

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 23, Номер 1

ЯНВАРЬ – МАРТ 2021

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
ОБОРУДОВАНИЕ
ИНСТРУМЕНТЫ**

http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

НОВОСИБИРСК

ПЛАТФОРМА Web of Science



Academic
Search™
Ultimate



Applied Science
& Technology
Source™ Ultimate



Business Source®
Ultimate



Humanities Source™ Ultimate



Sociology Source™ Ultimate

AMERICAS

Philadelphia +1 800 336 4474
+1 215 386 0100

EUROPE, MIDDLE EAST AND AFRICA

London +44 20 7433 4000

ASIA PACIFIC

Singapore +65 6411 6888
Tokyo +81 3 5218 6500

For a complete
office list, visit:
clarivate.com

EBSCO

Расширенная версия **ULTIMATE**
для успеха в научной работе

www.ebsco.com ■ + 420 2 34 700 600 ■ info.cr@ebsco.com

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Том 23 № 1 2021 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель совета

Пустовой Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, член Национального комитета по теоретической и прикладной механике, президент 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

Испания: **Чувиллин А.Л.**, кандидат физико-математических наук, профессор, научный руководитель группы электронной микроскопии «CIC nanoGUNE», г. Сан-Себастьян

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

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

Российская Федерация: **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, **Кирсанов С.В.**, доктор техн. наук, профессор, ТПУ, г. Томск, **Коротков А.Н.**, доктор техн. наук, профессор, академик РАН, КузГТУ, г. Кемерово, **Кудряшов Е.А.**, доктор техн. наук, профессор, Засл. деятель науки РФ, ЮЗГУ, г. Курск, **Лобанов Д.В.**, доктор техн. наук, доцент, ЧГУ, г. Чебоксары, **Макаров А.В.**, доктор техн. наук, член-корреспондент РАН, ИФМ УрО РАН, г. Екатеринбург, **Овчаренко А.Г.**, доктор техн. наук, профессор, БТИ АлтГТУ, г. Бийск, **Сараев Ю.Н.**, доктор техн. наук, профессор, ИФПМ СО РАН, г. Томск, **Янюшкин А.С.**, доктор техн. наук, профессор, ЧГУ, г. Чебоксары

В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI)* базы *Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» теперь можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing) на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.

СОУЧРЕДИТЕЛИ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»
ООО НПКФ «Машсервисприбор»

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Батаев Анатолий Андреевич – профессор,
доктор технических наук,
ректор НГТУ

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Иванцовский Владимир Владимирович – доцент,
доктор технических наук

Скиба Вадим Юрьевич – доцент, кандидат технических наук

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

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

ИЗДАЕТСЯ С 1999 г.

Периодичность – 4 номера в год

ИЗДАТЕЛЬ

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

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

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

Журнал зарегистрирован 01.03.2021 г. Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-80400

Индекс: **70590** («РОСПЕЧАТЬ»)

Адрес редакции и издателя:

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5.

Тел. +7 (383) 346-17-75

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

E-mail: metal_working@mail.ru; metal_working@corp.nstu.ru

Цена свободная

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ

Гузанов Б.Н., Пугачева Н.Б., Слукин Е.Ю., Быкова Т.М. Технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий....	6
Арляпов А.Ю., Волков С.Ю., Промахов В.В., Жуков А.С. Исследование обрабатываемости фрезерованием композита Inconel 625 с добавлением NiTi-TiB ₂ , полученного лазерным спеканием.....	21
Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С. Определение температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе исследования изменения электромагнитных свойств.....	33
Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Иванов Е.В. Оценка уровня упрочнения стружки из алюминиевого сплава, предназначенной для последующей обработки давлением.....	45

ОБОРУДОВАНИЕ. ИНСТРУМЕНТЫ

Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Определение оптимальных координат переключения циклов обработки на металлорежущих станках.....	56
---	----

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Абдульменова Е.В., Кульков С.Н. Влияние механической активации порошка ВК-8 на свойства спеченных твердых сплавов.....	68
Логинов Ю.Н., Замараева Ю.В. Инвариантные показатели напряженного состояния при кузнечной осадке магния в оболочке.....	79

МАТЕРИАЛЫ РЕДАКЦИИ

Рекомендации по написанию научной статьи	89
Подготовка аннотации	93
Правила для авторов	97

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

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 04.03.2021. Выход в свет 15.03.2021. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ.л. 13,0. Уч.-изд. л. 24,18. Изд. № 25. Заказ 254. Тираж 300 экз.

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

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

METAL WORKING & MATERIAL SCIENCE

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

Volume 23 No.1 2021 SCIENTIFIC, TECHNICAL AND INDUSTRIAL JOURNAL

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF:

Anatoliy A. Bataev, D.Sc. (Engineering), Professor, Rector,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF:

Vladimir V. Ivancivsky, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
Department of Industrial Machinery Design,
Novosibirsk State Technical University,
Novosibirsk, Russian Federation

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

Editor of the English translation:

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

The journal is issued since 1999

Publication frequency – 4 numbers a year



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

Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”) has been Indexed in Clarivate Analytics Services.



We sincerely happy to announce that Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working and Material Science”), ISSN 1994-6309 / E-ISSN 2541-819X is selected for coverage in Clarivate Analytics (formerly Thomson Reuters) products and services started from July 10, 2017. Beginning with No. 1 (74) 2017, this publication will be indexed and abstracted in: Emerging Sources Citation Index.



Journal “Obrabotka Metallov” (“Metal Working & Material Science”) has entered into an electronic licensing relationship with EBSCO Publishing, the world's leading aggregator of full text journals, magazines and eBooks. The full text of JOURNAL can be found in the EBSCOhost™ databases.

📍 Novosibirsk State Technical University, Prospekt K. Marksa, 20,
Novosibirsk, 630073, Russia

☎ Tel.: +7 (383) 346-17-75

🌐 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

✉ E-mail: metal_working@mail.ru; metal_working@corp.nstu.ru

EDITORIAL COUNCIL CHAIRMAN:

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

MEMBERS:

The Federative Republic of Brazil:

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

The Federal Republic of Germany:

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

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

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

The Spain:

Andrey L. Chuvilin, Ph.D. (Physics and Mathematics),
Ikerbasque Research Professor,
Head of Electron Microscopy Laboratory “CIC nanoGUNE”,
San Sebastian

The Republic of Belarus:

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

The Ukraine:

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

The Russian Federation:

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*;

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*;

Dmitry V. Lobanov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*;

Aleksey V. Makarov, D.Sc. (Engineering), Corresponding Member of RAS,
Head of division, Head of laboratory (Laboratory of Mechanical Properties)
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*;

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,
I.N. Ulianov Chuvash State University, *Cheboksary*

CONTENTS

TECHNOLOGY

Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Slukin E.Yu., Bykova T.M. Technology of obtaining composite conglomerate powders for plasma spraying of high-temperature protective coatings.....	6
Arlyapov A.Yu., Volkov S.Yu., Promakhov V.V., Zhukov A.S. Investigation of the machinability by milling of the laser sintered Inconel 625/NiTi-TiB ₂ composite.....	21
Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Determination of temperature of maximum operability of replaceable cutting hard-alloy inserts based on study of electromagnetic properties change.....	33
Loginov Yu. N., Zagirov N.N., Ivanov E.V. Evaluation of the level of hardening of aluminum alloy chips intended for subsequent pressure treatment.....	45

EQUIPMENT. INSTRUMENTS

Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Determination of optimal coordinates for switching processing cycles on metal-cutting machines.....	56
---	----

MATERIAL SCIENCE

Abdulmenova E.V., Kulkov S.N. Effect of mechanical activation of WC-based powder on the properties of sintered alloys.....	68
Loginov Y.N., Zamaraeva Y.V. Invariant stress state parameters for forging upsetting of magnesium in the shell.....	79

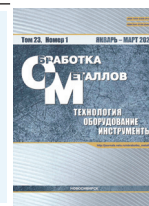
EDITORIAL MATERIALS

Guidelines for Writing a Scientific Paper	89
Abstract requirements	93
Rules for authors	97



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий

Борис Гузанов^{1,а}, Наталия Пугачева^{2,б}, Евгений Слукин^{3,с}, Татьяна Быкова^{2,д,*}

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет, ул. Машиностроителей, 11, г. Екатеринбург, 620012, Россия

² Институт машиноведения УрО РАН, ул. Комсомольская 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-5698-0018>,  guzanov_bn@mail.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>,  nat@imach.uran.ru,

^с  <https://orcid.org/0000-0003-4807-5135>,  slukin@cniim-ekt.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>,  tatiana_8801@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.74:543.4

История статьи:

Поступила: 29 октября 2020

Рецензирование: 18 ноября 2020

Принята к печати: 14 декабря 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Покрyтия
Плазменное напыление
Порошок
Фракция
Связующее
Растворитель
Конгломерат

Финансирование:

Работа выполнена при частичном финансировании по теме № АААА-А18-118020790145-0 Министерства образования и науки Российской Федерации.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для деталей газотурбинных установок, эксплуатируемых в условиях коррозионно-эрозионного воздействия и интенсивного изнашивания, наиболее приемлемыми считаются композиции, содержащие в своем составе Ni, Co, Cr, Al, B, Y как в чистом виде, так и в составе соединений, наносимых на контактную поверхность при газотермическом напылении. Перспективными являются современные интегрированные комплексы, полученные объединением разнородных веществ в виде единой композиции. Такие порошки получают либо за счет плакирования, либо при конгломерировании тонкодисперсных исходных компонентов в более крупную частицу. Проблема разработки и изготовления установок для конгломерирования порошков является актуальной и практически важной, поскольку позволяет получать материал для газотермического напыления покрытий высокотемпературного назначения. **Цель работы** – разработать технологическую схему получения порошков требуемого химического состава с заданной формой и размером частиц, предназначенных для напыления высокотемпературных защитных покрытий. **Материалы и методы исследования.** Разработана технология получения интегрированных порошков для напыления покрытий с использованием метода распылительной сушки и последующего спекания в вакууме или в аргоно-водородной газовой среде, которая позволяет избежать потери исходного сырья за счет возврата мелкой и крупной фракции. Предложена технология подготовки материалов для распылительной сушки и гранулирования. Сконструирован и изготовлен аэродинамический классификатор гравитационного типа, позволяющий в автоматическом режиме осуществлять отбор необходимой для напыления покрытия фракции порошка, а также возврат нежелательной фракции на повторную переработку. Морфологию гранулированного порошка определяли на сканирующем электронном микроскопе TESCAN. Химический состав получаемых интегрированных комплексов определен методом микрорентгеноспектрального анализа на приставке OXFORD. **Результаты и обсуждения.** Установлены технологические условия получения порошков заданного размера (40...100 мкм). Показано, что форма частиц конгломерата после распылительной сушки близка к сферической. На основе многофакторного эксперимента выполнена оптимизация технологического процесса получения порошка Ni-17Cr-10Al-1Y и Ni-22Cr-16Al-1Y размерами до 100 мкм. Показано, что при конгломерировании порошков с повышенным содержанием алюминия (Ni-22Cr-16Al-1Y) необходимо учитывать экзотермическую реакцию образования алюминидов никеля и разбавлять смесь исходных компонентов перед спеканием готовым спеченным порошком. Получаемые интегрированные комплексы характеризуются высокой жаростойкостью, поэтому предназначены и успешно используются для плазменного напыления защитных покрытий высокотемпературного назначения. **Выводы.** Разработана технология получения композиционных конгломерированных порошков Ni-17Cr-10Al-1Y и Ni-22Cr-16Al-1Y размерами частиц до 100 мкм и формой, близкой сферической. Отличительной особенностью этой технологии является то, что она позволяет избежать потери исходного сырья за счет возврата мелкой и крупной фракций.

Для цитирования: Технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий / Б.Н. Гузанов, Н.Б. Пугачева, Е.Ю. Слукин, Т.М. Быкова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 6–20. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-6-20.

*Адрес для переписки

Быкова Татьяна Михайловна, к.т.н., научный сотрудник
Институт машиноведения УрО РАН,
ул. Комсомольская, 34,
620049, г. Екатеринбург, Россия
Тел.: 8 (343) 362-30-43, e-mail: tatiana_8801@mail.ru

Введение

В современном газотурбостроении для защиты деталей, эксплуатируемых в условиях коррозионно-эрозионного воздействия и интенсивного изнашивания, наиболее эффективными считаются напыляемые покрытия системы Ni-Co-Cr-Al-B-Y [1–8]. Использование в качестве способа нанесения высокотемпературных защитных покрытий плазменного напыления позволяет проводить локальное или дополнительное упрочнение и защиту отдельных участков поверхности деталей с целью придания им особых служебных свойств. Определенные технологические трудности возникают при напылении разнородных металлических порошков, имеющих существенно отличающиеся температуры плавления и теплофизические свойства. Формирующиеся покрытия характеризуются повышенной пористостью, неоднородностью по химическому составу, склонностью к трещинообразованию и плохой адгезии к поверхности детали. Решить проблему различий теплофизических свойств позволяет применение так называемых интегрированных комплексов, представляющих собой объединение разнородных веществ в виде единой композиции в каждой частице порошка. Это стало возможным за счет создания либо плакированных порошков путем получения на исходной матричной частице одного или нескольких слоев других материалов, либо за счет получения порошковых материалов путем конгломерации (конгломерирования) тонкодисперсных исходных компонентов в более крупную частицу [11, 12]. При получении интегральных композиций особо важным является максимальный размер частиц, их форма, стабильность гранулометрического и химического состава, поэтому многие исследователи уделяют особое внимание определению этих характеристик. Систематические многолетние исследования позволили определить, что для этих целей наиболее приемлемыми являются составы, кристаллизующиеся с образованием эвтектических структур на основе никеля и/или кобальта, в которых за счет изменения содержания и концентрации легирующих элементов высокие показатели защитных свойств сочетаются с удовлетворительной пластичностью [13,14]. Выполненные ранее исследования, в том числе проведенные натурные

испытания, показали, что наилучшие результаты были получены в случае применения разработанной интегральной композиции состава Ni-22Cr-16Al-1Yb [15–17].

Накопленный опыт показывает, что для плазменного напыления высокотемпературных покрытий размер частиц интегральных комплексов должен соответствовать интервалу 20...80 мкм. Немаловажным моментом является способность порошков не создавать заторы в транспортных трубопроводах, равномерная подача их в плазменную струю и свободное перемещение с газовым потоком. Этого удастся добиться при сферической или близкой ей форме частиц [6, 11, 12]. Положительно зарекомендовал себя метод распылительной сушки, используемый для интенсификации процессов сушки и гранулирования материалов [19–21]. В зарубежной практике применяются различные варианты данного метода в целях получения порошков для плазменного напыления, например: Al_2O_3 -Mo, WC-Co [22–25].

Цель работы – разработать технологическую схему получения порошков требуемого химического состава с заданной формой и размером частиц, предназначенного для напыления покрытий.

Методика исследований

Авторами предложена принципиально новая технологическая схема получения композиционных порошков для напыления покрытий, включающая в себя несколько последовательных операций (рис. 1).

Для распыления суспензий сконструирована и изготовлена установка, схема которой показана на рис. 2. Корпус камеры 1 установки имеет следующие размеры: диаметр 850 мм, высота 3000 мм. Такие размеры камеры обеспечивают полное высыхание порошка и предотвращают его прилипание к стенкам. Это дает возможность получать мелкие порошки по форме, близкой к сферической. Наличие верхнего 2 и нижнего 3 ввода распылителя 4 в камеру позволяет вести процесс распыления суспензий в двух вариантах: «сверху-вниз» и «снизу-вверх». По второму варианту время высыхания капли в потоке воздуха существенно выше. Однако при этом происходит значительная турбулизация воздушно-

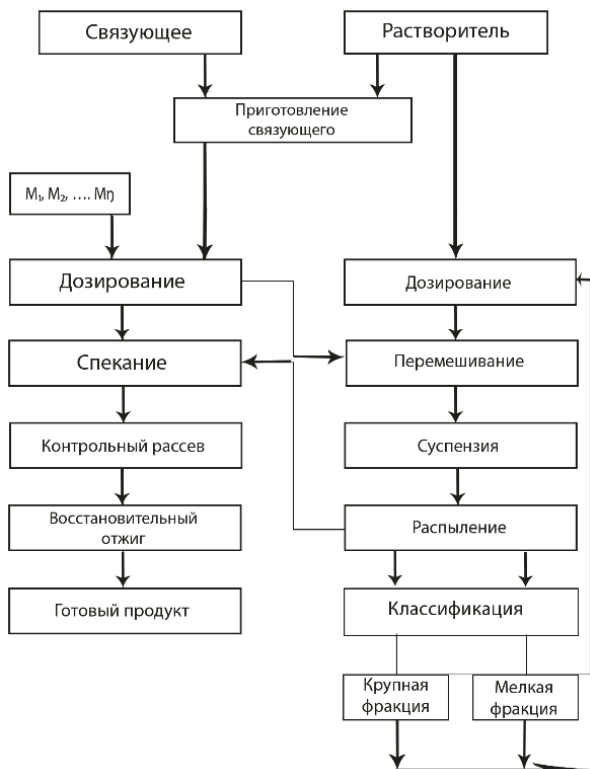


Рис. 1. Технологическая схема получения композиционных порошков

Fig. 1. Technological scheme for obtaining composite powders

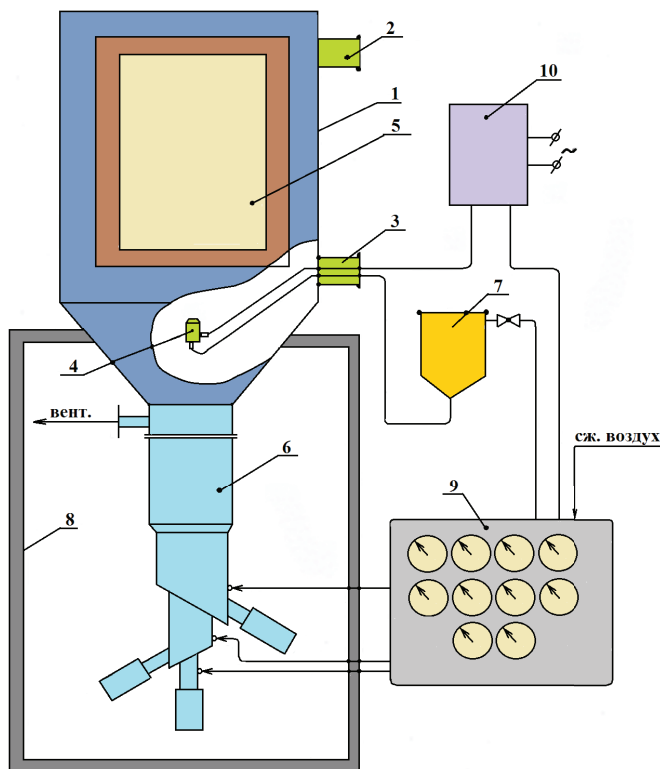


Рис. 2. Схема установка распылительной сушки для конгломерирования порошков

Fig. 2. Schematic diagram of a spray dryer for powder conglomeration

капельного потока, способствующая повышению вероятности взаимодействия жидких капель со стенками установки и увеличению количества деформированных и разрушенных гранул.

Расход суспензии задается величиной давления воздуха в питателе и диаметром выходного отверстия форсунки 1,3...1,2 мм. Аналогично задается расход распыляющего воздуха. Производительность установки и гранулометрический состав порошка во многом определяются режимом распыления, а именно при данных размерах форсунки давлением распыляющего и подающего суспензию из питателя воздуха, а также его температурой.

Камера оборудована дверцей со смотровым стеклом 5 и классификатором 6. Она установлена на подставке 8 и комплектуется питателем для суспензий 7, распределительным пультом 9 и нагревателем распыляющего воздуха 10.

Традиционно для определения гранулометрического состава порошка используют набор сит с разным размером ячеек. С целью автоматизации процесса просеивания порошка был сконструирован и изготовлен аэродинамический классификатор гравитационного типа (рис. 3), представляющий собой систему аксиально расположенных труб. Расход воздуха и размеры труб подобраны таким образом, чтобы происходила двойная классификация порошка на три фракции. В зависимости от того, какую фракцию необходимо использовать в дальнейшем процессе приготовления порошка, остальные части направляются в голову процесса, что обеспечивает почти 100 % использования порошка в процессе распылительной сушки.

Большую роль в процессе распыления играет выбор типа распылительной форсунки (рис. 4). Аналогом форсунки, применяемой нами, послужила форсунка, используемая для подачи диспергированного мазута в камеру сгорания печей [22]. Такая форсунка позволяет получать крупность распыляемых частиц мазута в интервале 0...100 мкм. Поскольку вязкость мазута и используемых нами суспензий приблизительно одинакова, то это дало возможность применить для наших целей данную конструкцию форсунки. Общая производительность установки для конгломерирования порошков по высушенному материалу составляет 20...50 кг/ч.

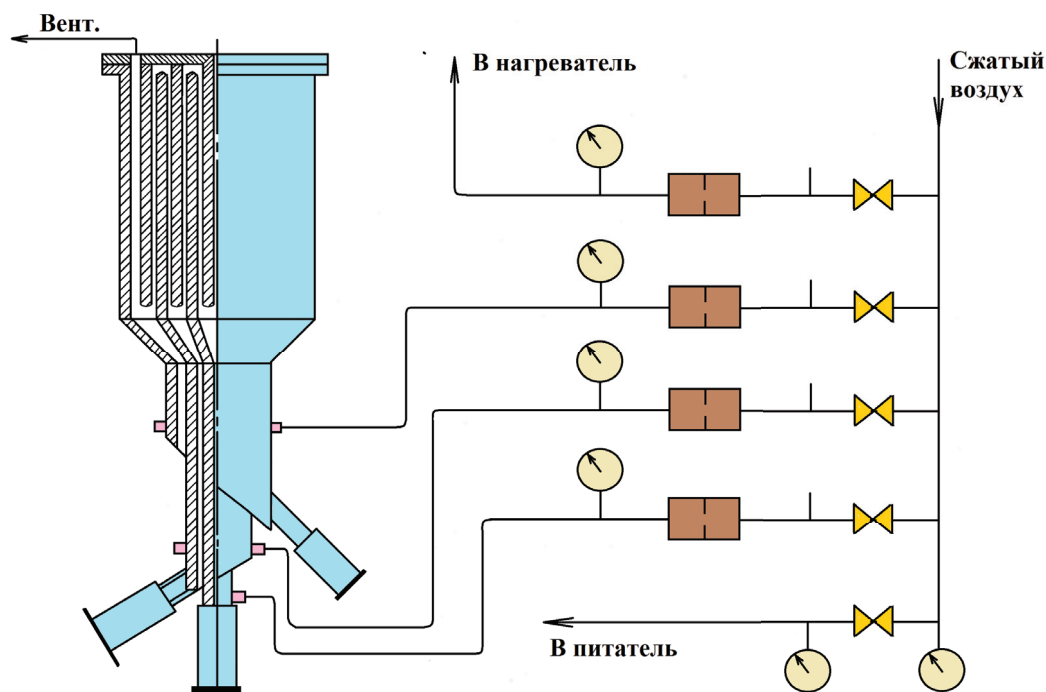


Рис. 3. Классификатор порошков гравитационного типа

Fig. 3. Gravity Type Powder Classifier

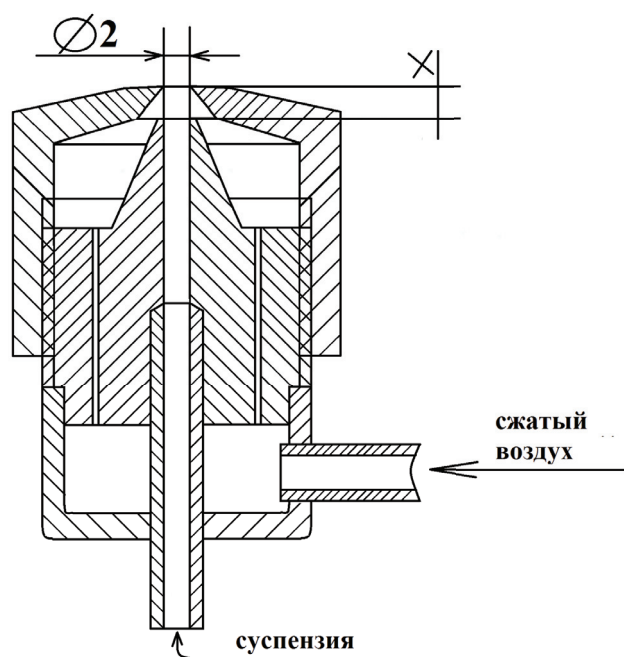


Рис. 4. Форсунка для распыления суспензий

Fig. 4. Suspension spray nozzle

На первом этапе разработанного технологического процесса осуществляется приготовление суспензии, которая подвергается в дальнейшем распылительной сушке. Связующие и растворитель для приготовления суспензий выбираются исходя из свойств получаемых композиций, а также условий гранулирования и

требований по чистоте получаемого продукта. К растворителю и связующему предъявляются определенные требования. Они должны легко и по возможности без остатка улетучиваться из конгломератов порошка при соответствующих температурных условиях. Растворитель испаряется из капель суспензии при распылении и сушке в потоке воздуха. Связующее удаляется в процессе последующего спекания композиционных частиц. По мнению авторов [23], связующее должно быть устойчивым при температурах конгломерирования и испаряться приблизительно на 50 К выше этих температур и, по крайней мере, на 50 К ниже температуры спекания субчастиц в конгломератах. Эти требования позволяют использовать широкий спектр веществ в качестве связующего, например: поливиниловый спирт, стеариновую кислоту, парафины, полиэтиленгликоль и различные смолы.

В настоящей работе для проведения распылительной сушки при комнатной температуре в качестве связующего и растворителя использовали соответственно каучук и бензин либо поливинилацетат (ПВА) и эквивалентную смесь бутилацетата и ацетона. Последняя пара является предпочтительной из-за более высокой испаряемости растворителя в процессе распыления и образования прочных конгломератов, что облег-

чает классификацию полученных порошков. Неоспоримым достоинством использования ПВА, в отличие от каучука, является возможность практически полного удаления его в процессе спекания субчастиц в конгломератах.

Количество связующего, вводимое в суспензию, существенно влияет на устойчивость последней до подачи в распылительную форсунку, а также на прочность получаемых гранул композиционных материалов. В каждом конкретном случае количество связки, вводимое в шихту из исходных мелкодисперсных порошков, определено нами экспериментально и составляет величину, варьирующую в пределах 0,5...1,5 % от массы порошка. Количество растворителя должно быть минимальным, при котором еще сохраняется подвижность суспензии, и определяется также экспериментально. Содержание связующего и растворителя в суспензии, а также тип распыляющего устройства и условия распыления определяют в конечном итоге гранулометрический состав порошков. Исходные суспензии, используемые для распыления, имеют в зависимости от плотности и дисперсности интегрированных комплексов концентрацию твердой составляющей 70...85 %. В случае недостаточной устойчивости и подвижности суспензии рекомендовано вводить добавки поверхностно-активных веществ или электролитов [24].

Для получения конгломератов, отвечающих заданному химическому составу, приготовление суспензии проводили путем тщательного перемешивания исходной шихты с растворителем и связующим в смесителях различной конструкции в течение достаточного промежутка времени, варьируемого в зависимости от состава композиции и характеристик исходных материалов в пределах от 2 до 8 часов. Более длительное время осуществляли перемешивание суспензий, в состав которых вводили небольшие количества легирующих добавок (до 2 %), например тантала, иттрия, ниобия.

Морфологию интегрированных комплексов определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN, возможности программного обеспечения которого позволили в автоматическом режиме определить размер частиц. Химический состав определяли методом микрорентгеноспектрального анализа частиц порошка с помощью энергодисперсионной

приставки OXFORD. Усреднение проводили по 20 частицам в каждой из пяти проб. Стойкость полученных интегрированных комплексов к высокотемпературному окислению определяли по результатам изменения удельной массы (ΔM) порошковой пробы после выдержки в алундовом тигле в печи электросопротивления при температуре 1324 К в течение 25 часов. Текучесть конгломерированных порошков определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 20899–98.

Результаты и их обсуждение

При конгломерировании порошков с использованием метода распылительной сушки важное значение имеет дисперсность исходных порошковых материалов. Размер субчастиц этих порошков не должен превышать 1/5 диаметра конгломератов [25]. Уменьшение размера субчастиц, во-первых, повышает подвижность и устойчивость суспензий. Во-вторых, в результате использования очень мелких исходных материалов достигается более равномерное распределение всех составляющих компонентов в готовом порошке, особенно при микролегировании. В-третьих, из мелких субчастиц образуются конгломераты с формой, близкой к сферической, менее подверженные механическому разрушению при классификации после распыления и обладающие большей текучестью. В-четвертых, увеличивается поверхность спекания субчастиц в конгломератах, и в результате повышается их прочность. При оптимальном спекании субчастиц достигается максимальная плотность конгломерированных частиц. Регулируя размер субчастиц, можно управлять в допустимых пределах плотностью порошка.

В процессе распылительной сушки суспензий происходит формирование композиционных частиц (конгломератов). Размер образующих частиц зависит от последующего спекания. Гранулометрический состав, текучесть полученного порошка, его механическая прочность зависят от используемых растворителя и связующего, их концентрации, крупности исходных порошков, расхода воздуха и распыляемой суспензии, температуры распыляющего воздуха, типа используемой форсунки.

Согласно [26] средний диаметр распыляемых частиц можно определить из эмпирического уравнения

$$d = 585 \frac{\sqrt{\sigma}}{U \gamma_p} + 507 \left(\frac{\eta}{\sqrt{\sigma \gamma_p}} \right)^{0,45} \times \left(\frac{1000G}{V} \right)^{1,5} \text{ мкм}, \quad (1)$$

где U – относительная скорость между раствором и газом, м/с; G и V – расход соответственно раствора и газа, м³/с; η – коэффициент вязкости раствора, П; σ – поверхностное натяжение раствора, дин/см; γ_p – плотность раствора, г/см³.

Из уравнения (1) видно, что для получения более мелких порошков, необходимых для плазменного напыления в динамическом вакууме, следует увеличивать скорость распыляющего воздуха, плотность используемой суспензии, уменьшать поверхностное натяжение и вязкость раствора. Снижение вязкости суспензии, в свою очередь, достигается уменьшением концентрации связки и увеличением количества растворителя.

Для выделения необходимой фракции порошка производили классификацию последнего в ситах. Отходы мелкой и крупной фракции возвращаются обратно в процесс на стадию приготовления суспензии. Фракционированные порошки спекали в свободной засыпке в вакууме или аргоне при следующих условиях: отгонку связующего (ПВА) производили при 573...723 К, после чего температуру повышали до таких значений, когда происходит спекание субчастиц в объеме конгломератов, а сами конгломераты между собой не спекаются. Температуру и время спекания для каждого состава композиционного порошка определяли экспериментально.

Результаты исследований показали, что в среднем температуру спекания конгломерированных порошков следует устанавливать на 100...250 К ниже температуры спекания компактных материалов. Оптимальными условиями спекания конгломерированных порошков следует считать такие, когда спеченная масса порошка представляет собой брикет, легко разрушающийся при раздавливании. После контрольного рассева, необходимого для удаления мелкодисперсных частиц, образующихся при разрушении отдельных гранул, и крупных спеченных между собой конгломератов, порошок готов к напылению. Форма частиц интегрированных порошков после конгломерирования в процессе

распылительной сушки близка к сферической (рис. 5). По данным микрорентгеноспектрального анализа состав полученных интегральных комплексов был следующим: 1) 71 мас. % Ni, 17 мас. % Cr, 10 мас. % Al, 1 мас. % Y; 2) 61 мас. % Ni, 22 мас. % Cr, 16 мас. % Al, 1 мас. % Y.

Если конгломерируют большие партии порошков по полной технологической схеме (см. рис. 1) с возвратом мелких и крупных фракций,

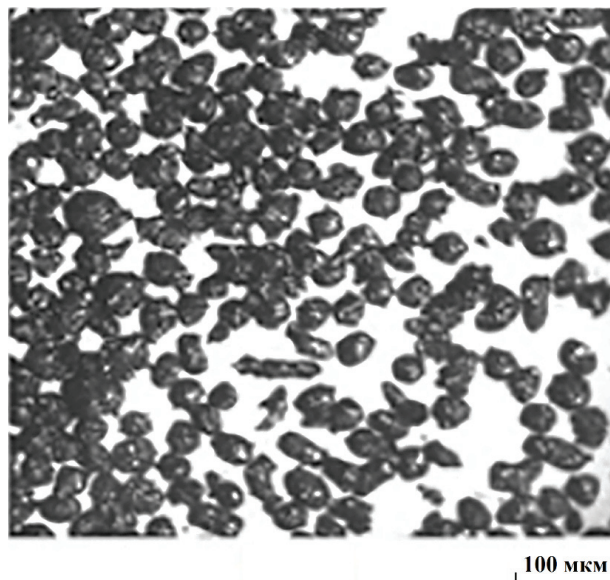


Рис. 5. Внешний вид конгломерированных порошков для напыления состава Ni-22Cr-16Al-1Y

Fig. 5. Appearance of conglomerated powders for spraying Ni-22Cr-16Al-1Y composition

то выход фракций, выделяемых для напыления, может быть приближен к 100 %. Это делает возможным получение с достаточно высокой эффективностью узкофракционных порошковых материалов для газотермического напыления.

Была проведена оптимизация процесса распылительной сушки для получения конгломератного порошка состава Ni-22Cr-16Al-1Y крупностью 0...100 мкм. Был использован полный факторный эксперимент 2³. Факторы: количество растворителя на 1 кг смешиваемого порошка V , мл/кг; избыточное давление в питателе с суспензией P , атм.; высота среза сопла над местом, где происходит впрыскивание суспензии в газовый поток, X , мм. Расход распыляющего воздуха составлял 0,5 м³/мин. Недостаточный расход воздуха приводит к налипанию порошка на стенки камеры. Порошок, осыпавшийся со стенок камеры по мере высыхания, имеет плохую

сферичность и ухудшает качество конечного продукта. Давление воздуха внутри труб аэродинамического классификатора подбиралось таким образом, чтобы в центральной трубе осаждался порошок крупностью больше 100 мкм, а в двух боковых – 0...100 мкм. Крупный порошок отправлялся в головную часть процесса. Содержание фракции 0...100 мкм в «сухом» порошке было принято за параметр оптимизации (Y). В табл. 1 даны значения факторов в абсолютном и кодированном виде, здесь же представлены и результаты исследования.

С учетом значимости коэффициентов уравнение регрессии имеет следующий вид (факторы представлены в кодированном виде):

$$Y = 66,4 + 11,6X + 10,2VX, \% \quad (2)$$

Анализ уравнения регрессии показывает, что для получения максимального количества порошка крупностью 0...40 мкм необходимо увеличить X и V . Давление в питателе с суспензией в исследуемом интервале практически не оказывает влияния на дисперсный состав порошка. Увеличение выхода фракции 0...100 мкм в зависимости от X и V можно объяснить тем, что повышенное содержание растворителя в суспензии снижает ее вязкость и поверхностное натяжение, а это способствует дроблению струи при распылении на более мелкие частицы. При избыточном расходе растворителя и распыляемой суспензии происходит налипание порошка к стенкам распылительной камеры. Большое значение размера X приводит к дополнительному дроблению струи во внутреннем пространстве форсунки, а это ведет к увеличению количества более мелких частиц. По данным табл. 1 максимальный выход порошка 0...100 мкм получается при следующих режимах: $V = 380$ мл растворителя / 1 кг порошка; $X = 2,0$ мм; $P = 1,32$ атм.

Исследование влияния температуры распыляющего воздуха на качество распыленного порошка показало, что при температурах 363...523 К резко снижается устойчивость процесса распыления, и процесс прерывается через 1...2 мин после начала вследствие высыхания суспензии в подающем канале форсунки.

Отгонку связующего (ПВА) производили при температуре 573...773 К в течение получаса, далее температуру повышали до значений, при ко-

торых происходит спекание субчастиц в объеме конгломератов. При температуре 903...923 К начинается экзотермическая реакция взаимодействия Al с Ni, протекающая с большим выделением тепла. При этом температура тигля с порошком кратковременно поднималась до 1023...1273 К. Для предотвращения спекания конгломератов между собой производили разбавление спеченным порошком того же состава в количестве 25...35 %. После твердофазного взаимодействия осуществляли изотермический отжиг при 1073 К в течение 30 мин.

В табл. 2 представлены результаты определения гранулометрического состава спеченных порошков. Основная масса полученного порошка имеет размер больше 40 мкм. Выход фракции 0...40 мкм составляет менее 25 %. Для получения порошка, используемого при напылении в динамическом вакууме, необходимо спекать более мелкую фракцию 0...40 мкм. Из приведенных результатов видно, что при спекании порошка крупностью 0...40 мкм происходит более существенное его укрупнение за счет частичного спекания конгломератов между собой, что ухудшает морфологию конечного продукта. Это обусловлено большей площадью контактирования, чем в случае спекания фракции 40...100 мкм.

На выход фракций после спекания влияет и состав порошка. Так, при спекании порошка состава Ni-17Cr-10Al-1Y выход крупной фракции меньше, чем для порошка состава Ni-22Cr-16Al-1Y, что связано с меньшим содержанием Al и, как следствие, меньшей теплотой, выделяющейся при реакции спекания, и более низкой температурой спекания (табл. 2).

После спекания порошка производится его разделение по фракциям и восстановительный отжиг. Отсев фракции 40...100 мкм осуществляется с помощью стандартного набора сит, а отделение фракции крупностью 10...40 мкм осуществляли трехкратной отмывкой порошка в дистиллированной воде с последующей сушкой в течение 2...3 часов при температуре 373...383 К. Финишная обработка порошка – восстановительный отжиг в атмосфере водорода при 873 К в течение получаса с целью удаления окислов, присутствующих в исходных порошках и образующихся в процессе приготовления конгломератов.

