостойкость [2]. Вместе с тем, гиперзвуковые газотермические

покрытия имеют существенно отличающееся от монолитных материалов структурно-фазовое состояние. В частности, покрытия содержат оксидные прослойки ($\approx 20-25$ об. %), поры, метастабильные фазы и т.д. Влияние указанных факторов, и, в особенности, оксидных прослоек, на диффузионный перенос легирующей примеси при ионно-лучевой обработке систематически не изучено. В связи с этим, представляло интерес провести исследование влияния оксидных прослоек, содержащихся на границах напыленных частиц покрытия из мартенситной стали 40X13, на диффузионный перенос атомов азота при ионно-лучевой обработке.

Материалы и методики исследований

Объектом исследований являлось гиперзвуковое газотермическое покрытие из стали 40X13, напыленное с помощью установки АДМ-10, разработанной в ОИМ НАН Беларуси [3]. Покрытие напылялось на пластины ($100 \times 50 \times 6$ мм), изготовленные из стали 45. С целью повышения прочности сцепления покрытия с основой наносился промежуточный слой напылением проволоки из сплава X20H80. Толщина напыленных покрытий составляла $\approx 0,7 \div 0,8$ мм.

Напыленное покрытие для удаления окисленного поверхностного слоя подвергалось механической шлифовке на глубину $\approx 0,10 - 0,15$ мм с финишной обработкой на абразивной бумаге (P1200) с размером зерна 10-14 мкм.

Ионно-лучевое азотирование образцов покрытия ($10 \times 6 \times 5$ мм) осуществлялось на экспериментальной установке ФТИ НАН Беларуси с помощью ионного источника УВН-2М с замкнутым дрейфом электронов [4]. Пучок содержит около 70 % ионов молекулярного азота и 30% ионов атомарного азота. Имплантация проводилась в течение 3-х часов при энергии ионов 1-3 кэВ и плотности ионного тока 2 mA/cm^2 . Флюенс легирования образцов покрытия составлял $\sim 3-4 \times 10^{19} \text{ см}^{-2}$. Температура азотирования покрытий составляла – 870 К.

Травление образцов газотермического покрытия для металлографических исследований осуществлялось в реактиве Куррана (50 мл HCl; 10 г CuSO₄; 50 мл H₂O). Металлографические исследования проводились на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ и сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMH. Микроанализ проводился с помощью энергодисперсионного спектрометра X-Max 150 производства Oxford Instruments с программным обеспечением AZtec Automated.

Исследование фазового состояния гиперзвуковых газотермических покрытий из стали 40X13, проводилось на дифрактометре ДРОН-2.0 в монохроматизированном кобальтовом (CoK α) излучении при напряжении 30 кВ и анодном токе 10 мА. Расшифровка рентгенограмм осуществлялось при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Измерения микротвердости и твердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор P=10 г и 10 кг, соответственно.

Результаты и обсуждение

Фазовый состав напыленного покрытия из стали 40X13 в исходном состоянии включает в себя: α -Fe, γ -Fe, оксиды Fe₃O₄ и FeO (рисунок 1 а). Суммарное содержание оксидов в покрытии достигает ≈ 25 об. %. Газотермическое покрытие представляет собой многослойный композит, содержащий перемежающиеся металлические и оксидные прослойки (рисунок 2). Металлические прослойки покрытия состоят из крупных и мелких частиц, а также конгломератов из сплавленных частиц (рисунок 2 а). Внутри конгломератов сплавленные частицы не разделены сплошными оксидными прослойками (рисунок 2 а).

Металлические частицы и конгломераты напыленного слоя соединены между собой мостиками сплавления. Твердость покрытия составляет ≈ 600 HV 10.

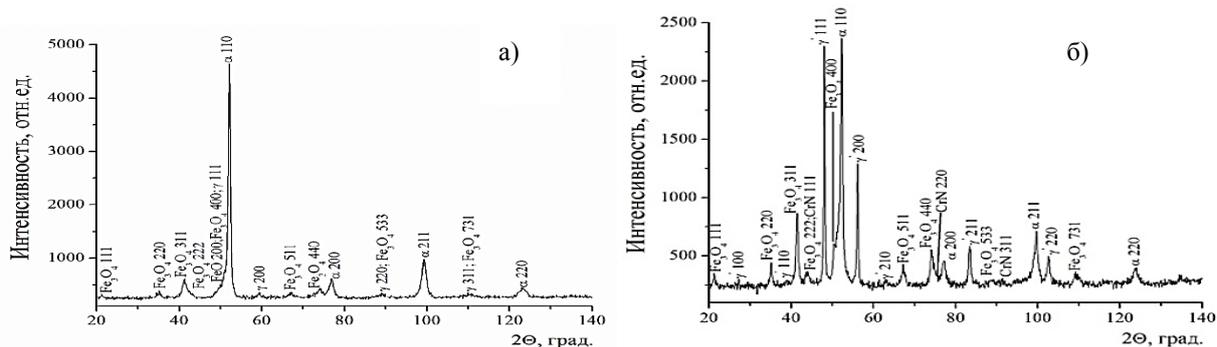


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_{α}) от поверхностных слоев покрытия из стали 40X13, после различных режимов обработки: а – исходное состояние; б – ионно-лучевое азотирование при 870 К

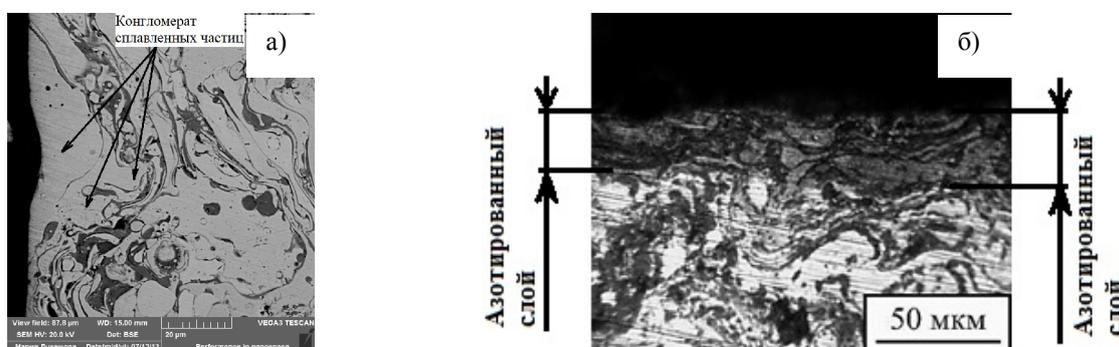


Рис. 2. Характерные микроструктуры газотермического покрытия из стали 40X13: а – исходное состояние; б – после ионно-лучевого азотирования при 870 К (3 часа)

Ионно-лучевое азотирование приводит к существенному изменению структуры и фазового состава покрытия. В частности, после ионно-лучевой обработки покрытия при 870 К формируется модифицированный азотом слой переменной глубины от 15–20 до 55 мкм (рисунок 2 б), содержащий фазы: α -Fe, γ -(Fe, Cr) $_4$ N, CrN, Fe $_3$ O $_4$ (рисунок 1 б). Нижняя граница азотированного слоя совпадает с границами напыленных частиц покрытия, что свидетельствует о наличии на них барьеров для диффузии атомов азота [5]. Такими барьерами в газотермическом покрытии могут выступать оксидные прослойки, состоящие преимущественно из Fe $_3$ O $_4$, который сохраняется после ионно-лучевого азотирования. Микротвердость азотированного слоя изменяется в широком диапазоне, и составляет 800 – 1100 HV 0,01.

С помощью метода энергодисперсионной спектроскопии на приборе TESCAN VEGA 3 LMN, проводилось исследование распределения азота в покрытии из стали 40X13, прошедшего ионно-лучевую обработку при 870 К. Полученные распределения азота по глубине покрытия представлены на рисунке 3. Из приведенного на рисунке 3 а, распределения азота в зоне конгломерата сплавленных частиц относительно небольшой толщины можно видеть, что граница азотированного слоя совпадает с границей напыленного конгломерата частиц (глубина ≈ 29 мкм). При этом оксидная прослойка, расположенная на глубине ≈ 10 мкм, не является непроницаемым препятствием для диффузии атомов азота, что связано с наличием смежных с оксидной прослойкой зон сплавления, обеспечивающих диффузионный перенос атомов азота в конгломерате при ионно-лучевой обработке. На рисунке 3 б приведена кривая распределения азота в конгломерате большой толщины, где

содержание азота в $\approx 1,2 - 1,5$ раза ниже, чем в конгломерате с относительно небольшим подповерхностным объемом (рисунок 3 а).

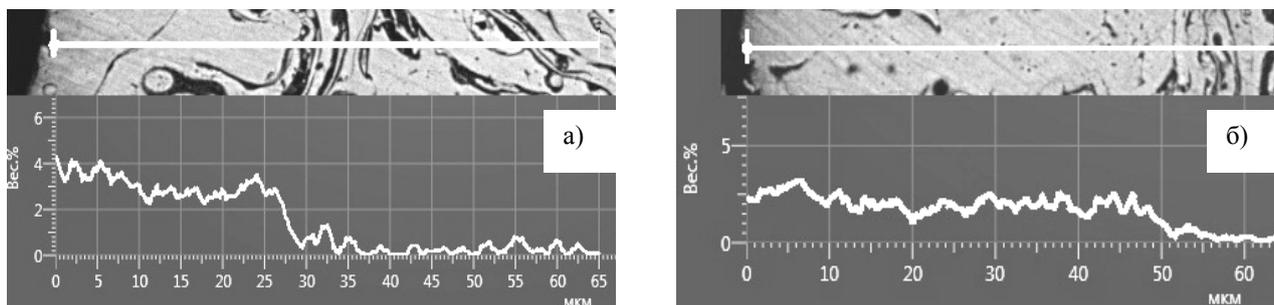


Рис.3. Распределение азота по глубине газотермического покрытия из стали 40X13, прошедшего ионно-лучевое азотирование при 870 К (3 часа):

- а – оксидная пленка располагается на глубине ≈ 29 мкм от поверхности покрытия;
- б – оксидная пленка располагается на глубине ≈ 52 мкм от поверхности покрытия

Таким образом, оксидные прослойки на границах напыленных частиц могут выступать в качестве непроницаемых или частично проницаемых барьеров для диффузии азота. В свою очередь наличие непроницаемых для диффузии оксидных прослоек приводит к появлению концентрационной неоднородности распределения азота по поверхности и глубине покрытия, прошедшего ионно-лучевую обработку (рисунок 3 а, б). Проведенные ранее исследования [5], направленные на изучение распределения азота в подвергнутом ионно-лучевому азотированию газотермическом покрытии из аустенитной стали 06X19N9T также показали, что напыленные частицы, имеющие пониженный подповерхностный объем, имеют более высокую концентрацию азота и значения микротвердости по сравнению с крупными частицами и конгломератами сплавленных частиц, имеющими большой подповерхностный объем. На рисунке 4 приведена схема, иллюстрирующая указанное явление. Можно видеть, что напыленные частицы 1 и 2, имеющие одинаковую площадь поверхности и различающиеся величиной подповерхностного объема, после облучения одинаковой дозой ионов азота будут характеризоваться существенно различной концентрацией легирующей примеси. При этом наиболее высокая концентрация азота достигается в тонких напыленных металлических частицах. Таким образом, концентрационная неоднородность содержания атомов азота в подвергнутом ионному азотированию газотермических покрытиях, будет приводить к пятнистому распределению легирующей примеси и значений микротвердости в поверхностных слоях покрытия.

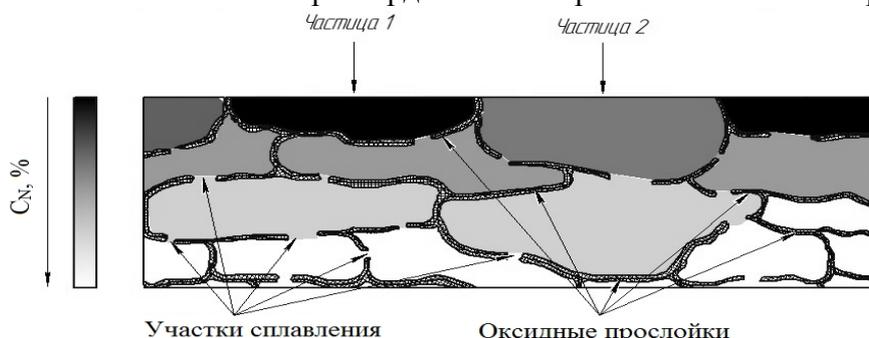


Рис.4. Схема имплантированного ионами азота участка поверхностного слоя газотермического покрытия с частицами различного размера (частицы более темного цвета имеют повышенную концентрацию атомов азота) [5]

Указанное различие в концентрации атомов азота в напыленных частицах покрытия может оказывать существенное влияние на их фазовый состав и свойства. В частности, микротвердость напыленной частицы из стали 40X13 с относительно небольшим подповерхностным объемом (рисунок 5 а) составляет 1100 HV 0,01, в то время как микротвердость более крупной частицы (рисунок 5 б) – 830 HV 0,01, что объясняет широкий диапазон варьирования значений микротвердости азотированного поверхностного слоя покрытия. Подобные результаты были получены при исследовании обработанного ионами азота покрытия из аустенитной стали 06X19H9T.

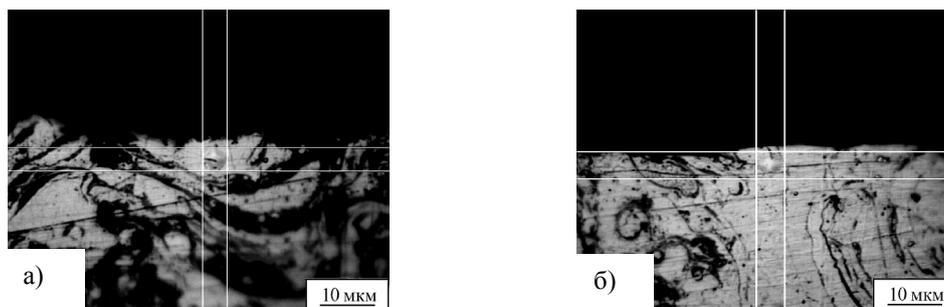


Рис. 5. Микроструктуры обработанного ионами азота ($T=870$ К, 3 часа) газотермического покрытия из стали 40X13 с нанесенными отпечатками Виккерса:

а – частица небольшого подповерхностного объема; б – частица с большим подповерхностным объемом

Указанное явление барьерного действия оксидных прослоек на диффузионный перенос атомов азота при ионном азотировании может быть использовано для управления свойствами ионно-модифицированных слоев. Так, в частности, в целях получения покрытий с относительно глубокими азотированными слоями необходимо проводить распыление при низком давлении распыляющего газа, обеспечивающего формирование покрытий из крупных частиц (≈ 30 -50 мкм). В случае напыления мелких частиц (≈ 5 -20 мкм) при последующем азотировании формируются тонкие азотированные слои с повышенным содержанием азота и значениями микротвердости.

Выводы

Исследовано структурно-фазовое состояние газотермического покрытия из мартенситной стали 40X13 в исходном состоянии и после ионно-лучевого азотирования. Показано, что в результате ионно-лучевого азотирования при 870 К в газотермических покрытиях формируются азотированные слои переменной глубины (от 15 до 55 мкм), содержащие нитриды $\gamma'-(Fe, Cr)_4N$ и CrN, а также оксид Fe_3O_4 . Установлено, что переменная глубина азотированного слоя связана с наличием на границах напыленных частиц покрытия, непроницаемых для диффузии азота оксидных прослоек. При этом в частицах с различным подповерхностным объемом будет регистрироваться различная концентрация азота и значения микротвердости.

Список литературы

1. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. Пособие / Н.Е. Денисова и др.; под общ. ред. Н.Е. Денисовой. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. – 248 с.
2. Структурно-фазовое состояние и износостойкость в условиях граничного трения обработанных ионами азота газотермических покрытий из сталей различных классов / В.А.

Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Трение и износ. – 2015. – Т. 36, № 6. – С. 661–670.

3. Белоцерковский М.А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. – Минск: Технопринт, 2004. – 200 с.

4. Белый А.В., Кукареко В.А., Патюк А. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 244 с.

5. Особенности формирования модифицированного азотом слоя при ионно-лучевой обработке гиперзвукового газотермического покрытия из аустенитной стали / А.Н. Григорчик, В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2016. – № 7. – С. 41–46.

CONCENTRATION INHOMOGENEITY OF THE NITRIDING LAYERS IN THERMAL SPRAYED COATINGS SUBJECTED ION-BEAM TREATMENT

Belotserkovskii M.A., D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: mbelotser@gmail.com

Grigorchik A.N., Senior Researcher, e-mail: Grigorchik_a_n@mail.ru

Kukareko V.A., D.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor,
e-mail: v_kukareko@mail.ru

The State Scientific Institution “Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”, 12 Akademicheskaya st., Minsk, 220072, Republic of Belarus

Abstract

Structural-phase state of thermal spray coatings from high-chromium martensitic steel 40h13 in the initial state and ion-beam nitriding at 870 K was investigated. It was found that ion-beam treatment nitrogen leads to the formation of modified layers of variable depth repeating the relief of the sprayed particles. Inference, that oxide layers disposed on the boundaries of the sprayed particles are barriers to the diffusion of nitrogen in deep coating layers, that leads both to the concentration inhomogeneity of nitrogen distribution in the surface layers of the coatings and to the scatter in the values of microhardness.