Таблица 1
Table 1

Влияние режимов распылительной сушки и последующего спекания на гранулометрический состав получаемых порошков
Influence of spray drying and subsequent sintering modes on the particle size distribution of the resulting powders

Номер опыта	Режим распыления						Выход фракции 0...100 мкм, %	Выход порошка после спекания (фракция 0..100 мкм), %				Стойкость порошков (10...40 мкм) Ni-22Cr-16Al-1Y против окисления на воздухе при 1323 К (привес за 6 ч), мг/г
	V, мл/кг		X, мм		P, атм			0..40 мкм	40..63 мкм	63..100 мкм	>100 мкм	
1	380	+	2	+	1,32	+	92,2	12,8	15,8	48,3	23,1	107,9
2	360	—	2	+	1,32	+	62,2	21,6	9,4	51,8	17,2	39,8
3	380	+	1	—	1,32	+	50,0	8,4	17,2	51,9	22,5	77,4
4	360	—	1	—	1,32	+	68,6	23,5	15,6	45,6	15,3	91,8
5	380	+	2	+	1,08	—	80,2	20,2	20,5	46,6	12,7	48,0
6	360	—	2	+	1,08	—	79,4	23,8	16,6	39,9	19,7	108,0
7	380	+	1	—	1,08	—	35,4	7,9	19,4	55,8	16,9	45,3
8	360	—	1	—	1,08	—	68,0	20,6	15,6	47,0	1,08	68,0

Таблица 2

Table 2

Влияние исходного гранулометрического и химического состава на выход порошка после спекания
Influence of the initial particle size distribution and chemical composition on the powder after sintering

Химический состав порошков, масс. %	Исходная крупность порошков, мкм	Выход порошков после распыления, %	Гранулометрический состав после спекания, %			
			0...40, мкм	40...63, мкм	63...100, мкм	>100 мкм
Ni-17Cr-10Al-1Y	0...100	–	29,2	36,0	28,1	5,6
Ni-22Cr-16Al-1Y	0...100	–	24,0	37,6	27,4	11,0
	0...40	35,8	61,4	32,3	6,6	–
	40...100	64,2	7,7	35,1	44,1	1,3

Для оценки качества получаемых порошков измерили их стойкость против окисления на воздухе при 1323 К. Результаты испытаний могут быть описаны уравнением регрессии следующего вида:

$$\Delta M = 73,3 - 3,63V + 2,65X + 5,95P + 5,65VX + 17,05VP - 8,03XP + 14,95XVP, \text{ мг / г.} \quad (3)$$

В соответствии с экспериментальными данными для улучшения качества порошка следует снижать в распыляемой суспензии количество растворителя (V), увеличить X и избыточное давление в камере (P). На практике, как правило, стремятся снизить объем растворителя, поэтому для получения порошков для плазменного напыления в динамическом вакууме нами был определен следующий технологический регламент: $V = 360$ мл/1 кг порошка; $X = 2,0$ мм; $P = 1,28$ атм.

Порошки, полученные с подогревом распыляющего воздуха, характеризуются более низкой жаростойкостью, например, для 363 К – 170,9 мг/г, а для 523 К – 208,6 мг/г. Это свидетельствует о том, что в процессе распыления происходит ускоренная сушка конгломератов, приводящая к деформированию и формированию повышенной пористости частиц.

Нами было проведено сравнительное исследование свойств порошков, полученных с использованием распылительной сушки и распылением расплава в вакууме (табл. 3).

Оба метода применительно к плазменному напылению дают порошки, близкие по свойствам. Однако метод распылительной сушки

является более дешевым и универсальным в отношении производимых порошков. Химический состав порошка, полученного с помощью метода распылительной сушки, практически не отличается от состава исходных компонентов.

Для придания распыленным конгломератам достаточной прочности и плотности производится их спекание, включающее в себя стадии удаления органического связующего и спекания субчастиц в конгломерате. Процесс спекания распыленного порошка оказывает существенное влияние на свойства получаемого продукта. От условий протекания процесса во многом зависит морфология, прочность частиц и их гранулометрический состав.

После распылительной сушки порошок помещают в свободной засыпке в вакуумную печь. Далее печное пространство вакуумируют и заполняют аргоном до давления 0,1 МПа. Затем плавно поднимают температуру со скоростью не выше $3...4 \text{ К} \cdot \text{мин}^{-1}$ с целью удаления связующего. В случае использования в качестве связующего поливинилацетата (ПВА) температура его полного удаления из массы порошка составляет примерно 820 К. Затем производится вакуумирование рабочего пространства печи до остаточного давления 0,1 Па и производится нагрев до температур спекания. Возможно проведение процесса спекания при атмосферном давлении, например в аргоно-водородной газовой среде. При этом значительно снижается степень окисленности материала порошка.

Некоторыми особенностями отличается процесс спекания порошков состава Ni-Cr-Al-Me, где Me – легирующие добавки одного или не-

Сравнительные характеристики порошков, полученных методом распылительной сушки и распылением расплавов

Comparative characteristics of powders obtained by spray drying and spraying of melts

Характеристика порошка	Метод получения	Крупность порошков, мкм					
		0...40	40...50	50...63	63...100	100...200	>200
Содержание, масс. %	Распылительная сушка	61,4	16,3	16,0	6,6	0	0
	Распыление расплавов	50,5	24,2	13,4	9,1	1,8	0,9
Текучесть, с	Распылительная сушка	69,9	34,2	28,8	23,5	—	—
	Распыление расплавов	57,8	25,3	28,0	31,5	—	—

скольких редких элементов, таких как Y, Ta, Nb. Эти конгломератные порошки обладают экзотермичностью за счет реакции образования алюминидов никеля. Реакция синтеза начинается при нагреве порошков до 900...950 К. При этом в реакционном пространстве печи температура поднимается до 1500 К. В этих условиях конгломераты сильно спекаются между собой, а это по технологии недопустимо. Чтобы снизить температуру спекания порошков, проводили разбавление в определенном соотношении распыленного порошка готовым спеченным порошком того же состава перед тем, как поместить его в печь. Степень разбавления в конечном итоге определяет температуру нагрева порошка и, как следствие, плотность и механическую прочность спеченных конгломератов. Для получения прочных и плотных гранул порошка состава Ni-Cr-Al-Me с различным содержанием хрома (20...28 %) и алюминия (12...20 %) было определено, что оптимальное количество порошка-разбавителя должно составлять от 20 до 40 %. Например, порошок состава (масс. %): Ni-28Cr-20Al-Me целесообразно спекать с разбавлением до 40 %.

После протекания экзотермической реакции устанавливают температуру в печи 1020 К и выдерживают при ней в течение получаса до полного спекания субчастиц в конгломератах. В результате спекания образуется брикет, легко

разрушающийся при раздавливании на отдельные гранулы. Для отделения от порошка мелких частиц, образующихся в результате разрушения отдельных гранул, и крупных спекшихся между собой конгломератов производится контрольный рассев. Фракция порошка, пригодная для напыления, подвергается восстановительному отжигу в атмосфере водорода при температуре 800 К. Весьма важно, что небольшие количества легирующих элементов практически не оказывают влияния на режимы спекания порошка.

В заключение необходимо отметить, что полученный композиционный конгломератный гранулированный порошковый материал был применен для создания комбинированного теплостойкого покрытия для защиты деталей высокотемпературного назначения маршевой газотурбинной установки. Покрытие состоит из трех слоев. Первый слой 28Al-2Si-1P3M толщиной 40...55 мкм наносится термодиффузионным методом и расположен на границе со сплавом-основой [15]. Этот слой обеспечивает высокую жаро- и коррозионную стойкость, а также диффузионную стабильность всего покрытия в целом. Второй – плазменный слой состава Ni-22Cr-16Al-1Y толщиной 115 мкм – обеспечивает высокую термостойкость покрытия, а также хорошую адгезию керамического внешнего слоя к поверхности. Третий – внешний кера-

мический слой состава $ZrO_2+Y_2O_3$ толщиной около 50 мкм – является теплозащитным, он снижает температуру поверхности сплава в процессе эксплуатации.

Заключение

Разработана технология получения композиционных конгломератных порошков для плазменного напыления высокотемпературных защитных покрытий. Отличительной особенностью этой технологии является использование метода распылительной сушки и последующего спекания в вакууме или в аргоно-водородной газовой среде.

Для определения гранулометрического состава сконструирован и изготовлен аэродинамический классификатор гравитационного типа, который в автоматическом режиме позволяет рассортировать порошок по фракциям.

Предлагаемая технология позволяет получать порошки заданного химического состава с формой частиц, близкой к сферической, размерами в интервале 40...100 мкм. Были получены интегрированные порошковые комплексы следующих химических составов: 1) 71 мас. % Ni, 17 мас. % Cr, 10 мас. % Al, 1 мас. % Y; 2) 61 мас. % Ni, 22 мас. % Cr, 16 мас. % Al, 1 мас. % Y.

Показано, что при спекании порошков состава Ni-Cr-Al-Y следует учитывать экзотермическую реакцию образования алюминидов никеля, начинающуюся при нагреве порошков до 900...950 К. Для получения интегрированного порошкового комплекса с повышенным содержанием алюминия (Ni-22Cr-16Al-1Y) предложено использовать разбавление готовым спеченным порошком того же состава перед загрузкой в печь.

Список литературы

1. Rickerby D.S., Winstone M.R. Coatings for gas tyrbines // Journal of Manufacturing Processes. – 1992. – Vol. 7, iss. 4. – P. 485–526. – DOI: 10.1080/10426919208947439.
2. Burgel R. Coating service experience with industrial gas turbines // Journal of Materials Science and Technology. – 1986. – Vol. 2. – P. 302–308. – DOI: 10.1179/mst.1986.2.3.302.
3. Гузанов Б.Н., Косицын С.В., Пугачева Н.Б. Упрочняющие защитные покрытия в машиностро-

ении. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 244 с. – ISBN 5-7691-1405-3.

4. Chaki T.K., Singht A.K., Sadananda K. Effect of Co-Cr-Al-Y coating on microstructural stability and creep behavior of nickel-base superalloy // Thin Solid Films. – 1989. – Vol. 168. – P. 207–220. – DOI: 10.1016/0040-6090(89)90007-2.

5. Мубояджан С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. – Екатеринбург: Квист, 2008. – 208 с. – ISBN 5-900474-60-7.

6. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов, А.С. Мнухин, М.Д. Никитин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 199 с.

7. Usitalo M.A., Vuristo P.M.J., Mantyla T.A. Elevated temperature erosion-corrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments // Wear. – 2002. – Vol. 252, iss. 7–8. – P. 586–594. – DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00014-5.

8. Lai G.Y. High-temperature corrosion and materials application. – Materials Park, Ohio: ASM International, 2007. – 461 p. – ISBN 978-0-87170-853-3.

9. Sidhu S.S., Prakash S. Performance of NiCrAlY, Ni-Cr, Stellite-6 and Ni3Al coatings in Na2SO4-60% V2O5 environment at 900° under cyclic conditions // Surface and Coatings Technology. – 2006. – Vol. 201, iss. 3–4. – P. 1643–1654. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.035.

10. Matthews S., Schweizer M. Optimization of arc-sprayed Ni-Cr-Ti coatings for high temperature corrosion applications // Journal of Thermal Spray Technology. – 2013. – Vol. 22, iss. 4. – P. 538–550. – DOI: 10.1007/s11666-013-9914-y.

11. Конгломерированные композиционные порошки для газотермического напыления / В.Р. Калиновский, Ю.В. Соколов, А.Ф. Ильющенко, В.В. Троцкий, А.В. Калиновский // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении» / под ред. Л.Г. Ворошина. – Минск, 2004. – С. 124–133.

12. Ильинкова Т.А., Барсукова Е.А., Тагиров А.Т. Взаимосвязь характеристик порошковых материалов и механических свойств плазменных теплозащитных покрытий // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 15. – С. 116–121.

13. Особенности структуры и свойств $\gamma+\beta$ сплавов Ni-Cr-Al вблизи эвтектического состава / С.В. Косицын, Б.Н. Гузанов, С.Д. Алексин, А.А. Копылов // Физика металлов и металловедение. – 1990. – № 9. – С. 114–122.

14. Tingaud D., Nardou F. Influence of non-reactive particles on the microstructure of NiAl and NiAl-ZrO2

processed by thermal explosion // *Intermetallics*. – 2008. – Vol. 16, iss. 5. – P. 732–737. – DOI: 10.1016/j.intermet.2008.02.016.

15. Пугачева Н.Б. Современные тенденции развития жаростойких покрытий на основе алюминидов железа, никеля и кобальта // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. – 2015. – Iss. 3. – P. 51–82. – DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. – URL: https://www.dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N._B._051_082..pdf (дата обращения: 14.01.2021).

16. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating / N.B. Pugacheva, B.N. Guzanov, N.V. Obabkov, T.M. Bykova, N.S. Michurov // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030013-1–030013-4. – DOI: 10.1063/1.5135137.

17. Особенности создания комбинированных теплостойких покрытий для деталей высокотемпературного назначения / Б.Н. Гузанов, Н.Б. Пугачева, В.Д. Алексеев, Е.Ю. Слукин // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 12–19. – DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.02.

18. Белопольский М.С. Сушка керамических суспензий в распылительных сушилках. – М.: Стройиздат, 1972. – 126 с.

19. Поляков А.А., Круглицкий Н.Н. Распылительная сушка в технологии радиоэлектронных материалов. – М.: Радио и связь, 1982. – 70 с.

20. Лыков М.М., Леончик Б.И. Распылительные сушилки. – М.: Машиностроение, 1966. – 331 с.

21. Патент 3960545 США, МКИ В 22 F 9/00. Cermet plasma flame spray powder, method for producing same and articles produced the reform / Port D.J., Lafferty W.D., Cheney R.F. (USA); GTE Sylvania Incorporated (USA). – N 561638. – Publ. 01.06.1976.

22. Патент 4025334 США, МКИ В 22 F 1/00, C 23 C 7/00. Tungsten carbide-cobalt flame spray powder and method / Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. (USA); GTE Sylvania Incorporated (USA). – N 674961. – Publ. 24.05.1977.

23. Патент 3881911 США, МКИ C 22 C 1/04-1/05, C 04 B 35/52-35/38. Free flowing, sintered refractory agglomerates / Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. (USA); GTE Sylvania Incorporated (USA). – N 411663. – Publ. 06.05.1975.

24. Stecura S. Effects of yttrium, aluminum and chromium concentrations in bond coatings on the performance of zirconia-yttria thermal barriers // *Thin Solid Films*. – 1980. – Vol. 73, iss. 2. – P. 481–489. – DOI: 10.1016/0040-6090(80)90521-0.

25. Mrdak M.R. Mechanical properties and metallographic analysis of plasma spray ABS – Ni5.5wt.%Al5wt.%Mo coatings // *Vojnotehnički glasnik / Militar Technical Courier*. – 2019. – Vol. 67, iss. 3. – P. 573–587. – DOI: 10.5937/vojtehg67-17424.

26. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев В.И. Распыливание жидкости форсунками. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.

Конфликт интересов

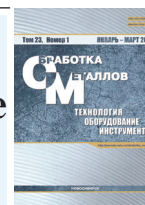
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Technology of obtaining composite conglomerate powders for plasma spraying of high-temperature protective coatings

Boris Guzanov^{1, a}, **Natalia Pugacheva**^{2, b}, **Evgeniy Slukin**^{3, c}, **Tatiana Bykova**^{2, d *}

¹ Russian State Vocational Pedagogical University, 11 Mashinostroiteley str., Ekaterinburg, 620012, Russian Federation

² Institute of Engineering Science, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya str., Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-5698-0018>, guzanov_bn@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8015-8120>, nat@imach.uran.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4807-5135>, slukin@cniim-ekt.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-8888-6410>, tatiana_8801@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 October 2020

Revised: 18 November 2020

Accepted: 14 December 2020

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Coatings

Plasma spraying

Powder

Fraction

Binder

Solvent

Conglomerate

Funding

The work was carried out with partial funding under the theme No. AAAA-A18-118020790145-0 of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

ABSTRACT

Introduction. For parts of gas turbines operating under conditions of corrosion-erosion and intense wear, the most acceptable are compositions containing Ni, Co, Cr, Al, B, Y both in pure form and in the composition of compounds applied on the contact surface during thermal spraying. Modern integrated complexes obtained by combining dissimilar substances in the form of a single composition are promising. Such powders are obtained either by cladding or by conglomeration of finely dispersed starting components into a larger particle. The problem of developing and manufacturing plants for conglomeration of powders is urgent and practically important, since it makes it possible to obtain material for thermal spraying of coatings for high-temperature purposes. **The aim of the work** is to develop a technological scheme for obtaining powders of the required chemical composition with a given particle shape and size, intended for spraying high-temperature protective coatings. **Materials and research methods.** A technology is developed for the production of integrated powders for spraying coatings using the method of spray drying and subsequent sintering in vacuum or in an argon-hydrogen atmosphere, which avoids the loss of feedstock due to the return of fine and coarse fractions. A technology for preparing materials for spray drying and granulation is proposed. A gravity type aerodynamic classifier is designed and manufactured, which makes it possible to select automatically the powder fraction necessary for spraying the coating, as well as return the unwanted fraction for recycling. The morphology of the granular powder is determined using a TESCAN scanning electron microscope. The chemical composition of the resulting integrated complexes is determined by X-ray microanalysis on an OXFORD attachment. **Results and discussion.** The technological conditions for obtaining powders of a given size (40...100 μm) are established. It is shown that the shape of the conglomerate particles after spray drying is close to spherical. On the basis of a multifactor experiment, the optimization of the technological process for obtaining powders Ni-17Cr-10Al-1Y and Ni-22Cr-16Al-1Y with sizes up to 100 μm is performed. It is shown that when conglomerating powders with increased aluminum content (Ni-22Cr-16Al-1Y), it is necessary to take into account the exothermic reaction of nickel aluminide formation and dilute the mixture of initial components before sintering with the finished sintered powder. The resulting integrated complexes are characterized by high heat resistance; therefore they are designed and successfully used for plasma spraying of protective coatings for high-temperature purposes. **Conclusions.** A technology is developed for obtaining composite conglomerated powders Ni-17Cr-10Al-1Y and Ni-22Cr-16Al-1Y with particle sizes up to 100 μm and a shape close to spherical. A distinctive feature of this technology is that it avoids the loss of feedstock by returning fine and coarse fractions.

For citation: Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Slukin E.Yu., Bykova T.M. Technology of obtaining composite conglomerate powders for plasma spraying of high-temperature protective coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 6–20. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-6-20. (In Russian).

* Corresponding author

Bykova Tatiana M., Ph.D. (Engineering), Scientific associate
Institute of Engineering Science,
Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya str.,
620049, Ekaterinburg, Russian Federation
Tel.: 8 (343) 362-30-43, e-mail: tatiana_8801@mail.ru

References

1. Rickerby D.S., Winstone M.R. Coatings for gas tyrbines. *Journal of Manufacturing Processes*, 1992, vol. 7, iss. 4, pp. 485–526. DOI: 10.1080/10426919208947439.
2. Burgel R. Coating service experience with industrial gas turbines. *Journal of Materials Science and Technology*, 1986, vol. 2, pp. 302–308. DOI: 10.1179/mst.1986.2.3.302.
3. Guzanov B.N., Kositsyn S.V., Pugacheva N.B. *Uprochnyayushchie zashchitnye pokrytiya v mashinostroenii* [Reinforcing protective coatings in engineering industry]. Ekaterinburg, Ural Branch of the RAS Publ., 2003. 244 p. ISBN 5-7691-1405-3.
4. Chaki T.K., Singht A.K., Sadananda K. Effect of Co-Cr-Al-Y coating on microstructural stability and creep behavior of nickel-base superalloy. *Thin Solid Films*, 1989, vol. 168, pp. 207–220. DOI: 10.1016 / 0040-6090 (89) 90007-2.
5. Muboyadzhan S.A., Lesnikov V.P., Kuznetsov V.P. *Kompleksnye zashchitnye pokrytiya turbinnykh lopatok aviatsionnykh GTD* [Complex protective coatings for turbine blades of aircraft gas turbine engines]. Ekaterinburg, Kvist Publ., 2008. 208 p. ISBN 5-900474-60-7.
6. Kulik A.Ya., Borisov Yu.S., Mnukhin A.S., Nikitin M.D. *Gazotermicheskoe napylenie kompozitsionnykh poroshkov* [Gas thermal spraying of composite powders]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1985. 199 p.
7. Uusitalo M.A., Vuristo P.M.J., Mantyla T.A. Elevated temperature erosion-corrosion of thermal sprayed coatings in chlorine containing environments. *Wear*, 2002, vol. 252, iss. 7–8, pp. 586–594. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00014-5.
8. Lai G.Y. *High-temperature corrosion and materials application*. Materials Park, Ohio, ASM International, 2007. 461 p. ISBN 978-0-87170-853-3.
9. Sidhu S.S., Prakash S. Performance of NiCrAlY, Ni-Cr, Stellite-6 and Ni₃Al coatings in Na₂SO₄-60% V₂O₅ environment at 900° under cyclic conditions. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, iss. 3–4, pp. 1643–1654. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2006.02.035.
10. Matthews S., Schweizer M. Optimization of arc-sprayed Ni-Cr-Ti coatings for high temperature corrosion applications. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, vol. 22, iss. 4, pp. 538–550. DOI: 10.1007/s11666-013-9914-y.
11. Kalinovskii V.R., Sokolov Yu.V., Il'yushchenko A.F., Troshchii V.V., Kalinovskii A.V. Konglomerirovannye kompozitsionnye poroshki dlya gazotermicheskogo napyleniya [Conglomerated composite powders for gas-thermal spraying]. *Perspektivy razvitiya poverkhnostnogo i ob'emnogo uprochneniya splavov* [Prospects for the development of surface and volumetric hardening of alloys]. Ed. by L.G. Voroshin. Minsk, 2004, pp. 124–133.
12. Ilinkova T.A., Barsukova E.A., Tagirov A.T. Vzaimosvyaz' kharakteristik poroshkovykh materialov i mekhanicheskikh svoystv plazmennyykh teplozashchitnykh pokrytii [The relationship between the characteristics of powder materials and the mechanical properties of plasma heat-shielding coatings]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 15, pp. 116–121.
13. Kositsyn S.V., Guzanov B.N., Aleksin S.D., Kopylov A.A. Osobennosti struktury i svoystv $\gamma + \beta$ splavov Ni-Cr-Al vblizi evtekticheskogo sostava [Features of the structure and properties of $\gamma + \beta$ alloys Ni-Cr-Al near the eutectic composition]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 1990, no. 9, pp. 114–122. (In Russian).
14. Tingaud D., Nardou F. Influence of non-reactive particles on the microstructure of NiAl and NiAl-ZrO₂ processed by thermal explosion. *Intermetallics*, 2008, vol. 16, iss. 5, pp. 732–737. DOI: 10.1016/j.intermet.2008.02.016.
15. Pugacheva N.B. Current trends in the development of heat-resistant coatings based on aluminides of iron, nickel and cobalt. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, iss. 3, pp. 51–82. DOI: 10.17804/2410-9908.2015.3.051-082. Available at: https://www.dream-journal.org/DREAM_Issue_3_2015_Pugacheva_N._B._051_082..pdf (accessed 14.01.2021).
16. Pugacheva N.B., Guzanov B.N., Obabkov N.V., Bykova T.M., Michurov N.S. Studying the structure and adhesion strength of thermal barriers coating. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2176, pp. 030013–1–030013-4. DOI: 10.1063 / 1.5135137.
17. Guzanov B.N., Pugacheva N.B., Alekseev V.D., Slukin E.Yu. Osobennosti sozdaniya kombinirovannykh teplostoikikh pokrytii dlya detalei vysokotemperaturnogo naznacheniya [Features of the creation of combined heat-resistant coatings for high-temperature parts]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie = Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, iss. 3, pp. 12–19. DOI: 10.15593 / 2224-9877 / 2020.3.02.

18. Belopol'skii M.S. *Sushka keramicheskikh suspenzii v raspylitel'nykh sushilkakh* [Drying of ceramic suspensions in spray dryers]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1972. 126 p.
19. Polyakov A.A., Kruglitskii N.N. *Raspylitel'naya sushka v tekhnologii radioelektronnykh materialov* [Spray drying in radio electronic materials technology]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 70 p.
20. Lykov M.M., Leonchik B.I. *Raspylitel'nye sushilki* [Spray dryers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 331 p.
21. Port D.J., Lafferty W.D., Cheney R.F. *Cermet plasma flame spray powder, method for producing same and articles produced the reform*. Patent USA, no. 3960545, 1976.
22. Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. *Tungsten carbide-cobalt flame spray powder and method*. Patent USA, no. 4025334, 1977.
23. Cheney R.F., Lafferty W.D., Long G. Free flowing, sintered refractory agglomerates. Patent USA, no. 3881911, 1975.
24. Stecura S. Effects of yttrium, aluminum and chromium concentrations in bond coatings on the performance of zirconia-yttrium thermal barriers. *Thin Solid Films*, 1980, vol. 73, iss. 2, pp. 481–489. DOI: 10.1016 / 0040-6090 (80) 90521-0.
25. Mrdak M.R. Mechanical properties and metallographic analysis of plasma spray ABS – Ni5.5wt.%Al5wt.%Mo coatings. *Vojnotehnički glasnik / Militaru technical courier*, 2019, vol. 67, iss. 3, pp. 573–587. DOI: 10.5937/vojtehg67-17424.
26. Vitman L.A., Kandelson B.D., Paleev V.I. *Raspylivanie zhidkosti forsunkami* [Spraying liquid with nozzles]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1962. 264 p.

Conflicts of Interest

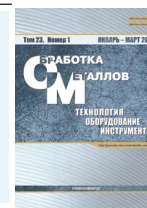
The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Исследование обрабатываемости фрезерованием композита Inconel 625 с добавлением NiTi-TiB₂, полученного лазерным спеканием

Алексей Арляпов^{1, а,*}, Сергей Волков^{1, б}, Владимир Промахов^{2, в}, Александр Жуков^{2, д}

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-5117-4663>,  arlyapov@tpu.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0001-9984-9466>,  vsu@pkmion.ru,

^в  <https://orcid.org/0000-0002-4385-3404>,  vvpromakhov@mail.ru, ^д  <https://orcid.org/0000-0002-9814-4365>,  zhuk_77@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.914.22

История статьи:

Поступила: 10 апреля 2020

Рецензирование: 15 апреля 2020

Принята к печати: 19 декабря 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Фрезерование

Режимы резания

Стойкость инструмента

Силы резания

Композит

Диборит титана

Лазерное спекание

Финансирование:

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РНФ № 20-79-10086.

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследована технологическая возможность фрезерования металломатричного композита на основе Inconel 625 с добавлением NiTi-TiB₂, полученного лазерным спеканием. Композит предназначен для изготовления турбинных лопаток и имеет прочностные характеристики, близкие к Inconel 625, однако за счет добавления TiB₂ обладает большими жаропрочностью и износостойкостью. Данный материал является новым, его обрабатываемость резанием не изучена. **Цель работы.** Определить технологические возможности фрезерования концевыми фрезами данного композита. Для достижения поставленной цели выполнено фрезерование нового композита концевыми фрезами, получены рекомендации по выбору скорости резания, глубины и ширины фрезерования. **Методы исследования.** Измерение износа концевых фрез и силы резания. Износ оценивался по фаске на задней поверхности с помощью микроскопа, силы резания измерялись динамометром Kistler 9257B. Фрезерование выполнялось на трех скоростях: 25, 35 и 50 м/мин. Для определения оптимальных параметров глубины и ширины фрезерования использовались следующие их соотношения: 1 : 1, 1 : 4; 1 : 16, при этом объем стружки, удаляемый в единицу времени, для всех соотношений оставался постоянным. **Результаты и обсуждение.** Интенсивнее изнашивается задняя поверхность зубьев фрезы. После достижения фаски износа по задней поверхности величины, равной 0,11...0,15 мм, возникает резкое увеличение сил и хрупкое разрушение зуба. Фрезерование со скоростью 25 м/мин гарантировало 28 мин стабильной работы, после чего величина износа быстро приближалась к критической величине, равной 0,11 мм, при скорости резания 50 м/мин критический износ наступал уже через 14 мин. Зависимости силы резания от времени для всех выбранных скоростей резания на всем протяжении времени испытаний имеют нарастающий характер, что свидетельствует о влиянии износа фрез на силы резания. Установлено, что стойкость фрез растет с ростом ширины и уменьшением глубины фрезерования.

Для цитирования: Исследование обрабатываемости фрезерованием композита Inconel 625 с добавлением NiTi-TiB₂, полученного лазерным спеканием / А.Ю. Арляпов, С.Ю. Волков, В.В. Промахов, А.С. Жуков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 21–32. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32.

Введение

В настоящее время все большее распространение имеют сплавы металлов и композиты, полученные с помощью аддитивных технологий. Такие материалы могут обладать более высокими параметрами прочности, твердости, износостойкости в сравнении с материалами, полученными классическим сплавлением. На данный момент около 29 металлов и сплавов производятся в виде порошков, включая нержавеющие и инструментальные стали, алюминиевые сплавы, а также жаропрочные стали [1]. Создание порошковых материалов позволяет получать новые свойства сплавов за счет изменения структуры материала определенным образом.

В настоящей статье рассмотрен композит на основе Inconel 625 с добавлением в его матрицу керамических частиц NiTi-TiB₂, полученный лазерным спеканием [2]. Данный композит полу-

*Адрес для переписки

Арляпов Алексей Юрьевич, к.т.н., доцент
 Национальный исследовательский
 Томский политехнический университет,
 пр. Ленина, 30

634050, г. Томск, Россия

Тел.: +7-906-947-5044, e-mail: arlyapov@tpu.ru

чен в лаборатории высокоэнергетических систем и новых технологий Томского государственного университета для изготовления турбинных лопаток [1]. Лопатки и лопасти газовых турбин работают при высоких температурах и нагрузках. Сплавы, используемые для изготовления деталей турбодвигателей, должны обладать высокой прочностью, высокой ударной вязкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью [3]. В России для изготовления турбинных лопаток используются сплавы на основе никеля, например такие марки, как ХН35ВТЮ, ХН55ВМТКЮ, ХН62МВКЮЛ, ХН67МВТЮЛ, ХН70МВТЮБ, ХН75ВМЮ, ХН80ТБЮ, ЖС6УД [4]. Характеристики этих сплавов на сегодняшний день не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям. В то же время изделия или заготовки, полученные с помощью аддитивных технологий, могут иметь более высокий предел прочности на растяжение, предел текучести и низкие значения относительного удлинения по сравнению с образцами, полученными литьем и прокатом [5]. Недостатком композитов, полученных путем аддитивных технологий, является неравномерное распределение добавляемых частиц внутри металлической матрицы, что существенно снижает их физико-механические характеристики. Метод получения композита, предложенный авторами [1], сводит указанный недостаток к минимуму. Для данного исследования были взяты образцы в виде брусков, химический состав и некоторые физико-механические свойства которых представлены в таблице.

Полученный в исследовании [1] композит обладает повышенной износостойкостью и термостойкостью. Так как материал является новым, его обрабатываемость резанием пока еще не изучена. В настоящей работе приведено исследование обрабатываемости данного композита фрезерованием.

Под термином обрабатываемость понимают свойство металлов подвергаться обработке резанием. Согласно [6] основными показателями для оценки обрабатываемости служат такие параметры, как силы резания, качество поверхностного слоя, износ инструмента, теплота, выделяющаяся при деформации материала срезаемого слоя, наличие или отсутствие склонности к наростообразованию, а также вид, форма и размеры срезанной стружки. В зависимости от этих

характеристик все материалы подразделяют на 8 групп [4].

Учитывая химический состав изучаемого материала, по рекомендациям из справочника [4] композит Inconel 625 с NiTi-TiB_2 следует отнести к V–VI группе обрабатываемости. К этим группам относятся жаропрочные, жаростойкие, кислотостойкие стали, сплавы на никелевой и железоникелевой основе. Указанные группы обладают очень низкой обрабатываемостью с коэффициентом от 0,16...0,08 в сравнении со сталью 45, для которой этот коэффициент равен единице. Низкая обрабатываемость связана с высоким пределом прочности и твердостью, которые оказывают значительное влияние на силы резания в процессе обработки. Силы резания при обработке спеченных сплавов могут быть больше, чем силы, возникающие при резании аналогичных сплавов, полученных классическими методами [7], что, скорее всего, вызвано более высокими прочностными характеристиками полученного лазерным спеканием сплава.

Другой особенностью изучаемого композита является то, что в его состав входит диборид титана TiB_2 , обладающий высокой твердостью и негативно влияющий на стойкость режущего инструмента. Рекомендации по выбору режимов резания для металломатричных композитов, полученных аддитивными методами из порошков с добавлением керамики, отсутствуют.

Из-за низкого коэффициента теплопроводности таких сплавов, тепло, производимое в процессе обработки, больше передается в инструмент, чем в обрабатываемую деталь, вызывая чрезмерный нагрев режущей кромки и, как следствие, износ инструмента [3].

В процессе фрезерования труднообрабатываемых материалов скорость обработки и величина подачи оказывают наибольшее влияние на срок службы инструмента, шероховатость поверхности и силы резания [8]. Согласно справочнику [9] при обработке жаропрочных никелевых сплавов фрезерованием рекомендуется использовать инструмент из твердого сплава, производить обработку на малых скоростях резания около 15...20 м/мин с подачей 0,02 мм/зуб. Однако в литературе [10, 11] при фрезеровании жаропрочных сплавов рекомендуют более агрессивные режимы резания твердосплавным инструментом

Физико-механические свойства композита Inconel 625 с NiTi-TiB₂
Physical and mechanical properties of the Inconel 625 and NiTi-TiB₂ composite

Физико-механические свойства	Значение
Плотность, г/см ³	8,3
Предел прочности при сжатии, МПа	1830
Предел прочности при растяжении, МПа	860
Предел прочности при изгибе, МПа	1320
Предел текучести при сжатии, МПа	990...1090
Предел текучести при растяжении, МПа	110...160
Модуль упругости, ГПа	290...330
Коэффициент Пуассона	0,29
Коэффициент теплопроводности, Вт/м · К	12,5...13,6
Коэффициент линейного температурного расширения, К ⁻¹	11,3...12,4 · 10 ⁻⁶
Твердость (H _V), HRC	44...46

с износостойким покрытием, а именно обработку следует производить по схеме попутного фрезерования на скорости резания от 20 до 50 м/мин при подачах 0,10...0,15 мм/зуб. Кроме того, в источнике [12] сказано, что керамические инструменты показывают большую стойкость при обработке некоторых жаропрочных сплавов (таких, как Inconel 718), но подобные инструменты являются гораздо более дорогими.

Для улучшения обрабатываемости жаропрочных материалов применяют наложение ультразвуковых колебаний на инструмент или деталь, что обеспечивает снижение сил резания, температуры и износа инструмента. В работе [13] излагается возможность обработки материалов на основе никеля на станках ULTRASONIC компании DMG MORI. Однако анализ литературы показал, что данную технологию в основном используют для обработки хрупких материалов, стекла и углепластиков [14, 15]. Вместе с тем в работе [16] говорится о положительном влиянии ультразвуковых колебаний при фрезеровании труднообрабатываемого сплава Ti-6Al-4V.

Необходимо отметить, что в литературе по выбору режимов резания легче найти информацию для выбора скоростей резания и подачи, а по выбору глубины и ширины фрезерования рекомендации почти отсутствуют. Авторами [17–21] описан метод высокоэффективного фрезерования (High Efficiency Milling, HEM). Этот метод предназначен для черновой обработки металлов с использованием малой глубины фрезерования t и большой ширины фрезерования B . Фрезерование, при котором обычно используются большое значение t и маленькая ширина B , вызывает концентрацию тепла в небольшой части режущего инструмента, ускоряющую процесс износа. Использование же всей доступной длины режущей части фрезы позволяет распределить износ по большей площади, что продлевает срок службы инструмента, а также рассеивает тепло и снижает вероятность поломки фрез. Метод HEM предполагает использование 7...30 % диаметра фрезы в радиальном направлении и удвоенного диаметра фрезы в осевом в сочетании с увеличенной скоростью подачи [17].

Таким образом, исследование обрабатываемости данного композита на основе никеля с добавлением керамики не изучено, поэтому работа является актуальной.

Основные задачи настоящей работы следующие.

1. Определение технологических возможностей обработки концевыми фрезами композита на основе Inconel 625 с добавлением в его состав NiTi-TiB₂.

2. Определение скорости резания исходя из условий минимального износа инструмента и минимальных сил резания, возникающих в процессе обработки.

3. Определение наиболее оптимального соотношения глубины и ширины фрезерования исходя из условий минимального износа инструмента и минимальных сил резания.

Методика исследований

Все работы выполнялись на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ модели VF1 фирмы «Haas» (США). Обработку производили по схеме попутного фрезерования. В качестве инструмента использовали цельно-твердосплавные концевые фрезы Ø10 мм модели ЖТ641 производства компании «ПК МИОН» (Россия), предназначенные для обработки жаропрочных титановых сплавов. Основные геометрические параметры этой фрезы имеют следующие значения: передний угол $\gamma = 4^\circ$, задний угол $\alpha = 10^\circ$, угол наклона винтовой линии зуба $\omega = 38^\circ$, число зубьев $z = 4$. Исходя из рекомендаций по режимам обработки жаропрочных сплавов для фрезы ЖТ641 и анализа литературы [4, 9, 11, 22] для экспериментов была выбрана подача на зуб, равная $S_z = 0,04$ мм/зуб. Фрезы закреплялись в цанговом патроне с одинаковым вылетом, величина которого составляла $24 \pm 0,5$ мм. При этом для качественной и количественной оценки результатов экспериментов измеряли износ фрез и силы резания.

Износ инструмента оценивали по фаске износа на задней поверхности. Фаску износа измеряли на микроскопе УИМ 21 на каждом зубе фрезы. Силы резания определяли с помощью динамометра Kistler 9257В (Швейцария). Измерения проводились в трех взаимно перпендикулярных направлениях (рис. 1). Для оценки ре-

зультатов использовалась суммарная сила $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$, действующая в плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Динамометр, установленный на специальную плиту, закреплялся в станочных тисках. Перед началом экспериментов в заготовке были подготовлены крепежные отверстия, через которые с помощью четырех винтов заготовка закреплялась на динамометре (рис. 1).

Для решения задачи по выбору скорости резания выполняли обработку на трех скоростях резания: $V_1 = 25$ м/мин; $V_2 = 35$ м/мин и $V_3 = 50$ м/мин. При этом подача на зуб, глубина и ширина фрезерования оставались постоянными: $S_z = 0,04$; $B = 4$; $t = 1$. Через одинаковые промежутки времени измерялся износ фрез.

Для определения оптимального соотношения глубины и ширины фрезерования, при котором стойкость фрезы будет наибольшей, было выбрано три варианта соотношения t и B ($t = B$; $t = B/4$; $t = B/16$) при условии одинакового объема срезаемого слоя в единицу времени, т. е. произведение $t_1 B_1 = t_2 B_2 = t_3 B_3$ для всех трех вариантов выбранных режимов оставалось неизменным и обеспечивающим одинаковую производительность обработки. Скорость резания равнялась 25 м/мин, скорость подачи – $S_z = 0,04$ мм/зуб. Схемы резания представлены на рис. 2.

Так, для фрезы № 1 глубина и ширина фрезерования равнялись $t = 2$ мм и $B = 2$ мм соответственно. Для фрезы № 2 глубина равнялась

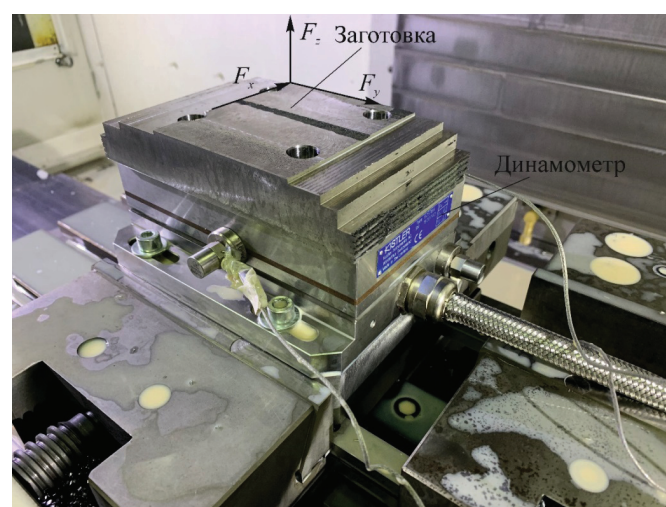


Рис. 1. Заготовка на динамометре

Fig. 1. Workpiece clamped in the dynamometer

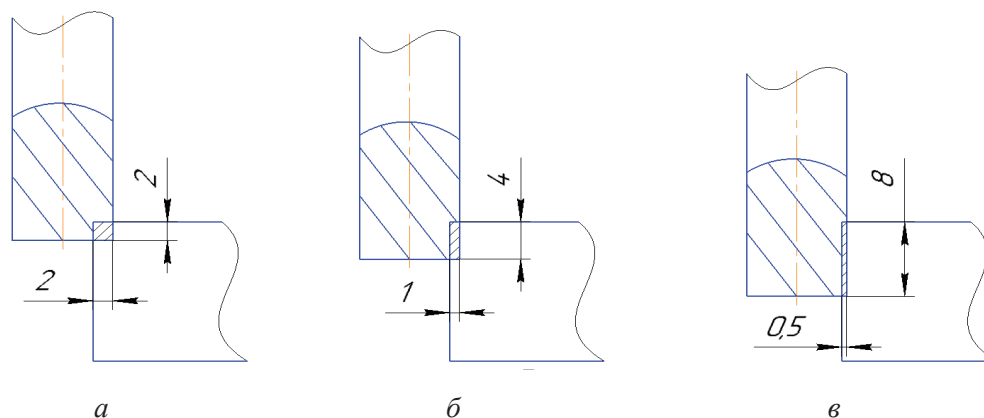


Рис. 2. Схемы фрезерования

Fig. 2. Milling technique

$t = 1$ мм, следовательно, ширина увеличивалась до $B = 4$ мм. У фрезы № 3 при $t = 0,5$ мм ширина равнялась $B = 8$ мм (рис. 2).

Для сбора и анализа данных использовалось программное обеспечение DynoWare (Kistler, Швейцария). Обработка всех полученных данных выполнялась в программе Microsoft Excel.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 показаны зависимости величины износа по фаске на задней поверхности зуба от времени работы фрезы для скоростей резания 50, 35 и 25 м/мин (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Из графика видно, что фреза, работающая на скорости резания 25 м/мин, испытала наименьший износ на исследуемом промежутке времени. Так, на 28-й минуте работы фаска износа по задней поверхности достигла значения 0,11 мм. Фреза, работающая при скорости $V = 50$ м/мин, имеет наибольший износ, так как величина фаски становится равной 0,11 мм уже к 14 минуте.

Очевидно, что рост сил в исследуемом промежутке времени вызван износом фрез (рис. 4). Фреза, работающая на скорости $V = 50$ м/мин (кривая 1) демонстрирует наиболее интенсивный рост сил во всем исследуемом диапазоне. Для фрез, работающих на скоростях 35 и 25 м/мин, рост сил резания с течением времени также коррелирует с величиной износа, но является менее интенсивным, чем при резании со скоростью 50 м/мин.

На рис. 5 приведены зависимости износа, а на рис. 6 – зависимости сил резания от времени работы для различных соотношений глубины и ширины фрезерования. После 40 минут фрезерования наступает критическое изнашивание фрез № 1 и 2 с выкрашиванием режущей кромки. Фреза № 3, работающая при соотношении 1:16, проработала существенно дольше остальных – 117 минут и не подверглась катастрофическому износу с разрушением кромки. Резкое увеличение интенсивности износа фрезы № 3 произошло только на 92 минуте, после того как величина фаски износа превысила 0,15 мм, в то время как фрезы № 1 и 2 достигли этой величины износа на 32 и 43 минутах соответственно. Максимальное значение фаски износа фрезы № 3 после 117 минут работы составило 0,28 мм. Из графика сил (рис. 6) видно, что в интервале времени работы фрез от 0 до 40 мин для разных соотношений глубины и ширины фрезерования силы имели очень близкие значения, что вполне объяснимо одинаковым объемом срезаемого слоя в единицу времени. Однако как только износ переходит границу критической величины, которая колеблется в интервале от 0,11 до 0,15 мм, происходит моментальный рост сил. Отсюда следует, что до наступления критического износа влияние соотношения ширины и глубины фрезерования на силы резания отсутствует, и изменение сил для различных соотношений t и B (при одинаковом объеме срезаемого слоя в единицу времени, т. е. $tB = \text{constant}$, при $S = \text{constant}$) объясняется только разным износом фрез, что полностью подтверждается рис. 5 и 6.

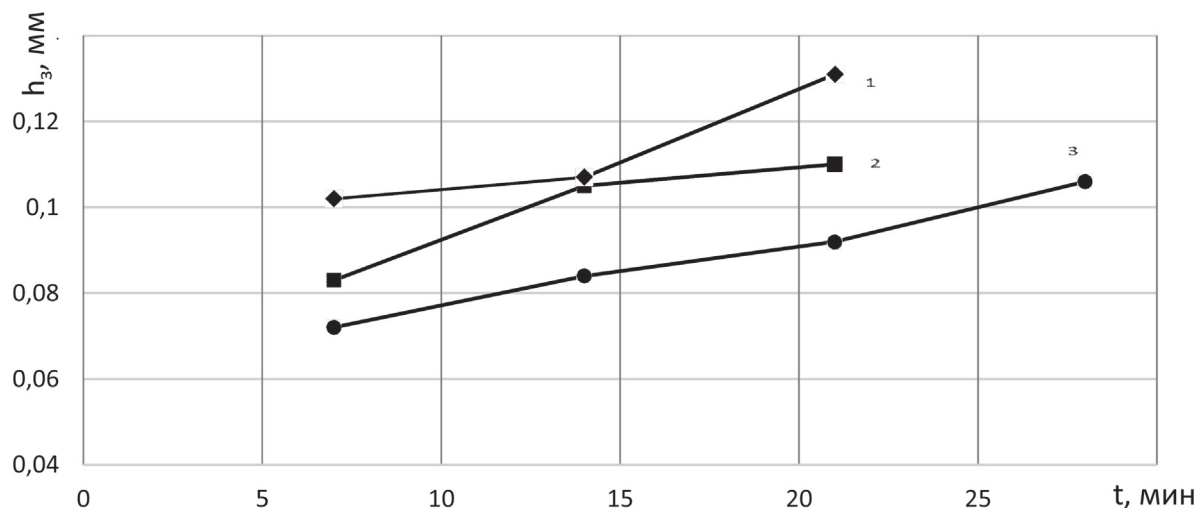


Рис. 3. График зависимости величины износа от времени работы для фрез:

1 – $V=50$ м/мин; 2 – $V=35$ м/мин; 3 – $V=25$ м/мин

Fig. 3. Dependence of flank wear on the machining time:

1 – $V=50$ m/min; 2 – $V=35$ m/min; 3 – $V=25$ m/min

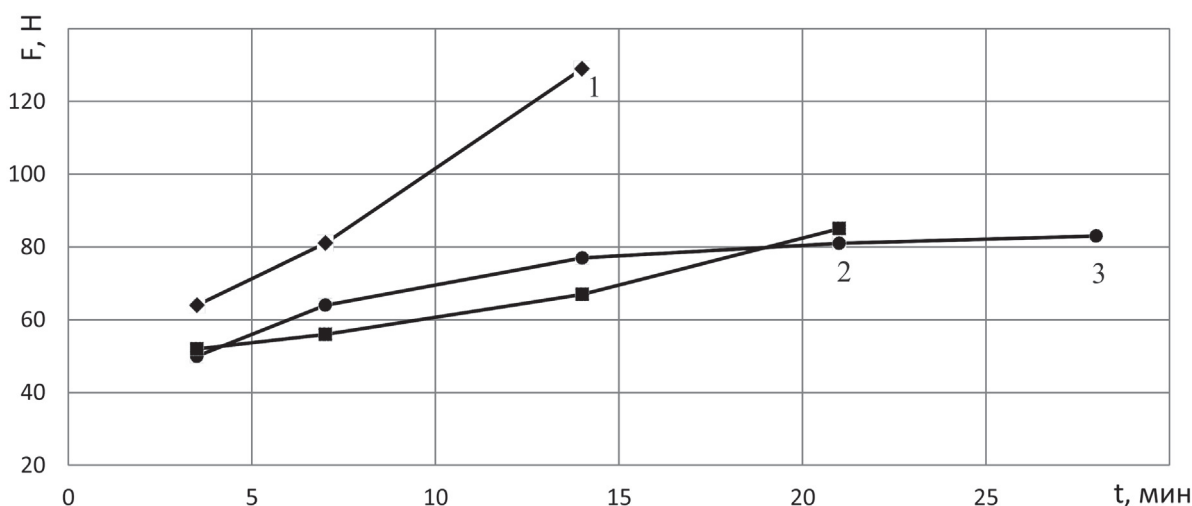


Рис. 4. График зависимости сил резания от времени обработки:

1 – $V=50$ м/мин; 2 – $V=35$ м/мин; 3 – $V=25$ м/мин

Fig. 4. Dependence of the cutting forces on the machining time:

1 – $V=50$ m/min; 2 – $V=35$ m/min; 3 – $V=25$ m/min

В ходе исследований установлено, что износ превалирует по задней поверхности зуба фрезы. Следует также отметить, что неравномерный износ в основном вызван механическим истиранием (рис. 7–9).

Из анализа графиков установленных зависимостей и фотографий износа фрез можно сделать вывод, что наиболее эффективной является схема обработки фрезой № 3 с соотношением глубины и ширины 1:16. Предполагается, что

это связано с меньшим изгибающим моментом, действующим на фрезу во время работы и с более равномерным распределением температуры резания вдоль режущей кромки.

Из графиков сил видно, что для разных соотношений t и V при одинаковом объеме срезаемого слоя величины сил резания до наступления критического износа примерно одинаковы, но если распределенную нагрузку вдоль режущей кромки заменить сосредоточенной силой, точка

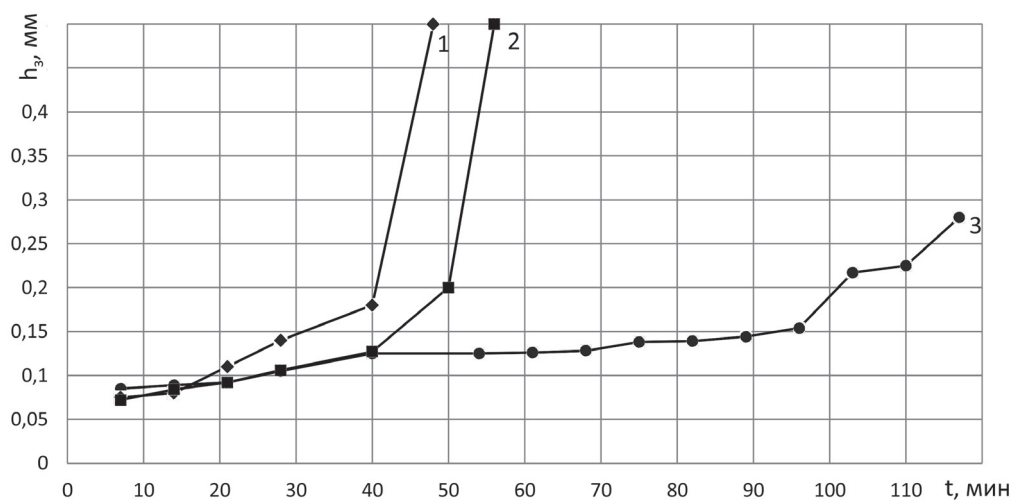


Рис. 5. График зависимости величины износа от схемы работы:

1 – фреза № 1; 2 – фреза № 2; 3 – фреза № 3

Fig. 5. Dependence of flank wear on the milling configuration:

1 – mill No. 1; 2 – mill No. 2; 3 – mill No. 3

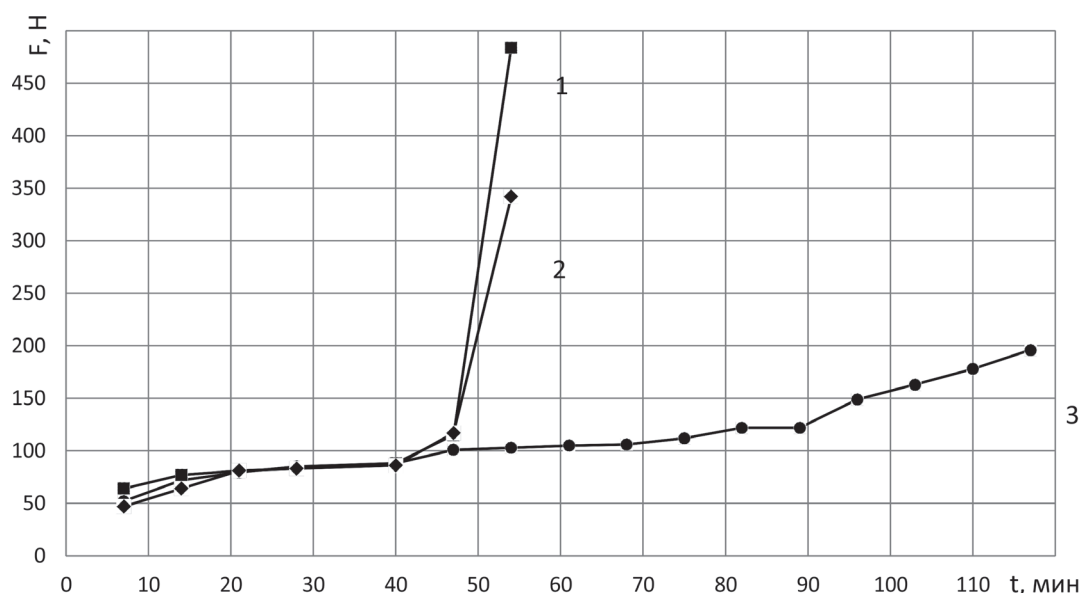


Рис. 6. График зависимости изменения сил резания от схемы работы:

1 – фреза № 1; 2 – фреза № 2; 3 – фреза № 3

Fig. 6. Dependence of cutting forces on the milling technique:

1 – mill No. 1; 2 – mill No. 2; 3 – mill No. 3

приложения этой силы будет разной, как продемонстрировано на рис. 10.

Из схемы видно, что при соотношении глубины и ширины 1:1 плечо сосредоточенной силы $l_1 = 23$ мм больше плеча $l_2 = 20$ мм при отношении 1:16. Следовательно, изгибающий момент, действующий на первую фрезу, больше. Для фрезы № 1 изгибающий момент равен $M_1 = 2,75$ Н·м, а

для фрезы № 3 $M_3 = 2,26$ Н·м. Для расчета изгибающего момента значение силы получено из эксперимента, а плечо действующей силы определено по схеме, представленной на рис. 10. Изгибающий момент первой фрезы почти на 20 % больше, чем у третьей. Это приводит к большей амплитуде колебаний и вибрациям фрезы, что увеличивает ее износ, а после дости-

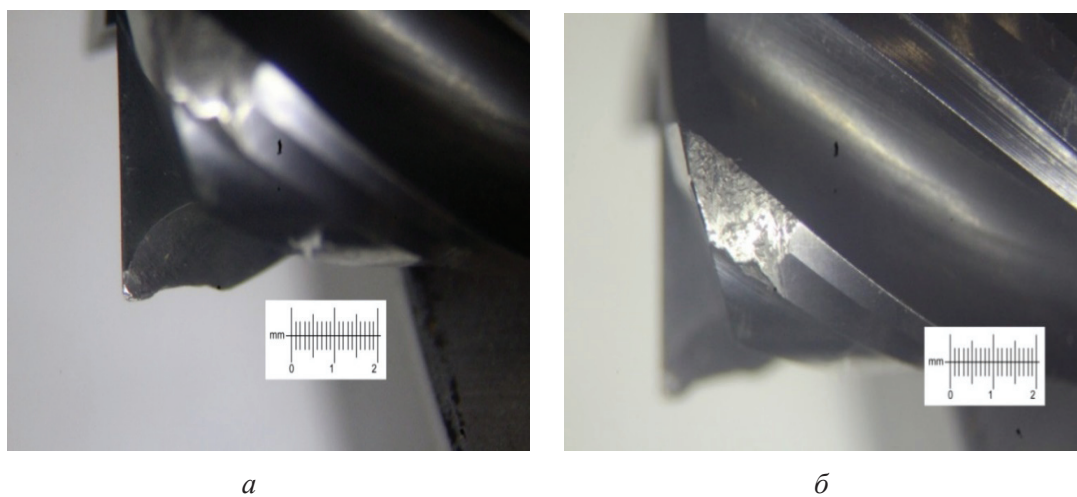


Рис. 7. Фотография износа фрезы № 1 по передней (а) и задней (б) поверхности
Fig. 7. Photo of the wear of the mill No.1 on the rake (a) and flank (б) surface

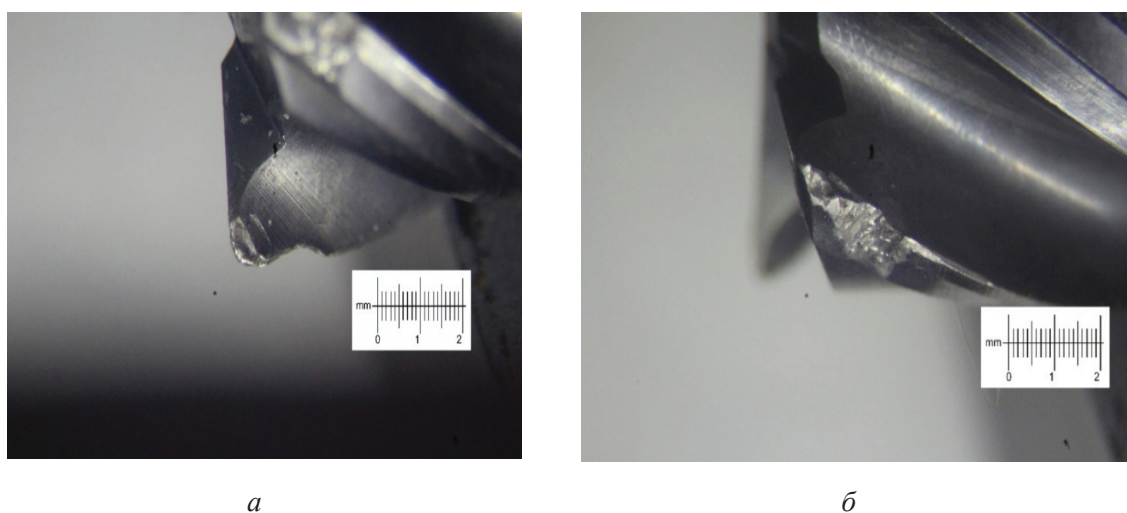


Рис. 8. Фотография износа фрезы № 2 по передней (а) и задней (б) поверхности
Fig. 8. Photo of the wear of the mill No. 2 on the rake (a) and flank (б) surface

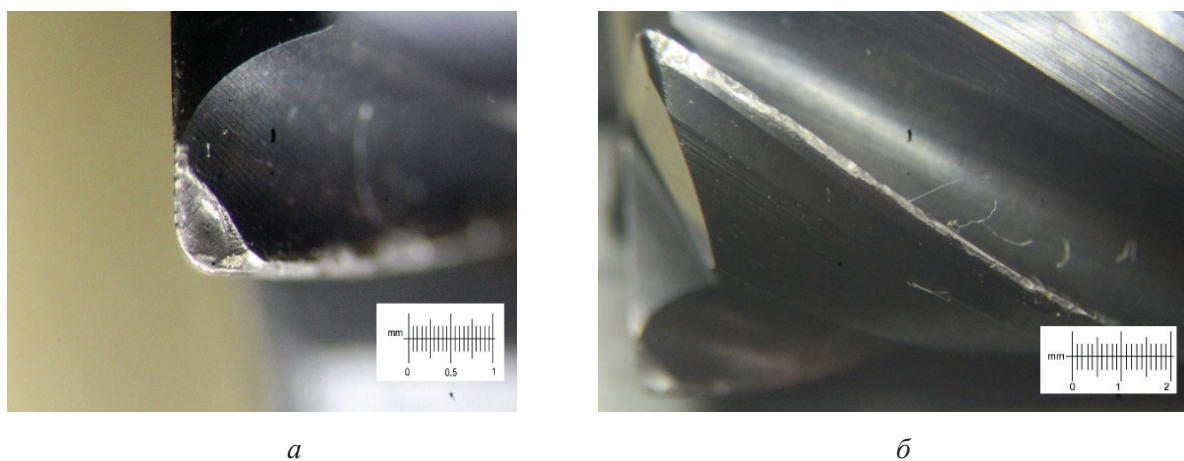


Рис. 9. Фотография износа фрезы № 3 по передней (а) и задней (б) поверхности
Fig. 9. Photo of the wear of the mill No. 3 on the rake (a) and flank (б) surface

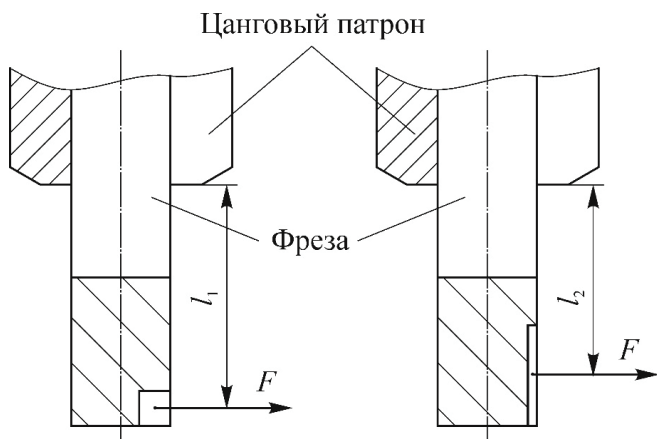


Рис. 10. Схема приложения сосредоточенной силы при разных соотношениях глубины и ширины фрезерования

Fig. 10. Application of point force for different depth to width ratios

жения критического значения износа резко возрастает сила, и тогда разница изгибающих моментов становится еще больше.

Другой причиной чрезмерного износа может являться характер распределения температуры в зоне резания. Так, например, при использовании малой ширины и большой глубины фрезерования температура в процессе резания локализуется на небольшом участке инструмента [17], вызывая ускорение процесса изнашивания. При увеличении ширины фрезерования температура распределяется по большей длине режущей части фрезы, уменьшая скорость износа.

Выводы

Проведенное исследование показало следующее.

1. Исследуемый композитный материал можно эффективно обрабатывать концевыми фрезами, предназначенными для обработки жаропрочных сталей и титановых сплавов с геометрией $\gamma = 4^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\omega = 38^\circ$, $z = 4$, со скоростью резания от 20 до 30 м/мин и подачей на зуб от 0,02 до 0,04 мм/зуб.

2. Оптимальной для работы является схема фрезерования, при которой значение ширины фрезерования во много раз больше глубины. Стойкость фрезы, работающей при отношении глубины фрезерования к ширине 1 : 16, при прочих равных режимах почти в 3 раза выше, чем

при отношении 1 : 1, и в 2 раза выше, чем при отношении 1 : 4.

3. Основной износ сконцентрирован на задней поверхности зуба фрезы. При выбранных режимах обработки критическое значение износа находится в диапазоне от 0,11 до 0,15 мм. После достижения данной величины наблюдается более интенсивный износ и разрушение зуба фрезы.

4. До наступления критического износа 0,11...0,15 мм силы резания при разных соотношениях глубины и ширины и одинаковом объеме снимаемого слоя в единицу времени имеют близкие значения, равные примерно 70...86 Н.

Список литературы

1. Inconel 625/TiB2 metal matrix composites by direct laser deposition / V. Promakhov, A. Zhukov, M. Ziatdinov, I. Zhukov, N. Schulz, S. Kovalchuk, Y. Dubkova, R. Korsmik, O. Klimova-Korsmik, G. Turichin, A. Perminov // Metals. – 2019. – Vol. 9, iss. 2. – P. 141. – DOI: 10.3390/met9020141.
2. Microhardness and microstructure evolution of TiB2 reinforced Inconel 625/TiB2 composite produced by selective laser melting / B. Zhang, G. Bi, S. Nai, C. Sun, J. Wei // Optics and Laser Technology. – 2016. – Vol. 80. – P. 186–195. – DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.01.010.
3. Patel M.R.R., Ranjan M.A. Advanced techniques in machining of aerospace superalloys: a review // International Journal of Advance Research in Engineering, Science and Technology. – 2015. – Vol. 2, iss. 5. – P. 149–154. – DOI: 10.26527/ijarest.150507103716.
4. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: справочник. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с. – (Библиотека технолога). – ISBN 5-217-03132-8.
5. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting / T. Trosch, J. Ströbner, R. Völkl, U. Glatzel // Materials letters. – 2016. – Vol. 164. – P. 428–431. – DOI: 10.1016/j.matlet.2015.10.136.
6. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: учебник для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
7. Cutting force and surface finish analysis of machining additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V / A. Polishetty, M. Shunmugavel, M. Goldberg, G. Littlefair, R.K. Singh // Procedia Manufacturing. – 2017. – Vol. 7. – P. 284–289. – DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.071.

8. A brief review on machining of Inconel 718 / S. Roy, R. Kumar, Anurag, A. Panda, R.K. Das // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, iss. 9. – P. 18664–18673. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.212.
9. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы: справочник. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с. – ISBN 978-5-458-28144-7.
10. Arunachalam R., Mannan M.A. Machinability of nickel-based high temperature alloys // *Machining Science and Technology*. – 2000. – Vol. 4, iss. 1. – P. 127–168. – DOI: 10.1080/10940340008945703.
11. Технология обработки металлов резанием: учебное пособие. – Б. м.: Sandvik Coromant, 2009. – 359 с.
12. Grguraš D., Kern M., Pušavec F. Suitability of the full body ceramic end milling tools for high speed machining of nickel based alloy Inconel 718 // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 630–633. – DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.190.
13. Latest machining technologies of hard-to-cut materials by ultrasonic machine tool / F. Feucht, J. Ketelaer, A. Wolff, M. Mori, M. Fujishima // *Procedia CIRP*. – 2014. – Vol. 14. – P. 148–152. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.040.
14. Kuo K.L., Tsao C.C. Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2012. – Vol. 22, suppl. 3. – P. 793–800. – DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61806-8.
15. Influence of ultrasonic assistance on delamination during machining of different composite materials / M. Kuruc, M. Nepal, T. Vopát, V. Šimna, J. Peterka // *Annals of DAAAM and Proceedings*. – 2017. – Vol. 28. – DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.055.
16. Ni C., Zhu L., Yang Z. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti–6Al–4V from dynamic view // *Wear*. – 2019. – Vol. 436–437. – P. 203006. – DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.
17. HEM Guidebook: a machinist's guide to increasing shop productivity with high efficiency milling. – Harvey Performance Company, LLC, 2017. – URL: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/hem-guidebook-download/> (accessed: 15.01.2021).
18. Roberts S. High-efficiency milling speed changes rules // *Canadian Metalworking*. – 2018. – January 10. – URL: <https://www.canadianmetalworking.com/article/cuttingtools/high-efficiency-milling-speed-changes-rules> (accessed: 15.01.2021).
19. Derek K. Optimize cutting efficiency, optimize throughput // *Modern Machine Shop*. – 2005. – February 15. – URL: <https://www.mmsonline.com/articles/optimize-cutting-efficiency-optimize-throughput> (accessed: 15.01.2021).
20. High Speed Machining Vs. HEM. – 2017. – August 11. – URL: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/high-efficiency-milling-vs-high-speed-machining/> (accessed: 15.01.2021).
21. High efficiency vs. High Feed Milling: which is more productive? // *Modern Machine Shop*. – 2018. – November 2. – URL: <https://www.mmsonline.com/articles/high-efficiency-vs-high-feed-milling-which-is-more-productive> (accessed: 15.01.2021).
22. Каталог режущего инструмента компании «ПК МИОН». – Томск, 2019. – URL: <http://pkmion.ru/catalog/frezy/> (дата обращения: 15.01.2021).

Конфликт интересов

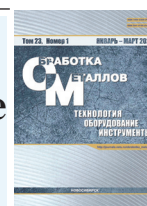
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Investigation of the machinability by milling of the laser sintered Inconel 625/NiTi-TiB₂ composite

Alexey Arlyapov^{1, a, *}, Sergei Volkov^{1, b}, Vladimir Promakhov^{2, c}, Alexander Zhukov^{2, d}

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

² National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5117-4663>, arlyapov@tpu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0001-9984-9466>, vsu@pkmion.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-4385-3404>, vvpromakhov@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-9814-4365>, zhuk_77@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 10 April 2020

Revised: 15 April 2020

Accepted: 19 December 2020

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Milling
Cutting parameters
Tool life
Cutting forces
Composite
Titanium diboride
Laser sintering

Funding

This work was carried out with partial financial support from the Russian Science Foundation No. 20-79-10086.

ABSTRACT

Introduction. The processing capability of milling a metal-matrix composite based on Inconel 625 with the addition of NiTi-TiB₂, obtained by laser sintering, is investigated. The composite is intended for turbine blades manufacture and has strength characteristics close to Inconel 625, however, due to the addition of TiB₂, its heat- and wear resistance is higher. This material is new; its machinability has not been studied yet. **The aim of the work** is to determine the technological capabilities of milling with end mills of this composite. **Investigations.** The new composite is milled with end mills, and recommendations on the selection of cutting speed, milling depth and width are obtained. **Experimental Methods.** Measuring end mill wear and cutting force. Wear is assessed by the flank chamfer using a microscope, and cutting forces are measured with a Kistler 9257B dynamometer. Milling is carried out at three speeds: 25, 35 and 50 m/min. To determine the optimal parameters of the depth and width of milling, the following ratios are used: 1 : 1, 1 : 4, 1 : 16, while the volume of chips removed per unit of time remained constant for all ratios. **Results and Discussion.** The back surface of the cutter teeth wears out more intensively. After reaching the wear chamfer along the flank surface of a value equal to 0.11...0.15 mm, there is a sharp increase in forces and brittle destruction of the tooth. Milling at a speed of 25 m/min guaranteed 28 minutes of stable operation, after which the amount of wear quickly approached the critical value of 0.11 mm, at a cutting speed of 50 m/min, critical wear occurred already after 14 minutes. The dependences of the cutting force on time for all selected cutting speeds, throughout the test time, have an increasing character, which indicates the effect of wear of cutters on cutting forces. It is found that the durability of cutters increases with increasing width and decreasing the depth of milling.

For citation: Arlyapov A.Yu., Volkov S.Yu., Promakhov V.V., Zhukov A.S. Investigation of the machinability by milling of the laser sintered Inconel 625/NiTi-TiB₂ composite. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 21–32. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-21-32. (In Russian).

References

1. Promakhov V., Zhukov A., Ziatdinov M., Zhukov I., Schulz N., Kovalchuk S., Dubkova Y., Korsmik R., Klimova-Korsmik O., Turichin G., Perminov A. Inconel 625/TiB₂ metal matrix composites by direct laser deposition. *Metals*, 2019, vol. 9, iss. 2, p. 141. DOI: 10.3390/met9020141.
2. Zhang B., Bi G., Nai S., Sun C., Wei J. Microhardness and microstructure evolution of TiB₂ reinforced Inconel 625/TiB₂ composite produced by selective laser melting. *Optics and Laser Technology*, 2016, vol. 80, pp. 186–195. DOI: 10.1016/j.optlastec.2016.01.010.

* Corresponding author

Arlyapov Alexey Yu. Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 National Research Tomsk Polytechnic University,
 30 Lenin Avenue,
 634050, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: +7-906-947-5044, e-mail: arlyapov@tpu.ru

3. Patel M.R.R., Ranjan M.A. Advanced techniques in machining of aerospace superalloys: a review. *International Journal of Advance Research in Engineering, Science and Technology*, 2015, vol. 2, no. 5, pp. 149–154. DOI: 10.26527/ijarest.150507103716.
4. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Kharlamov G.A. *Obrabotka spetsial'nykh materialov v mashinostroenii* [Processing of special materials in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p. ISBN 5-217-03132-8.
5. Trosch T., Ströbner J., Völkl R., Glatzel U. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. *Materials Letters*, 2016, vol. 164, pp. 428–431. DOI: 10.1016/j.matlet.2015.10.136.
6. Granovskii G.I., Granovskii V.G. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 304 p.
7. Polshetty A., Shunmugavel M., Goldberg M., Littlefair G., Singh R.K. Cutting force and surface finish analysis of machining additive manufactured titanium alloy Ti-6Al-4V. *Procedia Manufacturing*, 2017, vol. 7, pp. 284–289. DOI: 10.1016/j.promfg.2016.12.071.
8. Roy S., Kumar R., Anurag, Panda A., Das R.K. A brief review on machining of Inconel 718. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 9, pp. 18664–18673. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.06.212.
9. Maslenkov S.B. *Zharoprochnye stali i splavy* [Heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 192 p. ISBN 978-5-458-28144-7.
10. Arunachalam R., Mannan M.A. Machinability of nickel-based high temperature alloys. *Machining Science and Technology*, 2000, vol. 4, iss. 1, pp. 127–168. DOI: 10.1080/10940340008945703.
11. *Tekhnologiya obrabotki metallov rezaniem* [Technology of metal cutting]. Sandvik Coromant, 2009. 359 p.
12. Grguraš D., Kern M., Pušavec F. Suitability of the full body ceramic end milling tools for high speed machining of nickel based alloy Inconel 718. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 77, pp. 630–633. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.190.
13. Feucht F., Ketelaer J., Wolff A., Mori M., Fujishima M. Latest machining technologies of hard-to-cut materials by ultrasonic machine tool. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 148–152. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.040.
14. Kuo K.L., Tsao C.C. Rotary ultrasonic-assisted milling of brittle materials. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, suppl. 3, pp. 793–800. DOI: 10.1016/S1003-6326(12)61806-8.
15. Kuruc M., Necpal M., Vopát T., Šimna V., Peterka J. Influence of ultrasonic assistance on delamination during machining of different composite materials. *Annals of DAAAM and Proceedings*, 2017, vol. 28. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.055.
16. Ni C., Zhu L., Yang Z. Comparative investigation of tool wear mechanism and corresponding machined surface characterization in feed-direction ultrasonic vibration assisted milling of Ti-6Al-4V from dynamic view. *Wear*, 2019, vol. 436–437, p. 203006. DOI: 10.1016/j.wear.2019.203006.
17. *HEM Guidebook: a machinist's guide to increasing shop productivity with high efficiency milling*. Harvey Performance Company, LLC, 2017. Available at: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/hem-guidebook-download/> (accessed 15.01.2021).
18. Roberts S. High-efficiency milling speed changes rules. *Canadian Metalworking*, 2018, January 10. Available at: <https://www.canadianmetalworking.com/article/cuttingtools/high-efficiency-milling-speed-changes-rules> (accessed 15.01.2021).
19. Derek K. Optimize cutting efficiency, optimize throughput. *Modern Machine Shop*, 2005, February 15. Available at: <https://www.mmsonline.com/articles/optimize-cutting-efficiency-optimize-throughput> (accessed 15.01.2021).
20. *High Speed Machining Vs. HEM*. 2017, August 11. Available at: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/high-efficiency-milling-vs-high-speed-machining/> (accessed 15.01.2021).
21. High efficiency vs. High Feed Milling: which is more productive? *Modern Machine Shop*, 2018, November 2. Available at: <https://www.mmsonline.com/articles/high-efficiency-vs-high-feed-milling-which-is-more-productive> (accessed 15.01.2021).
22. *Katalog rezhushchego instrumenta kompanii "PK MION"* [The cutting tool catalog of the PC MION company]. Tomsk, 2019. Available at: <http://pkmion.ru/catalog/frezy/> (accessed 15.01.2021).

Conflicts of Interest

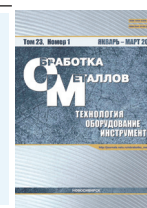
The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Определение температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе исследования изменения электромагнитных свойств

Евгений Артамонов^а, Андрей Тверяков^б, Антон Штин^{с,*}

Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, г. Тюмень, 625000, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>,  evgart2014@mail.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-6444-2559>,  tveryakov@mail.ru,
^с  <https://orcid.org/0000-0002-7000-6761>,  shstin92@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91.02

История статьи:

Поступила: 26 августа 2020
 Рецензирование: 09 сентября 2020
 Принята к печати: 12 января 2021
 Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Твердые сплавы
 Обработка металлов
 Температура максимальной работоспособности

АННОТАЦИЯ

Введение. Сегодня в условиях санкций Российская Федерация как никогда раньше нуждается в развитии энергосберегающих технологий в различных отраслях промышленности. При назначении режимов резания для новых материалов инструментальные фирмы проводят испытания на разрушение сменных режущих пластин при резании, полученные численные значения публикуются в каталогах. Наибольшее влияние на ресурс и работоспособность режущих инструментов из твердых сплавов оказывают физико-механические свойства инструментальных материалов. Исследования показали, что физико-механические свойства вольфрамовых твердых сплавов в процессе работы, а именно в процессе резания труднообрабатываемых материалов под действием высоких температур, симметрично изменяются. При разработке лабораторной установки был проведен литературный обзор, который показал, что в настоящий момент широкое применение получили методы неразрушающего контроля технологических объектов. Методы неразрушающего контроля технологических объектов позволяют проводить исследования состояния материала, дефектов в структуре, внутренних изменений, не разрушая образцы. Такое преимущество было определяющим при литературном обзоре. **Объектом** данного исследования выступают сменные режущие твердосплавные пластины из однокарбидного твердого сплава В35 четырехгранной формы в состоянии поставки. **Предметом** исследования являются взаимосвязь изменения магнитной составляющей свойств однокарбидного твердого сплава В35 в зависимости от воздействия на него высоких температур. В основу исследования легли законы физики раздела электродинамики, а также известные методики неразрушающего контроля, научные основы материаловедения, все исследования проводились в аккредитованных лабораториях Тюменского индустриального университета. Достоверность полученных данных подтверждается высокой корреляцией результатов численных значений с данными, полученными исследователями ранее. **Методика исследований.** В статье показана разработанная установка для определения температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе исследования изменения электромагнитных свойств. Приведена методика исследований. Испытания образцов проводились во время нагрева сменных режущих пластин из вольфрамового твердого сплава В35. Температурный интервал нагрева был выбран в соответствии с температурным режимом процесса резания при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов. Таким образом, нагрев производился в диапазоне от 0 до 1000 °С, который осуществлялся газопламенным методом ручным способом. **Результаты и обсуждения.** По результатам экспериментальных исследований были составлены таблицы полученных результатов, где с интервалом в 10 °С указаны соответствующие значения магнитного поля вихревых токов, наводимых в сменных режущих пластинах из вольфрамового твердого сплава В35. Получены результаты исследования по определению температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе исследования изменения электромагнитных свойств, для сплава В35 она составила 460...730 °С, что соответствует скорости резания 18 м/мин при обработке хромоникелевого сплава ЭИ867-ВД. На основе стойкостных испытаний в заводских условиях было доказано, что разработанная методика позволяет определять температурные интервалы максимальной работоспособности на основе исследования изменений электромагнитных свойств (магнитного поля вихревых токов, возникающих в сменных режущих пластинах) твердых сплавов. Полученные результаты дают возможность назначать наиболее подходящие режимные условия для режущего инструмента на основе научно обоснованной методики, позволяющей использовать максимальный ресурс инструмента.