Keywords

thermal spray coating, ion-beam nitriding, concentration nitrogen, oxide layers

УДК 621.771.23.09

**ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ НА УДАРНУЮ
ВЯЗКОСТЬ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ**

*А. Б. МАКСИМОВ, канд. техн. наук, доцент
И. С. ЕРОХИНА, преподаватель
(ФГБОУ ВО «КГМТУ», г. Керчь)*

Максимов А.Б. – 298309, Россия, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82,
Керченский государственный морской технологический университет,
e-mail: aleksandrmsk@yandex.ru

Исследовано влияние схемы предварительной деформации циклическим изгибом на величину ударной вязкости низколегированной стали 09Г2 при испытании на ударный изгиб. Установлено, что, если изгиб при предварительной деформации происходит в той же плоскости, что и изгиб при испытании на ударную вязкость, то снижение ударной вязкости больше, чем если бы эти плоскости были бы перпендикулярны. Это различие объясняется условиями зарождения и распространения трещины в обоих случаях. Если плоскости изгиба совпадают при предварительной деформации и при испытании на ударный изгиб, то зарождение и развитие трещины происходит в областях растяжения и только потом происходит в области сжатия. При взаимно-перпендикулярном расположении этих плоскостей фронт зарождения и распространения трещины происходит в сжатых и растянутых областях. При предварительной деформации циклическим изгибом в приповерхностных слоях образца возникают напряжения сжатия, а в центральной и промежуточной областях – напряжения растяжения. В зависимости от того в какой области будет зарождаться и распространяться трещина при испытании на ударный изгиб будет зависеть величина ударной вязкости.

Ключевые слова: остаточные напряжения, низколегированная сталь, пластический изгиб, ударная вязкость, степень разовой деформации, число циклов изгиба, схема деформации.

Введение

В ряде работ [1-5] показано, что предварительная деформация циклическим изгибом с амплитудой деформации (1-5)% приводит к повышению прочностных свойств (предела текучести и временного сопротивления разрыву) и снижению пластичности и вязкости стали (рис.1). Особенность изгиба состоит в том, что деформация распределена по линейному закону с возрастанием от центра образца к поверхности. Кроме того [6;7] смещение нейтрально линии деформации в сторону сжатых волокон приводит к возрастанию упрочнения в нейтральной части образца. При испытании на ударный изгиб образец подвергается деформации изгибом. В месте концентратора напряжений (надрезу) формируется трещина по ширине образца и распространяется на расстояние толщины образца в месте надреза. Влияние предварительной схемы деформации на показания механических свойств при испытании образцов исследовано в ряде работ [8-11]. Однако, экспериментальных данных о влиянии предварительной циклической деформации изгибом в пластической области на показания ударной вязкости при испытании на ударный изгиб в литературе недостаточно [12].

Целью настоящей работы было исследование влияния предварительного циклического пластического изгиба на изменение ударной вязкости при испытании на ударный изгиб.

Материал и методика исследования

В качестве материала исследования была использована листовая нормализованная сталь 09Г2 толщиной $8 \cdot 10^{-3}$ м. Из горячекатаных листов промышленного производства вырезались заготовки размером $(8 \times 24) \cdot 10^{-3}$ м вдоль и поперек направления прокатки. Заготовки деформировали по схеме чистого изгиба по симметричному циклу по жесткой схеме нагружения. Распределение деформации по сечению образца при изгибе рассчитывали по формуле [13].:

$$\varepsilon_x = \frac{x}{2\rho}, \quad (1)$$

где x – расстояние от нейтральной линии деформации до заданного слоя сечения заготовки, м.; ε_x – деформация слоя заготовки на расстоянии x от нейтральной линии деформации; ρ – радиус изгиба, м.

За амплитуду деформации принимали деформацию в наружных волокнах заготовки. Деформирование проводили при комнатной температуре. В данной работе амплитуда деформации составляла 5% (0,05а.е.). Количество циклов изгиба варьировали от 0 до 15.

Изгиб проводился в плоскости перпендикулярной катанной поверхности листа и осевой линии по длине заготовки. Заготовки вырезались из листов вдоль и поперек направления прокатки. Из деформированных заготовок вырезали образцы для испытания на ударный изгиб. Образцы вырезали вдоль направления длины заготовок. Испытание на ударную вязкость в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 с U-образным надрезом с радиусом $R=2 \cdot 10^{-3}$ м на катанной поверхности листа. Для сравнительной оценки надрез делался на грани ударного образца перпендикулярной катанной поверхности (рис.1). В дальнейшем в первом случае образцы будут называться изготовленными по варианту А, во втором – по варианту Б.

Схемы предварительной деформации циклическим изгибом и изгиба при испытании на ударную вязкость по вариантам А и Б представлены на рис.1 а, б.

Между плоскостями изгиба при предварительной деформации и испытании на ударный изгиб угол $\gamma=90^0$.

Обсуждение результатов

В работе [6] показано, как изменяется твердость по Виккерсу по толщине образца при циклическом изгибе. Установлено, что с увеличением числа циклов изгиба твердость по сечению возрастает от центра образца к поверхности. Характерно, что твердость в центральной части образца также возрастает, вследствие смещения нейтральной линии деформации в сторону сжатых волокон

При изготовлении образцов на ударную вязкость по варианту А в месте надреза снимался поверхностный слой на глубину 2 мм (величина радиуса надреза). При испытании на ударный изгиб трещина образуется в районе надреза и распространяется по толщине образца.

По варианту А образцы при предварительном циклическом изгибе и при испытании на ударный изгиб изгибались в одной плоскости: эта плоскость расположена вдоль длины образца и перпендикулярно его поверхности.

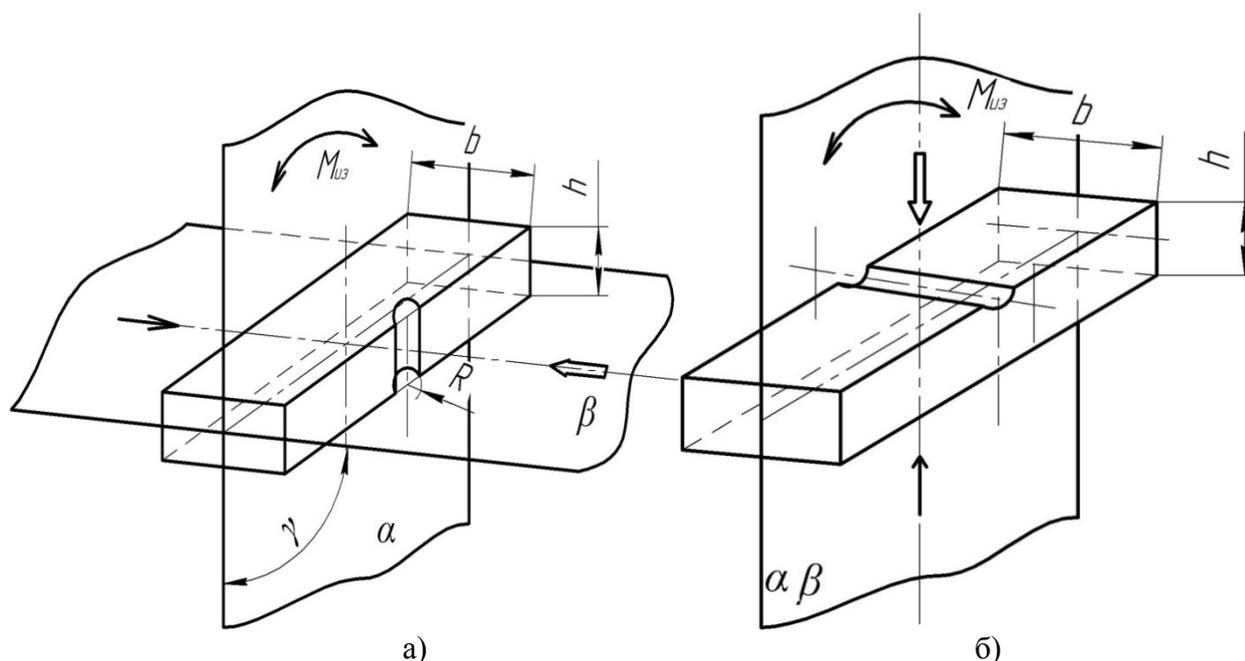


Рис. 1. Схемы предварительной деформации изгибающим моментом ($M_{из}$) и при испытании на ударный изгиб:
 → направление удара маятничкового копра,
 ↪ направление распространения трещины в образце,
 а – вариант А, б – вариант Б.

Установлено [7], что при циклическом изгибе плоских образцов с амплитудой деформации 5% в поверхностном слое толщиной порядка 1 мм возникают остаточные напряжения сжатия. В промежуточной и центральной части образца – остаточные напряжения растяжения.

Таким образом, трещина при испытании на ударный изгиб зарождалась в области растяжения. Распространение трещины идет по области растяжения и в последнее расстояние порядка 1 мм попадает в область сжатия (противоположная поверхность образца).

Для образцов, изготовленных по варианту Б предварительная пластическая деформация изгибом осуществлялась аналогично, как и по варианту А. Т.е. изгиб осуществлялся в плоскости вдоль длины образца и перпендикулярной их поверхности.

Надрез в этом случае делали на грани перпендикулярной поверхности образца (боковой грани). При испытании на определение ударной вязкости изгиб осуществлялся в плоскости параллельной катаной поверхности листа.

Таким образом, изгиб при предварительной деформации и при испытании на определение ударной вязкости проходил в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Трещина в этом случае образовывалась по прямой линии вдоль толщины заготовки. Поэтому зарождение трещины происходило как в растянутых, так и сжатых областях. Распространение трещины шло в той области, где она зародилась.

Сравнительный анализ схем деформации при испытании на ударную вязкость показывает, что направления распространения трещин по вариантам А и Б происходили во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

Известно [14-17], что в областях сжатия зарождение и распространение трещины более затруднительное, чем в областях растяжения. Вследствие этого в образцах, с надрезом, выполненным по варианту Б, более затруднительное образование и развитие трещины, чем для образцов варианта А. Поэтому уменьшение ударной вязкости образцов варианта Б относительно предварительно недеформированного состояния составляет 1,72-1,33 в зависимости от количества циклов (рис.2). По варианту А уменьшение ударной вязкости относительно предварительно недеформированного состояния составляет 4,5-2,25 в зависимости от количества циклов.

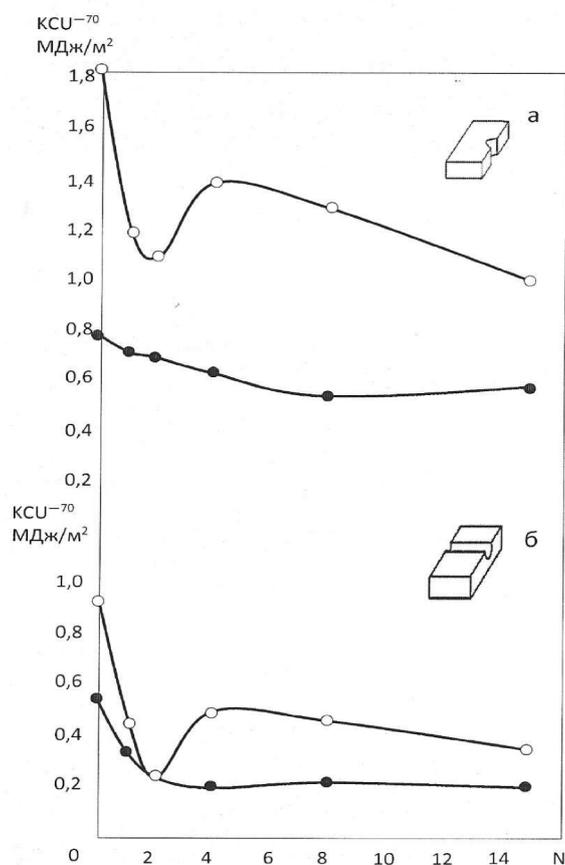


Рис. 2. Изменение ударной вязкости в зависимости от числа циклов изгиба (N):

- - образцы продольные,
- - образцы поперечные,
- а - вариант А, б – вариант Б.

Это свидетельствует, что схема предварительной деформации влияет на значения ударной вязкости при испытании на ударный изгиб. Если предварительная деформация циклическим изгибом и изгиб при испытании на ударную вязкость производятся в одной плоскости, то это приводит к более значительному уменьшению ударной вязкости, чем если бы они происходили в разных плоскостях, например, взаимно-перпендикулярных.

Заключение

Таким образом, установлено, что, если при испытании на ударный изгиб происходит в той же плоскости что и предварительная деформация изгибом, то ударная вязкость снижается меньше, чем если предварительная деформация изгибом в перпендикулярной плоскости.

Список литературы

1. *Подгайский М.С., Максимов А.Б.* Влияние циклической деформации знакопеременным изгибом на механические свойства низколегированных сталей в зависимости от исходного структурного состояния // Термическая и термомеханическая обработка проката. – М.: Металлургия, 1981. – С. 25–27.
2. Влияние деформации циклическим изгибом на дислокационную структуру стали 10Г2С1 / *М.С. Подгайский, А.Б. Максимов, Ю.П. Нескуб, В.И. Новик* // Известия АН СССР. Металлы. – 1985. – № 5. – С. 131–133.
3. *Подгайский М.С., Максимов А.Б., Белик А.В.* Влияние циклического пластического изгиба на склонность стали СтЗсп к хрупкому разрушению // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1982. – № 7. – С. 43–44.
4. *Иванова В.С., Терентьев В.Ф.* Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
5. *Кацаньда С.* Усталостное разрушение металлов: пер. с пол. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
6. *Максимов А.Б., Гуляев М.В.* Распределение прочности по толщине бруса при пластическом изгибе // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – № 2. – С. 39–43.
7. *Максимов А.Б., Гуляев М.В., Ерохина И.С.* Циклический пластический изгиб широкого бруса // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2016. – № 3. – С. 74–79.
8. *Дядин В.П.* Влияние предварительного деформирования на ударную вязкость образца Шарпи при разрушении / Автоматическая сварка. – 2007. – № 1. – С. 28–33.
9. *Бовтало Я.Н., Филиппов Ю.К., Игнатенко В.Н.* Влияние деформации и схемы напряженного состояния на механические свойства стали // Известия Тульского государственного университета. Серия Технические науки. – 2010. – № 4-1. – С. 108–115.
10. *Хоникомб Р.* Пластическая деформация металлов: пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
11. *Кроха В.А.* Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. – М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.
12. *Максимов А.Б., Гуляев М.В., Ерохина И.С.* Влияние циклической деформации изгиба на вязкость и пластичность сталей // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 358–363.
13. *Феодосьев В.И.* Сопротивление материалов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ, 2000. – 592 с.
14. *Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 359 с.
15. *Биргер И.А.* Остаточные напряжения. – М.: Машиностроение, 1963. – 232 с.
16. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. Ч. 2. Механические испытания. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.

17. Канн Р.У., Хаазен П.Т. Физическое металловедение. Т. 3: пер. с англ. – М.: Металлургия, 1987. – 330 с.
18. Бернштейн М.Л. Структура деформированных металлов. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.

THE EFFECT OF PRELIMINARY SCHEME OF DEFORMATION ON THE TOUGHNESS OF LOW ALLOY STEEL

Maksimov A.B., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: aleksandrmsk@yandex.ru
Yerohina I.S., Senior Lecturer, e-mail: irina-kerchanka@yandex.ru

Kerch State Maritime Technological University, 82 Ordzhonikidze str., Kerch, 298309, Republic of Crimea, Russian Federation

Abstract

The influence of the scheme of pre-strain on cyclic bending on the value of impact strength low alloy steel 09Г2 when tested for impact strength. It is established that, if the bending pre-strain occurs in the same plane as the bending test impact strength, the decrease in toughness more than if these planes would be perpendicular. This difference is explained by the conditions of initiation and propagation of cracks in both cases. If the plane of bending coincide when pre-deformation and when tested for impact strength, the origin and development of cracks occurs in areas of tension and then occurs in the region of compression. With mutually perpendicular arrangement of these planes is the front for the initiation and propagation of cracks occurs in the compressed and stretched regions. When pre-deformation cyclic bending in the surface layers of the specimen having compressive stress, and in the Central and intermediate regions of tensile stress. Depending on what field will emerge and spread crack when testing the impact strength will depend on the magnitude of toughness.

Keywords

residual voltage, low alloy steel, plastic bending, impact strength, degree of a single strain, the number of bending cycles, the scheme of deformation

УДК 539.4.015

**ПОЛЗУЧЕСТЬ И УСТАЛОСТЬ МЕТАЛЛОВ С ПОЗИЦИЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ
КОНЦЕПЦИИ РАЗРУШЕНИЯ****М.Г. ПЕТРОВ, канд. техн. наук, доцент
(ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»,
г. Новосибирск)****Петров М.Г.** – 630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова, 21,
Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина,
e-mail: markp@risp.ru

Рассматривается ползучесть металлических сплавов как термоактивированный процесс. Анализ результатов испытаний, проведённых в различных температурно-временных условиях, выявляет физические законы деформирования и разрушения, которые затем используются для построения структурных моделей материалов. Эти модели описывают амплитудные зависимости неупругости материалов, связывают их с распределением внутренних напряжений по объёму твёрдого тела и воспроизводят в расчётах микропластические деформации, вызывающие усталостное разрушение. Поскольку температура и время входят в дифференциальные уравнения физической кинетики в явном виде, решается задача прогнозирования долговечности материалов при произвольных температурно-силовых условиях.

Ключевые слова: ползучесть, усталость, пластическое течение, неупругие деформации, внутренние напряжения, разрушение, прочность, долговечность.

Введение

Зависимость используемых в инженерной практике прочностных характеристик материалов (различных «пределов» – прочности, текучести, усталости и др.) от температуры и времени указывает на их некоторую общую физическую причину. Большой объём экспериментальных исследований привёл к пониманию того, что разрушение является кинетическим процессом, происходящим во времени [1–3]. Все прочностные характеристики материалов определяются, прежде всего, температурой, являющейся мерой внутренней энергии твёрдого тела, и рядом других внутренних и внешних факторов. К внутренним факторам относятся теплофизические свойства веществ, составляющих материал, и его структура, а к внешним – вид и характер нагружения, воздействия окружающей среды.

Кинетическая природа прочности твёрдых тел выявляется в простых опытах на долговечность при постоянных и нарастающих нагрузках, при которых можно наблюдать появляющиеся и развивающиеся во времени повреждения в виде микротрещин или пор. Анализ долговечности τ и скорости течения материалов $\dot{\epsilon}_p$ как функций температуры T и напряжений σ указывает на физические причины этих процессов, которые выражаются зависимостями

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right) \text{ и } \dot{\epsilon}_p = \epsilon_* v_0 \exp\left(-\frac{Q_0 - \alpha\sigma}{RT}\right), \quad (1)$$

где R – универсальная газовая постоянная, U_0 и Q_0 – начальные значения энергии активации (ЭА) разрушения и деформирования, γ и α – активационные объёмы, ϵ_* – структурный

коэффициент вклада в деформацию, $\nu_0 = 1/\tau_0 \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ – характерная дебаевская частота [3]. Для металлов и сплавов обычно $U_0 \approx Q_0$ и $\gamma \approx \alpha$, а произведение этих выражений при стабильной структуре материала даёт примерно постоянную величину остаточной деформации ε_* [2]. Вид этих выражений подтверждается численным экспериментом, выполненным методом молекулярной динамики [4], и вытекает из термодинамического уравнения состояния твёрдого тела [5]. При переменных температуре и напряжениях вычисления ведутся по временным шагам, интегрируя на каждом шаге выражения скоростей разрушения ($\dot{\omega} = 1/\tau$) и течения $\dot{\varepsilon}_p$ по времени.

Применив эти же выражения к описанию процессов локальных течений и разрушений в материале, получаем метод вычислений микропластических деформаций, вызывающих при переменных нагрузках усталостное разрушение [6]. Это параллельный процесс, идущий на фоне общего течения и разрушения материала. Известно, что усталостное разрушение связано с неупругими деформациями материала, которые одновременно характеризуют его структурную неоднородность [7, 8]. Структурная модель материала, воспроизводя распределение внутренних напряжений по объёму в виде дискретного спектра, позволяет просчитать во времени процесс усталостного разрушения в зависимости от текущего значения температуры, напряжений и скорости их изменения. То есть так, как этот процесс в действительности происходит [6].

Запишем дифференциальное уравнение деформирования материала в локальном объёме как сумму скоростей упругой и пластической деформации

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_e + \dot{\varepsilon}_p = \frac{\dot{\sigma}}{M} + A \exp(B\sigma), \quad (2)$$

где M – модуль упругости локального объёма, а A и B – параметры, соответствующие выражению (1) для постоянного значения температуры. При постоянной скорости полной деформации $\dot{\varepsilon} = C$ получим решение

$$\sigma = -\frac{1}{B} \ln \left\{ \exp[-B(\sigma_0 + MCt)] + \frac{A}{C} [1 - \exp(-BMCt)] \right\}, \quad (3)$$

где σ_0 – начальное значение локальных напряжений на временном шаге в момент времени $t = 0$. С увеличением времени ($t \rightarrow \infty$) выражение (3) даёт постоянные напряжения течения $\sigma = -\ln(A/C)/B$, зависящие от скорости деформирования и температуры. При $\dot{\varepsilon} = 0$ решением (2) будут напряжения

$$\sigma = -\frac{1}{B} \ln[\exp(-B\sigma_0) + ABMt], \quad (4)$$

убывающие со временем. Вычитая из полной деформации ε упругую составляющую по формулам (3) или (4), получаем локальную пластическую деформацию в данном объёме, вносящую вклад в локальную повреждённость материала и в общую неупругую деформацию всего твёрдого тела.

В результате получаем структурную модель материала, состоящую из элемента общего течения, воспроизводимого выражениями вида (1) с переменными γ и α , если изменяется структура материала, и элементов локальных течений вида (2) с другими значениями входящих параметров [6].

Методики экспериментального исследования

Чтобы получить представление о том, на что «способен» исследуемый материал, и параметры модели общего течения материала, следует пользоваться опробованной методикой [6]. Нагружая с заданной скоростью или по заданной траектории партию образцов, каждый из которых испытывается при своей температуре в достаточно широком её диапазоне, и, проведя термоактивационный анализ, получаем силовые зависимости ЭА разрушения. В области повышенных температур, если материал не изменяет своего структурного состояния, обычно получается линейная зависимость ЭА разрушения от напряжений. На рисунке 1 приведены результаты полученных данных для некоторых марок сталей (в скобках указан диапазон температуры испытаний). Это наиболее быстрый способ, не всегда, конечно, заменяющий исследования длительного разрушения (возможных изменений структуры).

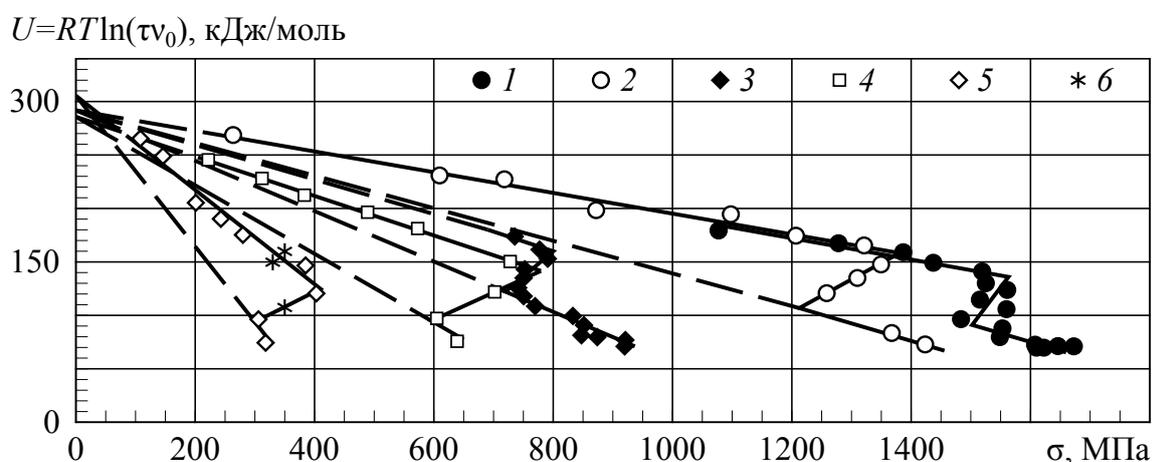


Рис. 1. Силовые зависимости ЭА разрушения сплавов на основе α -железа при монотонном (1–5) и циклическом (6) нагружении: 1 – сталь 30ХГНСА, отпуск 693 К (293–723 К); 2 – сталь 30ХГСА, отпуск 783 К (293–873 К); 3 – сталь 30ХГСНА, отпуск 973 К (293–683 К); 4 – сталь 45 (293–873 К); 5 – сталь 08 (293–973 К); 6 – сталь 09Г2С (389–588 К, частота 2 и 10 Гц)

Все испытанные марки сталей имеют характерные изломы в силовых зависимостях ЭА разрушения, которые расположены между двумя прямыми $U_0 - \gamma_{\min}\sigma$ и $U_0 - \gamma_{\max}\sigma$, что свидетельствует о релаксационных процессах, происходящих в структуре этих материалов. Подобные явления наблюдаются также и в алюминиевых сплавах и воспроизводятся в расчётах в виде спектра релаксационных процессов [6]. Результат монотонного нагружения – это тоже долговечность, определённая для заданной программы нагружения [1].

Данные опытов 1–3 и 6, проведённых автором, соответствуют каждому испытанному образцу. Кривые 4 и 5 построены по усреднённым данным, взятым из справочника [9]. Среднее значение $U_0 = 294,3$ кДж/моль со средним квадратическим отклонением 9,7 кДж/моль для всех представленных данных.

При циклическом нагружении строится амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости, по которой каждый участок прироста её раскрытия связывается с долговечностью, получаемой экспериментально при фиксированных параметрах цикла нагружения. На рисунке 2 построена такая зависимость по экспериментальным данным, приведённым в работе [10], где выделены характерные участки прироста неупругости

гистерезисного типа. А на рисунке 3 показана связь выносливости с приращением раскрытия петли.

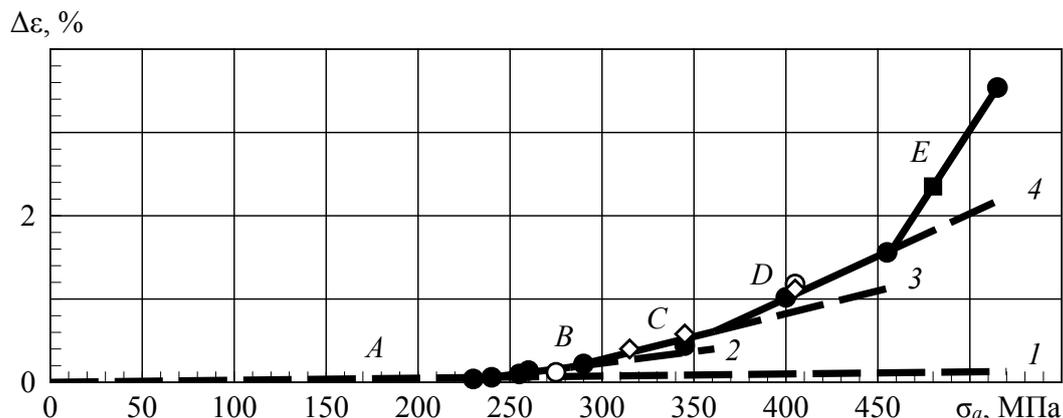


Рис.2. Амплитудная зависимость раскрытия петли неупругости стали Ман-Тен (разными значками обозначены данные, взятые из разных источников):

- I* – составляющая неупругости релаксационного типа (участок *A*),
 2, 3, 4 – приращения раскрытия петли за счёт локальных пластических деформаций на участках *B*, *C*, *D*, начинающиеся при $\sigma_{a0} = 239,6$ МПа

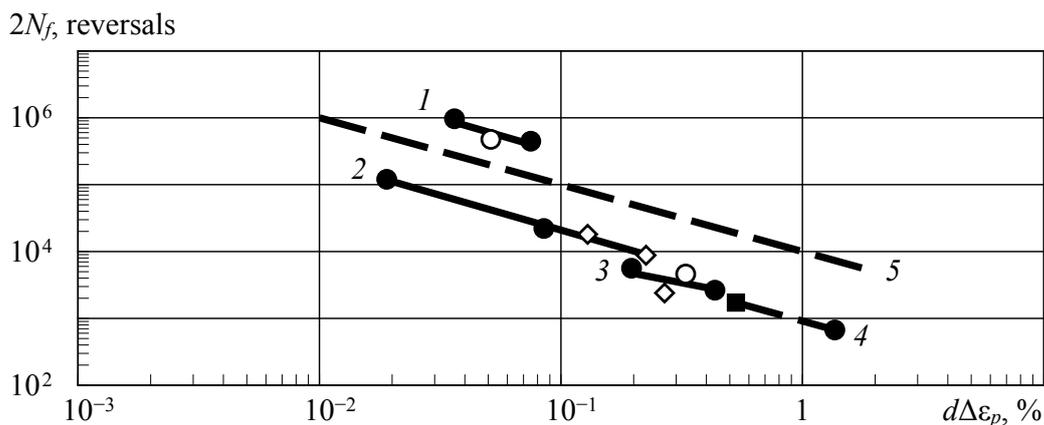


Рис.3. Статистическая связь выносливости и приращений раскрытия петли неупругости стали Ман-Тен на участках (рис. 2): *B* (1), *C* (2), *D* (3), *E* (4); 5 – линия обратно пропорциональной зависимости (приведена для сравнения)

Подобного вида зависимость также была выявлена и у других материалов [6, 11]. Если полагать, что процессы разрушения и пластического течения в локальных объёмах материала так же тесно связаны между собой, как и при общем течении материала, то на каждом участке амплитудной зависимости неупругости должна наблюдаться обратно пропорциональная зависимость между долговечностью (временем разрушения) и неупругими деформациями. Но поскольку неупругое деформирование является временным процессом, то при различающихся частотах испытаний сопоставлять с долговечностью следует среднюю скорость неупругих деформаций, отнеся приращение раскрытия петли к среднему значению периода цикла [11].

По полученной связи между неупругими деформациями и временем разрушения определяются параметры элементов модели материала, каждый из которых соответствует

ряду статистически подобных локальных объёмов разрушающегося материала. В результате воспроизводятся во времени локальные пластические деформации и вычисляются усталостные повреждения при заданных спектрах тепловых и силовых воздействий [6, 12].

Результаты и обсуждение

Чтобы убедиться в возможностях изложенной методологии анализа прочностных свойств материалов и используемых алгоритмов вычислений, достаточно сравнить расчётные оценки долговечности с их фактическими значениями в наиболее разнообразных случаях разрушения конструкций. Такие сопоставления показывают их удовлетворительное соответствие для случаев монотонного нагружения и разнообразных программ термомеханического нагружения конструктивных образцов, циклического нагружения материалов и элементов конструкций при различных температурах, частотах, амплитудах и асимметрии цикла, а также при случайных нагрузках [6, 12].

В механике деформируемого твёрдого тела тоже разработаны методы прогнозирования долговечности, но подходы основаны на формальном описании наблюдаемых в эксперименте соотношений между напряжениями и деформациями [13, 14]. Они помогают решать некоторые частные задачи, но не касаются того, что стоит за этими экспериментальными соотношениями. Изложенный же подход опирается на извлечение информации о внутренних процессах, связанных с физикой явлений, и их моделирование [15, 16].

Выводы

Термоактивационный анализ течения и разрушения материалов при постоянных и монотонно нарастающих нагрузках выявляет физические закономерности этих процессов. Циклическое нагружение дополнительно устанавливает связь амплитуды нагружения с раскрытием петли неупругости, которая характеризует распределение в материале внутренних напряжений и, тем самым, его структуру. Воспроизведение в моделях материала его структурной неоднородности с использованием уравнений физической кинетики решает задачу прогнозирования долговечности материалов в конструкциях в различных температурных и силовых условиях эксплуатации.

Список литературы

1. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
2. Степанов В.А., Песчанская Н.Н., Шпейзман В.В. Прочность и релаксационные явления в твердых телах. – Л.: Наука, 1984. – 248 с.
3. Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. – СПб.: Политехника, 1993. – 475 с.
4. Ющенко В.С., Шукин Е.Д. Молекулярно-динамическое моделирование при исследовании механических свойств // ФХММ. – 1981. – Т. 17, № 4. – С. 46–59.
5. Комаровский А.А. Прогнозирование остаточного ресурса и долговечности // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 12. – С. 8–12.
6. Петров М.Г. Прочность и долговечность элементов конструкций: подход на основе моделей материала как физической среды. – Saarbrücken: Lambert Academic Publ., 2015. – 472 с.

7. Криштал М.А., Головин С.А. Внутреннее трение и структура металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 376 с.
8. Головин С.А., Пушкар А. Микропластичность и усталость металлов. – М.: Металлургия, 1980. – 240 с.
9. Справочник по машиностроительным материалам. В 4 т. Т. 1. Сталь. – М.: Машгиз, 1959. – 907 с.
10. Tucker L.E., Bussa S.L. The SAE cumulative fatigue damage test program. – Warrendale, PA: SAE International, 1975. – (SAE Technical Paper; 750038).
11. Петров М.Г. Усталость и неупругость композиционных материалов // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2016. – С. 157–161.
12. Petrov M.G. Simulation of random thermal and loading effects that are taken by aircraft structure // Proceedings of XIII International conference on the methods of aerophysical research. – Novosibirsk: Parallel, 2007. – Pt. 1. – P. 165–170.
13. Бондарь В.С. Термовязкопластичность. Теория и эксперимент // Упругость и неупругость: материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященной 100-летию А.А. Ильюшина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. – С. 122–128.
14. Корнеев С.А. Вязкоупругопластичность твёрдых тел при конечных деформациях // Упругость и неупругость: материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященной 100-летию А.А. Ильюшина. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2011. – С. 152–157.
15. Petrov M.G. Some methods of analysis and diagnostics of structure and properties of materials produced under various technological processes // Proceedings of XIV International conference on the methods of aerophysical research. Section V. – Novosibirsk: ИТАМ, 2008. – Paper No 24.
16. Petrov M.G. Fundamental studies of strength physics – methodology of longevity prediction of materials under arbitrary thermally and forced effects // International Journal of Environmental and Science Education. – 2016. – Vol. 11, N 17. – P. 10211–10227.