Для цитирования: Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С. Определение температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе исследования изменения электромагнитных свойств // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 33–44. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-33-44.

*Адрес для переписки

Штин Антон Сергеевич, ассистент
 Тюменский индустриальный университет
 ул. Володарского, 38,
 625000, г. Тюмень, Россия
 Тел.: +7-953-826-98-02, e-mail: shstin92@mail.ru

Введение

Сегодня в условиях санкций Российская Федерация как никогда нуждается в развитии энергосберегающих технологий в различных отраслях промышленности.

Задачи, которые стоят при проектировании деталей машин, например в авиа- или нефтегазовом машиностроении, обуславливают применение жаропрочных и труднообрабатываемых материалов, в том числе новых материалов в конструкции изделий. Металлургия не стоит на месте, в последнее время появляются новые марки материалов, обладающие характеристиками в части прочности, твердости, пластичности, жаростойкости, в разы превосходящие свои аналоги, например, российские марки сплавов типа ВВП, американский «martensite». В связи с этим при изготовлении таких деталей машин возникает множество проблем, связанных с назначением технологических параметров процесса обработки. Прежде всего это связано с освоением новых материалов в период становления производства изделий или капитального и преждевременного ремонта, т. е. единичного производства различных агрегатов и машин.

На территории Тюменской области производят капитальный и аварийный ремонт газотурбинных двигателей, которые используют для перекачки газа. Как известно, в их конструкции применяется большое количество труднообрабатываемых жаропрочных материалов. Исследования показали, что выбор инструментального материала, а также назначение режимов обработки (резания) являются основными проблемами при обработке сталей и сплавов, входящих в группу труднообрабатываемых материалов [1]. Решение проблемы выбора технологических параметров процесса резания позволяет построить энергоэффективный процесс производства и ремонта деталей машин.

Процесс резания – это многофакторный процесс, он очень сложен в прогнозировании, особенно при обработке жаропрочных и труднообрабатываемых материалов. Однако не вызывает сомнения тот факт, что под действием температуры и сил резания структура, а соответственно и свойства инструментального и обрабатываемого материала меняются и это оказывает влияние на процесс обработки. Исследования

влияния изменения свойств этих материалов на процесс обработки материалов резанием позволяют обоснованно назначать рациональные режимы обработки.

При назначении режимов резания для новых материалов инструментальные фирмы проводят испытания на разрушение сменных режущих пластин при резании, полученные численные значения публикуются в каталогах [2]. Но как показывает практика, данные численные значения не всегда соответствуют оптимальным режимам резания. На практике режимные условия для инструмента разделены по группам обрабатываемости [3]. На сегодняшний день инструментальные фирмы используют семь групп обрабатываемости в своих каталогах. В группу может входить большое количество марок обрабатываемых материалов, а для обработки могут рекомендоваться лишь несколько марок инструментального материала. Какой инструментальный материал обеспечит наиболее полный ресурс при обработке данного обрабатываемого материала, по этим рекомендациям определить не представляется возможным.

В своих работах проблему обеспечения наиболее полного ресурса режущего инструмента с различных позиций изучали: Васин С.А. [4], Григорьев С.Н. [5], Грубый С.В. [6], Carceanu I., Cosmeleată G. [7], Ferri C. [8], Kümmel J. [9], Munish Kumar Gupta [10], Murthy K.S. [11], Neugebauer R. [12], Jaafar I. [13], Tangjitsitcharoen S. [14], Patwari A. [15], Tillmann W. [16], Zhang H. [17], Zhang C. L. [18].

Литературный анализ работ ученых с мировым именем в области механической лезвийной обработки металлов резанием показал, что температурный фактор оказывает результирующее влияние на процесс резания труднообрабатываемых материалов [4–18].

Инструментальные материалы (ИМ), как и другие материалы, обладают физико-механическими свойствами, которые под действием внешних факторов способны изменяться. Эти свойства оказывают определяющее влияние на работоспособность и ресурс инструмента, выполненного из этих материалов. Исследования показали, что физико-механические свойства вольфрамовых твердых сплавов в процессе работы, а именно в процессе резания труднообрабатываемых материалов под действием высо-

ких температур, симметрично изменяются [19]. Изучение процессов, протекающих внутри инструментальных материалов, в том числе вольфрамовых твердых сплавов, позволит на основе научно обоснованной методики определять и назначать режимы работы данного материала с учетом его внутренних изменений, что повысит ресурс режущего инструмента и обеспечит условия, при которых режущий инструмент будет обладать максимальными режущими свойствами при обработке труднообрабатываемых материалов [20].

Цель работы. Определение скорости резания, обеспечивающей максимальный ресурс работы сменных режущих пластин из вольфрамового твердого сплава В35 при токарной обработке хромоникелиевого сплава ЭИ867-ВД на основе исследования изменения электромагнитного поля вихревых токов, возникающих в сменных режущих пластинах при изменении температуры.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи**.

1. Выполнить литературный обзор, а также провести анализ существующих работ, посвященных проблемам рационального выбора инструментального материала, а также назначения режимов резания.

2. Провести экспериментальные исследования изменения электромагнитного поля вихревых токов, возникающих в твердых сплавах В35 под воздействием высоких температур, характерных для процесса резания.

3. Провести исследования механики процесса резания при токарной обработке труднообрабатываемой хромоникелиевой стали ЭИ867-ВД на разных скоростях резания резцами, оснащенными сменными режущими твердосплавными пластинами из твердого сплава В35.

Методика исследований

Работоспособностью режущих инструментов принято считать условия, при которых ими можно выполнять обработку резанием в соответствии с установленными требованиями в определенных условиях [21].

Для решения второй задачи необходимо провести лабораторные исследования изменения магнитного поля вихревых токов, возникающих в сменных режущих пластинах из вольфрамо-

вого твердого сплава В35. Эксперимент проводился в температурном диапазоне от комнатной температуры до температуры, возникающей в процессе резания на острие режущей кромки. Именно при таких температурах протекает процесс резания при обработке труднообрабатываемых сталей и сплавов, таких как ЭИ867-ВД. Анализ существующих решений показал, что таких устройств, удовлетворяющих нашим требованиям, не существует. Одним из требований к устройству является возможность использования в качестве исследуемого образца сменную многогранную твердосплавную пластину в состоянии поставки для максимального приближения результатов к реальным условиям. Для проведения экспериментальных исследований была построена лабораторная установка.

При разработке лабораторной установки был проведен литературный обзор, который показал, что в настоящий момент широкое применение получили методы неразрушающего контроля технологических объектов. Эти методы позволяют проводить исследования внутренних изменений, не разрушая образцы, что явилось определяющим преимуществом при литературном обзоре. Существует семь типов неразрушающего контроля, представленных на рис. 1 [22], у каждого из них есть как достоинства, так и недостатки.

Для исследований внутренних изменений, протекающих в инструментальных материалах, с возможностью проведения испытаний на образцах в состоянии поставки сменных режущих твердосплавных пластин (СМТП) подходит метод неразрушающего контроля – «вихретоковый» [22]. Такой метод контроля основывается на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов [23].

Это достоинство не только отвечает нашим требованиям, но позволяет сократить время на изготовление специальных образцов из вольфрамового твердого сплава В35. Кроме того, оно позволяет приблизить лабораторные исследования к реальным условиям, что, несомненно, является существенным преимуществом перед другими видами неразрушающего контроля.

В качестве исследуемых образцов были выбраны СМТП из инструментального твердого сплава В35 в состоянии поставки, рис. 2.



Рис. 1. Виды неразрушающего контроля (НК)

Fig. 1. Types of non-destructive testing (NDT)

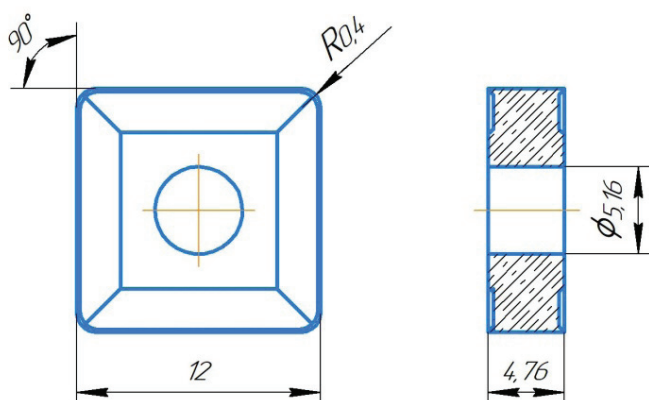


Рис. 2. Сменная режущая твердосплавная пластина

Fig. 2. Replaceable Cutting Hard Alloy Insert

Характеристики выбранных сменных режущих пластин приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Характеристики выбранных сменных режущих пластин

Characteristics of selected replaceable cutting inserts

Фирма	Форма	Размеры	Материал
КЗТС	SNMA	12×12×4.76	B35

Исследования проводились на специальной лабораторной установке, в основу которой лег вихре токовый метод неразрушающего контроля. Схема предложенной установки показана на рис. 3.

Лабораторная установка представляет собой систему приборов для измерений изменений магнитного поля вихревых токов, возникающих в ферромагнетиках. В качестве объектов исследования рекомендуется использовать СМТП в состоянии поставки, так как лимитирующими являются размеры используемой катушки с теплоизолирующим покрытием. При изменении катушки допускаются исследования на образцах других формфакторов.

В установку входят автоколебательный контур (АК) и щиток приборов (для измерения количественной комплексной характеристики изменения магнитного поля ВТ (вихревых токов) используется мультивольтметр, а для измерения состояния температуры в ходе всего эксперимента использовался цифровой термометр). Электронная часть устройства представляет собой электронную схему из двух последовательно подключенных конденсаторов, сопротивления, транзистора и блока питания. АК выполнен в виде автотрансформатора как обмотка возбуждения вихре токового преобразователя. На обмотку нанесено покрытие для предотвращения пагубного воздействия нагрева объекта и разрушения самой обмотки.

Испытания образцов проводились во время нагрева сменных режущих пластин из вольфрамового твердого сплава В35, рис. 4.

Температурный интервал нагрева был выбран в соответствии с температурным режимом процесса резания при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов. Таким образом, нагрев производился в диапазоне до 1000 °С.

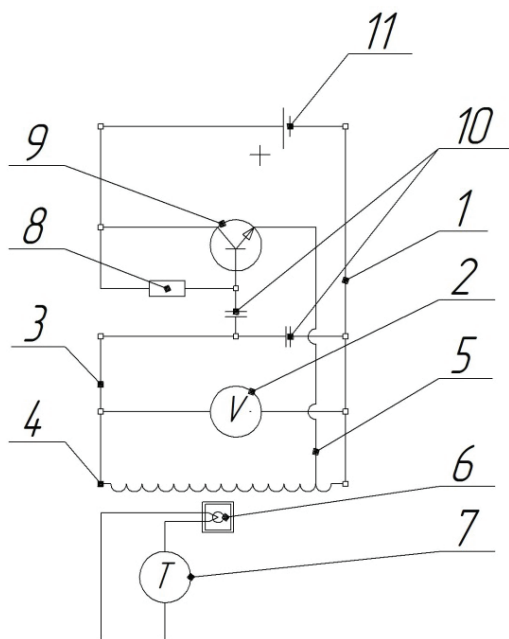


Рис. 3. Схема разработанной авторами установки для определения температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин по электромагнитным свойствам:

1 – автоколебательный контур; 2 – вольтметр; 3 – выход катушки 1; 4 – катушка; 5 – выход катушки 2; 6 – сменная режущая пластина; 7 – термометр; 8 – сопротивление; 9 – транзистор; 10 – конденсатор; 11 – источник питания

Fig. 3. Diagram of developed plant for determination of maximum operability temperature of replaceable cutting hard-alloy inserts by electromagnetic properties:

1 – self-oscillating circuit; 2 – voltmeter; 3 – coil 1 output; 4 – coil; 5 – coil 2 output; 6 – replaceable cutting insert; 7 – thermometer; 8 – resistance; 9 – transistor; 10 – condenser; 11 – power supply

Сам нагрев осуществлялся газопламенным методом ручным способом.

Исследования проводились следующим образом: выполнялся нагрев образца, в нашем случае образец представляет собой сменную режущую твердосплавную пластину в состоянии поставки, затем бесконтактным методом наводилось магнитное поле на исследуемый образец. На измерительном приборе (вольтметре) разработанной установки фиксировались изменения значений, свидетельствующих о внутренних изменениях твердого сплава. Результаты выводились на экране монитора персонального компьютера.

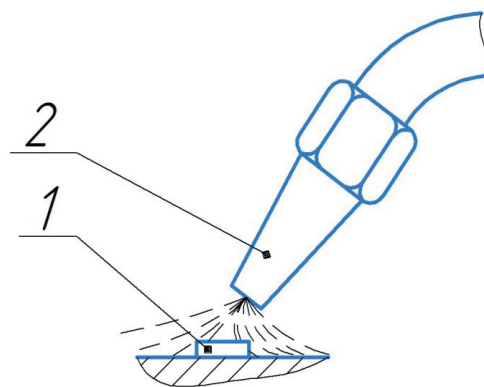


Рис. 4. Нагрев сменной режущей твердосплавной пластины:

1 – образец, сменная твердосплавная пластина из В35; 2 – устройство нагрева

Fig. 4. Heating of replaceable hard alloy cutting insert:

1 – sample, replaceable carbide insert from hard alloy B35 (92 %WC + 8 %Co); 2 – heating device

Результаты и их обсуждение

По результатам экспериментальных исследований были составлены таблицы полученных результатов, где с интервалом в 10 °С, были указаны соответствующие значения магнитного поля вихревых токов, наводимых в сменных режущих пластинах из вольфрамового твердого сплава В35.

С помощью возможностей математического аппарата программного продукта MS Excel были построены полиномиальные зависимости полученных данных от температуры нагрева, рис. 5. Температурный интервал 12, рис. 5, в котором производились экспериментальные исследования, соответствует температурному интервалу, характерному для процесса резания.

Полученная графическая зависимость, где в качестве аппроксимирующей кривой выбран полином, обрабатывается по правилам инженерных исследований в соответствии с 5 %-й погрешностью, допустимой для таких расчетов.

Для определения границы температурного диапазона используется специальная методика. От значения максимального магнитного поля откладывается 5-й % интервал. Через данную точку проводится линия, параллельная оси температур, через все поле графика. Точки, где линия пересекается с линией графика, принимаем за границы искомого интервала. Из полученных

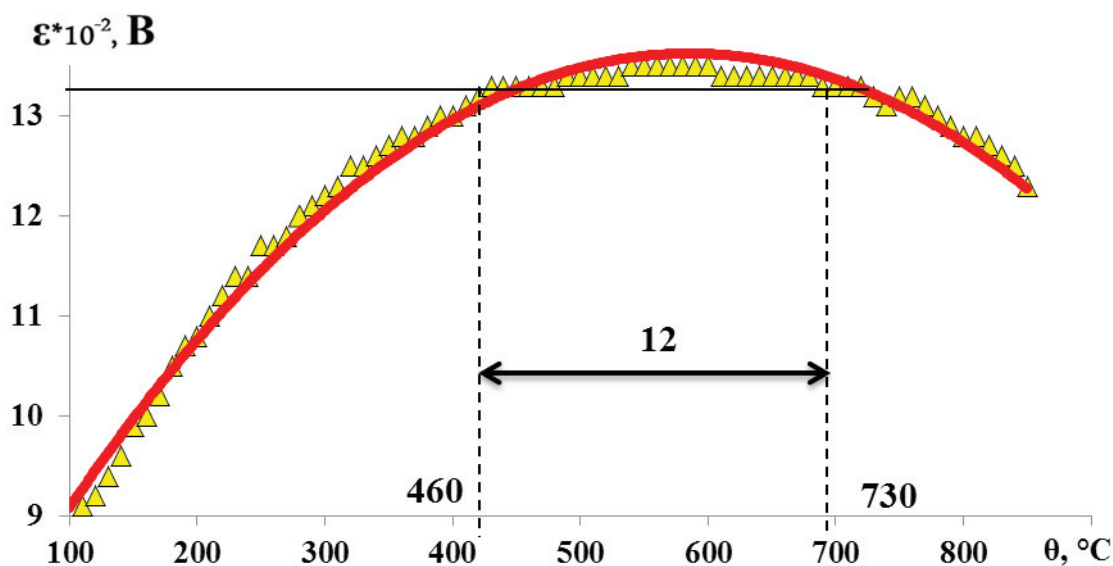


Рис. 5. Полученная однопараметрическая зависимость изменения значений ЭДС АК под действием температур во время эксперимента на сменных режущих пластинах из сплава В35

Fig. 5. The obtained one-parameter dependence of change of EMF values under the influence of temperatures during the experiment on replaceable alloy cutting insert B35 (92 %WC + 8 %Co)

точек проводим проекционные линии на ось температур. Полученный температурный интервал принимаем за интервал максимального ресурса сменных режущих пластин из твердого сплава В35. Допускается использование инструмента во всем температурном интервале, но с технологической точки зрения рекомендуется придерживаться максимальной температуры, так как она обеспечивает максимально допустимую скорость резания.

На рис. 6 представлены зависимости температуры резания, пути резания и относительного поверхностного износа инструмента. По характеру данных зависимостей мы можем сказать, что в определенном интервале температур наблюдается минимум относительного поверхностного износа и максимум пути резания, что доказывает адекватность разработанной методики. Каждая точка на графиках представляет собой среднее арифметическое значение полученных значений, в результате проводят не менее трех измерений.

На полученных зависимостях (рис. 6), в лабораторных условиях изменение направления значений ЭДС соответствует структурным изменениям первого фазового перехода кобальта. До этих значений наблюдается рост значений прочности твердого сплава, что обеспечивает

условия максимальной работоспособности инструмента. Это подтверждается при исследовании механики процесса резания при токарной обработке хромоникелевого сплава ЭИ867-ВД.

Полученные результаты коррелируют с результатами ученых, занимающихся исследованиями повышения ресурса режущего инструмента, табл. 2.

Проведенный сравнительный анализ доказывает возможность использования данной методики для определения температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин на основе исследования изменения электромагнитных свойств. В качестве результирующей температуры предлагается использовать максимально допустимую температуру интервала, так как она обеспечивает максимальный ресурс инструмента, исключая возможность преждевременного его выхода из строя.

Таким образом, изменение электромагнитных свойств инструментальных твердых сплавов реагирует на изменения состояния материала, что может быть использовано для определения температуры максимальной работоспособности сменных режущих твердосплавных пластин. В производственных условиях по данному температурному интервалу беспрепятственно опре-

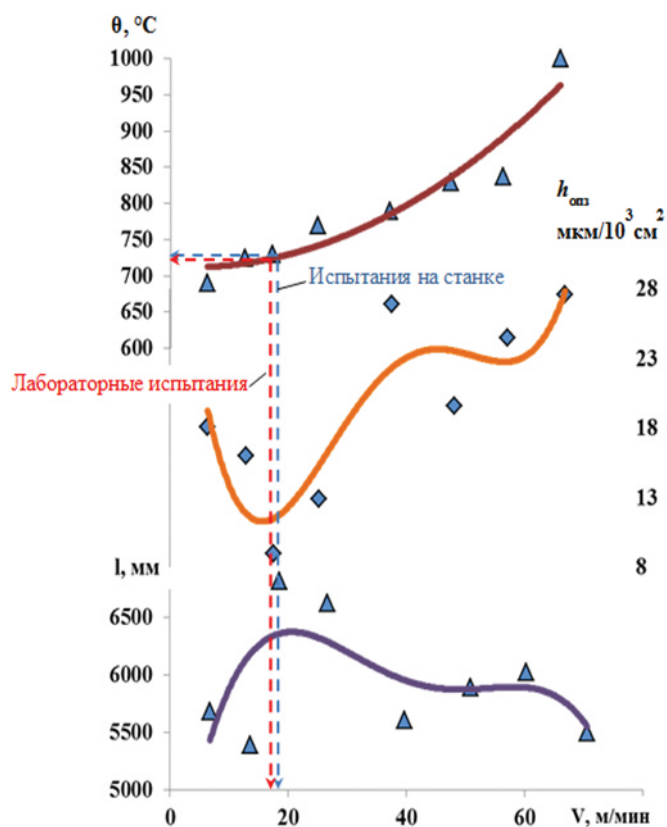


Рис. 6. Зависимости температуры резания (θ), пути резания до отказа (L), относительного поверхностного износа ($h_{\text{опз}}$) от скорости резания (V) (обрабатываемый материал ЭИ867-ВД, инструментальный материал В35, $S = 0,39$ мм/об, $t = 1$ мм)

Fig. 6. Dependencies of cutting temperature (θ), cutting path to failure (L), relative surface wear (h_{tw}) cuttingspeed (V) (material to be treated EI867-VD (57%Ni 9 %Mo 10 %Cr 6 %W 4,2 %Al 4 %Co), tool material В35 (92 %WC+8 %Co), Feed (S) = 0,39 mm/n, Time (t) = 1 mm)

деляется скорость резания, обеспечивающая наиболее полный ресурс сменных режущих пластин при помощи метода естественной термопары либо тепловизора.

Закключение

В ходе работы были проведены экспериментальные исследования по изменению электромагнитного поля вихревых токов, возникающих в твердых сплавах марки В35, под воздействием высоких температур, характерных для процесса резания, которые позволили получить температурный интервал изменения электромагнитных свойств 460...730 °С. Проведены также исследования испытаний механики процесса резания при токарной обработке труднообрабатываемой хромоникелиевой стали ЭИ867-ВД на разных режимах резания (скоростях резания) резцами, оснащенными сменными режущими твердосплавными пластинами из твердого сплава В35, в ходе которых получили скорость резания, обеспечивающую максимальный ресурс режущего инструмента.

Исследование показало, что при токарной обработке хромоникелиевого сплава ЭИ867-ВД скорость резания, обеспечивающая максимальный ресурс работы вольфрамового твердого сплава В35, составляет 18 м/мин. Это подтверждается минимальной величиной фаски износа сменных режущих пластин по задней поверхности, равной 0,225 мм, и минимальной величиной относительного поверхностного износа по задней поверхности $h_{\text{опз}} = 211,97$ мкм/10³ см, полученного при одной температуре резания 730 °С. Такая температура входит в температурный интервал, полученный в лабораторных условиях при исследовании изменений электромагнитного поля вихревых токов, возникающих в твердых сплавах марки В35.

Таким образом, данные исследования по изменению структурных изменений твердых

Таблица 2

Table 2

Сравнительный анализ полученных результатов с результатами, выполненными по методике, основанной на ударной вязкости (KCV)

Comparative analysis of the results with the results obtained by the method based on toughness (KCV)

Материал	Методика определения температуры максимальной работоспособности, основанная на ударной вязкости (KCV) (исследования В.М. Костив Д.С. Василега [1])	Методика авторов по определению температуры максимальной работоспособности по изменению магнитного поля вихревых токов (исследования авторов)
В35 (92 %WC+8 %Co)	520...730 °С	460...730 °С

сплавов позволят для каждого твердого сплава выявить скорости резания, обеспечивающие их максимальный ресурс или максимальную работоспособность на основании научно обоснованной методики.

Список литературы

1. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. – Тюмень: Вектор Бук, 2003. – 190 с. – ISBN 5-88465-416-2.
2. Zorev N.N., Uteshev M.H. Untersuchung der Kintakt-spannung auf den Arbeits-flachen des Werkzeugs miteiner Schneidenabrundung // Berichte der Internationalen Forschungesgemein-schaft fur mechanische produktionstechnik. – 1971. – Vol. 20-1. – P. 31–32.
3. Металлорежущий инструмент, 2019–2020 / Кировградский завод твердых сплавов. – Кировград, 2020. – 284 с. – URL: http://www.kzts.ru/core/user_files/psm-2014.pdf (дата обращения: 23.01.2021).
4. Васин С.А., Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учебник для технических вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с. – ISBN 5-7038-1823-0.
5. Процессы формообразования и инструментальная техника: учебное пособие / В.А. Гречишников, Н.А. Чемборисов, В.Б. Ступко, Д.Т. Сафаров, О.Б. Кучина, С.Н. Григорьев, А.Г. Схиртладзе. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 328 с. – ISBN 978-5-94178-326-7.
6. Lapshin V.V., Zakharevich E.M., Grubyi S.V. Machining of linear negative matrices for fresnel lenses and prisms // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36, iss. 10. – P. 826–830. – DOI: 10.3103/S1068798X16100105.
7. High performance composite materials created through advanced techniques / I. Carceanu, G. Cosmeleată, B. Ghiban, M. Balanescu, I. Nedelcu // Materiale Plastice. – 2007. – Vol. 44, iss. 4. – P. 321–325.
8. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining / C. Ferri, T. Minton, S.B. Ghani, K. Cheng // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2014. – Vol. 228, iss. 1. – P. 135–145. – DOI: 10.1177/0954406213480312.
9. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization / J. Kümmel, D. Braun, J. Gibmeier, J. Schneider, C. Greiner, V. Schulze, A. Wanner // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 215. – P. 62–70. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.032.
10. Sustainable machining of aerospace material Ti (grade-2) alloy: modelling and optimization / M.K. Gupta, P.K. Sood, G. Singh, V.S. Sharma // Journal of Cleaner Production. – 2017. – Vol. 147. – P. 614–627. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.133.
11. Murthy K.S. Rajendran I. Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2012. – Vol. 34, iss. 3. – P. 253–261. – DOI: 10.1590/S1678-58782012000300005.
12. Energy efficient process planning based on numerical simulations / R. Neugebauer, C. Hochmuth, G. Schmidt, M. Dix // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 223. – P. 212–221. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.212.
13. Role of discrete nature of chip formation and natural vibrations of system components in chatter formation during metal cutting / A. Nurulamin, I. Jaafar, A.U. Patwari, W. Zubaire // IJUM Engineering Journal. 2010. – Vol. 11 (1). – P. 124–126.
14. Tangjitsitharoen S., Moriwaki T. Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine // Journal of Manufacturing Processes. – 2008. – Vol. 10. – P. 40–46. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.043.
15. Patwari A., Amin N., Faris W. Investigations of formation of chatter in a non-wavy surface during thread cutting and turning operations // Advanced Materials Research. – 2010. – Vol. 83. – P. 637–645. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.637.
16. Robot based deposition of WC-Co HVOF coatings on HSS cutting tools as a substitution for solid cemented carbide cutting tools / W. Tillmann, C. Schaak, D. Biermann, R. Abmuth, S. Goeke // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 181, iss. 1. – P. 012011. – DOI: 10.1088/1757-899X/181/1/012011.
17. Zhang H., Fang Z.Z., Lu Q. Characterization of a bilayer WC-Co hardmetal using Hertzian indentation technique // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2009. – Vol. 27, iss. 2. – P. 317–322. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.014.
18. A hybrid approach of ANN and HMM for cutting chatter monitoring / C.L. Zhang, X. Yue, Jiang Y.T., W. Zheng // Advanced Materials Research. – 2010. – Vol. 97. – P. 3225–3232. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3225.
19. Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С. Установка для диагностики температуры максимальной работоспособности сменных режущих пластин на основе изменения электромагнитных свойств

твердых сплавов // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 12. – С. 54–57.

20. Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С. Определение температуры максимальной работоспособности инструментальных твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 47–57. – DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-47-57.

21. Вережика А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с. – ISBN 5-217-01482-2.

22. Артамонов Е.В., Тверяков А.М., Штин А.С. Разработка элементов установки для определения температуры максимальной работоспособности режущих элементов из твердых сплавов // Транспорт и машиностроение Западной Сибири. – 2018. – № 1. – С. 31–38.

23. Srithar A., Palanikumar K., Durgaprasad B. Experimental investigation and surface roughness analysis on hard turning of AISI D2 steel using coated Carbide insert // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 97. – P. 72–77. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.226.

Конфликт интересов

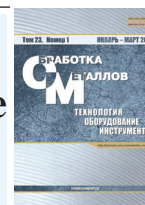
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Determination of temperature of maximum operability of replaceable cutting hard-alloy inserts based on study of electromagnetic properties change

Evgeny Artamonov^a, Andrey Tveryakov^b, Anton Shtin^{c,*}

Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-3099-4435>, evgart2014@mail.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-6444-2559>, tveryakov@mail.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0002-7000-6761>, shtin92@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 August 2020

Revised: 09 September 2020

Accepted: 12 January 2021

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Hard alloys

Metal processing

Maximum operability temperature

ABSTRACT

Introduction. Today, under the conditions of sanctions, the Russian Federation, more than ever before, needs the development of energy-saving technologies in various industries. There is no secret that when assigning cutting modes for new materials, tool companies conduct tests for the destruction of replaceable cutting inserts during cutting, the obtained numerical values are published in catalogs. The greatest impact on the life and operability of hard alloy cutting tools is exerted by the physical and mechanical properties of tool materials. Studies have shown that the physical and mechanical properties of tungsten hard alloys in the process of operation, namely in the process of cutting difficult-to-process materials under the influence of high temperatures, vary symmetrically. During the development of the laboratory plant, a literary review was carried out, which showed that at the moment non-destructive testing methods of technological facilities are widely used. Methods of non-destructive testing of technological objects allow conducting studies of the state of material, defects in the structure, internal changes, without samples destroying; this advantage was decisive during the literary review. **The object** of this study is replaceable cutting hard alloy inserts made of single carbide hard alloy B35 (92 %WC+8 %Co), tetrahedral in the state of supply. **The subject** of the study is the relationship between the changes of the magnetic component of the properties of a single-carbide hard alloy B35 (92 %WC+8 %Co) depending on the effect of high temperatures on it. This study is based on the laws of physics of the division of electrodynamics, as well as well-known non-destructive testing techniques, scientific foundations of material science. All studies are carried out in accredited laboratories of Tyumen Industrial University. The reliability of the obtained data is confirmed by the high correlation of the results of numerical values with the data obtained by the scientific predecessors. **Research methodology.** The paper shows the developed plant for determination of the maximum operability temperature of replaceable cutting hard-alloy inserts on the basis of study of change of electromagnetic properties. The method of research is given. Tests of the specimen are carried out during heating of replaceable cutting inserts made of tungsten hard alloy B35 (92 %WC+8 %Co). The heating temperature interval is selected in accordance with the temperature mode of the cutting process in the blade treatment of hard-to-process materials. Thus, heating is carried out in the range from 0 to 1000 °C. The heating itself is carried out by the flame method manually. **Results and discussions.** Based on the results of experimental studies, tables of the results are compiled, where, with an interval of 10 °C, the corresponding values of the magnetic field of eddy currents induced in replaceable cutting inserts made of tungsten hard alloy B35 (92 %WC+8 %Co) are indicated. The results of the investigation are obtained to determine the maximum operability temperature of replaceable cutting hard alloy inserts based on the study of the change in electromagnetic properties for the hard alloy B35 (92%WC+8%Co) amounted to 460...730 °C, which corresponds to a cutting speed of 18 m/min during the treatment of the alloy EI867-VD (57 %Ni9 %Mo10 %Cr6 %W4.2 %Al4 %Co). On the basis of persistent tests in factory conditions, it is proved that the developed technique allows determining temperature intervals of maximum operability based on the study of changes in electromagnetic properties (magnetic field of eddy currents arising in replaceable cutting inserts) of hard alloys. These intervals make it possible to assign the most appropriate operating conditions for the cutting tool based on a scientifically sound technique that allows using the maximum tool resource.

For citation: Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Determination of temperature of maximum operability of replaceable cutting hard-alloy inserts based on study of electromagnetic properties change. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 33–44. DOI:10.17212/1994-6309-2021-23.1-33-44. (In Russian).

* Corresponding author

Shtin Anton S., Ph.D. (Engineering), Assistant

Industrial University of Tyumen,

38 Volodarskogo,

625000, Tyumen, Russian Federation

Tel.: +7-953-826-98-02, e-mail: shtin92@mail.ru

References

1. Artamonov E.V. *Prochnost' i rabotosposobnost' smennykh tverdosplavnykh plastin sbornyykh rezhushchikh instrumentov* [Durability and working capacity of retrofittable hard alloy blades of assembly cutting tools]. Tyumen, Vektor Buk Publ., 2003. 190 p. ISBN 5-88465-416-2.
2. Zorev N.N., Uteshev M.H. Untersuchung der Kintakt-spannungen auf den Arbeits-flachen des Werkzeugs miteiner Schneidenabrundung. *Berichte der Internationalen Forschungsgemeinschaft fur mechanische produktionstechnikstechnik*, 1971, vol. 20-1, pp. 31–32.
3. *Metallorezhushchii instrument, 2019–2020* [Metal cutting tool, 2019–2020]. Kirovgrad hard alloys plant. Kirovgrad, 2020. 284 p. Available at: http://www.kzts.ru/core/user_files/psm-2014.pdf (accessed 23.01.2021).
4. Vasin S.A., Vereshchaka A.S., Kushner V.S. *Rezanie materialov: termomekhanicheskii podkhod k sisteme vzaimosvyazei pri rezanii* [Cutting materials: thermomechanical approach to the system of relationships in cutting]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2001. 448 p. ISBN 5-7038-1823-0.
5. Grechishnikov V.A., Chemborisov N.A., Stupko V.B., Safarov D.T., Kuchina O.B., Grigor'ev S.N., Skhirtladze A.G. *Protsessy formoobrazovaniya i instrumental'naya tekhnika* [Shaping processes and tools]. Staryi Oskol, TNT Publ., 2012. 328 p. ISBN 978-5-94178-326-7.
6. Lapshin V.V., Zakharevich E.M., Grubiy S.V. Machining of linear negative matrices for fresnel lenses and prisms. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, iss. 10, pp. 826–830. DOI: 10.3103/S1068798X16100105.
7. Carceanu I., Cosmeleatǎ G., Ghiban B., Balanescu M., Nedelcu I. High performance composite materials created through advanced techniques. *Materiale Plastice*, 2007, vol. 44, iss. 4, pp. 321–325.
8. Ferri C., Minton T., Ghani S.B., Cheng K. Internally cooled tools and cutting temperature in contamination-free machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, vol. 228, iss. 1, pp. 135–145. DOI: 10.1177/0954406213480312.
9. Kümmel J., Braun D., Gibmeier J., Schneider J., Greiner C., Schulze V., Wanner A. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilization. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, vol. 215, pp. 62–70. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.07.032.
10. Gupta M.K., Sood P.K., Singh G., Sharma V.S. Sustainable machining of aerospace material – Ti (grade-2) alloy: modelling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 147, pp. 614–627. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.01.133.
11. Murthy K.S. Rajendran I. Optimization of end milling parameters under minimum quantity lubrication using principal component analysis and grey relational analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2012, vol. 34, iss. 3, pp. 253–261. DOI: 10.1590/S1678-58782012000300005.
12. Neugebauer R., Hochmuth C. Schmidt G., Dix M. Energy efficient process planning based on numerical simulations. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 223, pp. 212–221. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.223.212.
13. Nurulamin A., Jaafar I., Patwari A.U., Zubaire W. Role of discrete nature of chip formation and natural vibrations of system components in chatter formation during metal cutting. *IJUM Engineering Journal*, 2010, vol. 11 (1), pp. 124–126.
14. Tangjitsitharoen S., Moriwaki T. Intelligent monitoring and identification of cutting states of chips and chatter on CNC turning machine. *Journal of Manufacturing Processes*, 2008, vol. 10, pp. 40–46. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.04.043.
15. Patwari A., Amin N., Faris W. Investigations of formation of chatter in a non-wavy surface during thread cutting and turning operations. *Advanced Materials Research*, 2010, vol. 83, pp. 637–645. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.637.
16. Tillmann W., Schaak C., Biermann D., Abmuth R., Goeke S. Robot based deposition of WC-Co HVOF coatings on HSS cutting tools as a substitution for solid cemented carbide cutting tools. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, vol. 181, iss. 1, p. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/181/1/012011.
17. Zhang H., Fang Z.Z., Lu Q. Characterization of a bilayer WC-Co hardmetal using Hertzian indentation technique. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2009, vol. 27, iss. 2, pp. 317–322. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2008.07.014.
18. Zhang C.L., Yue X., Jiang Y.T., Zheng W. A hybrid approach of ANN and HMM for cutting chatter monitoring. *Advanced Materials Research*, 2010, vol. 97, pp. 3225–3232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3225.
19. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. *Ustanovka dlya diagnostiki temperatury maksimal'noi rabotosposobnosti smennykh rezhushchikh plastin na osnove izmeneniya elektromagnitnykh svoystv tverdykh splavov* [Installation for diagnostics of temperature of the maximum operability of the replaceable cutting plates on

the basis of change of electromagnetic properties of hard alloys]. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2018, no. 12, pp. 54–57.

20. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Opredelenie temperatury maksimal'noi rabotosposobnosti instrumental'nykh tverdykh splavov [Determination of temperature of maximum working capacity of tool hard alloys]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 47–57. DOI: 10.17212/1994-6309-2018-20.3-47-57.

21. Vereshchaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostoikimi pokrytiyami* [Operability of cutting tool with wear-resistant coatings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 336 p. ISBN 5-217-01482-2.

22. Artamonov E.V., Tveryakov A.M., Shtin A.S. Razrabotka elementov ustanovki dlya opredeleniya temperatury maksimal'noi rabotosposobnosti rezhushchikh elementov iz tverdykh splavov [Development of installation elements for determination of temperature of maximum operability of cutting elements from hard alloys]. *Transport i mashinostroenie Zapadnoi Sibiri = Transport and Mechanical Engineering of West Siberia*, 2018, no. 1, pp. 31–38.

23. Srithar A., Palanikumar K., Durgaprasad B. Experimental investigation and surface roughness analysis on hard turning of AISI D2 steel using coated Carbide insert. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 97, pp. 72–77. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.226.