CREEP AND FATIGUE OF METALS FROM THE STANDPOINT OF THE KINETIC CONCEPT OF FRACTURE

Petrov M.G., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Leading researcher,
e-mail: markp@risp.ru

Siberian Aeronautical Research Institute named after S. A. Chaplygin, 21 Polzunov st.,
Novosibirsk, 630051, Russian Federation

Abstract

The creep of metallic alloys is considered as a thermally activated process. Analysis of test results that are conducted at various thermo-temporal conditions has revealed physical laws of deformation and failure which are used then for construction of structural material models. These models describe amplitude relationships of inelasticity of materials and associate them with a distribution of internal stresses over volume of solids. They reproduce in calculations micro plastic strains that initiate the fatigue fracture. Inasmuch as temperature and time appear in the differential equations of physical kinetics in an explicit form, the problem on prediction of materials longevity under arbitrary thermally and forced conditions is solved.

Keywords

creep, fatigue, plastic flow, inelastic strains, internal stresses, failure, strength, longevity

УДК 669.715.046.516.2

**СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ ЛЕГИРОВАНИЯ И УСЛОВИЙ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ НА ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ
И ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ЛИТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

*М.В. ПОПОВА¹, доктор техн. наук, профессор
М.А. МАЛЮХ¹, соискатель
Н.Б. ЛАВРОВА², ст. преподаватель
(¹СибГИУ, г. Новокузнецк,
²СФУ, г. Красноярск)*

Малюх М.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: starostina_ma1976@mail.ru

Представлены результаты исследований влияния легирования и условий кристаллизации на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР, α) сплавов алюминия с кремнием и медью в интервале температур испытания 50–450 °С. Показано, что высокоскоростная кристаллизация повышает технологичность и уменьшает ТКЛР двойных силуминов Al–(5–20)%Si в интервале 50–100 °С, а также делает менее выраженной аномалию теплового расширения в интервале 250–350 °С для доэвтектических сплавов. Установлено, что тройные сплавы Al–Si–Cu имеют более низкий ТКЛР, чем двойные сплавы Al–Si и Al–Cu сравнимых концентраций. Результаты исследований могут быть использованы для получения легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Ключевые слова: алюминий, сплавы алюминий-кремний, сплавы алюминий-медь, температурный коэффициент линейного расширения, кристаллизация, легирование.

Введение

Достижения Российской авиационной и ракетно-космической техники, атомной энергетики, которые сегодня находятся на передовом мировом уровне, связаны с успехами в разработке алюминиевых сплавов. Дальнейшая разработка и реализация «прорывных» технических проектов в самолетостроении, двигателестроении и других отраслях (в том числе создание гиперзвуковых прямоточных ракетных двигателей, многоразовых аэрокосмических самолетов) будет, прежде всего, определяться возможностями материалов [1]. Для обеспечения весового совершенства конструкций, их повышенной надежности и ресурса необходима разработка новых алюминиевых сплавов, обладающих свойствами, обеспечивающими надежность и безопасность эксплуатации конструкции.

Для космического приборостроения необходимо сочетание высокой стабильности размеров в широком интервале температур, коррозионной стойкости и малого удельного веса, так как облегчение выводимых на орбиту конструкций и приборов способствует значительной экономии топлива [2, 3].

Этим требованиям отвечают сплавы Al с Si, так как Al – легкий и пластичный металл, обладающий хорошей коррозионной стойкостью. ТКЛР у него достаточно велик ($\alpha_{0-100} = 23,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), однако легированием кремнием его можно значительно снизить [4]. Эти сплавы немагнитны, характеризуются хорошими литейными свойствами и герметичностью [5, 6]. Большое их достоинство в том, что при понижении температуры ТКЛР становится

ниже, а механические свойства – выше, чем при комнатной температуре. Таким образом, Al–Si-сплавы – самая удачная основа для разработки «летающих материалов».

Медь, также как и кремний, является важнейшим легирующим элементом алюминия. Сплавы системы Al–Si–Cu широко применяются в машиностроении как конструкционные материалы и их свойства постоянно повышаются [7]. Ранее авторским коллективом [8] подробно изучались сплавы Al–Cu, чтобы определить возможность использования Cu в новых композициях легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Большой предшествующий опыт изучения теплового расширения сплавов Al–Si и Al–Cu позволяет утверждать, что они могут иметь широкий спектр ТКЛР (от 22 до $11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), величина которого, в первую очередь, определяется содержанием легирующих элементов [9]. Кроме того, важное значение имеют условия получения сплавов, например, скорость кристаллизации. По данным многих исследователей быстрое охлаждение расплава, а также высокие скорости охлаждения алюминиевых сплавов в процессе кристаллизации способствуют улучшению параметров микроструктуры и благоприятно влияют на физико-механические свойства, в том числе и на ТКЛР [10-13].

Поэтому, *целью настоящей работы* являлось исследование возможности уменьшения ТКЛР алюминиевых сплавов за счет совместного легирования элементами, ТКЛР которых меньше, чем у алюминия, такими как кремний и медь ($\alpha_{\text{Si}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha_{\text{Cu}} = 16,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Учитывались также условия приготовления сплавов, а именно – скорость кристаллизации.

Методика экспериментального исследования

Сплавы готовили в лабораторных условиях в печах с силитовыми нагревателями, исключаящими наведение магнитного поля, с соблюдением всех правил подготовки шихты и ведения плавки. Легирующие добавки вводили в виде металлов и лигатур. После растворения легирующих элементов проводили заливку металла с разной скоростью кристаллизации: в алюминиевый кокиль ($\sim 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$) и между двумя медными плитами – имитация жидкой штамповки ($\sim 100 \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$). Высокая скорость кристаллизации применялась с целью фиксации пересыщенного твердого раствора водорода в Al, так как, согласно [14–16], в жидком Al при температуре кристаллизации содержание водорода гораздо больше, чем в твердом. Кроме того, при высоких скоростях кристаллизации силуминов происходит измельчение в их структуре кристаллов первичного и эвтектического кремния, а также частиц CuAl_2 . При этом улучшается технологичность сплавов, т.к. предельная степень деформации до разрушения при нагреве силуминов определяется их микроструктурой, в первую очередь, количеством и размерами кристаллов первичного кремния, а также дисперсностью эвтектики [17].

Из полученных слитков изготавливали образцы для dilatометрического исследования. ТКЛР определяли с помощью дифференциального оптического фоторегистрирующего dilatометра системы Шевенара в интервале температур испытания 50–450 $^\circ\text{C}$, погрешность определения составляла $\pm 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Особенности теплового расширения силуминов, закристаллизованных с различной скоростью, изучали, сравнивая с алюминием А7, полученным по общепринятой технологии – заливкой в алюминиевый кокиль [18, 19].

Результаты и обсуждение

Авторами исследованы сплавы алюминия, содержащие от 1 до 50% Si, залитые с разной скоростью кристаллизации. Результаты определения ТКЛР сплавов приведены в

таблице 1. При изучении теплового расширения доэвтектических сплавов отмечено, что ТКЛР Al при температуре испытания $T_{исп} = 50...100^{\circ}\text{C}$ с увеличением содержания Si, постепенно уменьшается, что важно для приборной техники. Также отмечена возможность существенного снижения ТКЛР при высоких $T_{исп} = 400...450^{\circ}\text{C}$, что представляет значительный интерес для разработки жаропрочных сплавов. Главная особенность изменения ТКЛР для этих сплавов – наличие аномалии расширения при $T_{исп} = 250...350^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует о возможности доэвтектических силуминов иметь ТКЛР, значительно больший, по сравнению с алюминием А7.

Таблица 1

Сравнение действия скорости кристаллизации и легирования Si на ТКЛР Al

Сплав	Способ кристаллизации	ТКЛР $\alpha \times 10^6$, град ⁻¹ , при температурах испытания, °C								
		50	100	150	200	250	300	350	400	450
Al	К	21,5	22,3	23,2	23,6	24,3	25,2	25,5	26,5	27,0
Al-5%Si	К	20,0	21,3	22,5	22,9	26,2	30,0	28,1	25,9	24,3
	Ш	18,5	20,3	22,5	22,8	26,2	29,2	22,3	23,0	23,4
Al-10%Si	К	19,6	20,0	20,2	20,5	20,7	21,1	23,9	24,4	24,8
	Ш	18,3	19,4	19,9	21,0	26,2	26,6	21,5	20,7	20,1
Al-15%Si	К	17,9	18,4	18,5	18,8	19,0	19,3	19,7	18,5	18,0
	Ш	16,8	18,2	18,3	19,4	22,4	22,9	19,7	20,1	20,0
Al-20%Si	К	17,4	18,2	18,7	19,2	20,0	19,2	17,2	17,4	17,3
	Ш	16,7	17,1	17,1	17,6	21,1	24,7	17,9	15,6	14,7
Al-25%Si	К	15,7	16,1	16,2	16,5	17,2	18,0	18,3	18,6	19,0
	Ш	15,7	16,1	16,2	17,2	18,0	18,3	18,6	17,8	16,9
Al-30%Si	К	15,2	16,1	16,5	17,3	18,9	17,6	17,4	16,9	14,5
	Ш	14,5	16,5	17,7	17,9	19,2	19,8	18,4	16,6	15,7
Al-40%Si	К	13,5	13,8	13,9	13,1	12,4	11,8	11,9	12,1	12,9
	Ш	13,5	13,7	13,1	13,0	13,5	12,8	11,9	11,7	10,9
Al-50%Si	К	11,1	11,0	10,9	10,9	9,8	9,4	8,9	7,9	6,8
	Ш	10,5	10,6	10,7	10,9	11,0	12,1	12,1	9,9	9,5

Примечание: К – литье в алюминиевый кокиль; Ш – имитация жидкой штамповки.

В сплавах близких к эвтектической концентрации (10 – 15 % Si), залитых с более высокой скоростью, ТКЛР в большей мере снижается при $T_{исп} = 50...100^{\circ}\text{C}$ чем существенно уменьшает аномалию теплового расширения. Если в малокремнистых сплавах максимальные значения ТКЛР в интервале аномалии достигают $\alpha = (27...34) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, то в сплавах эвтектической концентрации и с малым выходом за нее максимальные значения ТКЛР уменьшаются до $\alpha = (22...23) \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Высокая степень модифицирования структуры приводит к значительному повышению механических свойств (прочностных – более чем на 40 %, при сохранении уровня пластичности) и увеличению технологичности, в частности, предельной степени деформации до разрушения на 25%.

В сплавах Al – (15...20%)Si, где размер выделений Si-фазы еще невелик, кристаллизация с более высокой скоростью увеличивает аномалию. Именно в этих сплавах проявляется максимальное действие высокой скорости кристаллизации, измельчающей выделения кремнистой фазы. Далее при увеличении содержания Si от 25 до 50% резко укрупняются выделения первичного Si, и в меньшей мере проявляется влияние скорости кристаллизации. Однако даже в сплаве Al-50% Si имеются некоторые различия ТКЛР у образцов, закристаллизованных в алюминиевом кокиле и между двумя медными плитами.

После тщательного анализа влияния кремния на тепловое расширение алюминия, подробно изучались сплавы Al–Cu, чтобы определить оптимальное количество Cu в новых композициях легких сплавов с низким ТКЛР. В таблице 2 приведено сравнение действия Cu и Si на ТКЛР алюминия.

Таблица 2

Влияние легирования медью и кремнием на ТКЛР алюминия

Легирующий элемент	Массовая доля, %	Средний ТКЛР $\alpha \times 10^6$, град ⁻¹ , при температурах испытания, °С			
		50-100	150-250	300-350	400-450
А7		22,4	23,6	25,3	26,8
Si	5	20,6	23,8	29,0	25,1
Cu		22,1	24,2	27,5	25,8
Si	10	19,8	20,5	22,5	24,6
Cu		21,4	23,7	26,9	26,2
Si	15	18,2	18,8	19,5	18,3
Cu		21,7	22,5	25,6	23,2
Si	20	17,8	19,3	18,2	17,4
Cu		19,7	21,8	25,5	23,5
Si	25	15,9	16,6	18,2	18,8
Cu		19,2	21,4	24,8	23,4
Si	30	15,6	17,6	17,5	15,7
Cu		19,5	21,1	23,0	25,4

Из представленных данных видно, что до 15% Cu резко увеличивает ТКЛР при температуре испытания $T_{исп.} = 300$ °С (первая аномалия). Здесь α алюминия увеличивается до значений $(27...28) \cdot 10^{-6}$, град⁻¹. После первой аномалии появляется вторая при $T_{исп.} = 400$ °С, которая проявляется в резком снижении ТКЛР.

Увеличение содержания Cu до 20...25% существенно снижает α алюминия при $T_{исп.} = 50...300$ °С с сохранением первой аномалии. Анализ таблицы показал, что Cu незначительно отстает от Si по уменьшению ТКЛР алюминия А7. Так, значения α при $T_{исп.} = 50...100$ °С, равные $19,7 \cdot 10^{-6}$, град⁻¹, что характерно для сплава Al–10% Si, могут быть получены лишь при добавке к алюминию 20% Cu. Однако, сплавы, содержащие 5% Cu и 5% Si, при $T_{исп.} = 400...450$ °С имеют практически одинаковые значения ТКЛР.

Судя по большой разнице в ТКЛР меди и кремния при комнатной температуре ($16,6$ и $3,0 \cdot 10^{-6}$, град⁻¹), следовало бы ожидать большего различия в ТКЛР сплавов Al–Si и Al–Cu при одинаковом содержании легирующих элементов.

Дальнейшим шагом нашей работы было изучение влияния комплексного легирования на линейное расширение алюминиевых сплавов (рисунок 1).

ТКЛР при добавке 11% Si к сплаву Al–11%Cu плавно увеличивается с $\alpha = 18 \cdot 10^{-6}$ до $20 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ в интервале 50...250 °С. Температура аномалии смещается до $T_{исп.} = 350$ °С с последующим резким снижением до $\alpha = 10,3 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹ при $T_{исп.} = 450$ °С. Сильнее эта добавка Si снижает ТКЛР при увеличении содержания Cu до 15%. Для интервала $T_{исп.} = 50...100$ °С (приборная техника) добавка 11% Si уменьшает ТКЛР до $\alpha = 15,6...17,4 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, что соответствует ТКЛР двойного сплава Al–30...32%Si, который отличается от сплава Al–15%Cu–11%Si очень высокой хрупкостью. Таким образом, тройные сплавы Al–Si–Cu имеют более низкий ТКЛР, чем двойные сплавы Al–Si и Al–Cu сравнимых концентраций.

Еще меньшие значения ТКЛР, но с сохранением аномалии при $T_{исп.} = 300$ °С, можно получить у многокомпонентного сплава [8]. Сплав Al–15%Cu–11%Si–11%Ge–10%Sb–1,2%V имеет такой же ТКЛР, как и сплав Al–40%Si. Можно считать, что комплексное легирование

элементами, ТКЛР которых больше, чем у кремния (15%Cu–11%Ge–10%Sb–1,2%V), может заменить 29%Si (α равен: Si – 2,33; Ge – 5,75; V – 7,8; Cu – 16,61 и Sb – $9,2 \cdot 10^{-6}$, град $^{-1}$).

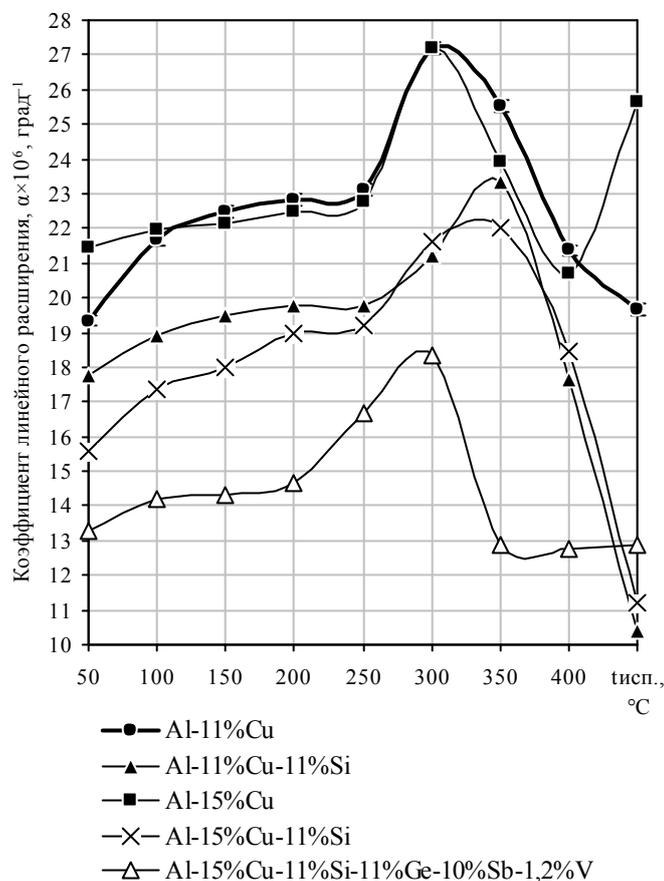


Рис. 1. Влияние легирования на линейное расширение сплавов алюминий – медь

Выводы

Применение высоких скоростей кристаллизации двойных силуминов способствует измельчению структурных составляющих, которое обеспечивает повышение технологичности сплавов и дополнительное снижение ТКЛР, что особенно заметно проявляется у сплавов околоэвтектического состава.