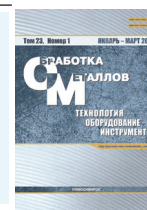
Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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

Оценка уровня упрочнения стружки из алюминиевого сплава, предназначенной для последующей обработки давлением

Юрий Логинов^{1, 2, а, *}, Николай Загиров^{3, б}, Евгений Иванов^{3, с}¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия³ Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, г. Красноярск, 660041, Россия^а  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0003-0144-5063>,  nzagiroff@mail.ru^с  <https://orcid.org/0000-0002-7585-6140>,  kafomd_1@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.014.8

История статьи:

Поступила: 30 декабря 2020

Рецензирование: 13 января 2021

Принята к печати: 06 февраля 2021

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Техногенные образования

Переработка стружки

Алюминиевый сплав

Метод конечных элементов

Пластическая деформация

Финансирование:

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006

АННОТАЦИЯ

Введение. Отмечено, что стружка является нежелательным видом металлического лома, поскольку обладает развитой поверхностью, что создает условия для более интенсивного взаимодействия с окружающей атмосферой. Тем самым создаются условия для окисления и газонасыщения, особенно при повышенных температурах, характерных для процессов переплава. Поэтому рассматривается процесс утилизации стружки, минуя стадию переплава. **Целью работы** является установление уровня наклепа стружки при обработке алюминиевых сплавов и прогноз ее влияния на последующий процесс переработки. **Методы исследования:** для оценки деформированного состояния применили метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе РАПИД-2D. Последовательность действий включала создание начальной формы очага деформации и конфигурации инструмента. Взаимное перемещение инструмента и деформируемого материала задано с помощью соответствующих граничных условий. Деформируемая среда – вязкопластический материал со степенным упрочнением, физико-механические свойства соответствуют алюминий-магний-марганцевому сплаву. **Результаты и обсуждение:** полученное решение показывает, что степень деформации сдвига в стружке может достигать величины больше 2. При этом наиболее высокий уровень деформации локализован со стороны выпуклой части стружки. Выполнено сравнение решения с полученными ранее другими авторами и показана их сходимость. В рассмотренном варианте решения различие в степени нагартки стружки по ее толщине составляет 36 %. Рассмотрен вариант последовательности обработки заготовки вначале холодной деформацией, а затем резанием. **Областью применения результатов работы** является разработка методов переработки техногенных образований. **Выводы.** В процессе резания пластическая деформация стружки достигает значительных величин. В работе установлено различие величин степени деформации сдвига по толщине стружки в зависимости от близости срезаемого слоя к поверхности режущего инструмента. Предложено это различие учитывать на последующих стадиях обработки стружки. Наличие отмеченной неоднородности механических свойств приводит к последствиям в виде неоднородного распределения температуры начала рекристаллизации при последующих операциях термической обработки или горячей деформационной обработки. Введен принцип аддитивности степени деформации, полученной металлом на стадии пластического формоизменения заготовки, и формоизменения собственно стружки.

Для цитирования: Логинов Ю.Н., Загиров Н.Н., Иванов Е.В. Оценка уровня упрочнения стружки из алюминиевого сплава, предназначенной для последующей обработки давлением // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 45–55. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-45-55. (In Russian).

Введение

В процессах обработки давлением создается меньшее количество отходов по сравнению с обработкой резанием, а сами отходы менее дис-

персны, чем стружка, что позволяет осуществить их переплав с меньшими потерями. Однако не все процессы придания изделиям нужной формы могут быть переведены в область обработки давлением, и процессы резания, приводящие к образованию стружки, занимают значительный сегмент в машиностроении [1]. Стружка является второсортным видом металлического лома, поскольку обладает развитой поверхностью, что

*Адрес для переписки

Логинов Юрий Николаевич, д.т.н., профессор

Уральский федеральный университет

ул. Мира, 19,

620002, г. Екатеринбург, Россия

Тел.: 8 (343) 375-44-37, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

создает условия для более интенсивного ее взаимодействия с окружающей атмосферой. Если стружку переводить в состояние расплава, то на ее поверхности в результате нагрева возникают оксидные пленки либо происходит процесс газонасыщения металла. Эти обстоятельства заставили разработчиков пойти по пути утилизации стружки, минуя стадию переплава [2,3]. Для этого применяются методы обработки давлением, такие как компактирование в закрытом контейнере, прокатка-прессование, горячее прессование с последующей холодной обработкой продукта и др. [4]. Дополнительная трудность возникает при переплаве алюминиевой стружки. Если тяжелые цветные металлы или даже черные металлы можно восстановить в ходе плавки, применяя различные материалы-восстановители, то оксиды алюминия можно перевести в состояние металла только процессами электролиза. Отсюда стремление ограничиться только твердофазными процессами утилизации [5–7]. В жидкофазном процессе переплава алюминия на поверхности металла образуются пленки оксидов, плотность которых почти такая же, как плотность жидкой фазы, что делает трудным разделение этих фаз за счет сил тяжести. Твердую фазу не удастся отделить за счет всплывания на поверхность расплава или оседания на поверхности пода плавильных печей.

Стружка обладает определенной степенью нагартовки, что признается всеми исследовате-

лями. Эта степень нагартовки мало влияет на температуру плавления, но очень влияет на температуру рекристаллизации. Для некоторых металлов возможно понижение этой температуры до комнатной, что позволяет перевести металл в мягкое состояние. И, наоборот, фактор наличия упрочнения металла должен быть учтен в процессах компактирования стружки, он создает необходимость затрат дополнительной энергии.

В последнее время получили развитие исследования, направленные на определение свойств стружки в зависимости от условий резания [8], в том числе при обработке резанием различных алюминиевых сплавов [9], а также свойств получаемых из нее полуфабрикатов [10].

Цель работы состоит в установлении уровня степени деформации стружки при обработке алюминиевых сплавов резанием и прогноз ее влияния на последующий процесс переработки. Задачами исследования являются формулировка граничных условий процесса резания, получение решения и адаптация сделанных выводов к процессу утилизации стружки.

Методика экспериментального исследования

Брикетиrowание стружки 2 из алюминиевого сплава осуществляли в пресс-форме (рис. 1, а), которая состоит из верхнего 1 и нижнего 4

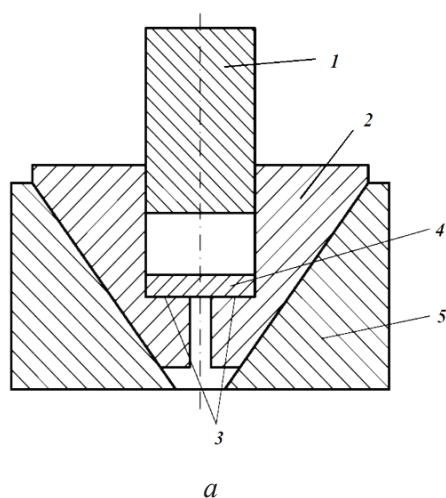


Рис. 1. Схема холодного прессования заготовки из стружки (а) и фото последующей горячей обработки на установке совмещенного процесса прокатки-прессования (б)

Fig. 1. Scheme of cold pressing of a billet made of chips (а) and a photo of subsequent hot processing on a combined rolling-pressing process unit (б)

пуансонов, разъемной матрицы 3 и обоймы 5 с наклонными контактирующими поверхностями.

В ходе экспериментов было установлено, что для обеспечения относительной интегральной плотности брикетов в 70...80 % давление брикетирования должно быть не ниже 80...100 МПа. Применение давлений такого уровня является обычным для компактирующих установок, его стараются не превышать из-за опасности повышенного износа рабочих поверхностей инструмента. Применительно к алюминиевым сплавам износ инструмента провоцируется тонкой защитной пленкой оксида алюминия, окружающей каждый фрагмент стружки. Твердость оксида алюминия весьма велика, кромки выступающих ее частей непрерывно царапают инструмент, вызывая износ. К этому обстоятельству добавляется опасность заалюминивания этих поверхностей.

Известно, что для алюминиевой стружки важным фактором при ее утилизации является развитие сдвиговых деформаций, позволяющих раздробить пленку оксида, окружающего каждый фрагмент металла, что позволяет консолидировать металл [11, 12]. Поэтому для дальнейшей обработки полученных брикетов применили установку совмещенной прокатки-прессования (СПП) (рис. 1, б). Валки установки подогревали до температуры 80...100 °С. Брикетывали в валки и деформировали с получением прутка конечным размером 7 и 9 мм, что соответствовало значениям коэффициентов вытяжки при прессовании 8 и 5. Исследования микроструктуры по-

лученных прутков привели к выводу о том, что в ряде случаев элементы стружки не образуют сплошного соединения, несмотря на комплекс созданных для этого условий: повышенной температуры, больших сдвиговых деформаций.

Причиной этому явлению могло быть то, что стружка после съема резцом обладает повышенными прочностными свойствами, что мешает процессу ее консолидации при холодном брикетировании. Низкий уровень уплотнения на этой стадии приводит к высокому уровню остаточной пористости после горячей деформации. Для оценки уровня упрочнения стружки предложено применить математическое моделирование процесса резания, что осуществлено в следующей части работы.

Методика вычислительного эксперимента

Для оценки деформированного состояния применили метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе РАПИД 2D (© Полищук Е.Г., Жиров Д.С.), описание и применение программного продукта приведено в книге [13]. Последовательность действий включала создание начальной формы очага деформации и конфигурации инструмента (рис. 2). Схема деформированного состояния – плоская. Тем самым выделяется только приповерхностный слой материала, который воспринимает напряжения резания. Физико-механические свойства деформируемого материала соответствуют сплаву АМг1

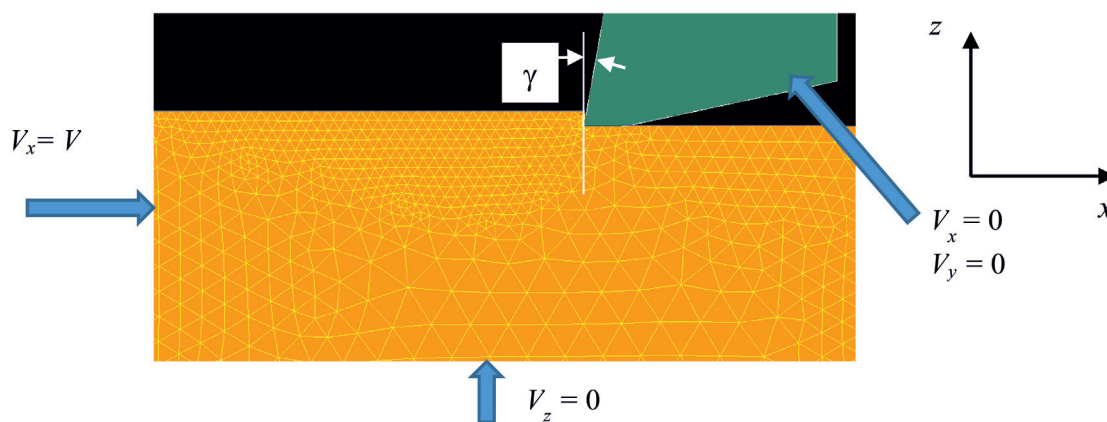


Рис. 2. Граничные условия при постановке задачи и система координат, γ – передний угол резца

Fig. 2. Boundary conditions in the formulation of the problem and the coordinate system, γ – tool rake angle

и взяты из библиотеки программного модуля. Наличие вязких свойств алюминиевых сплавов в холодном состоянии доказывалось в работах [14–16]. Резец представлен как абсолютно жесткое тело, поэтому характеристики материала, из которого он изготовлен, не учитывались.

Взаимное перемещение инструмента и деформируемого материала задано с помощью соответствующих граничных условий. Деформируемая среда – вязкопластическая со степенным упрочнением. Задана скорость взаимного смещения заготовки и резца на уровне 2 м/с. Обычно в процессах с высокими нормальными напряжениями на поверхности контакта задают закон трения по Зибелю, что реализовано в данной постановке. Показатель трения принят равным 0,1.

Программный комплекс РАПИД 2D позволяет оперировать размерными величинами на уровне миллиметра и выше, что для съема стружки не всегда характерно. Поэтому применили такой прием: размерные величины увеличили на порядок, имея в виду последующий переход после реализации расчетов к безразмерным величинам. Безразмерное представление информации делает ее более универсальной для применения.

Рассмотрен слой металла толщиной 25 мм. Толщина съема металла назначена на уровне 1 мм. Размеры выбраны условно, важно соотношение

между ними. Сетка конечных элементов в местах предполагаемых повышенных градиентов деформаций выполнена с меньшим шагом.

Деформационное упрочнение металла оценивают инвариантными величинами: либо степенью деформации ϵ (эквивалентная деформация), либо степенью деформации сдвига Λ при наличии связи между ними, $\Lambda = 1,732 \epsilon$.

Области равного уровня (рис. 3) показывают, что степень деформации сдвига в стружке может достигать значений выше 2 и это значение выше на выпуклой части витка. Это можно объяснить тем, что выпуклая часть стружки претерпевает большее удлинение относительно вогнутой поверхности.

Пластическая деформация при съеме стружки заканчивается в месте отделения ее от инструмента. Схема, представленная на рис. 3, позволяет оценить переход от неупрочненного состояния (от $\Lambda = 0$) к упрочненному, но градиент степени деформации в самой стружке не удастся отобразить адекватно. Поэтому на рис. 4 сдвинут диапазон отображения степени деформации сдвига до величин 2...2,8.

Максимальное значение степени деформации сдвига равно $\Lambda = 2,69$. Это значение можно соотнести с величиной относительного обжатия по сечению ϵ , например при волочении прутка, используя формулу

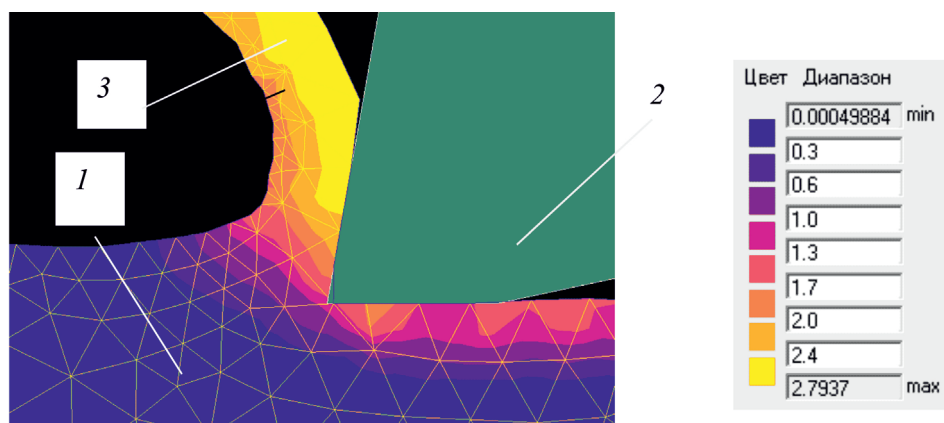


Рис. 3. Решение задачи отделения стружки при угле $\gamma = 10^\circ$ и условной глубине съема 1 мм:

1 – заготовка из сплава АМг1; 2 – резец; 3 – стружка; справа цветовой ключ для степени деформации сдвига Λ

Fig. 3. Solution of the problem of separation of chips at an angle of $\gamma = 10^\circ$ and a nominal removal depth of 1 mm:

1 – workpiece from AlMg1 alloy; 2 – cutter; 3 – chips; on the right is a color key for the of shear strain Λ

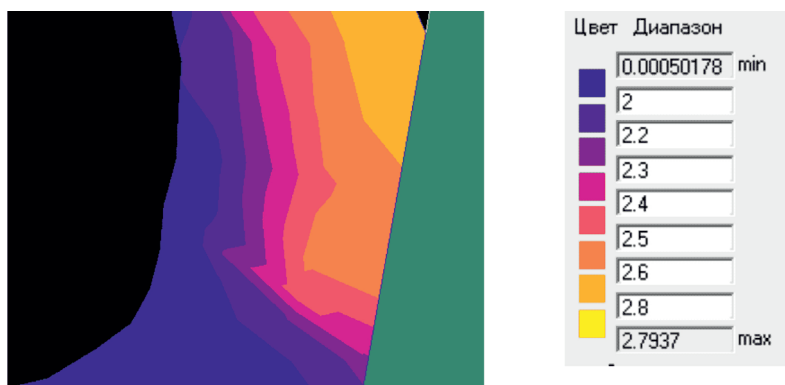


Рис. 4. Поле степени деформации сдвига Λ в месте отделения стружки от резца, справа цветовой ключ

Fig. 4. Field of the of shear strain Λ in the place of separation of the chips from the cutter, on the right with a color key

$$\begin{aligned}\Lambda &= 1,732 \cdot \ln(F_0 / F_1) = \\ &= 1,732 \cdot \ln[F_0 / (F_0 - \Delta F)] = \\ &= 1,732 \cdot \ln[1 / (1 - \varepsilon / 100)],\end{aligned}\quad (1)$$

где F_0 , F_1 , ΔF – начальная и конечная площадь поперечного сечения, а также ее изменение соответственно.

Отсюда

$$\varepsilon = 100 [1 - \exp(-\Lambda / 1,732)]. \quad (2)$$

При $\Lambda = 2,69$ получим значение $\varepsilon = 79\%$.

Для оценки численных значений распределения деформаций введена относительная координата x/δ , где x – текущая горизонтальная координата; δ – толщина стружки. График зависимости $\Lambda = f(x/\delta)$ представлен на рис. 5.

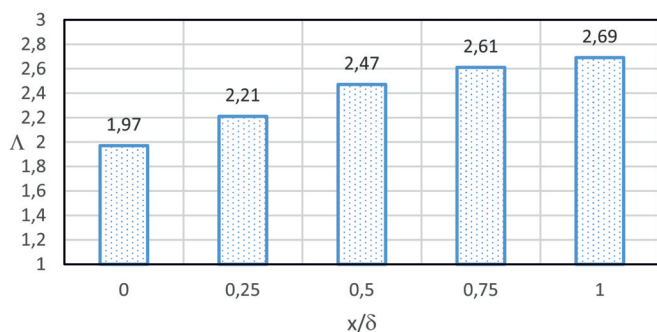


Рис. 5. Зависимость степени деформации сдвига от относительной координаты x/δ

Fig. 5. Dependence of the of shear strain on the relative coordinate x/δ

Здесь видно, что в данном случае различие в степени наклепа стружки по ее толщине составляет $100(2,69 - 1,97)/1,97 = 36\%$. Дальнейшие расчеты показали, что при увеличении толщины стружки эта разница будет увеличиваться, т. е. стружка становится все более неоднородным материалом.

Результаты и их обсуждение

Следует отметить, что качественно похожее решение задачи было получено в совместном исследовании США, республики Корея и Великобритании [17]. Задача решалась методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus/Explicit при реализации плоского деформированного состояния. Задача отделения стружки от заготовки не всегда решалась исследователями успешно, так как надо было допустить начало разрушения металла, чему мешает гипотеза неразрывности, принятая при построении системы уравнений теории пластичности. Однако это преодолено в статье [18], где показано значительное упрочнение металла стружки.

Большая степень деформации, локализованной в стружке, приводит к физическим явлениям, к которым относится измельчение структуры. В работе [19] показано, что происходит уменьшение размера зерна от величины около 60 мкм до 1...3 мкм, т. е. в 20...60 раз. Большой эффект достигается в слоях металла на выпуклой поверхности стружки, а меньший – на вогнутой поверхности, что соответствует полученному распределению деформации.

Отдельным фактором, который приходится учитывать при оценке деформированного состояния стружки, является учет степени деформации, достигнутой на предыдущих стадиях обработки. Дело в том, что детали часто подвергаются резанию после предварительной холодной деформации. Уровень этой деформации задан техническими условиями с целью использования в детали металла повышенной прочности.

Кроме того, для нагартованного металла характерен более высокий уровень хрупкости, что позволяет вместо сливной стружки получать сыпучую. Ее легче удалять из зоны резания как уже фрагментированный материал.

В механике пластической деформации действует гипотеза, вследствие которой пластические деформации, достигаемые в различных процессах, обладают свойством аддитивности, т. е. их можно складывать. Тогда результирующая степень деформации сдвига Λ_{Σ} , полученная стружкой, является суммой степеней деформации сдвига, накопленной заготовкой на предварительных стадиях ее обработки $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots, \Lambda_{i-1}$, и степени деформации сдвига, полученной при резании Λ_c :

$$\Lambda_{\Sigma} = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \dots + \Lambda_{i-1} + \Lambda_c. \quad (3)$$

Чистый алюминий редко выступает в качестве конструкционного материала. Обычно его рассматривают как функциональный материал и используют в качестве проводника электрического тока или элемента теплопередачи. Соответственно при изготовлении изделий типа проволоки или токопроводящих шин здесь редко возникает стружка, поскольку изделия получают методом волочения.

Термически неупрочняемые сплавы алюминия упрочняют холодной пластической деформацией. Термически упрочняемые сплавы проходят этапы закалки и последующего естественного или искусственного старения. При этом сохраняется возможность дополнительного упрочнения холодной или теплой пластической деформацией. Металл, прошедший эти стадии упрочнения, может обрабатываться резанием с образованием стружки. Степень деформации до разрушения зависит при этом от вида сплава и может превышать 90 % [20].

Дополнительная степень деформации сдвига Λ_{i-1} , которая была осуществлена применительно к металлу заготовки для операции резания, вызывает уменьшение температуры начала рекристаллизации. Это обстоятельство придется учесть при наличии операций термообработки или горячей деформационной обработки [21]. В том числе это понижение может оказаться неоднородным в объеме заготовки из-за неоднородностей самой стружки. В результате не исключено образование разнотекстурной структуры, что, в свою очередь, вызовет неоднородность распределения физико-механических свойств готового изделия.

Другой фактор, который приходится учитывать при оценке состояния стружки, касается

тепловых процессов, возникающих при обработке резанием. Сам процесс может осуществляться в различных условиях. Работа резания превращается в тепло, в результате стружка нагревается. С этим процессом конкурирует процесс ее охлаждения со стороны смазочно-охлаждающей жидкости, подаваемой в очаг резания. Вместе с тем при высоких скоростях резания тепло может не успевать отводиться, поэтому температура нагрева может превысить температуру рекристаллизации, что приведет к отжигу металла. Однако большое количество алюминиевых сплавов имеет очень высокую температуру рекристаллизации, что позволяет, в частности, получать нагартованный металл в таких операциях, как прессование. Таким образом, несмотря на то что прессование относят, как правило, к процессам горячей обработки, для алюминиевых сплавов оно часто является процессом холодной или в крайнем случае теплой обработки. В результате получается полуфабрикат, например прутки, который поступает на операцию резания с остаточным уровнем накопленной деформации. Здесь складывается такая же ситуация, как в случае обработки холоднодеформированного полуфабриката: для оценки наклепа образующейся стружки степени деформации сдвига должны быть просуммированы.

Парадокс заключается в том, что повышенная степень деформации в этом случае приводит к снижению температуры рекристаллизации материала стружки, т. е. процесс горячей деформации для нее может быть осуществлен при меньших температурах. Следует также отметить, что температура рекристаллизации для алюминиевой стружки зависит также от скорости деформации: при ее повышении температура рекристаллизации понижается. Поэтому, если есть стремление достичь менее прочного состояния алюминиевой стружки, то рекомендуемый во многих случаях процесс ее горячего брикетирования лучше проводить при больших скоростях нагружения, что противоречит концепции скоростного упрочнения, свойственной другим металлам. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение структурных последствий применения стружки как сырьевого материала для изготовления полуфабрикатов.

Заключение

В процессе резания пластическая деформация стружки достигает значительных величин. В работе установлено различие величин степени деформации сдвига по толщине стружки в зависимости от близости срезаемого слоя к поверхности режущего инструмента. Предложено это различие учитывать на последующих стадиях обработки стружки. Наличие отмеченной неоднородности механических свойств приводит к последствиям в виде неоднородного распределения температуры начала рекристаллизации при последующих операциях термической обработки или горячей деформационной обработки. Введен принцип аддитивности степени деформации, полученной металлом на стадии пластического формоизменения заготовки, и формоизменения собственно стружки.

Список литературы

1. Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. The perfection of technology for recycling steel chips // *Черные металлы*. – 2018. – № 12. – С. 66–71.
2. Solid state recycling of aluminium AA6061 alloy chips by hot extrusion / M.I. Abd El Aal, M.A. Taha, A.I. Selmy, A.M. El-Gohry, H.S. Kim // *Materials Research Express*. – 2019. – Vol. 6, iss. 3. – P. 036525. – DOI: 10.1088/2053-1591/aaf6e7.
3. Effects of chip conditions on the solid state recycling of Ti-6Al-4V machining chips / E.W. Lui, S. Palanisamy, M.S. Dargusch, K. Xia // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. – Vol. 238. – P. 297–304. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.028.
4. Chiba R., Nakamura T., Kuroda M. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2011. – Vol. 211 (11). – P. 1878–1887. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.06.010.
5. Сравнительный анализ технологий изготовления сварочной проволоки из эвтектического силумина с применением совмещенных методов обработки / Н.Н. Загиров, С.Б. Сидельников, Ю.Н. Логинов, Р.Е. Соколов // *Цветные металлы*. – 2017. – № 4. – С. 86–92. – DOI: 10.17580/tsm.2017.04.13.
6. Mounghomo J.B.M., Kouya D.N., Songmene V. Aluminium machining chips formation, treatment and recycling: a review // *Key Engineering Materials*. – 2016. – Vol. 710. – P. 71–76. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.710.71.
7. Review of solid state recycling of aluminum chips / B. Wan, W. Chen, T. Lu, F. Liu, Z. Jiang, Z. Jiang,

M. Mao // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2017. – Vol. 125. – P. 37–47. – DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004.

8. Buchkremer S., Klocke F., Lung D. Analytical study on the relationship between chip geometry and equivalent strain distribution on the free surface of chips in metal cutting // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2014. – Vol. 85. – P. 88–103. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.05.005.

9. Control and mechanism analysis of serrated chip formation in high speed machining of aluminum alloy 7050-t7451 / Q. Shi, Z. Hao, S. Wang, X. Fu, H. Wang // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 990. – P. 13–17. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.990.13.

10. Koch A., Wittke P., Walther F. Computed tomography-based characterization of the fatigue behavior and damage development of extruded profiles made from recycled AW6060 aluminum chips // *Materials*. – 2019. – Vol. 12 (15), P. 2372. – DOI: 10.3390/ma12152372.

11. Electrical resistance-based fatigue assessment and capability prediction of extrudates from recycled field-assisted sintered EN AW-6082 aluminium chips / A. Koch, M. Bonhage, M. Teschke, L. Luecker, B.-A. Behrens, F. Walther // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 169. – P. 110644. – DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110644.

12. Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion / V. Güley, A. Güzel, A. Jäger, N. Ben Khalifa, A.E. Tekkaya, W.Z. Misiolek // *Materials Science and Engineering A*. – 2013. – Vol. 574. – P. 163–175. – DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.010.

13. Логинов Ю.Н. Решения технологических задач прессования с применением системы анализа процессов пластического деформирования «РАПИД 2D». – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – 78 с. – ISBN 978-5-321-01026-6.

14. Dynamic mechanical behavior of 6061 Al alloy at elevated temperature and different strain rates / X. Fan, T. Suo, Q. Sun, T. Wang // *Acta Mechanica Sinica*. – 2013. – Vol. 26, iss. 2. – P. 111–120. – DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.

15. The effect of varying strain rates and stress states on the plasticity, damage, and fracture of aluminum alloys / M.T. Tucker, M.F. Horstemeyer, W.R. Whittington, K.N. Solanki, P.M. Gullett // *Mechanics of Materials*. – 2010. – Vol. 42. – P. 895–907. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.07.003.

16. Stress-strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates / Y. Chen, A.H. Clausen, O.S. Hopperstad, M. Langseth // *International Journal of Solids and Structures*. – 2009. – Vol. 46. – P. 3825–3835. – DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.07.013.

17. Zones of material separation in simulations of cutting / H. Pan, J. Liu, Y. Choi, C. Xu, Y. Bai, T. Atkins // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2016. – Vol. 115–116. – P. 262–279. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.06.019.

18. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations / T. Mabrouki, C. Courbon, Y. Zhang, J. Rech, D. Nélías, M. Asad // *Comptes Rendus Mécanique*. – 2016. – Vol. 344 (4). – P. 335–354. – DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.003.

19. Orthogonal cutting simulation of OFHC copper using a new constitutive model considering the state

of stress and the microstructure effects / L.A. Denguir, J.C. Outeiro, G. Fromentin, V. Vignal, R. Besnard // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 46. – P. 238–241. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.208.

20. Колпашиников А.И. Прокатка листов из легких сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 264 с. – ISBN 978-5-321-01026-6.

21. Alternative technology for manufacturing rod–wire products from AK12 silumin / N.N. Zagirov, Y.N. Loginov, S.B. Sidel'nikov, E.V. Ivanov // *Metallurgist*. – 2018. – Vol. 62 (5–6). – P. 587–596. – DOI: 10.1007/s11015-018-0696-9.

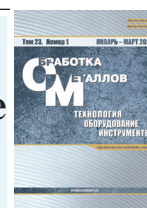
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Evaluation of the level of hardening of aluminum alloy chips intended for subsequent pressure treatment

Yuri Loginov^{1, 2, a, *}, Nickolay Zagirov^{3, b}, Evgeniy Ivanov^{3, c}¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskaya str., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation³ Siberian Federal University, 79 Svobodny Avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation^a  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0144-5063>,  nzagiroff@mail.ru^c  <https://orcid.org/0000-0002-7585-6140>,  kafomd_1@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 30 December 2020

Revised: 13 January 2021

Accepted: 06 February 2021

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Technogenic formations

Chip processing

Aluminum alloy

Finite element method

Plastic deformation

Funding

The work is performed with financial support of the Government of the Russian Federation, Act No. 211, Contract No. 02.A03.21.0006.

ABSTRACT

Introduction. It is noted that the chip is an undesirable type of metal scrap, because it has a developed surface, which creates conditions for more intense interaction with the surrounding atmosphere. This creates conditions for oxidation and gas saturation, especially at elevated temperatures typical of remelting processes. Therefore, the process of chip utilizing is considered, bypassing the remelting stage. The aim of the work is to establish the level of work hardening of chips during the processing of aluminum alloys and to predict its effect on the subsequent processing process. **Research methods:** to assess the deformed state, the finite element method was applied, implemented in the RAPID-2D software package. The sequence of actions included the creation of the initial shape of the deformation region and the configuration of the tool. The mutual displacement of the tool and the deformable material is specified using the corresponding boundary conditions. The deformable medium is a viscous-plastic material with power-law hardening, the physical and mechanical properties correspond to an aluminum-magnesium alloy. **Results and discussion:** the solution obtained shows that the degree of shear deformation in the chips can reach a value of more than 2. In this case, a higher level of deformation is localized on the side of the convex part of the chip. The comparison of the solution with those obtained earlier by other authors is carried out and its similarity is shown. In the considered solution, the difference in the degree of work-hardening of the chips along its thickness is 36 %. A variant of the sequence of processing the workpiece first by cold deformation, and then by cutting is considered. The field of application of the results of the work is the development of methods for the processing of technogenic formations. **Conclusions.** During the cutting process, the plastic deformation of the chips reaches significant values. In this paper, the difference in the degree of shear deformation in the chip thickness is established, depending on the proximity of the cut layer to the surface of the cutting tool. It is proposed to take this difference into account at the subsequent stages of chip processing. The presence of the marked inhomogeneity of mechanical properties leads to consequences in the form of an inhomogeneous distribution of the temperature of the beginning of recrystallization during subsequent operations of heat treatment or hot deformation treatment. The principle of additivity of the degree of deformation obtained by the metal at the stage of plastic shaping of the workpiece and the shaping of the chip itself is introduced.

For citation: Loginov Yu.N., Zagirov N.N., Ivanov E.V. Evaluation of the level of hardening of aluminum alloy chips intended for subsequent pressure treatment. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 45–55. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-45-55. (In Russian).

References

1. Yaroslavl'tsev V.M., Yaroslavl'tseva N.A. The perfection of technology for recycling steel chips. *Chernye Metally*, 2018, vol. 12, pp. 66–71.

* Corresponding author

Loginov Yuri N., Ph.D. (Engineering), Full Professor
Ural Federal University,
19 Mira street,
620002, Ekaterinburg, Russian Federation
Tel.: 8 (343) 375-44-37, e-mail: j.n.loginov@urfu.ru

2. Abd El Aal M.I., Taha M.A., Selmy A.I., El-Gohry A.M., Kim H.S. Solid state recycling of aluminium AA6061 alloy chips by hot extrusion. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, iss. 3, p. 036525. DOI: 10.1088/2053-1591/aaf6e7.
3. Lui E.W., Palanisamy S., Dargusch M.S., Xia K. Effects of chip conditions on the solid state recycling of Ti-6Al-4V machining chips. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, vol. 238, pp. 297–304. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.028.
4. Chiba R., Nakamura T., Kuroda M. Solid-state recycling of aluminium alloy swarf through cold profile extrusion and cold rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, vol. 211 (11), pp. 1878–1887. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.06.010.
5. Zagirov N.N., Sidelnikov S.B., Loginov Yu.N., Sokolov R.E. Sravnitel'nyi analiz tekhnologii izgotovleniya svarочноi provoloki iz evtekticheskogo silumina s primeneniem sovmeshchennykh metodov obrabotki [Comparative analysis of technologies of welding wire production from eutectic silumin using combined processing methods]. *Tsvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2017, no. 4, pp. 86–92. DOI: 10.17580/tsm.2017.04.13.
6. Mounghomo J.B.M., Kouya D.N., Songmene V. Aluminium machining chips formation, treatment and recycling: a review. *Engineering Materials*, 2016, vol. 710, pp. 71–76. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.710.71.
7. Wan B., Chen W., Lu T., Liu F., Jiang Z., Jiang Z., Mao M. Review of solid state recycling of aluminum chips. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, vol. 125, pp. 37–47. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.06.004.
8. Buchkremer S., Klocke F., Lung D. Analytical study on the relationship between chip geometry and equivalent strain distribution on the free surface of chips in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 85, pp. 88–103. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.05.005.
9. Shi Q., Hao Z., Wang S., Fu X., Wang H. Control and mechanism analysis of serrated chip formation in high speed machining of aluminum alloy 7050-t7451. *Materials Science Forum*, 2020, vol. 990, pp. 13–17. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.990.13.
10. Koch A., Wittke P., Walther F. Computed tomography-based characterization of the fatigue behavior and damage development of extruded profiles made from recycled AW6060 aluminum chips. *Materials*, 2019, vol. 12 (15), p. 2372. DOI: 10.3390/ma12152372.
11. Koch A., Bonhage M., Teschke M., Luecker L., Behrens B.-A., Walther F. Electrical resistance-based fatigue assessment and capability prediction of extrudates from recycled field-assisted sintered EN AW-6082 aluminium chips. *Materials Characterization*, 2020, vol. 169, p. 110644. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110644.
12. Güley V., Güzel A., Jäger A., Ben Khalifa N., Tekkaya A.E., Misiolek W.Z. Effect of die design on the welding quality during solid state recycling of AA6060 chips by hot extrusion. *Materials Science and Engineering A*, 2013, vol. 574, pp. 163–175. DOI: 10.1016/j.msea.2013.03.010.
13. Loginov Yu.N. *Resheniya tekhnologicheskikh zadach pressovaniya s primeneniem sistemy analiza protsessov plasticheskogo deformirovaniya "RAPID 2D"* [Solutions of technological problems of pressing using the system of analysis of plastic deformation processes "RAPID 2D"]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2007. 78 p. ISBN 978-5-321-01026-6.
14. Fan X., Suo T., Sun Q., Wang T. Dynamic mechanical behavior of 6061 Al alloy at elevated temperature and different strain rates. *Acta Mechanica Sinica*, 2013, vol. 26, iss. 2, pp. 111–120. DOI: 10.1016/S0894-9166(13)60011-7.
15. Tucker M.T., Horstemeyer M.F., Whittington W.R., Solanki K.N., Gullett P.M. The effect of varying strain rates and stress states on the plasticity, damage, and fracture of aluminum alloys. *Mechanics of Materials*, 2010, vol. 42, pp. 895–907. DOI: 10.1016/j.mechmat.2010.07.003.
16. Chen Y., Clausen A.H., Hopperstad O.S., Langseth M. Stress-strain behaviour of aluminium alloys at a wide range of strain rates. *International Journal of Solids and Structures*, 2009, vol. 46, pp. 3825–3835. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2009.07.013.
17. Pan H., Liu J., Choi Y., Xu C., Bai Y., Atkins T. Zones of material separation in simulations of cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, vol. 115–116, pp. 262–279. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.06.019.
18. Mabrouki T., Courbon C., Zhang Y., Rech J., Nélis D., Asad M. Some insights on the modelling of chip formation and its morphology during metal cutting operations. *Comptes Rendus Mécanique*, 2016, vol. 344 (4), pp. 335–354. DOI: 10.1016/j.crme.2016.02.003.



19. Denguir L.A., Outeiro J.C., Fromentin G., Vignal V., Besnard R. Orthogonal cutting simulation of OFHC copper using a new constitutive model considering the state of stress and the microstructure effects. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 238–241. DOI: 10.1016/j.procir.2016.03.208.

20. Kolpashnikov A.I. *Prokatka listov iz legkikh splavov* [Rolling of light alloy sheets]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 264 p.

21. Zagirov N.N., Loginov Y.N., Sidel'nikov S.B., Ivanov E.V. Alternative technology for manufacturing rod–wire products from AK12 silumin. *Metallurgist*, 2018, vol. 62 (5–6), pp. 587–596. DOI: 10.1007/s11015-018-0696-9.

Conflicts of Interest

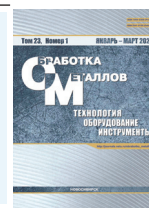
The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Определение оптимальных координат переключения циклов обработки на металлорежущих станках

Вилор Заковоротный ^а, Валерия Гвинджилия ^{б, *}

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, sinedden@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 08 ноября 2020
Рецензирование: 05 декабря 2020
Принята к печати: 06 января 2021
Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Минимизация приведенных затрат на изготовление
Качество изготовления деталей
Координаты переключения циклов обработки

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ: «Разработка теории анализа и синтеза управляемой самоорганизации в динамической системе резания в ходе обработки на примере изготовления деталей на токарных станках», № 19-08-00022; «Разработка методов анализа и синтеза динамической системы резания по критерию минимизации приведенных затрат на изготовление», № 20-38-90074.

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из направлений повышения эффективности обработки на станках является согласование программы ЧПУ с изменяющимися свойствами динамической системы резания. Если при этом учитывается износ инструмента и связанные с ним изменения параметров динамической системы резания, то скорость резания для обеспечения минимального значения интенсивности изнашивания уменьшается по пути резания. Соответствующая скорость подачи уменьшается еще быстрее, так как необходимо обеспечивать постоянство деформационных смещений инструмента относительно заготовки. Эволюция свойств процесса резания, для согласования с которыми выполняется коррекция траекторий исполнительных элементов станка, зависит от мощности необратимых преобразований подводимой к резанию энергии. При этом уменьшается эффективность обработки. Поэтому формулируется новая для рассматриваемой предметной области проблема определения координат перемещения инструмента относительно заготовки, начиная с которых дальнейшая обработка экономически нецелесообразна. В этом случае необходимо после обработки очередной детали обеспечить замену инструмента и выполнить его переналадку. **Предмет.** Металлорежущий станок токарной группы, траектории исполнительных элементов которого управляются, например, системой ЧПУ. **Цель работы.** Математическое моделирование и методика определения координат, при которых необходимо делать замену инструмента. **Метод и методология проведения работы.** Доказаны необходимые условия оптимальности определения этих координат. Приводится математический инструментальный, позволяющий по заданным траекториям вычислить координаты, при которых приведенные затраты на изготовление принимают минимальное значение. При этом учитываются вероятностные характеристики эволюционных траекторий. **Результаты и обсуждения.** Приводится анализ эффективности использования методики в промышленности в зависимости от стоимости затрат на станок и инструмент вместе с его заменой и переналадкой. Доказанные условия оптимальности и приведенный математический инструментальный дополняют знания об оптимизации управляемых процессов обработки на станках. **Выводы.** Результаты исследования показывают новые варианты организации замены инструментов, направленные на повышение эффективности обработки программными методами с помощью системы ЧПУ.

Для цитирования: Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Определение оптимальных координат переключения циклов обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 56–67. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-56-67.

Введение

После опубликования работ [1, 2] многие проблемы динамики систем различной природы, взаимодействующих с различными средами, ста-

ли рассматриваться с учетом их эволюционных изменений и самоорганизации [3–7]. Показано, что при управлении сложными взаимосвязанными системами эффективно использовать синергетическое согласование внешнего управления с внутренней динамикой управляемой системы [3]. Применительно к обработке на станках – это согласование траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС) с динамической системой резания (ДСР) [8–10], свойства которой

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Енвериевна, аспирант
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1
344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тел.: +7-918-583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

изменяются в зависимости от развития износа режущего инструмента и выделяемой мощности в зоне резания [8–14]. Принимаются во внимание два обстоятельства. Во-первых, свойства ДСР изменяются в зависимости от износа инструмента и подводимой к резанию энергии [8–10]; во-вторых, эволюционные изменения приводят не только к динамической перестройке свойств резания, но и изменяют технологические режимы, при которых интенсивность изнашивания инструмента минимальна. Изменяется и геометрическая топология поверхности детали. Эти изменения вытекают, прежде всего, из термодинамической природы изнашивания и зависимости скорости изнашивания от вводимой в зону резания энергии механической системы [18–24]. Такие особенности процесса резания привели к созданию различного класса систем управления процессом обработки на металлорежущих станках [25–34]. Например, если опираться при выборе оптимальной скорости резания на существование оптимальной температуры в зоне контакта граней инструмента с заготовкой, то оптимальной температуре должна соответствовать оптимальная мощность потребляемой в зоне резания энергии. Тогда обеспечению оптимальной мощности по мере развития износа должно соответствовать монотонное уменьшение скорости резания. При этом для стабилизации упругих деформаций должна уменьшаться величина подачи, т. е. скорость подачи должна уменьшаться еще быстрее по пути резания [8–10]. Уменьшение ТИЭС по пути резания

приводит к тому, что дальнейшая обработка на малых скоростях резания и подачах становится нецелесообразной. Поэтому формулируется новая задача определения координат, в которых необходимо делать замену инструмента – проблема, близкая синтезу систем оптимального быстрогодействия, которая решается, например, на основе использования принципа максимума Л. Понтрягина [35, 36]. Подобная задача решалась авторами применительно к сверлению глубоких отверстий малого диаметра [37]. Однако в случае обработки она имеет особенности, рассмотрению которых посвящена статья. Целью статьи является разработка математических алгоритмов и методик, позволяющих определить эти координаты.

Методика исследований

Математическая формулировка

Ограничимся рассмотрением продольного точения на станках токарной группы. Приведенные результаты легко обобщаются на другие виды обработки: фрезерование, сверление, в том числе сверление глубоких отверстий [37]. Пусть заданы: общий путь движения вершины инструмента L , который определяется суммой (рис. 1)

$$L = \sum_{i=1}^{i=n} l_i. \quad (1)$$

Путь L эквивалентен партии деталей. Поставим задачу определения координат $l^{(i)}$

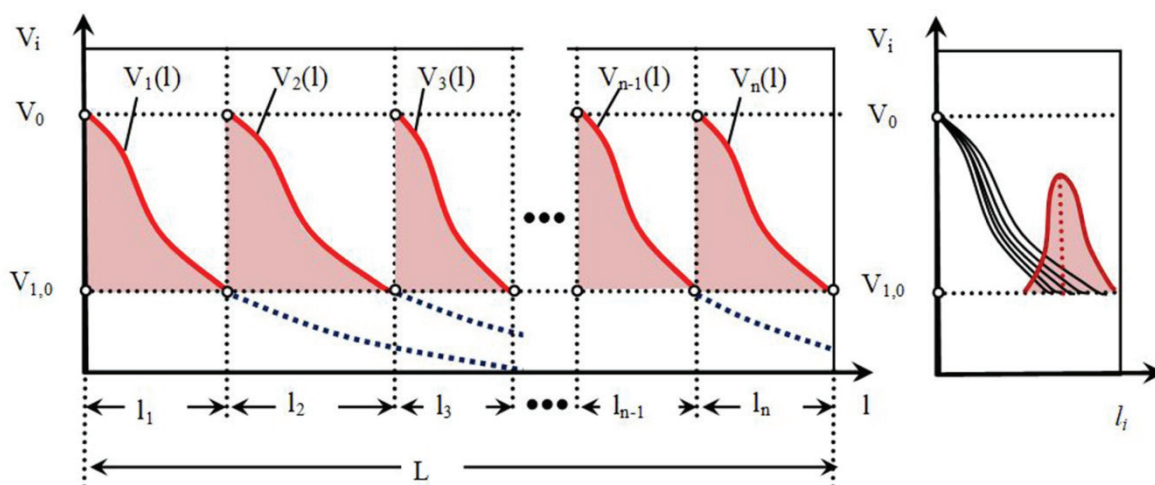


Рис. 1. Схема определения координат переключения циклов обработки

Fig. 1. Scheme for determining the coordinates of processing switching cycles

вдоль траектории перемещения инструмента ($l^{(1)} = l_1$, $l^{(2)} = l_1 + l_2$, $l^{(3)} = l_1 + l_2 + l_3$, ..., $l^{(n-1)} = L - l_n$), при которых затраты на изготовление партии деталей минимальны. Они определяются суммой затрат на собственно резание и на замену инструмента и его переналадку. При этом заданы траектории скорости по пути $V_i(l)$, изменяющиеся в зависимости от текущего износа инструмента. Начальное значение скорости $V_0 = \text{const}$. Траектория скорости резания $V_p^{(i)}(l_i)$ по пути вычислена таким образом, что интенсивность изнашивания инструмента является минимальной [10]. Методика вычисления базируется на гипотезе о связи интенсивности изнашивания с мощностью необратимых преобразований энергии. Оптимальной мощности соответствует оптимальная температура – это область перехода от преобладающего адгезионного к диффузионному изнашиванию инструмента [7, 24]. Скорости $V_p^{(i)}(l_i)$ соответствует скорость подачи $V_i(l)$, которая ограничена сверху предельным значением, влияющей на формируемую резанием шероховатость поверхности. Однако в ходе эволюции за счет износа инструмента и связанного с ним увеличения объема пластической деформации в зоне резания величину подачи необходимо уменьшать. Поэтому траектория скорости подачи по пути резания уменьшается быстрее траектории скорости резания [10].

При заданных скоростях $V_i(l)$ затраты Z на обработку определяются по формуле

$$Z = Z(l_1, l_2, \dots, l_n) = c_1 \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^{l_i} \frac{d\xi}{V_i(\xi)} + (n-1)c_2, \quad (2)$$

где c_1 – стоимость станкоминутой в [руб/мин]; c_2 – стоимость замены инструмента вместе с его настройкой. Аналогичную структуру стоимости имеет сверление глубоких отверстий малого диаметра спиральными сверлами, но в этом случае переключению цикла обработки соответствуют затраты на вывод инструмента из зоны резания для его очистки от стружки [37].

Решение задачи сводится к вычислению l_i , при которых $Z \Rightarrow \min$.

Необходимые условия оптимальности Алгоритм вычисления

Скорость в силу указанных выше обстоятельств является монотонно убывающей функцией. Покажем, что в этом случае оптимальным координатам переключения циклов соответствуют равные между собой скорости резания. Причем эти скорости равны при различных монотонно изменяющихся функциях $V_i(l_i) \in \mathbb{S}_0$. Множество $\mathbb{S}_0$ является множеством фазовых траекторий скоростей, при которых одновременно выполняется условие минимума интенсивности изнашивания и обеспечения заданного качества изготовления детали.

При решении задачи вначале зафиксируем количество переключений n и для заданных n и L определим координаты переключений, при которых в (2) $Z(l_1, l_2, \dots, l_n) = \min$ при условии, что дополнительно выполняется требование (1). Очевидно, если при определении оптимальных координат не накладывать условия (1) и не зафиксировать n , то задача не имеет смысла. Если зафиксировать $Z(l_1, l_2, \dots, l_n) = Z_i$, то полученная поверхность может пересекаться гиперплоскостью $L(l_1, l_2, \dots, l_n) = \sum_{i=1}^{i=n} l_i$ (рис. 2).

Если уменьшать Z_i , то линии пересечения поверхности $Z_i(l_1, l_2, \dots, l_n)$ с гиперплоскостью представляют выпуклые замкнутые траектории, которые вырождаются в точку $Z_0(l_1, l_2, \dots, l_n)$, которой соответствуют искомые координаты. Причем поверхности $Z_i(l_1, l_2, \dots, l_n)$ являются выпуклыми, так как по мере развития износа функция изменения скорости является монотонно убывающей. Следовательно, единственной оптимальной точкой, в которой выполняется условие $Z \Rightarrow \min$, является условие касания гиперповерхности $Z(l_1, l_2, \dots, l_n)$ и гиперплоскости $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$ (рис. 2). Следовательно, для этой точки $Z_0(l_1, l_2, \dots, l_n)$ справедливо

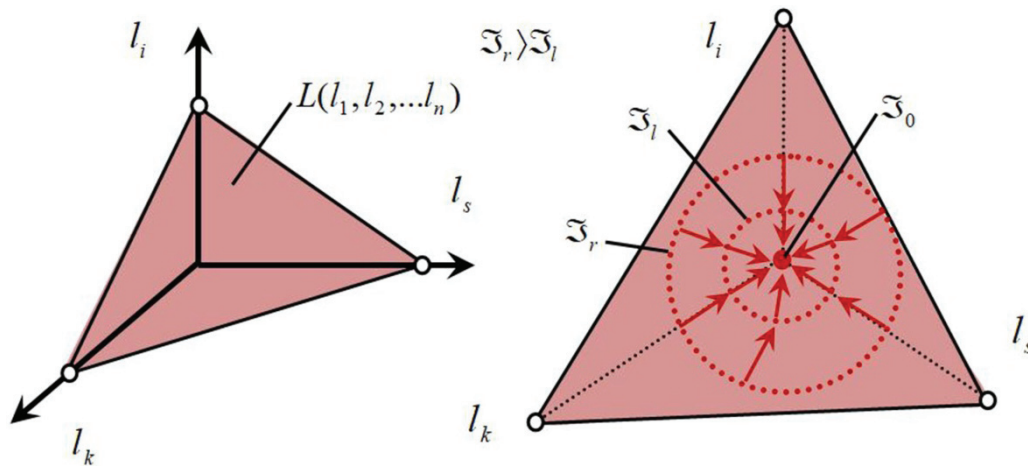


Рис. 2. Схема, поясняющая пересечение гиперплоскости $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$ и гиперповерхности $\mathfrak{Z}(l_1, l_2, \dots, l_n)$

Fig. 2. Diagram explaining the intersection of a hyperplane $L(l_1, l_2, \dots, l_n)$ and a hypersurface $\mathfrak{Z}(l_1, l_2, \dots, l_n)$

$$\begin{aligned} \partial \mathfrak{Z}(l_1, l_2, \dots, l_n) / \partial l_i &\equiv \\ &\equiv \partial L(l_1, l_2, \dots, l_n) / \partial l_i, \end{aligned} \quad (3)$$

откуда сразу получаем

$$V_i(l_i) = V_s(l_s), \quad i, s \Rightarrow 1, 2, 3, \dots, n. \quad (4)$$

Условие (4) позволяет упростить вычисление координат, а также физически реализовать систему, обеспечивающую условие $3 \Rightarrow \min$. Причем это условие принимает во внимание физические и экономические требования к оптимальности. Условие оптимальности будет достаточным, если дополнительно из (2) определить n , при котором $3 \Rightarrow \min$. Ранее в [10] предложена аппроксимация изменения скорости по пути резания в виде экспоненциальной функции

$$\begin{aligned} V^{(i)}(l_i) &= V_0 \exp[-\alpha_i l_i], \\ l_i &\in \left(0, \frac{4}{\alpha_i}\right), \quad V^{(i)}(l_i) \in \mathbb{N}_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где V_0 – начальное значение скорости в [м/с]; α_i – параметр в [м⁻¹]. В дальнейшем, не нарушая общности, будем считать аппроксимацию (5) справедливой.

В работах [8–10] было показано, что траектории (5), определяемые эволюционными свойствами системы, являются чувствительными к малым вариациям исходных параметров и к не-

управляемым возмущениям, например биениям. Поэтому при неизменной начальной скорости V_0

параметр α_i может варьироваться. Его естественно рассматривать в виде гауссовой случайной величины с математическим ожиданием $M[\alpha_i] = \hat{\alpha}$ и дисперсией σ_α . Тогда по математическому ожиданию $\hat{Z}(n)$ для (2) с учетом (5) имеем зависимость приведенных затрат на изготовление партии деталей от количества переключений n :

$$\begin{aligned} \hat{Z}(n) = \hat{\mathfrak{Z}}(n) &= \frac{c_1}{V_0 \hat{\alpha}} \left[\exp\left(\hat{\alpha} \frac{L}{n}\right) - 1 \right] + \\ &+ (n-1) c_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Очевидно, что (6) при варьировании n имеет минимум, которому соответствует оптимальная минимальная скорость $V_{0,1} = V_0 \exp\left(-\frac{\hat{\alpha} L}{n_0}\right)$.

Здесь n_0 – количество переключений, доставляющее минимум (6). Если учесть доказанное необходимое условие оптимальности (4), то из (6) вычисляется оптимальное значение n_0 и соот-

ветствующая оптимальная скорость $V_{0,1}$. Затем вычисляются l_i , соответствующие $\alpha_i \in (\hat{\alpha} - 3\sigma_\alpha, \hat{\alpha} + 3\sigma_\alpha)$, которые характеризуют множество $\mathbb{N}^{(1)}$.

Они определяются по очевидной зависимости

$$l_i = -\frac{1}{l_i} \ln \left(\frac{V_{0,1}}{V_0} \right), \quad V_{0,1} < V_0. \quad \text{Причем} \quad \text{всем} \quad l_i \in \mathbb{N}^{(0)}$$

соответствуют скорости $V_{0,1} = \text{const}$.

Результаты и их обсуждение

Пример определения оптимальных координат переналадки инструмента

Приведем пример эффективности методики выбора траекторий скорости и переключений циклов обработки для продольного точения вала $D = 8,0$ мм из стали 08X15H24B4TP неперетачиваемыми пластинами фирмы SANDVIK Coromant из твердого сплава GC2015, форма пластины – «W». Глубина резания $t_p^{(0)} = 2,0$ мм; начальная подача $S_p^{(0)} = 0,1$ мм / об; начальная скорость резания $V_0 = 1,2$ м / с. Длина вдоль оси 38,0 мм, путь резания одной детали 9,5 м, общий путь $L = 840$ м. Математическое ожидание пути резания до критического износа 0,8 мм при неизменных оптимальных режимах резания 20 м. Параметры α , характеризующие эволюцию: $\hat{\alpha}_1 = 0,1 \text{ м}^{-1}$, $\hat{\alpha}_2 = 0,01 \text{ м}^{-1}$. Величина дисперсии этого параметра: $\sigma_i = 0,1 \hat{\alpha}_i$. Параметры стоимости c_1 , c_2 приняты в условных единицах стоимости к единице времени. Для этого случая на рис. 3 показаны зависимости стоимостной эффективности от числа переключений n . Здесь красными кругами и пунктирной линией выделены оптимальные значения числа переключений в зависимости от стоимости замены и переналадки инструмента $c_2 = sc_1$.

В любой реальной системе обычно выполняется условие $c_2 > c_1$, так как в c_2 входит стоимость эксплуатации станка. Если $c_2 = 0$, то оптимальным является $n \rightarrow \infty$. Тогда затраты приближаются к своему предельному минимальному значению Z_0 (показано синим цветом), определяемому гипотетическим случаем обработки изнашиваемым инструментом на постоянных режимах: $S_p^{(0)} = 0,1 \text{ мм / об} = \text{const}$, $V_0 = 1,2 \text{ м / с}$. Оптимальные значения числа переключений зависят также от параметров $\hat{\alpha}$, характеризую-

щего изменение интенсивности изнашивания по пути резания. Как показано ранее [10], параметр $\hat{\alpha}$, являющийся интегральной оценкой эволюционных свойств процесса резания, зависит от динамических свойств этого процесса, в том числе от формируемых аттракторов деформационных смещений инструмента относительно заготовки. Они изменяются в ходе развития износа инструмента.

При анализе, как правило, n является не целым, поэтому оптимальное количество переключений естественно взять в виде ближайшего целого значения. Кроме этого необходимо дополнительно согласовать путь, соответствующий переключению, с длиной перемещения вершины инструмента при обработке конкретной детали. Приведенный пример иллюстрирует оптимизацию переключения циклов обработки для случая, когда параметры эволюционных траекторий изменения режимов постоянны и соответствуют математическим ожиданиям $\hat{\alpha}$. Так как в реальной системе $\alpha_i \in (\hat{\alpha} - 3\sigma_\alpha, \hat{\alpha} + 3\sigma_\alpha)$, то случайным распределением характеризуется и множество $l_i \in \mathbb{N}^{(0)}$. На рис. 4 $a = V_{1,0}(\hat{\alpha} - \sigma_\alpha)$, $b = V_{1,0}(\hat{\alpha})$, $c = V_{1,0}(\hat{\alpha} + \sigma_\alpha)$. Согласно доказанному положению (3) и (4) всем координатам l_i , обеспечивающим минимум затрат на изготовление партии деталей, соответствуют постоянные скорости $V_{1,0}$, при которых необходимо выполнять замену инструмента (рис. 4). Поэтому замену инструментов необходимо осуществлять не в координатах перемещения, а в их скоростях $V_{1,0} = \text{const}$.

Результаты и их обсуждение

В настоящее время программы ЧПУ для обработки деталей остаются неизменными при обработке партии деталей независимо от развития износа инструмента. Развитие износа изменяют параметры динамической системы резания и, как следствие, изменяют ее свойства, влияющие на интенсивность изнашивания инструмента и параметры качества обрабатываемых деталей. Поэтому необходимо согласовать ТИЭС с эволюционно изменяющимися свойствами процесса резания. В этом случае ТИЭС определяются

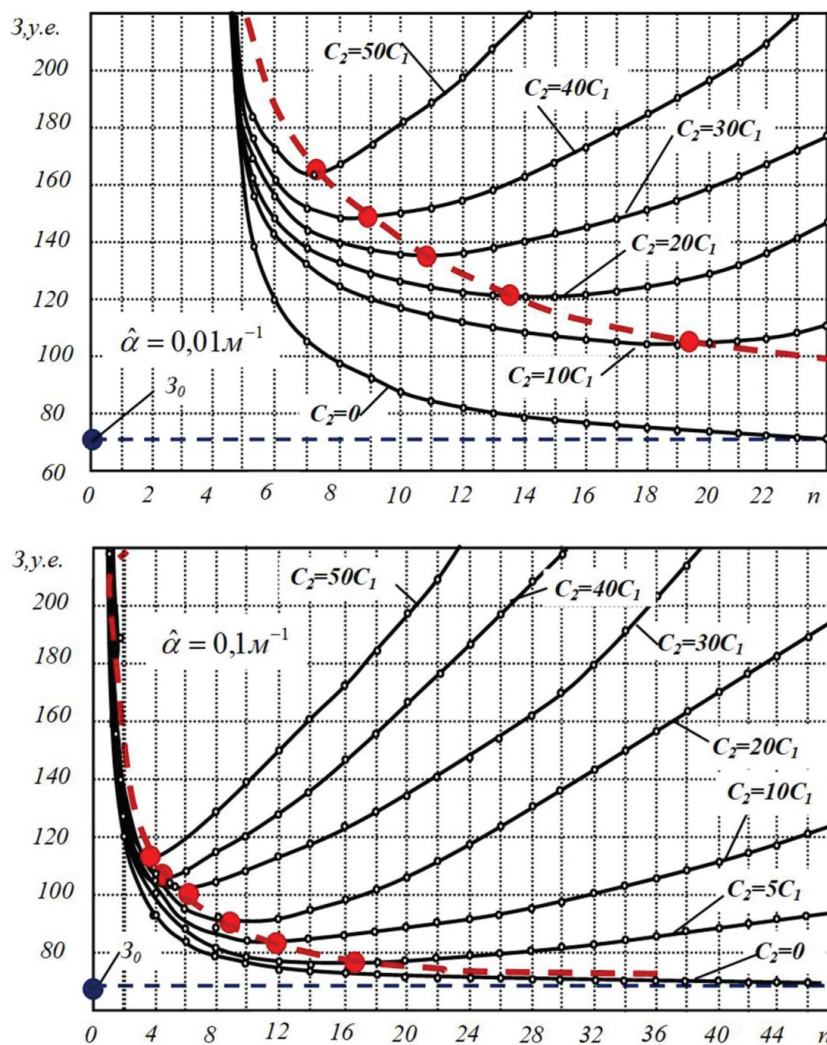


Рис. 3. Диаграммы изменения стоимости изготовления партии из ста деталей в условных единицах в зависимости от числа переключений циклов обработки

Fig. 3. Diagrams of changes in the cost of manufacturing a batch of one hundred parts depending on the number of processing switching cycles in conventional units

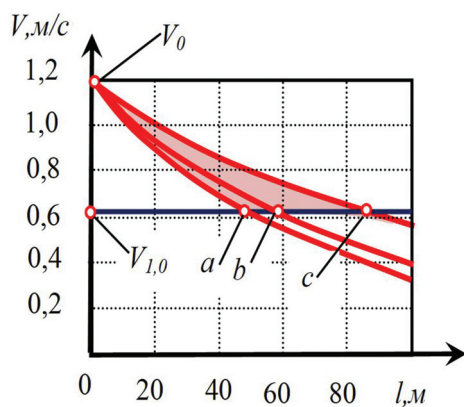


Рис. 4. Связь координат переключения с изменениями α

Fig. 4. The relationship of switching coordinates with the changes α

не на основе фиксированных значений технологических режимов, а на их траекториях, согласованных с эволюционно изменяющимися свойствами динамической системы резания. Такое согласование позволяет минимизировать интенсивность изнашивания инструмента при выпуске деталей требуемого качества. Оно приводит к необходимости уменьшения вектора скорости по направлению движения вершины инструмента. Таким образом, при неизменности упруго-диссипативных свойств подсистем инструмента и заготовки условию согласования соответствуют монотонные уменьшения как скорости резания, так и в еще большей степени скорости продольной подачи. Поэтому для обеспечения

экономической оптимальности процесса обработки формулируется новая для рассматриваемой предметной области задача определения таких координат переналадки инструментальной подсистемы, при которых затраты на изготовление партии деталей являются минимальными. Приведенный математический инструментарий, алгоритмы и доказанные необходимые условия оптимальности позволяют решать эту проблему.

Пример изменения оптимальных координат переналадки инструментальной подсистемы показал, что они зависят от соотношения стоимости станкоминуток станка во время собственно процесса резания и стоимости замены и переналадки режущего инструмента. При возрастании стоимости переключений уменьшается их число и возрастает путь резания в каждом цикле. На число переключений и путь резания оказывает влияние и интенсивность процесса деградации процесса обработки, которая характеризуется параметром α . На него влияют необратимые преобразования энергии в области сопряжения задней грани инструмента с заготовкой. Они зависят как от упруго-диссипативных свойств взаимодействующих через резание подсистем, эволюционно изменяющихся параметров формируемой резанием динамической связи, так и от неуправляемых возмущений, например, биений шпинделя. Причем, как показано нами ранее [8–10], траектории необратимых преобразований энергии по пути резания могут обладать высокой чувствительностью к малым вариациям параметров системы и к параметрам неуправляемых возмущений.

Разработанная методика апробирована в условиях ПАО Роствертол при точении вала штурцера гидросистемы вертолета МИ-29 из стали 08Х15Н24В4ТР. Не останавливаясь на деталях, отметим следующие практические результаты. Вследствие использования согласованных с эволюцией ТИЭС, а также оптимальных алгоритмов переключения циклов обработки получены следующие практические результаты: количество обработанных деталей между переналадкой инструментальных систем по традиционной программе составило 3 детали, по адаптированной программе – 8 деталей; среднее машинное время на обработку одной детали увеличилось в 1,7 раза. Приведенные затраты при изготовлении партии из 100 деталей уменьшились в 1,3

раза. Важно отметить, что приведенная эффективность получена программными методами без изменения инструмента и условий обработки. Разработанная методика и математический инструментарий можно распространить на решение задач управления другими эволюционными процессами обработки [37].

Закключение

При создании программы ЧПУ с учетом согласования траекторий исполнительных элементов станка с эволюционными изменениями свойств процесса резания приходится считаться с тем, что скорость резания и соответствующая ей скорость подачи имеют тенденцию к снижению их значений по мере развития износа инструмента. Поэтому для эффективности обработки необходимо определить по пути резания координату, в которой следует осуществить замену инструмента. Эта координата выбирается из условия минимизации приведенных затрат на изготовление партии деталей. Для реализации выбора координаты предложено математическое моделирование процесса, доказаны необходимые условия оптимальности и приведена методика вычисления оптимальных координат, при которых необходимо осуществить замену инструмента. Показано, что оптимальным координатам переключения соответствуют равные между собой минимальные скорости резания по направлению движения вершины инструмента. Они зависят от соотношения стоимостей машинного времени и стоимости замены инструментов (стоимости переключения циклов обработки). Приведены результаты численного моделирования и промышленной апробации разработанных алгоритмов, показывающие, что без изменения свойств инструментов, состояния станков и прочее только программными методами можно увеличить стоимостную эффективность обработки в 1,2–1,3 раза.

Список литературы

1. *Haken H.* Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 258 p. – ISBN 978-3-540-33021-9. – DOI: 10.1007/3-540-33023-2.
2. *Prigogine I., George C.* The second law as a selection principle: the microscopic theory of dissipative processes in quantum systems // Proceedings of the

National Academy of Sciences of the United States of America. – 1983. – Vol. 80. – P. 4590–4594.

3. Колесников А.А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза. – Таганрог: ЮФУ, 2007. – 384 с.

4. Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Угнич Е.А. Модель управления современным предприятием на основе системно-синергетического подхода // Экономическая наука современной России. – 2016. – № 4 (75). – С. 112–128.

5. Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Динамика транспортных трибосистем // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 12. – С. 19–24.

6. Рыжкин А.А. Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке. – Ростов н/Д.: Донской гос. техн. ун-т, 2019. – 289 с. – ISBN 978-5-7890-1669-5.

7. Мигранов М.Ш. Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 65–71.

8. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46–61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

9. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39, N 5. – P. 423–430. – DOI: 10.3103/S1068798X19050204.

10. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 54–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.

11. Лапшин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В. Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.

12. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear // Encyclopedia of Tribology. – Boston, MA: Springer, 2013. – P. 3622–3636. – DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.

13. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 30 (8). – P. 958–963. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.

14. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes // Computers and Industrial Engineering. – 2006. – Vol. 50, N 12. – P. 15–34. – DOI: /10.1016/j.cie.2005.10.001.

15. Каримов И.Г. Влияние температуры резания на энергетические параметры контакта инструмента с деталью // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 44 (49). – С. 85–89.

16. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction / J.R. Gomez-Solano, C. July, J. Mehl, C. Bechinger // New Journal of Physics. – 2015. – Vol. 17. – P. 045026. – DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.

17. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach // Tribology in Industry. – 2014. – Vol. 36, N 4. – P. 341–347.

18. Патент 2538750 Российская Федерация. Способ определения оптимальной скорости резания в процессе металлообработки / М.П. Козочкин, С.В. Федоров, М.В. Терешин – № 2013123625/02; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.01.2015.

19. Зариктуев В.Ц. Автоматизация процессов на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 14–19.

20. Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Kulenovic M. Experimental study on the high speed machining of hardened steel // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 291–295. – DOI: 10.1016/j.pro-eng.2014.02.234.

21. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting / P. Blau, K. Busch, M. Dix, C. Hochmuth, A. Stoll, R. Wertheim // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 26. – P. 361–366. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.058.

22. Chin C.-H., Wang Y.-C., Lee B.-Y. The effect of surface roughness of end-mills on optimal cutting performance for high-speed machining // Strojnicki Vestnik = Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 52 (2). – P. 124–134. – DOI: 10.5545/sv-jme.2012.677.

23. Kant G., Sangwan K.S. Prediction and optimization of machining parameters for minimization power consumption and surface roughness in machining // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 83. – P. 151–164. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.073.

24. Рыжкин А.А. Синергетические аспекты управления износостойкостью инструментальных режущих материалов // Динамика технических систем: XII международная научно-техническая конференция: сборник трудов. – Ростов н/Д., 2016. – С. 9–10.

25. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Тимирязев В.А. Адаптивное управление технологическими процессами на металлорежущих станках. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

26. Базров Б.М. Повышение эффективности механической обработки деталей с помощью систем адаптивного управления. – М.: ЦНИИТЕИлегпищемаш, 1976. – 67 с.
27. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Новейшие тенденции в области архитектурных решений систем ЧПУ // Автоматизация в промышленности. – 2005. – № 4. – С. 3–9.
28. Brzhozovsky B.M., Yankin I.N., Brovkova M.B. Controlling the oscillatory process composition in machining by correcting the exciting force structure in the cutting zone // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – P. 241–246. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.755.
29. Neural network approach for automatic image analysis of cutting edge wear / T. Mikołajczyk, K. Nowicki, A. Kłodowski, D.Y. Pimenov // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Vol. 88. – P. 100–110. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.11.026.
30. Martinov G.M., Pushkov R.L., Evstafieva S.V. Collecting diagnostic operational data from CNC machines during operation process // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709, N 3. – P. 033051. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033051.
31. Martinov G., Martinova L., Ljubimov A. From classic CNC systems to cloud-based technology and back // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 63. – DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101927.
32. Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R. Approach in implementing of logical task for numerical control on basis of concept “Industry 4.0” // 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Moscow, Russia, 2018. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728584.
33. Kozlov A.M., Malyutin G.E., Handozhko A.V. Performance increase of precision volumetric milling on machines based on frame-accurate control // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – P. 1111–1119. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.603.
34. Tool condition monitoring in turning using statistical parameters of vibration signal / H. Arslan, A.O. Er, S. Orhan, E. Aslan // International Journal of Acoustics and Vibration. – 2016. – Vol. 21, N 4. – P. 371–378. – DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4432.
35. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
36. Болтянский В.Г. Моделирование линейных оптимальных быстрых действий при помощи релейных схем // Доклады Академии наук СССР. – 1961. – Т. 139, № 2. – С. 275–278.
37. Zakovorotny V.L., Bordatchev E.V., Sanekar T.S. Variational formulation for optimal multi-cycle deep drilling of small holes // Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME. – 1997. – Vol. 119, N 3. – P. 553–560. – DOI: 10.1115/1.2801293.

Конфликт интересов

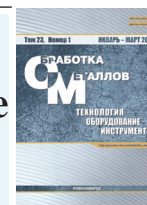
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Determination of optimal coordinates for switching processing cycles on metal-cutting machines

Vilor Zakovorotny^a, Valery Gvindjiliya^{b, *}

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, sinedden@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 08 November 2020

Revised: 05 December 2020

Accepted: 06 January 2021

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Minimization of the above cost of manufacture

Quality of parts manufacturing

The coordinates of the switching cycles

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research projects: "Development of the theory of analysis and synthesis of controlled self-organization in a dynamic cutting system during processing on the example of manufacturing parts on lathes", No. 19-08-00022; "Development of methods for analysis and synthesis of a dynamic cutting system based on the criterion of minimizing the reduced manufacturing costs", No. 20-38-90074.

ABSTRACT

Introduction. One of the ways to improve the efficiency of processing on machines is to coordinate the CNC program with the changing properties of the dynamic cutting system. If this takes into account the tool wear and the associated with it changes in the parameters of the dynamic cutting system, then the cutting speed to ensure the minimum wear rate is reduced along the cutting path. The corresponding feed rate is reduced even faster, since it is necessary to ensure a constant deformation displacement of the tool relative to the workpiece. The evolution of the properties of the cutting process (for matching with which the trajectories of the operating elements of the machine are corrected) depends on the power of irreversible transformations of the energy supplied to cutting. This reduces the processing efficiency. Therefore, a new for the considered subject area problem of determining the coordinates of the tool movement relative to the workpiece is formulated, starting from which further processing is economically inexpedient. In this case, it is necessary, after processing the next part, to ensure the replacement of the tool and carry out its changeover. **Subject.** A metal-cutting machine of a turning group, the trajectories of the executive elements of which are controlled, for example, by a CNC system. **The purpose of the work.** Mathematical simulation and methods for determining the coordinates at which it is necessary to replace the tool. **Method and methodology.** The necessary conditions for the optimality of determining these coordinates are proved. Mathematical tools are provided that allow calculating the coordinates at which the given manufacturing costs take the minimum value according to the given trajectories. The probabilistic characteristics of evolutionary trajectories are taken into account. **Results and discussions.** The analysis of the efficiency of using the technique in industry depending on the cost of the machine and tool together with its replacement and readjustment is given. The proven optimality conditions and the given mathematical tools complement the knowledge about the optimization of controlled machining processes on machines. **Conclusions.** The results of the study show new options for the organization of tool replacement, aimed at improving the efficiency of processing by software methods using a CNC system.

For citation: Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Determination of optimal coordinates for switching processing cycles on metal-cutting machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 56–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-56-67. (In Russian).

References

1. Haken H. *Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 258 p. ISBN 978-3-540-33021-9. DOI: 10.1007/3-540-33023-2.
2. Prigogine I., George C. The second law as a selection principle: the microscopic theory of dissipative processes in quantum systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1983, vol. 80, pp. 4590–4594.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Post-graduate Student

Don State Technical University,

1 Gagarin square,

344000, Rostov-on-Don, Russian Federation

Tel.: +7-918-583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

3. Kolesnikov A.A. *Prikladnaya sinergetika: osnovy sistemnogo sinteza* [Applied synergetics: fundamentals of system synthesis]. Taganrog, SFU Publ., 2007. 384 p.
4. Zakovorotny V.L., Flek M.B., Ugnich E.A. Model' upravleniya sovremennym predpriyatiem na osnove sistemno-sinergeticheskogo podkhoda [Model of the modern enterprise management on the basis of system-synergistic approach]. *Ekonomicheskaya nauka sovremennoi Rossii = Economic of Contemporary Russia*, 2016, no. 4 (75), pp. 112–128.
5. Zakovorotny V.L., Shapovalov V.V. Dinamika transportnykh tribosistem [Dynamics of transport tribosystems]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2005, no. 12, pp. 19–24.
6. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoy obrabotke* [Synergetics of tool wear in cutting edge treatment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 9785789016695.
7. Migranov M.Sh. Issledovaniya iznashivaniya instrumental'nykh materialov i pokrytii s pozitsii termodinamiki i samoorganizatsii [Research of wear of tool materials and coatings from the positions of thermodynamics and self-organization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 11, pp. 65–71.
8. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Svyaz' samoorganizatsii dinamicheskoi sistemy rezaniya s iznashivaniem instrumenta [Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika = Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–61. DOI: /10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.
9. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone. *Russian Engineering Research*, 2019, vol. 39, no. 5, pp. 423–430. DOI: 10.3103/S1068798X19050204.
10. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Vliyanie dinamiki rezaniya na vybor tekhnologicheskikh rezhimov, obespechivayushchikh minimal'noe iznashivanie rezhushchikh instrumentov [Influence of cutting dynamic on the selection of the technological regimes to ensure minimal wear of cutting tools]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 54–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.
11. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov [Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibrations in metal turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.
12. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA, Springer, 2013, pp. 3622–3636. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.
13. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 30 (8), pp. 958–963. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
14. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 1–2, pp. 15–34. DOI: 10.1016/j.cie.2005.10.001.
15. Karimov I.G. Vliyanie temperatury rezaniya na energeticheskie parametry kontakta instrumenta s detal'yu [Influence of the cutting temperature on the energy parameters of the tool contact with the part]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviationsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2012, vol. 16, no. 44 (49), pp. 85–89.
16. Gomez-Solano J.R., July C., Mehl J., Bechinger C. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction. *New Journal of Physics*, 2015, vol. 17, p. 045026. DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
17. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 341–347.
18. Kozochkin M.P., Fedorov S.V., Tereshin M.V. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya v protsesse metalloobrabotki* [Method for determining the optimal cutting speed in the process of metalworking]. Patent RF, no. 2538750, 2015.
19. Zariktuev V.Ts. Avtomatizatsiya protsessov na osnove polozheniya ob optimal'noi temperature rezaniya [Automatization of process based on concept of optimal cutting temperature]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviationsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 14–19.
20. Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Kulenovic M. Experimental study on the high speed machining of hardened steel. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 291–295. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.234.