Установлено, что тройные сплавы Al–Si–Cu имеют более низкий ТКЛР, чем двойные сплавы Al–Si и Al–Cu сравнимых концентраций. Результаты исследований могут быть использованы для получения легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Список литературы

1. Перспективные высокопрочные материалы на алюминиевой основе / И.Н. Фридляндер, А.В. Добромислов, Е.А. Ткаченко, О.Г. Сенаторова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 7. – С. 17–23.

2. *Афанасьев В.К., Попова М.В.* Перспективы развития легких сплавов с малым тепловым расширением для космической техники // *Металлургия машиностроения*. – 2012. – № 6. – С. 8–13.
3. *Polmear I.J.* Light alloys: from traditional alloys to nanocrystals. – Amsterdam: Elsevier, 2005.
4. О влиянии кремния на тепловое расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.В. Попова, А.Н. Прудников, М.А. Старостина (М.А. Малюх) // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – № 6. – С. 23–26.
5. *Материаловедение и технология материалов: учебное пособие / под ред. А.И. Батышева, А.А. Смолькина*. – М.: Инфра-М, 2012. – 288 с.
6. *Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливано В.А.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МИСИС, 2005. – 432 с.
7. *Jeong C.-Y.* High temperature mechanical properties of Al-Si-Mg-(Cu) alloys for automotive cylinder heads // *Materials Transactions*. – 2013. – Vol. 54, N 4. – P. 588–594.
8. Особенности влияния меди на линейное расширение алюминия А7 / В.К. Афанасьев, А.В. Горшенин, М.А. Старостина (М.А. Малюх), Е.В. Первакова, И.В. Дегтярева // *Металлургия машиностроения*. – 2010. – № 3. – С. 30–34.
9. *Попова М.В.* Некоторые пути получения алюминиевых инваров // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2004. – № 3 (24). – С. 16–19.
10. Density and thermal expansion of liquid Al-Si alloys / J. Schmitz, B. Hallstedt, J. Brillo, I. Egry, M. Schick // *Journal of Materials Science*. – 2012. – Vol. 47, iss. 8. – P. 3706–3712.
11. Microstructure and mechanical properties of an Al-Si alloy consolidated by spark plasma sintering / T. Schubert; J. Schmidt, T. Weißgärber, B. Kieback // *World PM 2010 Proceedings. Vol. 2: Sintering, secondary & finishing operations, full density & alternative consolidation, Florence, Italy, 10–14 October 2010 / European Powder Metallurgy Association*. – Florence, 2010. – P. 117–124.
12. *Srivastava V.C., Mandal R.K., Ojha S.N.* Microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys produced by spray forming process // *Materials Science and Engineering: A*. – 2001. – Vol. 304–306. – P. 555–558.
13. Structural and mechanical properties of Al-Si alloys obtained by fast cooling of a levitated melt / S.P. Nikanorov, M.P. Volkov, V.N. Gurin, Yu.A. Burenkov, L.I. Derkachenko, B.K. Kardashev, L.L. Regel, W.R. Wilcox // *Materials Science and Engineering: A*. – 2005. – Vol. 390, iss. 1–2. – P. 63–69.
14. *Флемингс М.* Процессы затвердевания: пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 423 с.
15. *Афанасьев В.К.* Водород и свойства алюминиевых сплавов. – Кемерово: Полиграф, 2009. – 428 с.
16. О распределении водорода в металле при кристаллизации / Р.М. Габидуллин, В.А. Засыпкин, В.Д. Юшин, В.Н. Титов // *Алюминиевые сплавы: сборник*. – М., 1968. – Вып. 5. – С. 14–21.
17. О природе процессов пластической деформации сплавов Al–1...50% Si / В.К. Афанасьев, М.В. Попова, А.В. Горшенин, С.В. Долгова, В.В. Герцен // *Металлургия машиностроения*. – 2014. – № 3. – С. 2–9.
18. *Альтман М.Б.* *Металлургия литейных алюминиевых сплавов*. – М.: *Металлургия*, 1972. – 153 с.
19. *Москвитин В.И., Николаев И.В., Фомин Б.А.* *Металлургия легких металлов: учебник для вузов*. – М.: *Интермет Инжиниринг*, 2005. – 416 с.

THE COMBINED EFFECT OF ALLOYING AND CRYSTALLIZATION CONDITIONS FOR MANUFACTURABILITY AND THERMAL EXPANSION OF CAST ALUMINUM ALLOYS

Popova M.V.¹, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: m.popova@rdtc.ru

Malyuh M.A.¹, Applicant, e-mail: starostina_ma1976@mail.ru

Lavrova N.B.², Senior Lecturer, e-mail: lavrova-nataly2016@yandex.ru

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² Siberian Federal University, 79 Avenue Free, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Abstract

To ensure weight perfection structures, their increased reliability and resource necessary to develop new aluminum alloys with properties that ensure the reliability and safety of operation of the structure.

For space instrumentation requires the combination of high dimensional stability in wide temperature range, corrosion resistance and small specific gravity, so as a relief to orbit designs and devices contributes to a significant fuel savings. These requirements are met by alloys of Al with Si, as Al – light and ductile metal with good corrosion resistance. Temperature coefficient of linear expansion (TCLE, α) it is large enough, however, doping with silicon can be significantly reduced.

The results of researches of influence of alloying and crystallization conditions for TCLE of alloys of aluminum with silicon and copper in the temperature range of 50-450 ° C test. It is shown that high-speed crystallization improves technology-lichnosti and reduces TCLE dual silumin Al–(5-20)%Si in the range of 50 ° C and 100°, and also makes a less pronounced anomaly of thermal expansion in the range of 250-350 ° C for doauthenticate alloys. Established that ternary alloys Al–Si–Cu have a lower TCLE than double the alloys Al–Si and Al–Cu is comparable concentrations. The research results can be used to produce light alloys with controlled thermal expansion.

Studies show that quite reasonable may be the use of copper for making alloys with controlled thermal expansion.

The fact of the strong action of silicon on the thermal expansion of the alloys Al–Cu, which may further have a significant impact on the practical working of the lungs Invar alloys.

Keywords

aluminium, alloys of aluminium-silicon alloys aluminium-copper, the temperature coefficient of linear expansion, crystallization, alloying

УДК 620.170:621.791

**ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ НАПЛАВКОЙ
И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ***

В.Е. КОРМЫШЕВ¹, инженер
В.Е. ГРОМОВ¹, доктор физ.-мат. наук, профессор
Ю.Ф. ИВАНОВ^{2,3}, доктор физ.-мат. наук, профессор,
главный научный сотрудник
В.А. БАТАЕВ⁴, доктор техн. наук, профессор
О.А. КОНДРАТОВА¹, канд. физ.-мат. наук, доцент
Е.Н. НИКИТИНА¹, канд. техн. наук
(¹ СибГИУ, г. Новокузнецк, ² НИ ТПУ, г. Томск,
³ ИСЭ СО РАН, г. Томск, ⁴ НГТУ, г. Новосибирск)

Кондратова О.А. – 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42,
Сибирский государственный индустриальный университет,
e-mail: okondratova@mail.ru

Методами современного физического материаловедения исследованы структура, фазовый состав, дефектная субструктура, микротвердость и трибологические свойства покрытия, сформированного на мартенситной низкоуглеродистой стали Hardox 450 электродуговой наплавкой проволоки *Fe-C-Ni-B* и модифицированного последующим облучением высокоинтенсивными импульсными электронными пучками. Выявлено формирование многофазного состояния наплавленного слоя, характеризующегося присутствием большого количества включений боридов железа, твердость которых существенно (более чем на порядок) превышает твердость стали Hardox -450. Поверхностный слой наплавки, модифицированный интенсивным импульсным электронным пучком, является многофазным агрегатом, основными фазами которого являются твердый раствор на основе α -железа, бориды железа состава *FeB* и карбид бора состава *B₄C*. Выявлено увеличение износостойкости наплавленного слоя, модифицированного интенсивным импульсным электронным пучком, более чем в 20 раз по отношению к износостойкости стали и более чем в 11 раз по отношению к наплавленному слою, не модифицированному электронным пучком. Существенным образом снижается коэффициент трения наплавленного слоя, облученного электронным пучком. Для исходной стали он равен 0,31; для наплавленного слоя 0,14; после облучения наплавленного слоя электронным пучком коэффициент трения равен 0,09.

Ключевые слова: износостойкость, микротвердость, структура, фазовый состав, наплавка, электронно-пучковая обработка.

Введение

Вопрос о выборе метода эффективной защиты различных изделий и деталей между упрочнением всего объема материала и нанесением на их рабочие части защитных покрытий в большинстве случаев решается однозначно в пользу последнего. Это объясняется тем, что наибольшее разрушение в процессе эксплуатации испытывает именно

* Исследования выполнены за счет средств гранта РФФИ (проект №15-19-00065). Электронно-пучковая обработка наплавленного слоя выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект №16-49-700659 р_а.

их поверхность [1]. Наиболее перспективными методами упрочнения и восстановления, позволяющими радикально улучшить свойства поверхностей, являются методы наплавки. Кроме того, упрочнение методами наплавки оказывается экономически эффективным, поскольку ресурс работы деталей преимущественно определяется долговечностью покрытий, которая зависит от способа покрытия [2-4].

Практически все процессы изнашивания, коррозии, роста усталостных трещин (и т.д.), приводящие к отказам изделий, начинаются с поверхности и определяются свойствами относительно тонкого поверхностного слоя. Наплавка является одним из основных методов создания покрытий с целью получения специальных свойств на поверхности изделий, а также восстановления изношенных деталей машин [5-7]. Это позволяет решать одну из важнейших задач обеспечения оптимального соотношения свойств поверхности и объема материала. В данном случае отпадает необходимость использования объемно-легированных материалов и появляется возможность в известной степени решить кардинальную задачу машиностроения – повышение надежности и долговечности деталей в условиях эксплуатации.

Получили развитие научные исследования и практические разработки в области наплавки композиционных покрытий, упрочненных частицами карбидов, боридов и других высокотвердых и высокомодульных фаз. Такие покрытия эффективно работают в условиях сильного абразивного износа и применяются в различных областях промышленности [8-11].

Целью настоящей работы являлся анализ результатов исследования механических и трибологических свойств слоя, сформированного на стали Hardox 450 электродуговой наплавкой порошковой проволоки системы $Fe-C-Ni-B$ и модифицированного облучением высокоинтенсивным импульсным электронным пучком.

Материал и методика исследования

В качестве материала основы использовали сталь марки Hardox 450 ((вес. %): 0,19 C; 0,70 Si; 1,6 Mn; 0,025 P; 0,010 S; 0,25 Cr; 0,25 Ni; 0,25 Mo, 0,004 B; остальное – Fe). Она характеризуется низким содержанием легирующих элементов, вследствие чего хорошо сваривается и обрабатывается. Благодаря специальной системе закалки листов, суть которой заключается в быстром охлаждении прокатанного листа без последующего отпуска, достигается мелкозернистая структура стали и ее высокая твердость. Благодаря этому сталь эффективно противостоит большинству видов износа. Наплавку упрочняющего слоя осуществляли методом MIG/MAG (Metal Inert Gas / Metal Active Gas – дуговая сварка плавящимся металлическим электродом с автоматической подачей присадочной проволоки) в среде газа (Ar – 98 %, CO_2 – 2%) при сварочном токе 250 – 300 А и напряжении (30 – 35) В. В качестве наплавляемого электрода использовали порошковую проволоку следующего химического состава (вес. %): 0,7 C; 2,0 Mn; 1,0 Si; 2,0 Ni; 4,5 B; остальное – Fe.

Модифицирование наплавленного слоя осуществляли, облучая поверхность высокоинтенсивным электронным пучком на установке «СОЛО» [12] в режиме плавления и высокоскоростной кристаллизации в два этапа: параметры пучка электронов на первом этапе – плотность энергии пучка электронов в импульсе $E_S = 30$ Дж/см²; длительность импульсов $\tau = 200$ мкс; количество импульсов $N = 20$; на втором этапе $E_S = 30$ Дж/см²; $\tau = 50$ мкс; $N = 1$. Режимы облучения были выбраны исходя из результатов расчета температурного поля, формирующегося в поверхностном слое материала при облучении в одноимпульсном режиме [13]. Трибологические испытания модифицированной поверхности осуществляли на трибометре «CSEM Tribometer High Temperature S/N 07-142», CSEM Instruments; контртело – шарик диаметром 2 мм из твердого сплава ВК6, скорость износа оценивали по площади поперечного сечения трека износа, используя 3D-профилометр MICRO MEASURE 3D

station фирмы STIL. Структуру объема модифицированного слоя анализировали методом поперечного шлифа, для чего образцы разрезали на две части перпендикулярно поверхности модифицирования. Дефектную структуру материала изучали методами оптической (микроскоп «Микровизор металлографический μ Vizo - MET-221»), сканирующей (сканирующий электронный микроскоп «SEM-515 Philips») и просвечивающей дифракционной (приборы ЭМ-125 FET Теснаі 2062 TWIN) электронной микроскопии [14-17]. Элементный состав поверхностного слоя определяли методами микрорентгеноспектрального анализа (микроанализатор EDAX ECON IV, являющийся приставкой к электронному сканирующему микроскопу SEM-515 «Philips»). Анализ фазового состава поверхностного слоя выполняли методами дифракции рентгеновских лучей (дифрактометр XRD-7000s, Shimadzu, Япония) [18-19].

Результаты и их обсуждение

Основное отличие стали Hardox 450 от широко распространенных износостойких сталей – это низкое содержание легирующих элементов. За счет этого сталь хорошо сваривается и обрабатывается. Высокая твердость сталей Hardox достигается за счет специальной системы закалки листов, которая позволяет получить мелкозернистую структуру. Суть закалки заключается в быстром охлаждении прокатного листа без последующего отпуска. По прочности сталь Hardox 450 превосходит другие свариваемые стали, а по значению ударной вязкости сравнима с обычными конструкционными сталями. Так, при температуре – 40°C она имеет гарантированное значение ударной вязкости 30 Дж/см² (образец с V-образным надрезом). Предел прочности стали Hardox 450 составляет 1250 МПа, предела текучести – 1000 МПа, относительное удлинение – 15%, относительное ужение – 63%. Твердость стали в закаленном состоянии составляет 370 НВ.

Формирование наплавленного электродуговым методом слоя на поверхности стали сопровождается слабо контролируемым нагревом материала. Это приводит к протеканию процесса отпуска закаленного состояния. Отпуск стали приводит к выделению частиц карбидной фазы (цементита), расположенных в объеме пластин и на их границах. Частицы имеют игольчатую форму, характерную для цементита, образующегося при низкотемпературном отпуске закаленной стали [20, 21]. Дефектная субструктура пластин мартенсита представлена дислокациями. Дислокации расположены хаотически, либо формируют сетчатую субструктуру. Скалярная плотность дислокаций изменяется в весьма широких пределах – от $3 \cdot 10^9$ до $6,5 \cdot 10^{10}$ см⁻². Отметим, что в кристаллах мартенсита закаленной стали скалярная плотность дислокаций составляет 10^{11} см⁻² [21, 22]. Нагрев стали сопровождается разрушением границ кристаллов мартенсита, что особенно характерно для пакетного мартенсита.

Особенностью фазового состава наплавленного слоя является формирование в эвтектике пластин борида железа преимущественно состава Fe_2B . Включения боридов железа не содержат в своем объеме дислокационной субструктуры, что кардинально отличает их от прилегающих слоев α -фазы. Причиной отсутствия дислокационной субструктуры в пластинах боридов железа является их сравнительно высокая твердость (12,5-16,5) ГПа [23, 24]. Характерной особенностью электронно-микроскопического изображения боридов является наличие в объеме включений большого количества изгибных экстинкционных контуров.

Разделяющая пластины боридов железа α -фаза, представлена преимущественно мартенситом пакетной морфологии, поперечные размеры которых изменяются в пределах от 30 до 70 нм. В объеме пластин наблюдается дислокационная субструктура сетчатого типа. Судя по размерам ячеек дислокационных сеток, скалярная плотность дислокаций

составляет 10^{11} см⁻². Высокая плотность дислокаций, пластинчатая морфология структуры прослоек указывают на мартенситный механизм формирования α -фазы с образованием ультрамелкой мартенситной структуры.

Анализируя результаты, изменения микротвердости по сечению поперечного шлифа (рис. 1), можно отметить формирование высокопрочного поверхностного слоя, микротвердость которого изменяется в пределах (10,5 – 12,5) ГПа, то есть более чем в 2 раза превышает твердость металла основы (сталь Хардокс-450) при толщине наплавленного слоя не менее 7 мм.