21. Blau P., Busch K., Dix M., Hochmuth C., Stoll A., Wertheim R. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 26, pp. 361–366. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.058.
22. Chin C.-H., Wang Y.-C., Lee B.-Y. The effect of surface roughness of end-mills on optimal cutting performance for high-speed machining. *Strojniski Vestnik = Journal of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 52 (2), pp. 124–134. DOI: 10.5545/sv-jme.2012.677.
23. Kant G., Sangwan K.S. Prediction and optimization of machining parameters for minimization power consumption and surface roughness in machining. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 83, pp. 151–164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.073.
24. Ryzhkin A.A. [Synergetic aspects of managing the wear resistance of tool cutting materials]. *Dinamika tekhnicheskikh sistem: XII mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya: sbornik trudov* [Dynamics of technical systems. Proceedings of the XII scientific and technical international conference]. Rostov-on-Don, 2016, pp. 9–10. (In Russian).
25. Solomentsev Yu.M., Mitrofanov V.G., Timiryazev V.A. *Adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami na metallovezhushchikh stankakh* [Adaptive control of technological processes on machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 536 p.
26. Bazrov B.M. *Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoi obrabotki detalei s pomoshch'yu sistem adaptivnogo upravleniya* [Improving the efficiency of machining parts by means of systems of adaptive control]. Moscow, TsNIITEllegpishchemash Publ., 1976. 67 p.
27. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Noveishie tendentsii v oblasti arkhitekturykh reshenii sistem ChPU [Latest trends in the architecture of CNC systems]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2005, no. 4, pp. 3–9.
28. Brzhozovsky B.M., Yankin I.N., Brovkova M.B. Controlling the oscillatory process composition in machining by correcting the exciting force structure in the cutting zone. *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 241–246. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.755.
29. Mikołajczyk T., Nowicki K., Kłodowski A., Pimenov D.Y. Neural network approach for automatic image analysis of cutting edge wear. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, vol. 88, pp. 100–110. DOI: 10.1016/j.ymsp.2016.11.026.
30. Martinov G.M., Pushkov R.L., Evstafieva S.V. Collecting diagnostic operational data from CNC machines during operation process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709, no. 3, p. 033051. DOI: 10.1088/1757-899X/709/3/033051.
31. Martinov G., Martinova L., Ljubimov A. From classic CNC systems to cloud-based technology and back. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 63. DOI: 10.1016 / j. rcim.2019.101927.
32. Martinov G., Kozak N., Nezhmetdinov R. Approach in implementing of logical task for numerical control on basis of concept “Industry 4.0”. *2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, Moscow, Russia, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728584.
33. Kozlov A.M., Malyutin G.E., Handozhko A.V. Performance increase of precision volumetric milling on machines based on frame-accurate control. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1111–1119. DOI: 10.1016/j.pro-eng.2017.10.603.
34. Arslan H., Er A.O., Orhan S., Aslan E. Tool condition monitoring in turning using statistical parameters of vibration signal. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2016, vol. 21, no. 4, pp. 371–378. DOI: 10.20855/ijav.2016.21.4432.
35. Pontryagin L.S., Boltyanskii V.G., Gamkrelidze R.V., Mishchenko E.F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [Mathematical theory of optimal processes]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 384 p.
36. Boltyanskii V.G. Modelirovanie lineynykh optimal'nykh bystrodeystviy pri pomoshchi relejnykh skhem [The simulation of linear, optimal high-speed operations by relay circuits]. *Doklady Akademii nauk SSSR = Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 1961, vol. 139, no. 2, pp. 275–278.
37. Zakovorotny V.L., Bordatchev E.V., Sankar T.S. Variational formulation for optimal multi-cycle deep drilling of small holes. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 1997, vol. 119, no. 3, pp. 553–560. DOI: 10.1115/1.2801293.

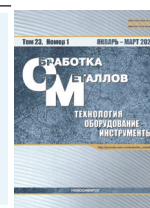
Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Влияние механической активации порошка ВК-8 на свойства спеченных твердых сплавов

Екатерина Абдульменова^{1, а, *}, Сергей Кульков^{1, 2, б}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, пр. Академический, 2/4, Томск, 634055, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0002-9594-5706>, Ekaterina.V.Abdulmenova@yandex.ru, ^б <https://orcid.org/0000-0002-4635-6569>, kulkov@ispms.ru.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 66.022.51:621.762.5:669.018.25

История статьи:

Поступила: 09 октября 2020

Рецензирование: 23 октября 2020

Принята к печати: 14 декабря 2020

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Карбид вольфрама
Механическая активация
Фазовый состав
Рентгеноаморфное состояние
Область когерентного рассеяния
Микродисторсия
Параметр решетки
Пористость
Твердость

Финансирование:

Результаты получены при выполнении комплексного проекта «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства полного цикла металлорежущих сложнопрофильных многогранных твердосплавных пластин для приоритетных отраслей промышленности» (соглашение о предоставлении субсидии от 27.11.2019 № 075-11-2019-036), реализуемого ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

Благодарности:

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физики наноструктурных функциональных материалов (ЛФНФМ) за помощь в приготовлении твердосплавных образцов и подготовку спеченных образцов к дальнейшим исследованиям.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для изготовления инструментов и деталей, подвергаемых значительному износу, широко используется метод порошковой металлургии. Улучшить структуру и свойства сплава, полученного методом порошковой металлургии, можно реализовав предварительную высокоинтенсивную механическую активацию порошка. В процессе такой обработки возможно формирование наноструктур, могут происходить аморфизация материала и фазовые превращения, что, безусловно, может отразиться на свойствах материала. Подобным исследованиям посвящено ряд работ, однако не всегда механическая обработка приводит к положительному результату. Поэтому исследование влияния высокоинтенсивной механической активацией на структуру и свойства сплавов на основе карбида вольфрама важны и актуальны. **Цель работы:** изучить влияние высокоинтенсивной механической активации порошка ВК-8 на структуру и свойства спеченных образцов. **В работе исследованы** сплавы, полученные методом порошковой металлургии, при использовании механически активированных порошков в течение от 10 до 300 с в планетарно шаровой мельнице. **Материалы и методы.** Сплавы получены методом холодного одностороннего прессования с последующим спеканием при температуре 1400 °С в вакуумной печи. Морфология частиц порошков и структура сплавов изучались методом сканирующей электронной микроскопии. Металлографический анализ сплавов проводился на оптическом микроскопе. Структура и фазовый состав образцов исследованы методами рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа. Твердость спеченных образцов измеряли на твердомере. **Результаты и их обсуждение.** Показано, что при спекании порошков формируются сплавы с WC- и Co-фазами, с параметром решетки WC-фазы, хорошо согласующимися с литературными данными. В образцах при механической активации более 100 с формируется вторая карбидная фаза $\text{Co}_3\text{W}_2\text{C}$. Установлена минимальная пористость $7,8 \pm 1 \%$ в спеченном образце при 30 с механической обработки. Твердость зависит от времени механической активации, размера зерна, пористости и содержания второго карбида. Таким образом, механическая активация может быть эффективна для увеличения физико-механических свойств и подавления роста зерна, однако в этом случае необходимо проводить механическую обработку в интервале времен 60...100 с.

Для цитирования: Абдульменова Е.В., Кульков С.Н. Влияние механической активации порошка ВК-8 на свойства спеченных твердых сплавов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 68–78. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-68-78.

*Адрес для переписки

Абдульменова Екатерина Владимировна, аспирант
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (3822) 28-69-88, e-mail: Ekaterina.V.Abdulmenova@yandex.ru

Введение

Твердые сплавы на основе карбида вольфрама и кобальта (WC-Co) широко используются при изготовлении режущих, буровых инструментов, износостойких деталей благодаря их высокой твердости, прочности, износостойкости и хорошей вязкости разрушения [1–3]. Как правило, изменяя строение твердых сплавов WC-Co, например состав сплава, размер карбидных зерен, объемное содержание связующего компонента, можно регулировать твердость, ударную вязкость, прочность [4]. Известно, что на процесс спекания и на механические свойства таких материалов значительно влияют состав и микроструктура, особенно размер зерна карбидной фазы [5], содержание и распределение кобальтовой связки [6–8]. При этом существенное влияние на свойства оказывает наличие η фазы (W_3Co_3C) [3], а многостадийное спекание приводит к уменьшению размера зерна карбидной фазы, уменьшению пористости образца. В [9] при использовании метода быстрого спекания при активации импульсным током удалось эффективно подавить рост зерна.

Известно, что улучшить физико-механические свойства позволяет использование нанокристаллических материалов. Так, в [10] показано, что при уменьшении размера частиц порошка TiC с 380 до 60 нм увеличивается твердость спеченных образцов с ~ 28 (HV) до 32 ГПа. Уменьшить размер частиц порошка можно с помощью высокоинтенсивной механической обработки в планетарно-шаровой мельнице [11]. Этот метод является относительно недорогим и простым в реализации [12]. В процессе высокоинтенсивной механической обработки порошков может формироваться состояние с очень малым размером области когерентного рассеяния [13, 14], а в [15, 16] показано, что механическая обработка позволяет активировать спекание с достижением более высокой плотности и меньшего размера зерна [11, 17]. В процессе такой обработки может также меняться форма частиц, что, как правило, отразится на физико-механических свойствах. Так, например, в [18, 19] сообщается, что пластинчатая форма частиц позволяет повысить как твердость материала, так и увеличить вязкость.

В [20] показано, что твердые сплавы с пластинчатыми зернами WC имеют более высо-

кую вязкость разрушения, чем твердые сплавы WC-Co с призматическим зернами WC. Однако известно, что механическая обработка не всегда приводит к положительному результату, поскольку при такой обработке возможно загрязнение порошков, их окисление и др. [21, 22].

Таким образом, несмотря на большое количество научных и практических публикаций, посвященных влиянию высокоинтенсивной механической обработки на свойства сплавов, данных о влиянии высокоинтенсивной механической обработки порошков WC-Co на морфологию частиц, структуру, фазовый состав и физико-механические свойства спеченных твердых сплавов недостаточно.

Целью настоящей работы является изучение влияния высокоинтенсивной механической активации порошка ВК-8 на структуру и свойства порошков и спеченных образцов. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**: **1)** изучить морфологию частиц и их размер методом сканирующей электронной микроскопией до и после механической обработки; **2)** изучить изменение фазового состава, параметров тонкой кристаллической структуры методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа после механической обработки; **3)** изучить микроструктуру спеченных образцов методами оптической и сканирующей электронной микроскопии; **4)** изучить изменение фазового состава, параметров тонкой кристаллической структуры методами рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа спеченных образцов; **5)** изучить твердость спеченных образцов.

Методика исследований

Изучен промышленный порошок карбида вольфрама марки ВК-8 производства ООО «Вириал». Порошок обрабатывали в планетарной шаровой мельнице АГО-2 (Россия), диаметр стальных шаров составлял 0,7 см, соотношение порошка к шарам составило 1:10, скорость вращения планетарного диска 1820 об/мин, что обеспечивает ускорение 60g. Время механической активации составляло 10...300 с.

Прессование образцов проводили на гидравлическом прессе методом холодного одностороннего прессования при давлении 200 МПа с выдержкой при давлении 15 с, спекание образ-

цов проводили в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16 (Россия) по следующему режиму:

а) нагрев от комнатной температуры до 800 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин с последующей выдержкой при заданной температуре в течение 30 мин;

б) нагрев от 800 °С до температуры спекания 1400 °С со скоростью 5 °С/мин;

в) выдержка при температуре спекания в течение 60 мин;

г) охлаждение с печью от температуры спекания до комнатной температуры.

Спеченные образцы подвергали полировке на алмазных пастах разной дисперсности. Металлографический анализ проводили с помощью микроскопа Лабомет-И (Россия). Морфология частиц порошка, микроструктура спеченных образцов изучались методом сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) при использовании микроскопа TESCAN VEGA3 SBH.

Для определения структуры и фазового состава исследуемых образцов использовали методы рентгеноструктурного и рентгенофазового анализа. Рентгенограммы получали с помощью дифрактометра ДРОН-3 (Россия) с CuK_α -излучением, экспозиция на каждую точку обеспечивает статистическую точность не хуже 0,5 %. Параметры кристаллической решетки определяли с использованием программы для рентгеноструктурных расчетов. Размер области когерентного рассеяния (ОКР) рассчитывали по уравнению Шеррера [23] по первой линии рент-

геновских спектров, величину микродисторсии [24] рассчитывали по формуле Стока – Уилсона по последней различимой линии рентгеновских спектров. Для расчета определялась полная ширина на половине максимума (FWHM) для каждой фазы. Дифракционные профили аппроксимировались с помощью спектров функции Лоренца.

Твердость спеченных образцов измеряли на твердомере Duramin 5 (Дания) при нагрузке 2 кг.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ-изображения порошков в исходном состоянии (а) и после механической активации 30 с (б) и 300 с (в). В исходном состоянии порошка присутствуют агломераты размером 350 ± 45 мкм, которые состоят из мелких частиц размером 7 мкм. Механическая активация приводит к уменьшению размера частиц и агломератов. Так, механически активированный в течение 30 с порошок состоит из единичных агломератов размером 40 ± 10 мкм, имеющих в своем составе мелкие частицы размером 2 мкм, а порошок после механической обработки в течение 300 с состоит из агломератов со средним размером 15 ± 5 мкм, содержащих мелкие частицы размером 1,4 мкм. Форма частиц в процессе механической активации не изменяется и близка к сферической.

На рис. 2 представлены рентгенограммы порошков при разном времени механической

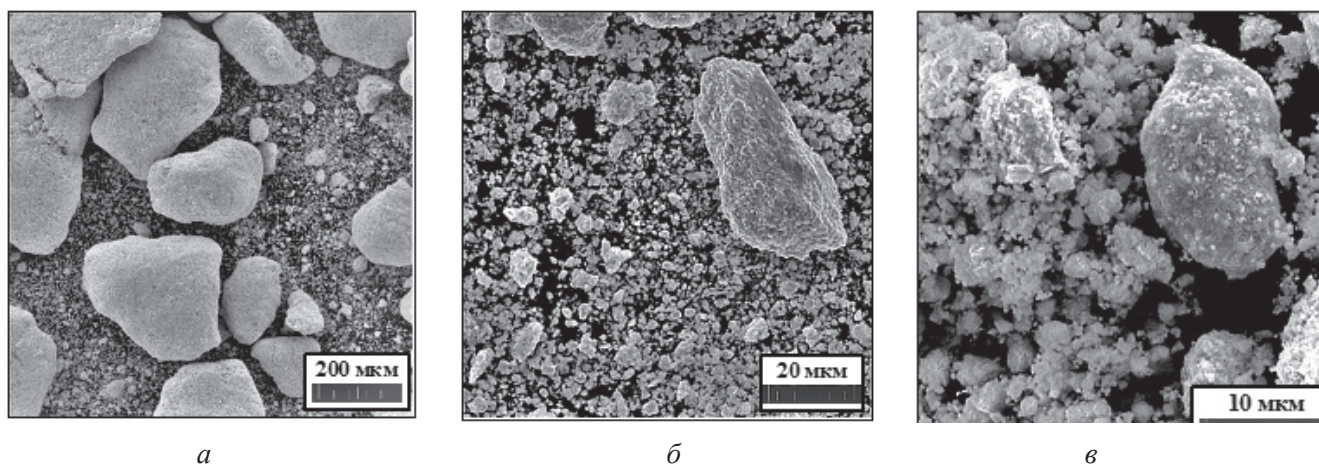


Рис. 1. СЭМ-изображения порошков: исходное состояние (а); после механической активации 30 (б) и 300 с (в)

Fig. 1. SEM images of the powders: the initial state (a); after ball milling for 30 (b) and 300 s (c)

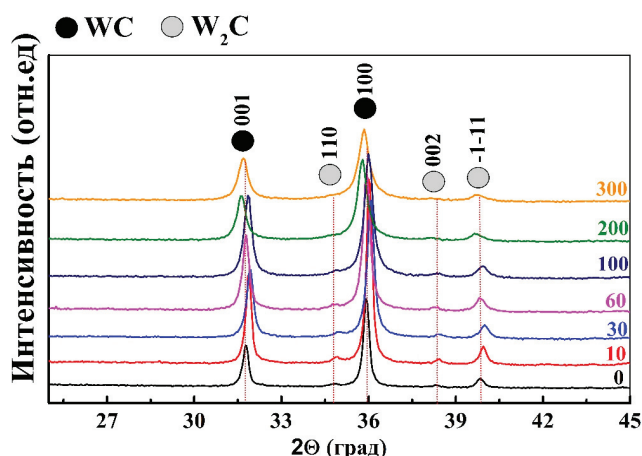


Рис. 2. Рентгенограммы порошков ВК-8 в исходном состоянии и после механической активации

Fig. 2. XRD patterns of VK-8 powders in the initial state and after milling

активации. Видно, что на всех рентгенограммах присутствуют отражения WC и W₂C фаз. С увеличением времени механической активации все дифракционные пики фаз уширяются. При этом при обработке более 100 с на рентгенограммах наблюдается широкая компонента, которая свидетельствует о формировании рентгеноаморфной фазы с относительным содержанием до 15 ± 5 % при обработке порошка в течение 300 с. Эти результаты согласуются с [17], где в порошке WC-10Co-0.8VC-0.2Cr₃C₂ после обработки также формируется рентгеноаморфная фаза. Относительное содержание W₂C до 60 с механической активации не изменяется и составляет не более 10 ± 5 %, а при более продолжи-

тельной обработке ее содержание уменьшается до 3 ± 5 %. Возможно формирование рентгеноаморфной фазы связано с присутствием в исходных порошках фазы W₂C.

На рис. 3 представлена зависимость полной ширины на половине максимума WC и рентгеноаморфной фаз от времени механической активации. Видно, что значительное изменение полуширин начинается после 10 с механической активации.

На рис. 4 представлены зависимости размера ОКР (а) и микродисторсии (б), рассчитанные для фазы WC, от времени механической активации.

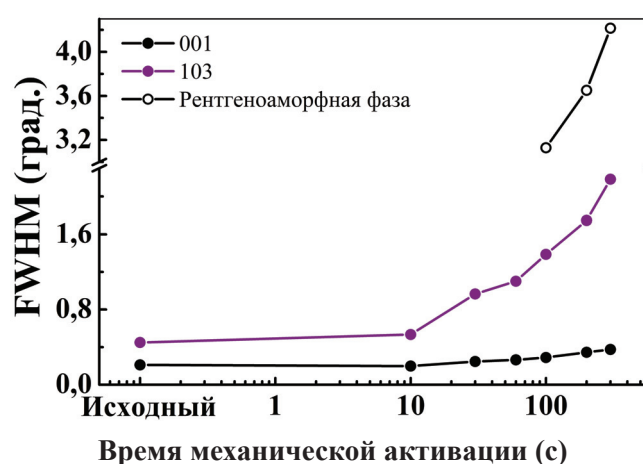
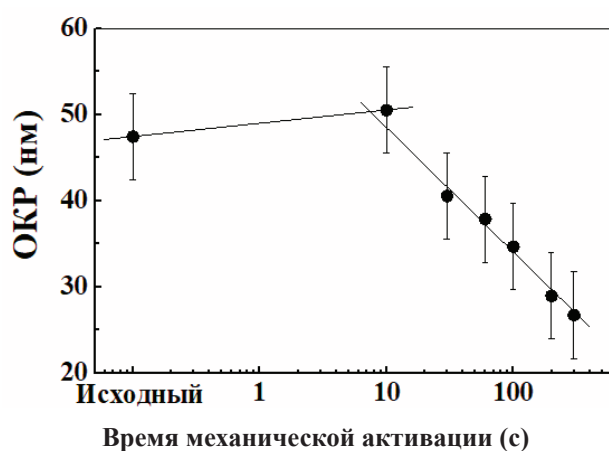
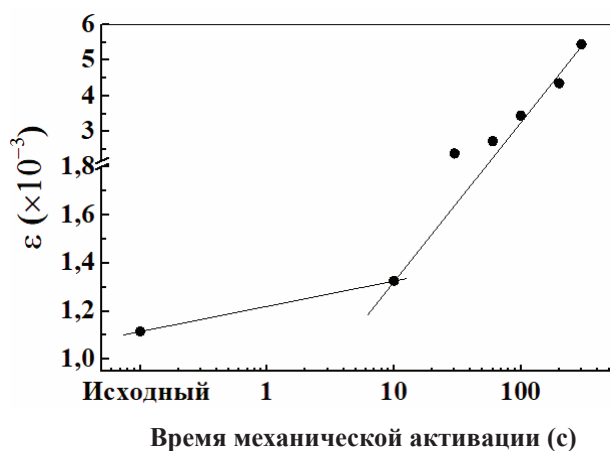


Рис. 3. Зависимость полной ширины на половине максимума WC и рентгеноаморфной фазы от времени механической активации

Fig. 3. The dependence of the full width at half maximum of WC and X-ray amorphous phases on the time of mechanical activation



а



б

Рис. 4. Размер ОКР (а) и микродисторсия (б), рассчитанные для фазы WC, в зависимости от времени механической активации

Fig. 4. CDD size (а) and microdistortion (б) calculated for WC phase depending on the milling time

Видно, что в процессе обработки размер ОКР уменьшается с 47 ± 5 нм до 27 ± 5 нм, а микродисторсия увеличивается с $1,1 \pm 0,03 \cdot 10^{-3}$ до $5,5 \pm 0,03 \cdot 10^{-3}$. При этом 10 с – это время, после которого начинают меняться размеры ОКР и микродисторсия решетки.

На рис. 5 представлены рентгенограммы спеченных образцов. Видно, что во всех сплавах присутствуют отражения WC и Co, а, кроме того, наличие фазы W_2C в исходном порошке обусловило формирование карбида Co_3W_3C , относительное содержание которого не превышает 16 ± 5 %.

На рис. 6 представлена зависимость параметра решетки и степени тетрагональности фазы WC от времени механической активации порошка, видно, что они изменяются незначительно и в пределах ошибки хорошо согласуются с литературными данными (ICDDPDF2 65-4539) [25].

На рис. 7 показаны СЭМ-изображения структуры спеченных образцов и распределения зерен по размерам. В структурах видны поры, зерна WC-фазы имеют неправильную геометрическую форму (светлые области), фаза W_2C (серые области) распределена в основном вокруг зерен WC-фазы. Зерна WC и фаза W_2C однородно распределены во всем объеме спе-

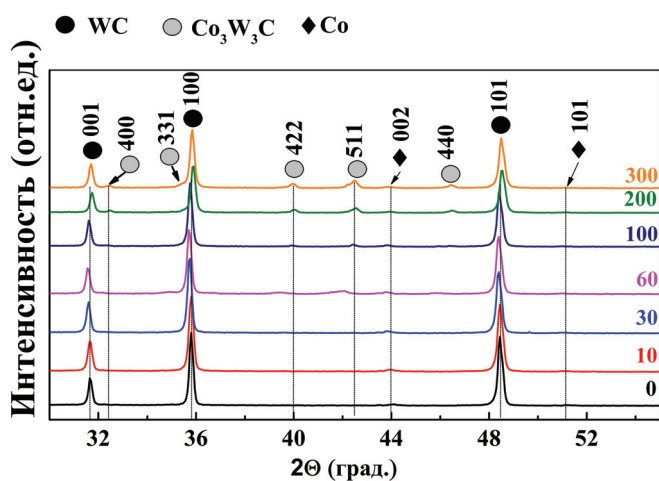


Рис. 5. Рентгенограммы спеченных образцов при разном времени механической активации порошка
Fig. 5. XRD patterns of sintered samples depending on the milling time of powder

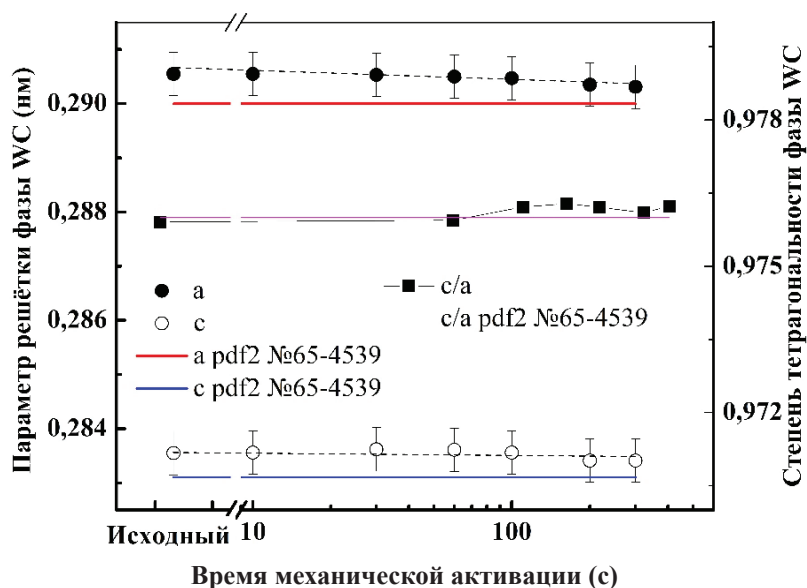


Рис. 6. Зависимость параметра решетки фазы WC и степени тетрагональности от времени механической активации

Fig. 6. Lattice parameters and degree of tetragonality for WC phase on the milling time of powder

ченного образца. Средний размер зерен WC-фазы уменьшается с увеличением времени механической обработки с 1,1 мкм ($\sigma = 0,6$ мкм) до 0,8 мкм ($\sigma = 0,3$ мкм) (при 300 с механической обработки порошка).

На рис. 8 представлена пористость спеченных образцов в зависимости от времени механической активации порошков. Видно, что при 10 с обработки пористость составляет $11,6 \pm 0,2$ %, при 30 с активации пористость имеет минимальное значение $7,8 \pm 1$ % вследствие разрушения агломератов, а затем начинает возрастать до $13,6 \pm 1,5$ % при более длительной обработке.

На рис. 9 представлена зависимость твердости спеченных материалов от времени механической обработки порошков, здесь же представлены литературные данные [3]. Известно, что твердость сплавов зависит от ряда параметров: размера зерна карбидной фазы, содержания связки, пористости и др. [5, 26–29]. Поэтому однозначного сравнения с полученными данными провести затруднительно, однако можно видеть, что механическая обработка первоначально приводит к уменьшению твердости, а затем она вновь растет и при 60...100 с обработки b приближается к спеченному материалу из необработанного порошка [3]. По-видимому, уменьшение твердости в образце при 10 с обработки

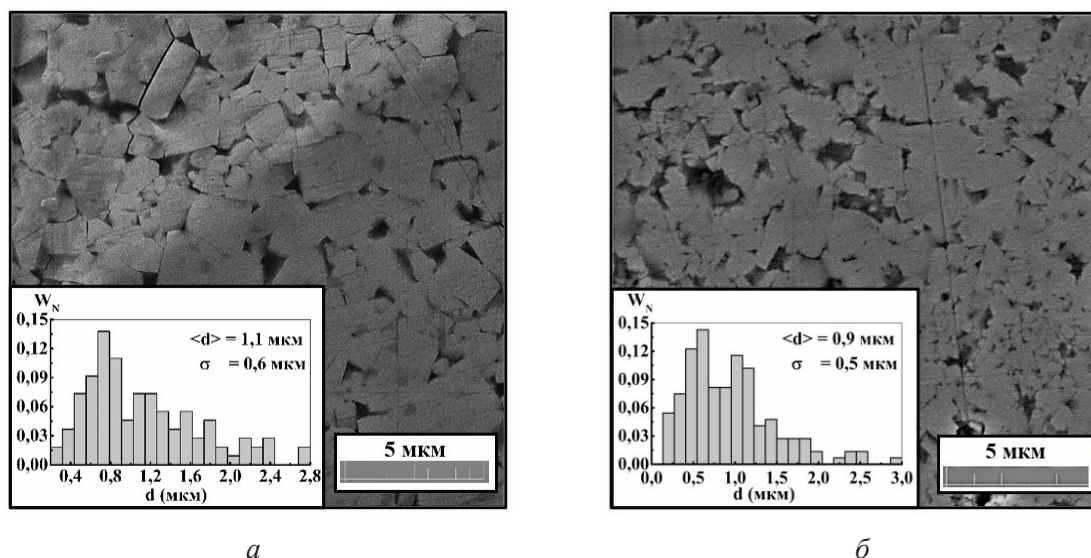


Рис. 7. СЭМ-изображения и распределение зерен по размерам:
исходное состояние порошка (а); после механической активации порошка 60 с (б)

Fig. 7. SEM images and grain size distribution:
the initial state (а); after ball milling for 60 seconds (б)

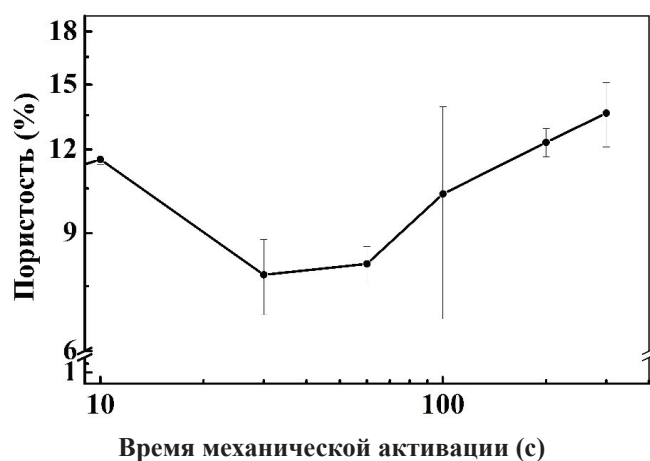


Рис. 8. Зависимость пористости спеченных образцов от времени механической активации порошков

Fig. 8. Porosity of sintered samples depending on the milling time of powder

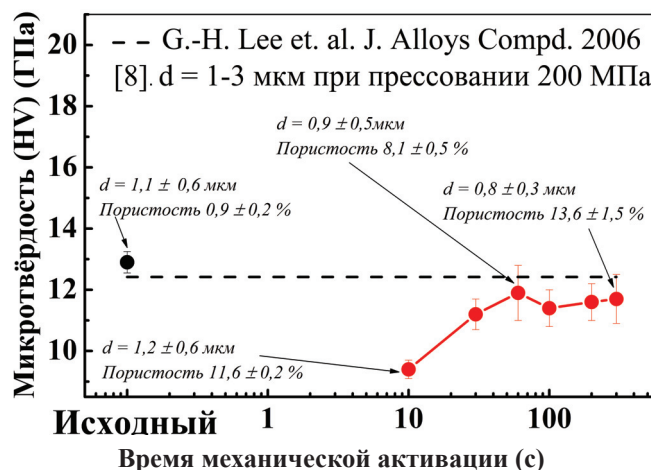


Рис. 9. Зависимость твердости спеченных образцов от времени механической активации порошка

Fig. 9. Hardness of sintered samples depending on the milling time of powder

связано с большим размером зерна ($1,2 \text{ мкм}$, $\sigma = 0,6 \text{ мкм}$) и значительной пористостью ($11,6 \pm 0,2 \%$). В образце спеченного из механически активированного порошка в течение 60 с увеличение твердости связано, напротив, с уменьшением как размера зерна ($0,9 \text{ мкм}$, $\sigma = 0,5 \text{ мкм}$), так и пористости ($8,1 \pm 0,5 \%$), тем не менее при более интенсивной механической активации твердость незначительно падает на фоне небольшого уменьшения размера зерна и увеличения пористости.

Заключение

Проведенные исследования показали, что механическая активация порошка приводит к уменьшению размера частиц и агломератов: в результате механической активации порошка в течение 300 с размер агрегатов уменьшился с 350 ± 45 до $15 \pm 5 \text{ мкм}$, а средний размер мелких частиц уменьшился от 7 до $1,4 \text{ мкм}$. Установлено, что при механической обработке более 100 с кроме кристаллических фаз

WC- и W_2C -фаз формируется рентгенофазная фаза, относительное содержание которой не превышает 15 ± 5 %. Параметр кристаллической решетки WC-фазы в процессе обработки не изменяется и соответствует литературным данным. Показано, что ширина всех пиков значительно увеличивается после 10 с механической обработки, а при обработке в течение 300 с размер ОКР фазы WC уменьшается с 47 ± 5 нм до 27 ± 5 нм, а микродисторсия увеличивается с $1,1 \pm 0,03 \cdot 10^{-3}$ до $5,5 \pm 0,03 \cdot 10^{-3}$.

При спекании порошков при различном времени механической активации формируются WC- и Co-фазы, с параметром решетки WC-фазы, который соответствует табличному значению. В образцах при механической активации более 100 с формируется карбидная фаза Co_3W_3C . Средний размер зерен WC-фазы уменьшается с 1,1 мкм ($\sigma = 0,6$ мкм) до 0,8 ($\sigma = 0,3$ мкм) с увеличением времени механической обработки. Минимальная пористость соответствует $7,8 \pm 1$ % при 30 с обработки порошка. Показано, что твердость зависит как от времени механической активации, так и от размера зерна, пористости и содержания карбида Co_3W_3C .

Таким образом, механическая активация может быть эффективна для подавления роста зерна, однако ее необходимо проводить в интервале времени 60...100 с.

Список литературы

1. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder / T. Ryu, H.Y. Sohn, K.S. Hwang, Z.Z. Fang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2009. – Vol. 481 (1–2). – P. 274–277. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.03.134.
2. Properties and rapid consolidation of ultra-hard tungsten carbide / I.-J. Shon, B.-R. Kim, J.-M. Doh, J.-K. Yoon, K.-D. Woo // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – Vol. 489 (1). – P. L4–L8. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.09.040.
3. Lee G.-H., Kang S. Sintering of nano-sized WC-Co powders produced by a gas reduction-carburization process // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. – Vol. 419 (1–2). – P. 281–289. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.09.060.
4. Kim J.Y., Kang S.H. WC platelet formation via high-energy ball mill // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2014. – Vol. 47. – P. 108–112. – DOI: 10.1016/j.jrmhm.2014.06.024.
5. Kim B.K., Ha G.H., Lee D.W. Sintering and microstructure of nanophase WC/Co hardmetals // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – Vol. 63. – P. 317–321. – DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02748-3.
6. Achieving combination of high hardness and toughness for WC-8Co hardmetals by creating dual scale structured plate-like WC / W. Wang, Z. Lu, M. Zeng, M. Zhu // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44 (3). – P. 2668–2675. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.10.190.
7. Stewart D.A., Shipway P.H., McCartney D.G. Microstructural evolution in thermally sprayed WC-Co coatings: comparison between nanocomposite and conventional starting powders // *Acta Materialia*. – 2000. – Vol. 48 (7). – P. 1593–1604. – DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00440-1.
8. Fabijanić T.A., Alar Ž., Ćorić D. Influence of consolidation process and sintering temperature on microstructure and mechanical properties of near nano- and nanostructured WC-Co cemented carbides // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2016. – Vol. 54. – P. 82–89. – DOI: 10.1016/j.jrmhm.2015.07.017.
9. Consolidation of ultrafine WC and WC-Co hard materials by pulsed current activated sintering and its mechanical properties / H.-C. Kim, I.-J. Shon, J.-K. Yoon, J.-M. Doh // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2007. – Vol. 25 (1). – P. 46–52. – DOI: 10.1016/j.jrmhm.2005.11.004.
10. El-Eskandarany M.S. Structure and properties of nanocrystalline TiC full-density bulk alloy consolidated from mechanically reacted powders // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2000. – Vol. 305. – P. 225–238. – DOI: 10.1016/S0925-8388(00)00692-7.
11. Raihanuzzaman R.M., Xie Z.H., Hong S.J. Powder refinement, consolidation and mechanical properties of cemented carbides – an overview // *Powder Technology*. – 2014. – Vol. 261. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.024.
12. Koch C.C. Synthesis of nanostructured materials by mechanical milling: problems and opportunities // *Nanostructured Materials*. – 1997. – Vol. 9. – P. 13–22. – DOI: 10.1016/S0965-9773(97)00014-7.
13. Mechanical activation of TiFe for hydrogen storage by cold rolling under inert atmosphere / L.E.R. Vega, D.R. Leiva, R.M. Leal Neto, W.B. Silva, R.A. Silva, T.T. Ishikawa, W.J. Botta // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – Vol. 43 (5). – P. 2913–2918. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.054.
14. Amorphous and nanocrystalline Fe-Ti prepared by ball-milling / L. Zaluski, P. Tessier, D.H. Ryan, C.B. Doner, A. Zaluska, J.O. Ström-Olsen, M.L. Trudeau, R. Schulz // *Journal of Materials Research*. – 1993. – Vol. 8 (12). – P. 3059–3068. – DOI: 10.1557/jmr.1993.3059.
15. Mushnikov N.V., Ermakov A.E., Uimin M.A. Kinetics of interaction of Mg-based mechanically activated alloys with hydrogen // *The Physics of Metals and*

Metallography. – 2006. – Vol. 102 (4). – P. 421–431. – DOI: 10.1134/s0031918x06100097.

16. *Stepanov A., Ivanov E., Konstanchuk I.* Hydriding properties of mechanical alloys Mg-Ni // *Journal of the Less-Common Metals*. – 1987. – Vol. 131. – P. 89–97. – DOI: 10.1016/0022-5088(87)90504-2.

17. *Sun J.F., Zhang F.M., Shen J.* Characterizations of ball-milled nanocrystalline WC-Co composite powders and subsequently rapid hot pressing sintered cermets // *Materials Letters*. – 2003. – Vol. 57. – P. 3140–3148. – DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00011-9.

18. Effect of Co content on microstructure and mechanical properties of ultrafine grained WC-Co cemented carbide sintered by spark plasma sintering / K. Liu, Z.H. Wang, Z.B. Yin, L.Y. Cao, J.T. Yuan // *Ceramics International*. – 2018. – Vol. 44. – P. 18711–18718. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.100.

19. *Zhao Z.W.* Microwave-assisted synthesis of vanadium and chromium carbides nanocomposite and its effect on properties of WC-8Co cemented carbides // *Scripta Materialia*. – 2016. – Vol. 120. – P. 103–106. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.04.024.

20. Microstructure and mechanical properties of new WC-Co base cemented carbide having highly oriented plate-like triangular prismatic WC grains / S. Kinoshita, T. Saito, M. Kobayashi, K. Hayashi // *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*. – 2000. – Vol. 47 (5). – P. 526–533. – DOI: 10.2497/jjspm.47.526.

21. *Nobuki T., Crivello J.-C., Cuevas F.* Fast synthesis of TiNi by mechanical alloying and its hydrogenation properties // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44. – P. 10770–10776. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.203.

22. He M., Wang J.Y., He R.G., Yang H.L. Effect of cobalt content on the microstructure and mechanical properties of coarse grained WC-Co cemented carbides fabricated from chemically coated composite powder //

Journal of Alloys and Compounds. – 2018. – Vol. 766. – P. 556–563. – DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.06.366.

23. *Scherrer P.* Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen // *Kolloidchemie Ein Lehrbuch*. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1912. – P. 387–409. – DOI: 10.1007/978-3-662-33915-2_7.

24. *Stokes A.R., Wilson A.J.C.* The diffraction of X rays by distorted crystal aggregates // *Proceedings of the Physical Society*. – 1944. – Vol. 56. – P. 174–181. – DOI: 10.1088/0959-5309/56/3/303.

25. Phase transformations and change in TiNi intermetallic compound structure during destructive hydrogenation and recombination / T. Bratanich, O. Get'man, V. Dobrovol'skii, L. Kopylova, N. Krapivka, T. Permyakova, V. Skorokhod // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2006. – Vol. 45. – P. 582–587. – DOI: 10.1007/s11106-006-0122-x.

26. *Ban Z.G., Shaw L.L.* Synthesis and processing of nanostructured WC-Co materials // *Journal of Materials Science*. – 2002. – Vol. 37. – P. 3397–3403.

27. *Berger S., Porat R., Rosen R.* Nanocrystalline materials: a study of WC-based hard metals // *Progress in Materials Science*. – 1997. – Vol. 42 (1–4). – P. 311–320. – DOI: 10.1016/s0079-6425(97)00021-2.