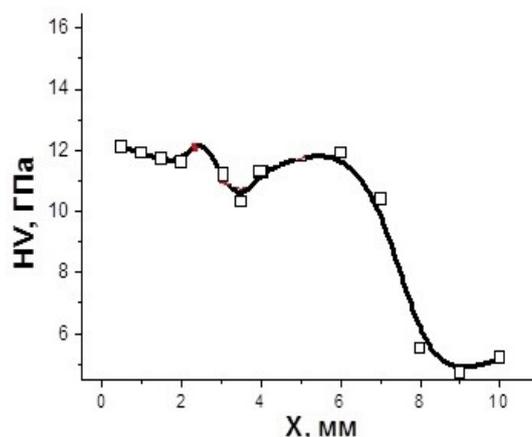


Рис. 1. Профиль микротвердости системы «наплавленный слой / сталь»

Облучение наплавленного слоя высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к формированию модифицированного поверхностного слоя толщиной до 50 мкм. Модифицированный слой, отличается от основного объема наплавленного материала степенью дисперсности структуры, выявленной при ионном травлении поперечного шлифа.

Облучение поверхности наплавленного слоя приводит к существенному изменению фазового состава и дефектной субструктуры материала. Прежде всего, обращает на себя внимание существенное уменьшение поперечных размеров кристаллов мартенсита. Если в стали, закаленной с печного нагрева средние поперечные размеры кристаллов пакетного мартенсита составляют (150-200) нм [14], то в модифицированном электронно-пучковой обработкой слое наплавки поперечные размеры кристаллов пакетного мартенсита изменяются в пределах (50-70) нм. Одной из причин такого изменения поперечных размеров кристаллов мартенсита может быть сверх высокая (до 10^6 К/с) скорость охлаждения поверхностного слоя наплавки, облученной интенсивным импульсным электронным пучком. Другой возможной причиной являются малые объемы γ -фазы, расположенные между включениями второй фазы. Поверхностный слой наплавки, облученной интенсивным импульсным электронным пучком, является многофазным материалом. Основными фазами являются α -фаза, борид железа FeB и карбид бора B_4C .

Формирование наплавленного слоя приводит к увеличению износостойкости стали. На рис. 2 приведено изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях наплавленного слоя, модифицированного электронным пучком.

Обращает на себя внимание двухстадийный характер изменения коэффициента трения. На первой стадии величина коэффициента трения составляет $\approx 0,07$, на второй стадии $\approx 0,11$. Коэффициент трения стали без наплавки $\approx 0,31$. Анализируя изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях (рис. 2), можно предположить, что облучение наплавленного слоя интенсивным импульсным электронным пучком приводит к существенному (в $\approx 3,5$ раза) снижению коэффициента трения наплавленного слоя.

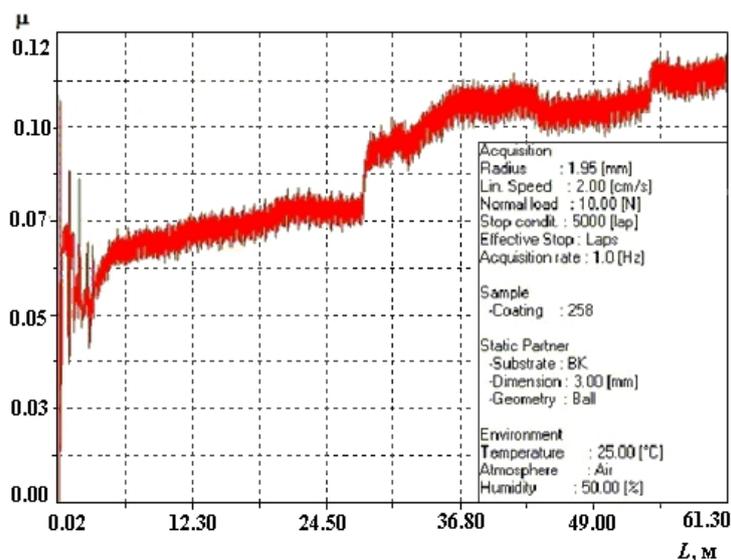


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения μ от длины трека L трибологических испытаний.
На вставке приведены условия трибологических испытаний

Заключение

Методами современного физического материаловедения проведены исследования фазового состава, дефектной субструктуры и трибологических свойств слоя, сформированного на стали Hardox 450 электродуговой наплавкой проволоки системы $Fe-C-Ni-B$, модифицированного облучением высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Показано, что электронно-пучковая обработка поверхности наплавки приводит к формированию многофазного состояния, основными фазами которого являются α -фаза (твёрдый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа), борид железа состава FeB и карбид бора состава B_4C .

Износостойкость поверхности наплавленного слоя после электронно-пучковой обработки возрастает более чем в 20 раз по отношению к износостойкости исходной стали Hardox 450, а коэффициент трения уменьшается в 3,5 раза.

Список литературы

1. Структура и свойства композиционных износостойких наплавочных сталей: монография / Е.В. Капралов, Е.А. Будовских, В.Е. Громов и др. – Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. – 109 с.
2. Structural phase states and properties of coatings welded onto steel surfaces using powder / E.V. Kapralov, S.V. Raikov, E.A. Budovskikh, V.E. Gromov, E.S. Vaschuk, Yu.F. Ivanov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2014. – Vol. 78, N 10. – P. 1015–1021.
3. Структура и свойства износостойких покрытий, наплавленных электродуговым методом на сталь порошковыми проволоками / В.Е. Громов, Е.В. Капралов, С.В. Райков, Ю.Ф. Иванов, Е.А. Будовских // Успехи физики металлов. – 2014. – Т. 15. – С. 211–232.
4. Structure and properties of wear-resistant weld deposit formed on martensitic steel using the electric-arc method / N.A. Popova, E.N. Nikonenko, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, E.A. Budovskikh, S.V. Raikov, E.V. Kapralov, E.S. Vaschuk // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1013. – P. 194–199.

5. Fe₂B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance / A. Marquez-Herrera, J.L. Fernandez-Munoz, M. Zapata-Torres et al. // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 254. – P. 433–439.
6. Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding / R. Zahiri, R. Sundaramoorthy, P. Lysz, C. Subramanian // Surface and Coatings Technology. – 2014. – Vol. 260. – P. 220–229.
7. Microstructure and high temperature corrosion behavior of wire-arc sprayed FeCrSiB coating / R. Li, Z. Zhou, D. He et al. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2015. – Vol. 24, N 5. – P. 857–864.
8. *Yüksel N., Şahin S.* Wear behavior–hardness–microstructure relation of Fe-Cr-C and Fe-Cr-C-B based hardfacing alloys // Materials & Design. – 2014. – Vol. 58. – P. 491–498.
9. *Venkatesh B., Striker K., Prabhakar V.S.V.* Wear characteristics of hardfacing alloys: state-of-the-art // Procedia Materials Science. – 2015. – Vol. 10. – P. 527–532.
10. Wear resistance of Fe-based nanostructured hardfacing / A. Gualco, C. Marini, H. Svoboda, E. Surian // Procedia Materials Science. – 2015. – Vol. 8. – P. 934–943.
11. *Teker T., Karatas S., Osman Y.S.* Microstructure and wear properties of AISI 1020 steel surface modified by HARDOX 450 and FeB powder mixture // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2014. – Vol. 50, N 1. – P. 94–103.
12. *Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф.* Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // Известия вузов. Физика. – 2008. – № 5. – С. 60–70.
13. Эволюция структуры поверхностного слоя стали, подвергнутой электронно-ионно-плазменным методам обработки / под ред. Н.Н. Ковалья, Ю.Ф. Иванова. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. – 304 с.
14. *Утевский Л.М.* Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
15. *Эндрюс К., Дайсон Д., Киоун С.* Электронограммы и их интерпретация. – М.: Мир, 1971. – 256 с.
16. Практические методы в электронной микроскопии: пер с англ. / под ред. О.М. Глоэра. – Л.: Машиностроение, 1980. – 375 с.
17. Электронная микроскопия в металловедении / А.В. Смирнова, Г.А. Кокорин, С.М. Полонская и др. – М.: Металлургия, 1985. – 192 с.
18. *Брандон Д., Каплан У.* Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. – М.: Техносфера, 2006. – 384 с.
19. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин и др. – М.: Техносфера, 2009. – 208 с.
20. *Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И.* Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
21. Закаленная конструкционная сталь: структура и механизмы упрочнения / Ю.Ф. Иванов, Е.В. Корнет, Э.В. Козлов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2010. – 174 с.
22. *Петров Ю.Н.* Дефекты и бездиффузионное превращение в стали. – Киев: Наукова думка, 1978. – 267 с.
23. *Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А.* Бориды. – М.: Атомиздат, 1975. – 376 с.
24. *Кузьма Ю.Б., Чабан П.Ф.* Двойные и тройные системы, содержащие бор: справочник. – М.: Металлургия, 1990. – 320 с.

**INCREASE OF STEEL SURFACE PROPERTIES OF SURFACING AND FOLLOWING
ELECTRON BEAM TREATMENT**

Kormyshev V.E.¹, Engineer, e-mail: kormyshev_v@mail.ru

Gromov V.E.¹, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, e-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Ivanov Yu.F.^{2,3}, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher,
e-mail: yufi55@mail.ru

Bataev V.A.⁴, D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: vabataev@yandex.ru

Kondratova O.A.¹, Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor,
e-mail: okondratova@mail.ru

Nikitina E.N.¹, Ph.D. (Engineering), e-mail: nikitina@sibsiu.ru

¹ Siberian State Industrial University, 42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

³ Institute of High Current Electronics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 2/3 Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation

⁴ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospect K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

Using the methods of modern material science the structure, phase composition, defect substructure, microhardness and tribology properties of coating formed on martensite low carbon Hardox 450 steel by electroarc surfacing of *Fe-C-N-B* powder wire and modified by the following irradiation of high intensive pulse electron beams are investigated. The formation of multiphase state of surfaced layer is revealed. It characterizes by the of large amount of iron borides inclusions, the hardness of whisk's 10 times more that the hardness of Hardox 450 steel. The surfaced layer, modified by intensive impulse electron beams is multiphase aggregate with solid solution on the α -Fe base iron boride *FeB* and boron carbide *B₄C* main phases. The increase of wear resistance of surfaced layer modified by intensive impulse electron beams in more than 20 times relatively to wear resistance of steel and in more than 11 times relatively to the surfaced layer without electron beam treatment is revealed. The friction coefficient of surfaced layer irradiated by electron beams is decreased essentially. For the initial steel it equals to 0,31; for surfaced layer – 0,14; for surfaced layer after electron beam treatment – 0,09.

Keywords

wear resistance, microhardness, structure, phase composition, surfacing, electron beam treatment

УДК 621.791.75

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ,
ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ НАПЛАВКОЙ***Е.В. БЕРЕЖНАЯ, канд. техн. наук, доцент
(ДГМА, г. Краматорск)*

Бережная Е.В. – 84313, Украина, Донецкая обл., г. Краматорск, ул. Шкадинова, 72,
Донбасская государственная машиностроительная академия
e-mail: elena_kassova@mail.ru

В работе исследовано влияние термообработки на структурные изменения наплавленного слоя на поверхности деталей из конструкционной стали, восстановленных электроконтактной наплавкой. В результате проведенного количественного металлографического анализа установлено, что применение в качестве охлаждающей среды сыпучего серебристого графита позволяет обеспечить замедленное охлаждение наплавленных образцов после их термической обработки, что способствует повышению содержания избыточного феррита в наплавленном слое. Кроме того замедленное охлаждение в изотермической среде приводит к значительному увеличению размеров зерна, по сравнению с зерном, полученным при охлаждении наплавленных образцов на воздухе.

Ключевые слова: замедленное охлаждение, термическая обработка, электроконтактная наплавка.

Введение

Регламентирование комплекса показателей физико-механического характера (механические свойства металла поверхностных слоев, микроструктура, остаточные напряжения с созданием благоприятного их распределения в поверхностном слое) является значительным резервом обеспечения надежности восстановленных деталей. При разработке комбинированной технологии восстановления деталей, работающих в условиях циклического нагружения, необходимо учитывать, что восстановлению электроконтактной наплавкой подвергается не все изделие, а только изношенные участки, а толщина ленты и глубина зоны термического влияния не превышает нескольких миллиметров [1-3]. Поэтому наиболее оптимальным в данном случае будет применение локального поверхностного метода нагрева токами высокой частоты [4-6], обладающим экономичностью, поскольку нет необходимости нагревать все изделие. Однако, как показали эксперименты [7, 8], после высокочастотного нагрева общее количество свободного феррита в структуре несколько меньше, чем при обычном печном, что способствует повышению склонности к концентрации напряжений в восстановленном изделии. Кроме того, охлаждение на воздухе приводит к образованию окалины, что требует увеличения припусков на механическую обработку, а, следовательно, и увеличение толщины наплавленной ленты. Для устранения указанных недостатков и получения требуемой структуры охлаждение после индукционного нагрева необходимо провести в среде, которая обеспечивала бы более медленную скорость охлаждения и препятствовала бы окислению поверхности. Согласно [9], такой средой является серебристый сыпучий графит.

Цель – исследование влияния термообработки на структуру наплавленного слоя применительно к конструкционной стали.

Задачей работы является проведение структурного анализа наплавленного слоя при охлаждении в изотермических условиях.

Методика экспериментального исследования

Испытания проводили на наплавленных образцах из стали 45 диаметром 40мм лентой толщиной 0,5 мм из стали 45 (режим электроконтактной наплавки: $I=6\text{кА}$, $P=1,25\text{кВ}$, $t_{\text{имп}}=0,04\text{с}$). Длина наплавленного образца 30 мм. Нагрев образцов проводили в установке ТВЧ до 900°C , а охлаждение – на спокойном воздухе (19°C) и в серебристом сыпучем графите кристаллическом литейном ГЛ1 ГОСТ 5279-74. Количественный фазовый анализ и анализ размеров зерна проводили с помощью специализированного программного обеспечения.

Результаты и обсуждение

Для исследованных условий охлаждения (на воздухе и в графите (рис.1)) характерны четыре стадии: 1 – охлаждение с температуры аустенитизации до температуры начала выделения феррита; 2 – охлаждение от температуры начала выделения феррита до начала перлитного превращения; 3 – собственно перлитное превращение; 4 – охлаждение с температуры завершения перлитного превращения до температуры 200°C .

При меньших степенях переохлаждения, которые имеют место при охлаждении в графите, снижаются потери тепла в окружающую среду, а поэтому создаются условия для увеличения длительности превращения. Поскольку при нормализации в поверхностном слое перлитное превращение протекает при более низкой температуре, чем в центральной части, то структура в поверхностном слое должна быть мельче, а в центральной части крупнее. При индукционном нагреве изделие будет прогреваться только на определенную глубину, поэтому отвод тепла будет протекать еще интенсивнее и длительность превращения еще более снизится. В случае охлаждения в сыпучем графите перлитное превращение начинается при температуре на 30°C выше, чем при охлаждении на воздухе, однако при этой же температуре и завершается. Отсюда следует, что после завершения перлитного превращения структура образцов после охлаждения в сыпучем графите более однородна.

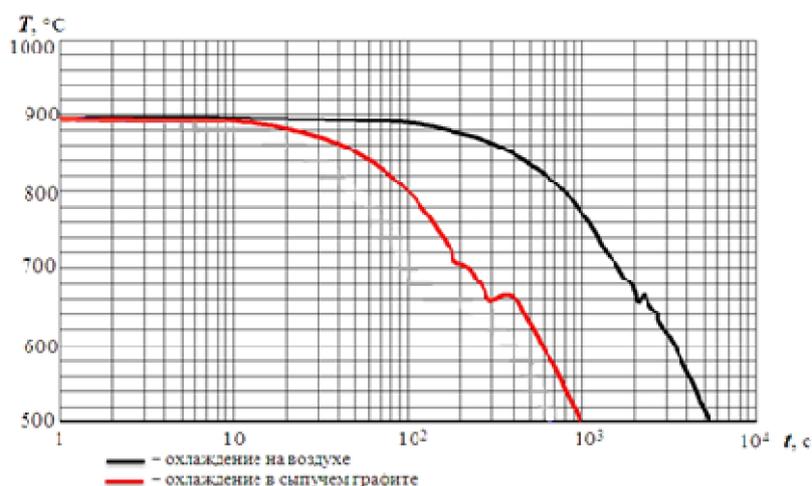


Рис.1. Изменение температуры наплавленных образцов при различных условиях охлаждения после термообработки

В результате количественного металлографического анализа наплавленных образцов было установлено, что охлаждение наплавленного образца после ТВЧ в сыпучем графите обеспечило увеличение содержания избыточного феррита в среднем на 4,7% по сравнению с охлаждением на воздухе. Таким образом, общая концентрация избыточного феррита в наплавленном образце после ТВЧ и охлаждении в сыпучем серебристом графите составляет

33,5899% (рис.2, а). Общая концентрация избыточного феррита в наплавленном образце после ТВЧ и охлаждения на воздухе в 1,12 раз меньше и составляет 30,0077% (рис.2, б). Результаты измерений размеров зерна (рис.3) свидетельствует о том, что замедленное охлаждение в графите также приводит к увеличению размеров зерен.

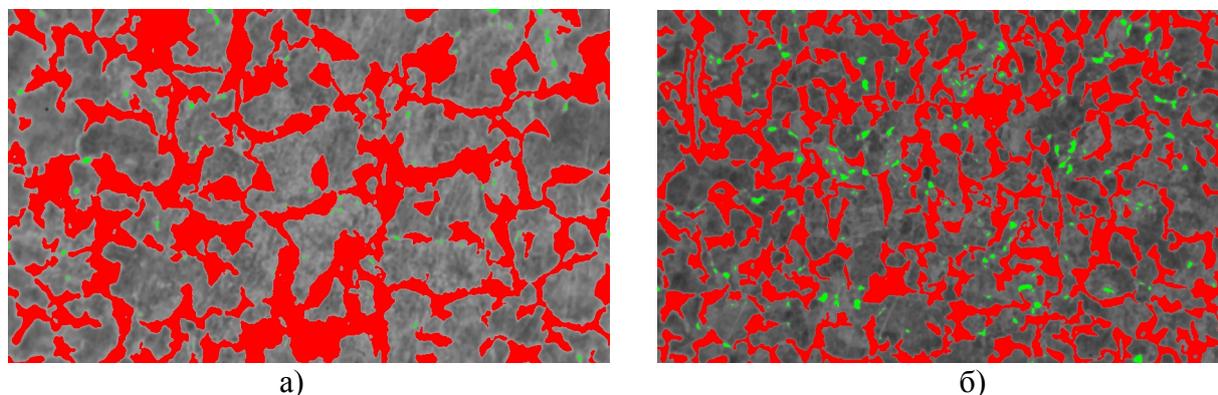


Рис.2. Количественный анализ структурных элементов при охлаждении в сыпучем графите (а) и на воздухе (б), ($\times 400$)

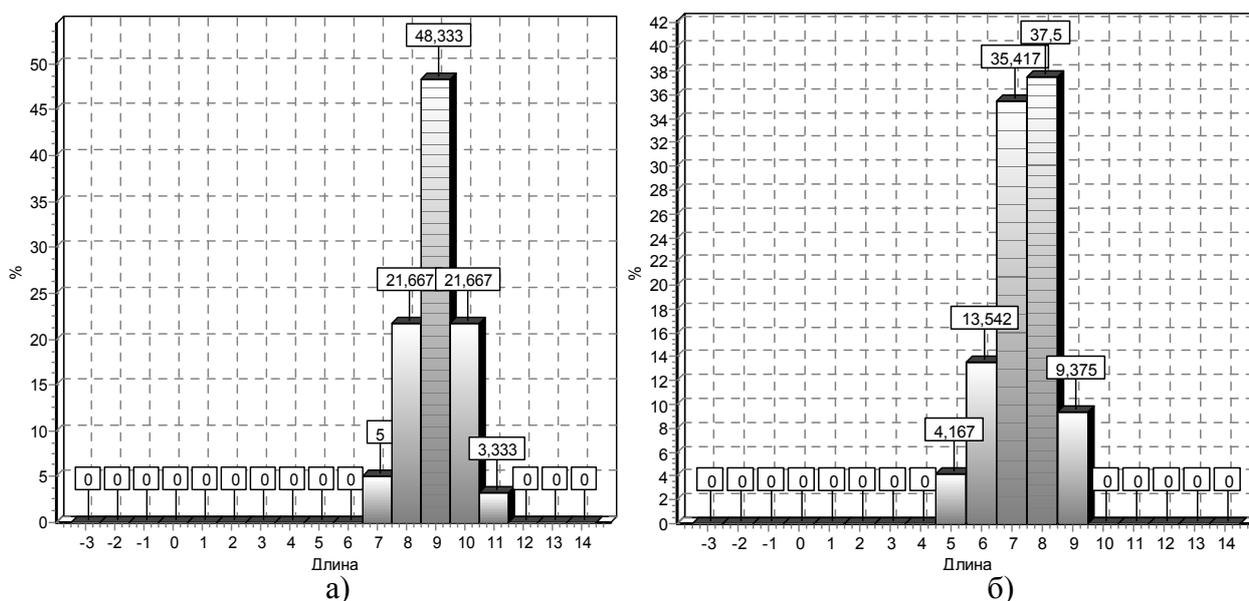


Рис.3. Распределение размеров зерна наплавленных образцов из стали 45 после ТВЧ при охлаждении на воздухе (а) и в сыпучем графите (б)

Такое изменение размеров зерен вызвано тем, что диффузионное превращение аустенита в феррито-цементитную смесь при охлаждении в графите протекает более медленно и при более высоких температурах. Согласно результатам исследований, средний размер зерна, полученный при замедленном охлаждении, на 11 мкм больше по сравнению с зерном, полученным при охлаждении на воздухе. Это способствует уменьшению площади межзеренной поверхности, что обуславливает снижение склонности к концентрации напряжений [10, 11]. Наплавленные образцы после ТВЧ и охлаждения в сыпучем графите содержат больший объем зерен избыточного феррита, благодаря чему в процессе микродеформации препятствия движению дислокаций накапливаются менее интенсивно, а структура наплавленного слоя менее склонна к концентрации напряжений в условиях циклического нагружения [7].

Выводы

Использование разработанной комбинированной технологии восстановления деталей, работающих при циклическом нагружении (электроконтактная наплавка с последующим локальным нагревом ТВЧ до 900°C и замедленным охлаждением в сыпучем серебристом графите) обеспечивает повышение среднего содержания избыточного феррита на 4,7% при увеличении размера зерна в среднем на 11мкм. Для деталей, работающих в условиях циклического нагружения, такая структура является наименее чувствительной к концентрации напряжений.

Список литературы

1. Бурак П.И. Продление ресурса детали электроконтактной приваркой // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 6. – С. 42–44.
2. Нафиков М.З. Формирование сплошного металлопокрытия при электроконтактной наплавке валов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 9. – С. 24–29.
3. Прохоров Н.Н. Влияние параметров электроконтактной наплавки на глубину // Сварочное производство. – 1988. – № 4. – С. 8–10.
4. Головин Г.Ф., Замятнин М.М. Высокочастотная термическая обработка. – М.: Машиностроение, 1990. – 239 с.
5. Васильев А.С., Царевский В.В. Высокоинтенсивный индукционный нагрев // Электричество. – 2001. – № 12. – С. 37–43.
6. Бровер Г.И., Варавка В.И., Русин А.П. Особенности строения и свойств инструментальных сталей после высококонцентрированного нагрева и отпуска // Физика и химия обработки материалов. – 1988. – № 5. – С. 107–113.
7. Бережная Е.В., Лапченко А.В., Турчанин М.А. Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на физико-механические характеристики покрытия // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, 2016. – № 38. – С. 125–131.
8. Кузнецов В.Д., Бережная Е.В., Лапченко А.В. Повышение износостойкости деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой // Проблемы тертя та зношування. – 2016. – № 3 (72). – С. 34–40.
9. Заблоцкий В.К., Шимко В.И., Шимко А.И. Особенности охлаждения стали 70X5BMФ с температуры аустенизации в сыпучем графите // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 55. – С. 34–37.
10. Chapetti M.D., Tagawa T., Miyata T. Ultra-long cycle fatigue of high-strength carbon steels. Part 1: Revive and analysis of the mechanism of failure // Materials Science and Engineering A. – 2003. – Vol. 356, N 1–2. – P. 227–230.
11. Marines I., Bin X., Bathias C. An understanding of a very high cycle fatigue of metals // International Journal of Fatigue. – 2003. – Vol. 5. – P. 1101–1107.

**TECHNOLOGICAL FEATURES OF THE HEAT TREATMENT OF DETAILS
RESTORED WITH ELECTRIC CONTACT SURFACING**

Berezshnaya O.V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: elena_kassova@mail.ru

Donbass State Engineering Academy, 72 Shkadinova, Kramatorsk, Donetsk region, 84313, Ukraine

Abstract

The influence of heat treatment on the structural changes of the deposited layer on the surface of structural steel components, remanufactured electric contact deposition is investigated. Preliminary experiments showed that high-frequency heating since the total number of free ferrite in the structure of the deposited layer is somewhat smaller than in the conventional furnace, thereby increasing the propensity to stress concentration in the restored product. To obtain the desired structure it is suggested to provide a cooling of the deposited samples at slower rate after induction heating. As a result of quantitative metallographic analysis found that the use as a cooling environment of silver particulate graphite ensures slow cooling of the deposited specimens after heat treatment, thereby increasing the content of excess ferrite in deposited layer. Also slow isothermal cooling environment leads to a significant increase in grain size as compared with the grain obtained by cooling the deposited samples in air.

Keywords

slow cooling, heat treatment, electric contact surfacing

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 упорядочение 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.

9. 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 списке 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,
Редакционный совет и редакция 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, и 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 базе 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 ^3P 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 ^3P MRSI, 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 «Актуальные проблемы в машиностроении» (Print ISSN: 2313-1020; Online ISSN: 2542-1093) публикует статьи, содержащие новые и оригинальные результаты исследований. Журнал представлен на сайте НГТУ: <http://journals.nstu.ru/machine-building> и <http://machine-building.conf.nstu.ru/>. Электронная версия издания доступна на платформе eLIBRARY. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. Публикация статей бесплатная.

Для того, чтобы подать статью, **автор и все соавторы должны быть зарегистрированы на сайте журнала** (при регистрации профиля автора должны быть заполнены все поля). Автор (один из соавторов) в своем кабинете выбирает в меню пункт «**Подать статью**» и вводит все необходимые данные. Своих соавторов при этом он выбирает из списка зарегистрированных пользователей.

Для регистрации перейдите по ссылке: <http://journals.nstu.ru/machine-building/registration>

Обращаем Ваше внимание! Если Вы зарегистрированы на сайте научно-технического и производственного журнала «Обработка металлов (технология · оборудование · инструменты)», то для подачи своей работы на сайте журнала «Актуальные проблемы в машиностроении» необходимо использовать тот же логин и пароль.

ПОДГОТОВКА РУКОПИСИ

Рукопись статьи готовится в соответствии с правилами оформления журнала (см. ниже) «Актуальные проблемы в машиностроении» в редакторе MS Word и прикрепляется в формате *.doc, *.docx.

Сканированные **Лицензионный договор с подписями авторов, Экспертное заключение о возможности открытого опубликования статьи и Заключение внутривузовской комиссии по экспортному контролю о возможности использования научных материалов при международном сотрудничестве (если предусмотрено ВУЗом)** (цветной режим сканирования, разрешение не менее 300 dpi) необходимо также прикрепить на сайте журнала в разделе «**Подать статью**» в формате *.pdf, *.jpg, *.jpeg. Поскольку, в оболочке при подаче статьи существует только одна опция «**Скан экспертного заключения**», необходимо «**Экспертное заключение о возможности открытого опубликования статьи**» и «**Заключение внутривузовской комиссии по экспортному контролю о возможности использования научных материалов при международном сотрудничестве**» объединить в один документ (многостраничный) и загрузить сформированный файл.

По окончании всех работ обязательно нажать кнопку «**Отправить в редакцию**».

Обращаем внимание, что авторы должны дополнительно отправить заявку на участие, в которой указать фамилию, имя и отчество (**Ф.И.О. полностью**), должность, ученую степень, звание, тематика доклада (*Инновационные технологии в машиностроении; Технологическое оборудование, оснастка и инструменты; Материаловедение в машиностроении; Экономика и организация инновационных процессов в машиностроении*), название организации, адрес, телефон, факс, e-mail. Заявку можно отправить на e-mail: metal_working@mail.ru, либо написать «**Сообщение**» в своем авторском профиле.

Бронированием мест в гостиницах участники занимаются самостоятельно. На сайте конференции, в разделе «**Контакты**» (<http://machine-building.conf.nstu.ru/archive/>), представлены адреса возможных гостиниц для размещения участников конференции в г. Новосибирске.

Одновременно со статьей высылаются оригиналы всех перечисленных документов на почтовый адрес редакции: 630073, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, ком. 137 ВЦ, зам. гл. редактора Скибе В.Ю.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РУКОПИСЕЙ

(<http://journals.nstu.ru/machine-building/rules>)

Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**; формат **A4** (210×297 мм); ориентация – книжная, все поля **2 см**; без переносов; шрифт **Times New Roman**, размер шрифта основного текста – **14 пт**, через **1 интервал**, абзацный отступ – **1,25 см**, страницы не нумеруются. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст работы.

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. Рекомендуемые размеры рисунков: 60 × 150, 60 × 70 мм с разрешением не менее **300 dpi**.

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].

Англоязычный блок должен включать следующую информацию: **Заглавие работы; Фамилию И.О. (всех авторов); Аффiliation всех авторов; Аннотация (Abstract)** 100-150 слов; **Ключевые слова (Keywords)**.

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 7.9-95 – 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 100 - 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** (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 повторов, 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:** не менее 15 – 25 наименований источников (оформлять 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]. Внимание авторы, в работе не должно быть более 30 % собственных статей, не менее 50 % - литература за последние 10 лет, обязательно включайте иностранные источники (желательно не менее 50 %).
9. **Англоязычный блок статьи** подготавливается на следующей странице, сразу же после русскоязычного списка литературы. Правила оформления данного раздела работы представлены ниже.
10. **Сведения для РИНЦ** (пример оформления представлен ниже).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ В ЖУРНАЛЕ «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ»

Англоязычная часть статьи должна включать в себя:

Заголовок (Title), переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен и др. объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

Аффилиация (Affiliation).

Для каждого автора указывается: **Фамилия** и первые буквы **Имени** и **Отчества**, **степень**, **звание**, **должность**, **адрес электронной почты (e-mail)**, адресные данные [**официальное название организации на английском языке, которую он представляет, полный почтовый адрес организации (включая название улицы, город, почтовый индекс, страна)**]. Для указания степени, звания и должности можно воспользоваться справочными материалами, представленными на сайте журнала: http://journals.nstu.ru/files/2_4/affiliation.doc;

Аннотация (Abstract) - по объему больше аннотации на русском языке и включает **100 - 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);

Ключевые слова (Keywords);

Информация об источниках финансирования исследования (Funding) (гранты, если необходимо).

Внимание! Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены).

ОФОРМЛЕНИЕ АНГЛОЯЗЫЧНОГО БЛОКА СТАТЬИ В ЖУРНАЛЕ «ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ (ТЕХНОЛОГИЯ • ОБОРУДОВАНИЕ • ИНСТРУМЕНТЫ)»

Обращаем внимание наших авторов, что в связи с планируемой подготовкой журнала к включению в международные базы данных библиографического описания и научного цитирования Web of Science и Scopus с 2014 г. существенно изменены правила оформления представляемых рукописей. Главная цель изменений состоит в том, чтобы сделать основные положения и выводы публикуемых в журнале статей доступными для широкой зарубежной аудитории, не владеющей русским языком. Особое значение теперь приобретают англоязычная аннотация к статье (Abstract) и список использованной автором литературы (References), поскольку именно они, а не текст самой статьи, находят отражение в системах Scopus и Web of Science. По своему содержанию и информативности Abstract и References должны привлечь внимание зарубежных читателей к теме статьи. Соответственно, в интересах автора тщательно подойти к подготовке этих блоков статьи и обеспечить их максимально высокое качество.

Англоязычная часть статьи подготавливается на следующей странице, сразу же после *русскоязычного списка литературы* и включается в себя:

- **Заголовок (Title)**, переведенный с русского языка. В переводе заглавий статей на английский язык не должно быть никаких транслитераций с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен и др. объектов, имеющих собственные названия; также не используется непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это также касается авторских аннотаций и ключевых слов;

- **Аффилиация (Affiliation)**.

Для каждого автора указывается: *Фамилия* и первые буквы *Имени* и *Отчества*, *степень*, *звание*, *должность*, *адрес электронной почты (e-mail)*, адресные данные [*официальное название организации* на английском языке, которую он представляет, *полный почтовый адрес организации (включая название улицы, город, почтовый индекс, страна)*]. Для указания *степени*, *звания* и *должности* необходимо воспользоваться следующими справочными материалами;

- **Аннотация (Abstract)** - по объему больше аннотации на русском языке и включает **не менее 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);

- **Ключевые слова (Keywords)**;

- **Список литературы (References)**. Ссылки на источники в англоязычном списке должны совпадать со ссылками, представленными в русскоязычном списке использованной литературы.

Список **всей** использованной в статье литературы дается на **латинице** (источники на англ., фр., нем. и др. языках – в оригинале, русскоязычные источники необходимо транслитерировать и переводить (правила оформления см. ниже)). Для автоматической транслитерации в латиницу рекомендуется обращаться на сайт <http://translit.ru> (стандарт транслитерации – **BSI**; настройка перед транслитерацией).

- **Информация об источниках финансирования исследования (Funding)** (гранты, если необходимо).

Внимание! Авторам запрещается предоставлять переводы заголовков статей, аннотаций, ключевых слов и информации об источниках финансирования, подготовленные с помощью электронных переводных систем (работы с ошибками и некорректным переводом будут отклонены)

Правила подготовки списка литературы в англоязычном блоке статьи*

Списки литературы в российских журналах включают большое разнообразие русскоязычных источников: журналы, материалы конференций, сборники, монографии, патенты, диссертации, отчеты, законы, постановления и пр. Поэтому постоянно возникают вопросы, как готовить для *References* описания этих публикаций.

Для подготовки описания этих видов документов необходимо учитывать тот факт, что эти публикации отсутствуют в системе и не предназначены для установления соответствий между публикациями и ссылками на них. Однако они также должны быть обязательно представлены в романском алфавите. Поэтому их описания можно делать достаточно короткими. Исключение составляют переводные книги, в основном, монографии.

Если готовить ссылки в *References* с пониманием цели их представления в системе, тогда существует ряд правил, выполняя которые можно получить максимальное число связанных с публикациями ссылок в журнале. К таким правилам можно отнести:

- 1) представлять в *References*, вместо русскоязычного варианта описания журнала, описание его переводной версии, которая, скорее всего, будет или уже представлена в *Scopus*;

- 2) так как известно, что описания включаемых в зарубежные индексы цитирования и другие базы данных публикаций даются по их англоязычному блоку, то в самом идеальном случае в *References* можно включать переводное название статьи в том виде, как оно указано в журнале (и потом - в базе данных). В таком случае транслитерация заглавия статьи не требуется, но указывается в скобках после ее описания язык публикации (**in Russian**);

- 3) представлять в *References*, вместо переводного издания книги (монографии), описание оригинальной ее версии, так как индексы цитирования все больше включают книг в свои ресурсы, в т.ч. *Scopus*. Переводная версия может быть также описана, как дополнительные сведения (в скобках), см. пример ниже;

- 4) представление в *References* только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо, так как делает такое описание совершенно не читаемым (еще как-то понятным для русскоязычного читателя, но не понятным по содержанию больше никому). Поэтому, если нужно сократить описание, то лучше приводить его переводное описание с указанием в скобках (**in Russian**). Это в большей степени относится к анонимным (не авторским) произведениям: законодательным, нормативным документам, а также к патентам, диссертациям, отчетам и другим не типичным для индексов цитирования документам;

- 5) при описании изданий без авторов (сборников, коллективных монографий) допускается вместо авторов писать одного, максимум двух редакторов издания;

* По материалам работ *О. В. Кирилловой*: 1. Редакционная подготовка научных журналов для включения в зарубежные индексы цитирования: методические рекомендации. М., 2012, 68 с.; 2. Редакционная подготовка научных журналов по международным стандартам. Рекомендации эксперта БД Scopus. М., 2013. Ч. 1. 90 с.

6) для неопубликованных документов можно делать самое короткое название с указанием в скобках (**unpublished**), если оно имеет авторство (для учета ссылок автора), либо просто “**Unpublished Source**” или “**Unpublished Report**” и т.д., если авторство в документе отсутствует;

7) так как русскоязычные источники трудно идентифицируются зарубежными специалистами, рекомендуется в описаниях оригинальное название источника выделять курсивом, как в большинстве зарубежных стандартов;

8) если описываемая публикация имеет doi, его обязательно надо указывать в библиографии в *References*, так как этот идентификатор является наиболее точным источником информации о статье и по нему производится ссылка “ссылка - публикация”;

9) нежелательно в ссылках делать произвольные сокращения названий источников. Это часто приводит к потере связи, так как название может быть не идентифицировано.

10) все основные выходные издательские сведения (в описаниях журнала: обозначение тома, номера, страниц; в описаниях книг: место издания - город, обозначение издательства (кроме собственного непереводного имени издательства, оно транслитерируется)) должны быть представлены на английском языке.

11) в описаниях русскоязычных учебников, учебных пособий не надо указывать тип изданий. Эта информация в ссылках в данном случае является избыточной.

12) в выходных данных публикаций в ссылках (статей, книг) необходимо указывать количество страниц публикации: диапазон страниц в издании указывается “pp.” перед страницами; количество страниц в полном издании (книге) - указывается как “p.” после указания количества страниц;

13) перевод заглавия статьи или источника берётся в квадратные скобки; иногда используются круглые скобки, однако, если квадратные скобки используются редко для других целей в описаниях изданий, то круглые скобки могут иметь другое предназначение, поэтому их использование может вызвать путаницу в описаниях;

14) одна публикация описывается в списке литературы один раз, независимо от того, сколько раз в тексте публикации был упомянут источник;

15) если книга в списке литературы (в любом варианте - основном или в *References*) описывается полностью, тогда в библиографии должен быть указан полный объем издания, независимо от того, какие страницы издания были процитированы в тексте; исключения составляют случаи, когда используются отдельные главы из книги; в этом варианте в списке литературы дается описание главы, с указанием страниц “от-до”.

16) использовать системы автоматического перевода кириллицы в романский алфавит; не делать транслитерацию вручную. Это позволит избежать ошибок транслитерации.

Для транслитерации русских слов целесообразно использование сайта: <http://translit.net/>

Нужно войти в программу **Translit.net**, включить русский язык, выбрать вариант стандарта транслитерации **BSI (British Standard Institute)**, вставить в нужное поле текст ссылки на русском языке и нажать «**в транслит**».

Последние два пункта «правил» относятся к процессу составления библиографий в целом. Ниже приведены примеры ссылок на различные виды публикаций.

Описание статьи из журналов:

Atapin V.G., Skeebeba V.Yu. Chislennoe modelirovanie beskarkasnykh arochnykh pokrytii [Numerical simulation of frameless arched covers]. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 4(57), pp. 23–27.

Kiselev E.S., Unyanin A.N., Kurzanova Z.S., Kuznetsova M.A. Sovremennye smazочно-okhlazhdayushchie zhidkosti [Modern coolants]. *Vestnik mashinostroeniya = Russian Engineering Research*, 1996, no. 7, pp. 30-34.

Описание статьи из электронного журнала:

Swaminathan V., Lepkoswka-White E., Rao B.P. Browsers or buyers in cyberspace? An investigation of electronic factors influencing electronic exchange. *Journal of Computer- Mediated Communication*, 1999, vol. 5, no. 2. Available at: <http://www.ascusc.org/jcmc/vol5/issue2/> (Accessed 28 April 2011).

Если статья имеет DOI – обязательно указать его!

Описание статьи с DOI:

Abul’khanov S.R., Goryainov D.S., Skuratov D.L., Shvetsov A.N. Formation of the surface layer in diamond smoothing. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 147-149. doi: 10.3103/S1068798X15020033

Ding H.T., Shin Y.C. Laser-assisted machining of hardened steel parts with surface integrity analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50, iss. 1, pp. 106-114. doi:10.1016/j.ijmactools.2009.09.001

Описание статьи из продолжающегося издания (сборника трудов)

Astakhov M.V., Tagantsev T.V. [Experimental study of the strength of joints "steelcomposite"]. *Trudy MGTU «Matematicheskoe modelirovanie slozhnykh tekhnicheskikh sistem»* [Proceedings of the Bauman MSTU “Mathematical Modeling of Complex Technical Systems”], 2006, no. 593, pp. 125–130. (In Russian)

Описание материалов конференций:

Usmanov T.S., Gusmanov A.A., Mullagalina I.Z., Muhametshina R.Ju., Chervyakova A.N., Sveshnikov A.V. [Features of the design of field development with the use of hydraulic fracturing]. *Trudy 6 Mezhdunarodnogo Simpoziuma “Novye resursosberegayushchie tekhnologii nedropol’zovaniya i povysheniya neftegazootdachi”* [Proceedings 6th International

Symposium “New energy saving subsoil technologies and the increasing of the oil and gas impact”. Moscow, 2007, pp. 267–272. (In Russian).

Нежелательно оставлять только переводное название конференции, так как оно при попытке кем-либо найти эти материалы, идентифицируется с большим трудом.

Sen'kin A.V. [Issues of vibration diagnostics of elastic spacecraft]. *Problemy teorii i praktiki v inzhenernykh issledovaniyakh. Trudy 33 nauchnoi konferentsii RUDN* [Problems of the Theory and Practice of Engineering Research. Proc. Russ. Univ. People's Friendship 33rd Sci. Conf.]. Moscow, 1997, pp. 223-225. (In Russian)

Описание книги (монографии, сборники):

Nenashev M.F. *Poslednee pravitel'stvo SSSR* [Last government of the USSR]. Moscow, Krom Publ., 1993. 221 p.

Ot katastrofy k vozrozhdeniyu: prichiny i posledstviya razrusheniya SSSR [From disaster to rebirth: the causes and consequences of the destruction of the Soviet Union]. Moscow, HSE Publ., 1999. 381 p.

Lindorf L.S., Mamikonians L.G., eds. *Eksploatatsiya turbogeneratorov s neposredstvennym okhlazhdeniem* [Operation of turbine generators with direct cooling]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 352 p.

Kanevskaya R.D. *Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamicheskikh protsessov razrabotki mestorozhdenii uglevodorodov* [Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposit development]. Izhevsk, 2002. 140 p.

Izvekov V.I., Serikhin N.A., Abramov A.I. *Proektirovanie turbogeneratorov* [Design of turbo-generators]. Moscow, MEI Publ., 2005, 440 p.

Latyshev V.N. *Tribologiya rezaniya. Kn. 1: Friksionnye protsessy pri rezanie metallov* [Tribology of Cutting, Vol. 1: Frictional Processes in Metal Cutting], Ivanovo, Ivanovskii Gos. Univ. Publ., 2009. 245 p.

Belousov, A.I., Bobrik, P.I., Rakhman_Zade, A.Z. *Teplovye yavleniya i obrabatyvaemost' rezaniem aviatsionnykh materialov. Trudy MATI* [Thermal Phenomena and the Ease of Cutting of Aviation Materials: Proceedings of the Moscow Aviation Engineering Institute]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966, no. 64.

Последняя ссылка является не полной. Из нее непонятно, описывается ли книга в целом (монография), выпущенная в серии трудов института, или это статья (в описании без заглавия статьи). Недостает в этом случае указания страниц. Если монография, тогда указывается, сколько всего страниц (235 p.), если статья - диапазон страниц или одна страница (pp. 220-222). Однако в любом случае эта ссылка будет найдена при поиске публикаций авторов.

Описание переводной книги:

Timoshenko S.P., Young D.H., Weaver W. *Vibration problems in engineering*. 4th ed. New York, Wiley, 1974. 521 p. (Russ. ed.: Timoshenko S.P., Iang D.Kh., Uiver U. *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 472 p.).

Brooking A., Jones P., Cox F. *Expert systems. Principles and case studies*. Chapman and Hall, 1984. 231 p. (Russ. ed.: Bruking A., Dzhons P., Koks F. *Ekspertnye sistemy. Printsipy raboty i primery*. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1987. 224 p.).

Если можно выявить оригинал, по которому был сделан перевод книги, тогда полезно описать его как основное название, вместо переводного. Такой вариант описания позволяет найти публикации авторов в действительном представлении их фамилий, а отличии от переводной версии (по все правилам, при переводе описания в латиницу фамилии авторов транслитерируются, что значительно искажает его настоящее написания - пример выше это хорошо демонстрирует).

Когда не удастся выявить сведения об оригинальной версии книги, либо переводная версия является, например, сборником из нескольких зарубежных изданий, в основном описании остается переводное издание.

Описание неопубликованного документа:

Latypov A.R., Khasanov M.M., Baikov V.A. *Geology and Production (NGT GiD). The Certificate on official registration of the computer program*. No. 2004611198, 2004. (In Russian, unpublished).

Pressure generator GD-2M. Technical description and user manual. Zagorsk, Res. Inst. of Appl. Chem. Publ., 1975. 15 p. (In Russian, unpublished).

Описание Интернет-ресурса:

Kondrat'ev V.B. *Global'naya farmatsevticheskaya promyshlennost'* [The global pharmaceutical industry]. Available at: http://perspektivy.info/rus/ekob/globalnaja_farmatsevticheskaja_promyshlennost_2011-07-18.html. (accessed 23.06.2013)

APA Style (2011). Available at: <http://www.apastyle.org/apa-style-help.aspx> (accessed 05.02.2011).

Описание диссертации или автореферата диссертации:

Seменов V.I. *Matematicheskoe modelirovanie plazmy v sisteme kompaktnyi tor*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Mathematical modeling of the plasma in the compact torus. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2003. 272 p.

Grigor'ev Iu.A. *Razrabotka nauchnykh osnov proektirovaniia arkhitektury raspredelennykh sistem obrabotki dannykh*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Development of scientific bases of architectural design of distributed data processing systems. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996. 243 p.

Описание ГОСТа:

GOST 8.586.5-2005. *Metodika vypolneniia izmerenii. Izmerenie raskhoda i kolichestva zhidkosti i gazov spomoshch'iu standartnykh suzhaiushchikh ustroistv* [State Standard 8.586.5 - 2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p.

или

State Standard 8.586.5-2005. Method of measurement. Measurement of flow rate and volume of liquids and gases by means of orifice devices. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (In Russian)

Описание патента:

Palkin M.V., e.a. *Sposob orientirovaniia po krenu letatel'nogo apparata s opticheskoi golovkoi samonavedeniia* [The way to orient on the roll of aircraft with optical homing head]. Patent RF, no. 2280590, 2006.

В описании не все авторы, как дано в основном списке литературы. Если работать с *References* добросовестно, тогда можно найти патент и дополнить авторов.

Описание авторского свидетельства (Inventor's Certificate) – аналогично.

Описание анонимных документов:

Russian Pharmaceutical Market. Results of 2010. The Analytical Review. DSM Group, 2011. 74 p. (In Russian)

Current status of the Russian pharmaceutical industry and international experience. Materials for the working group of the Commission for Modernization and Technological Development of Russia's Economy. Available at: <http://www.strategy.ru>. (In Russian)

Code of Business Conduct of OJSC "LUKOIL". Available at: http://www.lukoil.ru/materials/doc/documents/lukoil_corp_code.pdf. (In Russian)

RF Federal Law "On Protection of Consumers' Rights" of February 07, 1992 N 2300-1 (as amended by Federal Law of January 09, 1996 N 2 FZ, December 17, 1999 N 212 FZ). (In Russian)

Подписано в печать 10.03.2017. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Тираж 20 экз. Уч.-изд. л. 32,55. Печ. л. 17,5. Изд. № 54. Заказ № 405.

Издательство Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Тел.: (383)-346-31-87.

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

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ НГТУ

Кафедры:

Инженерной графики (ИГ)
Материаловедения в машиностроении (ММ)
Проектирования технологических машин (ПТМ)
Технологии машиностроения (ТМС)
Химии и химической технологии (ХХТ)

Научная деятельность:

выполнение фундаментальных и прикладных исследований в области:

- создания новых материалов с уникальными свойствами;
- исследования структурных превращений в металлических материалах;
- технологий производства керамики и керамических композитов;
- исследования процесса образования водорода и нановолокнистого углерода каталитическим разложением углеводородов при давлениях выше атмосферного;
- исследования способов модификации углеродных нанотрубок и нановолокон;
- управления качеством поверхностного слоя деталей машин при интеграции поверхностной термической и механической обработки на одном технологическом оборудовании;
- технологий плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- разработки технологических процессов лазерной и плазменной резки, поверхностной термообработки, сварки, маркировки, а также электрохимической и ультразвуковой обработки;
- разработки опытных образцов установок и модернизации существующего оборудования электрофизических методов обработки.

Производственная деятельность:

- содействие в конструкторско-технологической подготовке производства;
- проектирование технологических процессов;
- услуги по плазменной и лазерной резке материалов;
- услуги гибки листового и трубного проката;
- определение механических свойств, химического состава и структуры материалов;
- услуги механической, термической обработки материалов;
- проектирование и изготовление технологического оборудования с подготовкой требуемой конструкторской документации в NX, SolidWorks, AutoCAD, Компас;
- проведение инженерного анализа конструкторских задач и технологических процессов в программных комплексах ANSYS, SYSWELD, APM WinMachine для оптимизации проектных разработок на ранних стадиях;
- услуги плазменного нанесения покрытий на детали машин;
- технологический аудит предприятий;
- установление причин разрушения деталей машин.

Образовательные услуги:

- курсы повышения квалификации и обучающие семинары для сотрудников предприятий;
- обучение работе на станках с ЧПУ, лазерных и плазменных комплексах.

Центры, лаборатории:

Учебный центр современных металлообрабатывающих технологий «DMG-НГТУ».
Научно-образовательный центр «Сварочные технологии» - «НГТУ- «Kjellberg Finsterwalde».
Научно-образовательный центр «Нанотехнологии».
Научно-образовательный центр «Лазерные и плазменные технологии».
Научно-образовательный центр в области машиностроения «НГТУ-ИТПМ СО РАН».
Учебно-научная лаборатория «Термическая обработка материалов».
Учебно-научная лаборатория «Плазменные покрытия».
Центр прототипирования.

Адрес:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корп. 5, НГТУ, МТФ, V-278.

Тел./факс: +7 (383) 346-51-92

Сайт факультета: <http://www.mtf.nstu.ru/>

Декан МТФ: к.т.н., доцент Янпольский Василий Васильевич
e-mail: mtf@corp.nstu.ru

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov
metal_working@mail.ru



Организатор международных
выставок и конференций



ITE Сибирь
В составе группы компаний ITE

<http://www.ite-siberia.ru/> welcome@sibfair.ru

mash
SIBERIA



Выставка оборудования
для металлообработки и сварки

Россия, Новосибирск

www.mashex-siberia.ru