28. *Zhang F.L., Wang C.Y., Zhu M.* Nanostructured WC/Co composite powder prepared by high energy ball milling // *Scripta Materialia*. – 2003. – Vol. 49. – P. 1123–1128. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2003.08.009.

29. Effects of fine WC particle size on the microstructure and mechanical properties of WC-8Co cemented carbides with dual-scale and dualmorphology WC grains / Q. Ding, Y. Zheng, Z. Ke, G. Zhang, H. Wu, X. Xu, X. Lu, X. Zhu // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2020. – Vol. 87. – P. 105166–1–105166-7. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105166.

Конфликт интересов

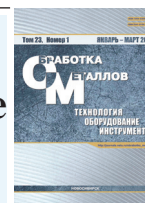
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Effect of mechanical activation of WC-based powder on the properties of sintered alloys

Ekaterina Abdulmenova^{1, a, *}, Sergey Kulkov^{1, 2, b}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4 pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-9594-5706>, Ekaterina.V.Abdulmenova@yandex.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-4635-6569>, kulkov@ispms.ru.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 09 October 2020

Revised: 23 October 2020

Accepted: 14 December 2020

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Wolfram carbide

Mechanical activation

Phase composition

Quasi-amorphous state

Coherently diffracting domain

Microdistortion

Lattice parameter

Porosity

Hardness

Funding

The results were obtained in the framework of the Integrated Project “Establishment of import-substituting high-tech full-cycle production of complex-shaped indexable carbide cutting inserts for priority industries” (Agreement No. 075-11-2019-036 dated November 27, 2019) implemented by the ISPMS SB RAS at the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as part of Decree of the Government of the Russian Federation No. 218 dated April 09, 2010.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the staff of the Laboratory of Physics of Nanostructured Functional Materials (LPNFM) for their help in preparing hard-alloy samples and help in preparation of sintered samples for further research.

ABSTRACT

Introduction. For the manufacture of wearproof tools and machine elements, the method of powder metallurgy is widely used. The preliminary high-

intensity mechanical activation of the powder is used to improve the structure and properties of the alloy obtained by the method of powder metallurgy. The mechanical activation can result in formation of nanostructures with subsequent amorphization of the material, can bring phase transformations, it can certainly affect the properties of the material. However, mechanical treatment does not always lead to a positive result. Therefore, the study of the effect of mechanical activation of WC-based powder on the properties of sintered alloys is important. **Purpose of the work:** to study the effect of high-intensity mechanical activation of WC-based powder on the structure and properties of sintered samples. The work investigates **alloys obtained** by the method of powder metallurgy, using mechanically activated powders for 10 to 300 seconds in a planetary ball mill. **Materials and methods.** The alloys are obtained by cold one-sided pressing followed by sintering at a temperature of 1400 °C in a vacuum furnace. Particle morphology of powder and structure of alloys is analyzed by scanning electron microscopy method. The metallographic analysis of the alloys is carried out by optical microscopy. Phase analysis and the parameters of the crystal structure are performed by X-ray diffraction. The hardness of the sintered samples is measured by hardness tester. **Results and its discussion.** It is shown that after sintering of powders alloys with WC and Co phases are formed. The lattice parameter of the WC-phase correlates well with values in literature. A second carbide phase, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, is formed in the samples upon mechanical activation for more than 100 sec. The minimum porosity of sintered sample is $7.8 \pm 1\%$ that corresponds of sample with preliminary mechanical treatment for 30 seconds. It is shown that the hardness depends on grain size, porosity and second carbide content. Thus, mechanical activation can be effective for increasing the physical and mechanical properties and inhibiting grain growth, but in this case, it is necessary to carry out mechanical processing in the mechanical treatment time range 60-100 sec.

For citation: Abdulmenova E.V., Kulkov S.N. Effect of mechanical activation of WC-based powder on the properties of sintered alloys. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 68–78. DOI:10.17212/1994-6309-2021-23.1-68-78. (In Russian).

* Corresponding author

Abdulmenova Ekaterina V., Postgraduate student
Institute of Strength Physics and Materials,
Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
2/4 pr. Akademicheskii,
634055, Tomsk, Russian Federation
Tel.: 8 (3822) 286-988, e-mail: Ekaterina.V.Abdulmenova@ispms.ru

References

1. Ryu T., Sohn H.Y., Hwang K.S., Fang Z.Z. Plasma synthesis of tungsten carbide and cobalt nanocomposite powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, vol. 481 (1–2), pp. 274–277. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.03.134.
2. Shon I.-J., Kim B.-R., Doh J.-M., Yoon J.-K., Woo K.-D. Properties and rapid consolidation of ultra-hard tungsten carbide. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 489 (1), pp. L4–L8. DOI: 10.1016/j.jallcom.2009.09.040.
3. Lee G.-H., Kang S. Sintering of nano-sized WC-Co powders produced by a gas reduction-carburization process. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, vol. 419 (1–2), pp. 281–289. DOI: 10.1016/j.jallcom.2005.09.060.
4. Kim J.Y., Kang S.H. WC platelet formation via high-energy ball mill. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 47, pp. 108–112. DOI: 10.1016/J.IJRMHM.2014.06.024.
5. Kim B.K., Ha G.H., Lee D.W. Sintering and microstructure of nanophase WC/Co hardmetals. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 63, pp. 317–321. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)02748-3.
6. Wang W., Lu Z., Zeng M., Zhu M. Achieving combination of high hardness and toughness for WC-8Co hardmetals by creating dual scale structured plate-like WC. *Ceramics International*, 2018, vol. 44 (3), pp. 2668–2675. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.10.190.
7. Stewart D.A., Shipway P.H., McCartney D.G. Microstructural evolution in thermally sprayed WC-Co coatings: comparison between nanocomposite and conventional starting powders. *Acta Materialia*, 2000, vol. 48 (7), pp. 1593–1604. DOI: 10.1016/S1359-6454(99)00440-1.
8. Fabijanić T.A., Alar Ž., Ćorić D. Influence of consolidation process and sintering temperature on microstructure and mechanical properties of near nano- and nanostructured WC-Co cemented carbides. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 54, pp. 82–89. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2015.07.017.
9. Kim H.-C., Shon I.-J., Yoon J.-K., Doh J.-M. Consolidation of ultrafine WC and WC-Co hard materials by pulsed current activated sintering and its mechanical properties. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2007, vol. 25 (1), pp. 46–52. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2005.11.004.
10. El-Eskandarany M.S. Structure and properties of nanocrystalline TiC full-density bulk alloy consolidated from mechanically reacted powders. *Journal of Alloys and Compounds*, 2000, vol. 305, pp. 225–238. DOI: 10.1016/S0925-8388(00)00692-7.
11. Raihanuzzaman R.M., Xie Z.H., Hong S.J. Powder refinement, consolidation and mechanical properties of cemented carbides – an overview. *Powder Technology*, 2014, vol. 261, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.04.024.
12. Koch C.C. Synthesis of nanostructured materials by mechanical milling: problems and opportunities. *Nanostructured Materials*, 1997, vol. 9, pp. 13–22. DOI: 10.1016/S0965-9773(97)00014-7.
13. Vega L.E.R., Leiva D.R., Leal Neto R.M., Silva W.B., Silva R.A., Ishikawa T.T., Botta W.J. Mechanical activation of TiFe for hydrogen storage by cold rolling under inert atmosphere. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43 (5), pp. 2913–2918. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.12.054.
14. Zaluski L., Tessier P., Ryan D.H., Doner C.B., Zaluska A., Ström-Olsen J.O., Trudeau M.L., Schulz R. Amorphous and nanocrystalline Fe-Ti prepared by ball-milling. *Journal of Materials Research*, 1993, vol. 8 (12), pp. 3059–3068. DOI: 10.1557/jmr.1993.3059.
15. Mushnikov N.V., Ermakov A.E., Uimin M.A. Kinetics of interaction of Mg-based mechanically activated alloys with hydrogen. *The Physics of Metals and Metallography*, 2006, vol. 102 (4), pp. 421–431. DOI: 10.1134/S0031918X06100097.
16. Stepanov A., Ivanov E., Konstanchuk I. Hydriding properties of mechanical alloys Mg-Ni. *Journal of the Less-Common Metals*, 1987, vol. 131, pp. 89–97. DOI: 10.1016/0022-5088(87)90504-2.
17. Sun J.F., Zhang F.M., Shen J. Characterizations of ball-milled nanocrystalline WC-Co composite powders and subsequently rapid hot pressing sintered cermets. *Materials Letters*, 2003, vol. 57, pp. 3140–3148. DOI: 10.1016/S0167-577X(03)00011-9.
18. Liu K., Wang Z.H., Yin Z.B., Cao L.Y., Yuan J.T. Effect of Co content on microstructure and mechanical properties of ultrafine grained WC-Co cemented carbide sintered by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 2018, vol. 44, pp. 18711–18718. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.07.100.
19. Zhao Z.W. Microwave-assisted synthesis of vanadium and chromium carbides nanocomposite and its effect on properties of WC-8Co cemented carbides. *Scripta Materialia*, 2016, vol. 120, pp. 103–106. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.04.024.
20. Kinoshita S., Saito T., Kobayashi M., Hayashi K. Microstructure and mechanical properties of new WC-Co base cemented carbide having highly oriented plate-like triangular prismatic WC grains. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 2000, vol. 47 (5), pp. 526–533. DOI: 10.2497/jjspm.47.526.

21. Nobuki T., Crivello J.-C., Cuevas F. Fast synthesis of TiNi by mechanical alloying and its hydrogenation properties. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, pp. 10770–10776. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.203.
22. He M., Wang J.Y., He R.G., Yang H.L. Effect of cobalt content on the microstructure and mechanical properties of coarse grained WC-Co cemented carbides fabricated from chemically coated composite powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 766, pp. 556–563. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.06.366.
23. Scherrer P. Bestimmung der inneren Struktur und der Größe von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen. *Kolloidchemie Ein Lehrbuch*. Berlin, Heidelberg, Springer, 1912, pp. 387–409. DOI: 10.1007/978-3-662-33915-2_7.
24. Stokes A.R., Wilson A.J.C. The diffraction of X rays by distorted crystal aggregates. *Proceedings of the Physical Society*, 1944, vol. 56, pp. 174–181. DOI: 10.1088/0959-5309/56/3/303.
25. Bratanich T., Get'man O., Dobrovol'skii V., Kopylova L., Krapivka N., Permyakova T., Skorokhod V. Phase transformations and change in TiNi intermetallic compound structure during destructive hydrogenation and recombination. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2006, vol. 45, pp. 582–587. DOI: 10.1007/s11106-006-0122-x.
26. Ban Z.G., Shaw L.L. Synthesis and processing of nanostructured WC-Co materials. *Journal of Materials Science*, 2002, vol. 37, pp. 3397–3403.
27. Berger S., Porat R., Rosen R. Nanocrystalline materials: a study of WC-based hard metals. *Progress in Materials Science*, 1997, vol. 42 (1–4), pp. 311–320. DOI: 10.1016/s0079-6425(97)00021-2.
28. Zhang F.L., Wang C.Y., Zhu M. Nanostructured WC/Co composite powder prepared by high energy ball milling. *Scripta Materialia*, 2003, vol. 49, pp. 1123–1128. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2003.08.009.
29. Ding Q., Zhenga Y., Ke Z., Zhang G., Wu H., Xu X., Lu X., Zhu X. Effects of fine WC particle size on the microstructure and mechanical properties of WC-8Co cemented carbides with dual-scale and dual morphology WC grains. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020, vol. 87, pp. 105166-1–105166-7. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2019.105166.

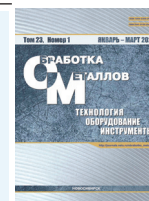
Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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

Инвариантные показатели напряженного состояния при кузнечной осадке магния в оболочке

Юрий Логинов^{1, 2, а, *}, Юлия Замараева^{1, 2, б}¹ Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия² Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия^а  <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>,  j.n.loginov@urfu.ru, ^б  <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>,  zamaraevajulia@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.7.01

История статьи:

Поступила: 12 января 2021

Рецензирование: 25 января 2021

Принята к печати: 13 февраля 2021

Доступно онлайн: 15 марта 2021

Ключевые слова:

Магний

Пластичность

Осадку

Показатель напряженного состояния

Коэффициент Лоде

Метод конечных элементов

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90051.

АННОТАЦИЯ

Введение. Для обработки давлением малопластичных металлов приходится разрабатывать специальные приемы повышения пластичности. В холодном состоянии повышение пластических свойств возможно за счет повышения уровня сжимающих напряжений в процессе деформации. В процессах кузнечной осадки это достигается применением оболочек или обойм различного вида. При этом конфигурация инструмента для осадки тоже имеет значение. Для создания дополнительных напряжений сжатия и повышения пластичности металла рабочую поверхность инструмента можно конфигурировать иначе, чем при обычной свободной осадке, где она заведомо больше площади контактной поверхности заготовки, чтобы могло происходить уширение металла. Напряженное состояние оказывает большое влияние на пластичность обрабатываемого материала. Это состояние описывается методами тензорного представления, но для оценки ситуации принято применять инварианты тензоров в том или ином виде, что устраняет влияние координат на результаты анализа. В разделах механики деформируемого тела, касающихся влияния напряженного состояния на пластичность, используют первый, но иногда и другие инварианты тензора напряжений, сами инварианты трансформированы в показатель напряженного состояния и коэффициент Лоде. **Цель работы:** математическая оценка инвариантных показателей напряженного состояния процесса осадки магния при комнатной температуре, по результатам которых удалось получить положительный результат в условиях реальных экспериментов. **Методы исследования:** конечно-элементное моделирование с помощью программного модуля DEFORM. **Результаты и обсуждение.** Выполнено теоретическое обоснование повышения пластичности магниевой заготовки в процессе осадки в обойме без ее обжатия. Выявлено повышение показателя напряженного состояния по модулю в 2...5 раз, что способствует повышению пластичности металла. В то же время выявлена зона с коэффициентом Лоде, близким к нулю. Она прилегает к середине высоты заготовки в месте контакта с обоймой и может являться опасным сечением с позиции возникновения трещинообразования.

Для цитирования: Логинов Ю.Н., Замараева Ю.В. Инвариантные показатели напряженного состояния при кузнечной осадке магния в оболочке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 79–88. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-79-88.

Введение

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением необходимо учитывать пластические свойства металла. Для малопластичных металлов приходится разрабатывать специальные приемы повышения пластичности. В основном усилия направлены на

повышение уровня пластических свойств за счет повышения температуры. Однако такой подход не всегда устраивает разработчиков технологии, поскольку ряд металлов при повышении температуры начинает окисляться с поверхности либо происходит процесс газонасыщения металла и в его объеме. Особенно это характерно для таких металлов, как титан [1] и магний [2]. Поэтому может иметь место и такой подход, в котором обработка осуществляется в холодном состоянии, а пластичность увеличивается за счет повышения уровня сжимающих напряжений [3] в процессе деформации.

*Адрес для переписки

Замараева Юлия Валентиновна, м.н.с.

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
ул. Софьи Ковалевской, 18,
620137, г. Екатеринбург, РоссияТел.: +7-950-200-56-79, e-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

В процессах кузнечной осадки это достигается применением оболочек или обойм различного вида [4–6]. При этом конфигурация инструмента для осадки тоже имеет значение. Например, при обычной свободной осадке инструмент имеет рабочую поверхность, площадь которой заведомо больше площади контактной поверхности заготовки, чтобы могло происходить уширение металла. Здесь процессу деформации препятствуют только напряжения трения, создающие дополнительные радиальные и тангенциальные напряжения, повышающие гидростатическое давление. Однако рабочую поверхность можно конфигурировать иначе, что создаст дополнительные напряжения сжатия и будет повышена пластичность металла. Сочетание заготовки и оболочки создает конфигурацию биметалла, из-за этого приходится применять сложные варианты решения краевых задач, которые в последнее время решаются все чаще методом конечных элементов [7].

Напряженное состояние оказывает большое влияние на пластичность обрабатываемого материала. Это состояние описывается методами тензорного представления, но для оценки ситуации принято применять инварианты тензоров в том или ином виде, что устраняет влияние координат на результаты анализа. В разделах механики деформируемого тела, касающихся влияния напряженного состояния на пластичность, используют первый, но иногда и другие инварианты тензора напряжений [8], сами инварианты трансформированы в показатель напряженного состояния [9, 10] и коэффициент Лоде [11, 12].

Применение оболочки в более ранних исследованиях процесса осадки было связано с применением схемы воздействия рабочего инструмента одновременно на торец заготовки и на торец оболочки. Другая более новая схема, по которой инструмент воздействует лишь на торец заготовки, была опробована только экспериментально [13], при этом удалось получить магниевую заготовку без разрушения и трещин. Известно, что за повышение пластичности металла в процессах пластической деформации отвечают инварианты тензора напряжений.

Целью работы является математическая оценка инвариантных показателей напряженного состояния процесса осадки магния в оболочке при воздействии инструмента только на торец заготовки.

Методика исследований

Экспериментальная часть

Физические эксперименты выполнены на кузнечно-прессовом оборудовании института физики металлов УрО РАН, их подробное описание изложено в ряде публикаций [13–15]. Во избежание самоцитирования ниже изложена только сущность процесса. В качестве материала заготовки применили магний марки Mg90 по ГОСТ 804–93. В эксперименте приняты следующие размеры: заготовка в форме цилиндра из магния диаметром 21,8 мм и высотой 25 мм, медная обойма имеет наружный диаметр 48 мм и высоту 29,5 мм, внутренний диаметр обоймы равен диаметру магниевой заготовки. Осадку осуществляли пуансонами диаметром 25 мм. Абсолютное обжатие составило величину 5,9 мм. Диаметр обоймы увеличился до 49,8...50,2 мм на контакте с бойками и до 52,9...53,2 мм в средней части. В экспериментах по этой схеме не выявлено разрушение металла заготовки. В то же время при обычной осадке заготовка разрушалась.

Расчетная часть

В данной работе речь идет о вычислительном эксперименте – оценке напряженно-деформированного состояния процесса деформации, реализация которого позволила сообщить определенный уровень деформации магниевым заготовкам в холодном состоянии. Такая оценка выполнена методом конечных элементов с помощью программного модуля DEFORM [16]. Задачей является определение условий отсутствия трещинообразования, т. е. разрушения металла. Далее будут использованы основы теории разрушения, изложенные, например, в книге [17]. Разрушение наступает при превышении предельной степени деформации сдвига Λ_p , которая, в свою очередь, зависит от показателя напряженного состояния σ/T и коэффициента Лоде μ_σ , здесь σ – среднее (гидростатическое) напряжение, T – интенсивность касательных напряжений, связанная с интенсивностью напряжений σ_i соотношением

$$T = \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}}. \quad (1)$$

Показатель μ_σ определяется соотношением

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (2)$$

где σ_i ($i = 1, 2, 3$) – главные нормальные напряжения, при этом напряжения ранжированы по правилу $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, т. е. нумерация начинается максимальным напряжением и заканчивается минимальным.

Системой DEFORM предусмотрена возможность расчета максимального (первого) и минимального (третьего) главных нормальных напряжений, однако второе главное напряжение не рассчитывается. Поэтому его определили специально расчетом по формуле

$$\sigma_2 = 3\sigma - (\sigma_1 + \sigma_3). \quad (3)$$

Одна из других проблем – отсутствие в перечне переменных, рассчитываемых в системе DEFORM: показателя напряженного состояния σ/T и коэффициента Лоде μ_σ , их рассчитывали специально и приводили к табличному виду.

В схеме холодной осадки магниевой заготовки для достижения более высокой пластичности было предложено применить оболочку и изменить конфигурацию поверхности инструмента [18]. Отличие от обычных схем применения оболочки заключается в том, что оболочка больше по высоте, чем заготовка, а пуансон воздействует не в целом на сборку, а только на заготовку (рис. 1, а). В качестве материала оболочки использована медь, ее свойства описаны с использованием справочных материалов.

Постановка задачи включала в себя описание физических и пластических свойств на основе справочных данных, а задание граничных условий – в перемещениях. Использовали модель

изотропной среды с упрочнением, которая описана в статье [19].

Установлены взаимодействия на контактных поверхностях: заготовка – бойки, заготовка – оболочка. На контакте с инструментом задан закон трения по Кулону с коэффициентом трения 0,1, поскольку осадку осуществляли со смазкой. На границе между заготовкой и обоймой смазка отсутствует, и поскольку оба материала – медь и магний – обладают повышенными адгезионными свойствами, то коэффициент трения на этой поверхности приняли равным 0,5.

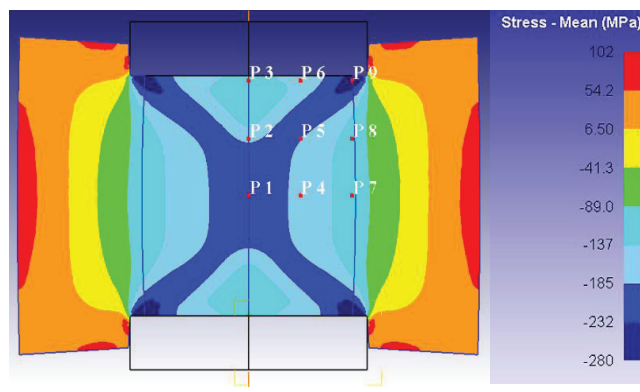
Результаты и их обсуждение

Параметр σ/T не входит в число определяемых программным модулем DEFORM так же, как и параметр T . Для дополнительных расчетов пришлось назначить контрольные точки P1, ..., P9, установив относительные координаты $z/h = 0; 0,5; 1$; $r/R = 0; 0,5; 1$. Здесь z и r – текущие координаты по радиусу и вертикальной оси; h и R – половина высоты и радиус заготовки. В этих точках выполнена оценка значений параметра stress mean, которые соответствуют понятию среднего напряжения (рис. 1, б), и параметра stress effective, которые соответствуют понятию интенсивности напряжений $\sigma_{\text{и}}$ (рис. 2).

Естественно, что в оболочке действуют преимущественно растягивающие средние напряжения до +102 МПа (рис. 1, б), их наличие создает опасность разрушения, именно поэтому здесь использован такой пластичный материал,



а



б

Рис. 1. Фото сборки (а) и расчетная модель процесса (б) осадки магниевой заготовки в оболочке с оценкой средних напряжений (stress mean)

Fig. 1. Photo of the assembly (a) and calculation model of the process (b) upsetting of a magnesium billet in a shell with an estimation of mean stresses (stress mean)

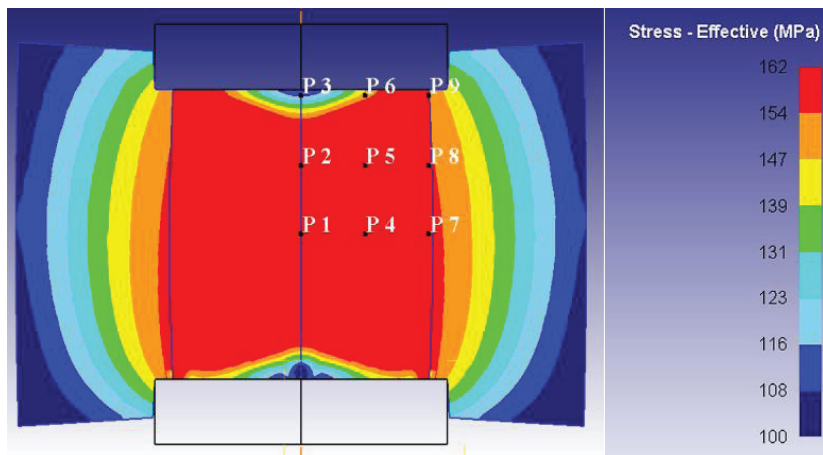


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений

Fig. 2. The distribution of stress intensity

как медь. Распределение средних напряжений в магниевой заготовке напоминает картину «ковочного креста», известного из теорииковки. Здесь зона повышенных (по модулю) значений вытянута вдоль диагоналей по продольному сечению заготовки с достижением напряжения – 280 МПа. При обычной ковке как раз вдоль линий «ковочного креста» возможен раскол заготовки. В данном случае наличие высоких (по модулю) значений среднего нормального напряжения позволяет надеяться на увеличение уровня пластичности, что должно предотвратить разрушение.

Иная картина наблюдается для распределения интенсивности напряжений (рис. 2): они уменьшаются от центра к периферии, т. е. по направлению к свободной поверхности. Градиент напряжений особенно велик на границе раздела заготовки и оболочки, что объясняется различием в механических свойствах материалов. В зонах затрудненной деформации, примыкающих к центрам торцов пуансонов, интенсивность напряжений падает, что обусловлено отсутствием упрочнения металла в этой области.

Расчетные данные по показателю напряженного состояния в контрольных точках P1-P9 представлены в табл. 1.

Поскольку пластичность металлов уменьшается с увеличением показателя σ/T , то из таблицы следует, что опасные зоны прилегают к точкам с координатами $z/h = 0$ и $r/R = 1$. Вместе с тем значения σ/T везде имеют отрицательные значения, т. е. преобладают напряжения сжатия. Из таблицы видно, что показатель σ/T может

варьироваться на этой стадии обработки в пределах $-1,21 \dots -3,02$. Наибольшие по модулю значения на уровне $-3,02$ характерны для периферийных точек, прилегающих к контактной поверхности. При этом неблагоприятные (наименьшие по модулю) значения находятся в районе выпуклости боковой поверхности. Возможно сравнение полученных результатов с результатами осадки цилиндрической заготовки на гладких бойках без трения. Как известно, в этом случае показатель напряженного состояния по всему объему заготовки одинаков и равен величине $-0,58$. При сравнении

этого значения с результатами, отраженными в таблице, мы видим, что произошло увеличение показателя по модулю в $2 \dots 5$ раз. Именно поэтому пластичность металла в опытах возросла и ее оказалось достаточно для осуществления операции осадки без разрушения.

Возможно также сравнение полученных результатов с вариантом осадки с трением цилиндрической заготовки в обойме с расположением всей сборки на контактной поверхности бойков. Такой вариант приводит к большей величине перемещения металла в зоне возникновения выпуклости боковой поверхности [20] и отходу оболочки от заготовки. При отсутствии подпора и образовании выпуклой поверхности средние нормальные напряжения в этой зоне могут перейти из области сжимающих в область растягивающих. Боковая поверхность заготовки при недостаточно высокой пластичности может разрушаться. Поэтому желательно, чтобы обойма не подвергалась действию осевых напряжений.

Распределение максимальных и минимальных главных напряжений отображено на рис. 3.

Таблица 1

Table 1

Показатель σ/T в контрольных точках P1–P9
Value of σ/T at P1–P9 control points

z/h	r/R		
	0	0,5	1
1	–1,99	–1,75	–3,02
0,5	–1,86	–2,01	–1,24
0	–2,15	–1,83	–1,21

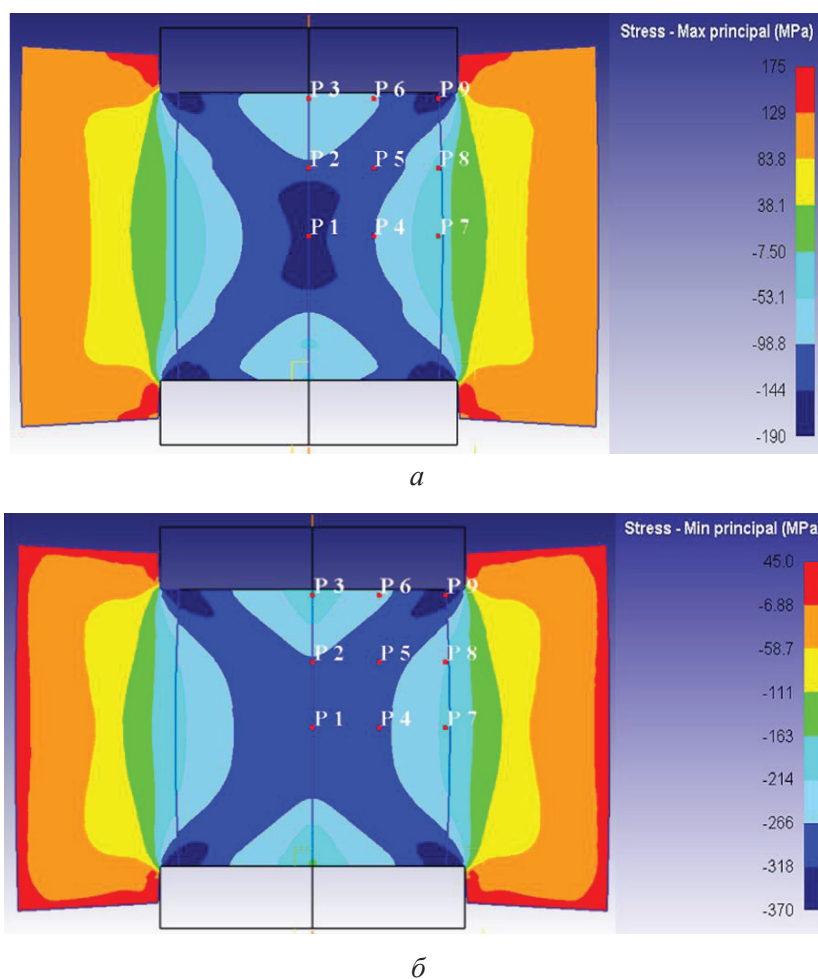


Рис. 3. Распределение максимального (а) и минимального (б) главного напряжения

Fig. 3. Distribution of the maximum (a) and minimum (b) principal stress

Видно, что схема ковочного креста повторяется и для главных напряжений. После расчета второго главного напряжения удалось рассчитать коэффициент μ_σ . Результаты расчетов главных нормальных напряжений приведены в табл. 2.

Видно, что все главные напряжения являются отрицательными величинами, т. е. они являются напряжениями сжатия. Опасность с позиции возможности разрушения представляют контрольные точки с наименьшими по модулю главными напряжениями. В их число входит точка P7

Таблица 2

Table 2

Главные нормальные напряжения (МПа) и коэффициент Лоде $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 / \mu_\sigma$ при относительных координатах

Principal normal stresses (MPa) and Lode coefficient $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 / \mu_\sigma$ at relative coordinates

z/h	r/R		
	0	0,5	1
1	-92/-92/-205/0,98	-95/-106/-248/0,86	-190/-262/-370/0,2
0,5	-119/-118/-279/0,98	-118/-153/-293/0,60	-39/-90/-219/0,43
0	-148/-148/-310/1,00	-104/-138/-280/0,61	-23/-111/-208/0,05

с координатами $z/h = 0$; $r/R = 1$, здесь $\sigma_1 = -23$ МПа. В этой же точке достигнуто значение коэффициента Лоде, близкое к нулю, в отличие от точек, расположенных на оси заготовки, где этот коэффициент близок к единице. При нулевом значении коэффициента Лоде пластичность оказывается самой низкой, на что указывает ряд работ [21, 22]. Поэтому указанную область можно считать опасным сечением с позиции трещинообразования.

Как видно из всех приведенных выше иллюстраций и результатов реального эксперимента, в исследуемом способе осадки не происходит отхода оболочки от заготовки. На протяжении всего процесса осадки на боковую поверхность заготовки действуют радиальные напряжения сжатия, повышающие пластичность металла и позволяющие провести деформацию без разрушения.

Закключение

Расчетами напряженно-деформированного состояния показано, что осадка магния в оболочке при воздействии прессового инструмента только на торец заготовки должна приводить к повышению пластичности металла, что ранее было показано экспериментально.

Выявлено повышение показателя напряженного состояния по модулю в 2...5 раз при сравнении его с показателем напряженного состояния при обычной осадке. При этом выявлена зона с коэффициентом Лоде, близким к нулю. Она прилегает к середине высоты заготовки в месте контакта с обоймой и может являться опасным сечением с позиции возникновения трещинообразования.

Список литературы

1. Kudiyarov V.N., Lider A.M., Harchenko S.Y. Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 880. – P. 68–73. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.68.
2. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion / M. Esmaily, J.E. Svensson, S. Fajardo, N. Birbilis, G.S. Frankel, S. Virtanen, R. Arrabal, S. Thomas, L.G. Johansson // *Progress in Materials Science*. – 2017. – Vol. 89. – P. 92–193. – DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.04.011.

3. Proust G. Processing magnesium at room temperature // *Science*. – 2019. – Vol. 364 (6448). – P. 30–31. – DOI: 10.1126/science.aax9732.

4. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion / L.L. Chang, Y.N. Wang, X. Zhao, J.C. Huang // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 496, iss. 1–2. – P. 512–516. – DOI: 10.1016/j.msea.2008.06.015.

5. Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Замараева Ю.В. Межслойное взаимодействие при осадке биметаллической заготовки // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2019. – № 7. – С. 41–45.

6. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets / F. Pan, Q. Wang, B. Jiang, J. He, Y. Chai, J. Xu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – Vol. 655. – P. 339–345. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.098.

7. Khanawapee U., Butdee S. A study of barrel-ing and DEFORM 3D simulation in cold upsetting of bi-material // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 26, pt. 2. – P. 1262–1270. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.252.

8. Malcher L., Mamiya E.N. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – Vol. 56. – P. 232–261. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.002.

9. Asymmetric yield function based on the stress invariants for pressure sensitive metals / J.W. Yoon, Y. Lou, J. Yoon, M.V. Glazoff // *International Journal of Plasticity*. – 2014. – Vol. 56. – P. 184–202. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.11.008.

10. Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys / L. Driemeier, G. Micheli, M. Alves, M. Brünig // *Mechanics of Materials*. – 2010. – Vol. 42, iss. 2. – P. 207–217. – DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.11.012.

11. Effect of the lode parameter in predicting shear cracking of 2024-t351 aluminum alloy Taylor rods / X. Xiao, Z. Mu, H. Pan, Y. Lou // *International Journal of Impact Engineering*. – 2018. – Vol. 120. – P. 185–201. – DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.06.008.

12. Mirone G., Corallo D. A local viewpoint for evaluating the influence of stress triaxiality and lode angle on ductile failure and hardening // *International Journal of Plasticity*. – 2010. – Vol. 26, iss. 3. – P. 348–371. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.07.006.

13. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Волков А.Ю. Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым

подпором // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 9. – С. 15–22.

14. Получение, структура, текстура и механические свойства сильно деформированных образцов магния / А.Ю. Волков, О.В. Антонова, Б.И. Каменецкий, И.В. Клюкин, Д.А. Комкова, Б.Д. Антонов // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 5. – С. 538–548. – DOI: 10.1134/S0031918X16050161.

15. Каменецкий Б.И., Логинов Ю.Н., Кругликов Н.А. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке // Технология легких сплавов. – 2012. – № 1. – С. 86–92.

16. Design Environment for forming: website. – 2021. – URL: <http://www.DEFORM.com> (accessed: 08.02.2021).

17. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 2001. – 834 с.

18. Логинов Ю.Н., Замараева Ю.В., Каменецкий Б.И. Осадка цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке без ее обжата // Цветные металлы. – 2020. – № 4. – С. 77–82. – DOI: 10.17580/tsm.2020.04.09.

19. Комкова Д.А., Волков А.Ю. Структура и текстура магния после низкотемпературной мегапластической деформации // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2017. – № 3 (41). – С. 70–75.

20. Narayanasamy R., Pandey K.S. Phenomenon of barrelling in aluminium solid cylinders during cold upset-forming // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 70, iss. 1–3. – P. 17–21. – DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00035-6.

21. Ganjani M. A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle // European Journal of Mechanics – A/Solids. – 2020. – Vol. 84. – P. 104048. – DOI: 10.1016/j.euromechsol.2020.104048.

22. Смирнов С.В., Вичужанин Д.И., Нестеренко А.В. Комплекс испытаний для исследования влияния напряженного состояния на предельную пластичность металла при повышенной температуре // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 3. – С. 146–164. – DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.11.

Конфликт интересов

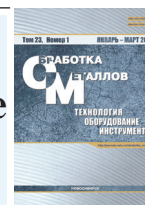
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2021 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Invariant stress state parameters for forging upsetting of magnesium in the shell

Yuriy Loginov^{1, 2, a, *}, Yuliya Zamaraeva^{1, 2, b}

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

² M.N. Mikheev Institute of Metal Physics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 18 S. Kovalevskaya str., Ekaterinburg, 620137, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-7222-2521>, j.n.loginov@urfu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2620-7064>, zamaraevajulia@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 12 January 2021

Revised: 25 January 2021

Accepted: 13 February 2021

Available online: 15 March 2021

Keywords:

Magnesium

Plasticity

Upsetting

Value of the stress state

Lode coefficient

Finite element method

Funding

The reported study was funded by RFBR according to the research project № 20-38-90051.

ABSTRACT

Introduction. For pressure treatment of low-plastic metals, it is necessary to develop special techniques for increasing plasticity. In the cold state, an increase in plastic properties is possible due to an increase in the level of compressive stresses during deformation. In the processes of forging precipitation, this is achieved by using shells or clips of various types. At the same time, the configuration of the precipitation tool also matters. To create additional compressive stresses and increase the ductility of the metal, the working surface of the tool can be configured differently than with a normal free draft, where it is obviously larger than the contact surface area of the workpiece, so that metal broadening can occur. The stress state has a great influence on the plasticity of the processed material. This state is described by methods of tensor representation, but to assess the situation, it is customary to use invariants of tensors in one form or another, which eliminates the influence of coordinates on the results of the analysis. In the sections of deformable body mechanics dealing with the influence of the stress state on plasticity, the first, but sometimes other invariants of the stress tensor are used, the invariants themselves are transformed into the stress state indicator and the lode coefficient. **The aim of the work:** mathematical evaluation of invariant parameters of the stress state of the magnesium precipitation process at room temperature, according to the results of which it is possible to obtain a positive result in real experiments. **Research methods:** finite element simulation using the DEFORM software module. **Results and discussion.** The theoretical justification of increasing the plasticity of the magnesium billet in the process of precipitation in the cage without its compression is carried out. An increase in the stress state index modulo 2...5 times is revealed, which contributes to an increase in the plasticity of the metal. At the same time, a zone with a lode coefficient close to zero is identified. It is adjacent to the middle of the height of the workpiece at the point of contact with the cage and can be a dangerous cross-section from the position of crack formation.

For citation: Loginov Yu.N., Zamaraeva Yu.V. Invariant stress state parameters for forging upsetting of magnesium in the shell. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 79–88. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-79-88. (In Russian).

References

1. Kudiiarov V.N., Lider A.M., Harchenko S.Y. Hydrogen accumulation in technically pure titanium alloy at saturation from gas atmosphere. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 880, pp. 68–73. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.880.68.
2. Esmaily M., Svensson J.E., Fajardo S., Birbilis N., Frankel G.S., Virtanen S., Arrabal R., Thomas S., Johansson L.G. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion. *Progress in Materials Science*, 2017, vol. 89, pp. 92–193. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.04.011.

* Corresponding author

Zamaraeva Yuliya V., Junior researcher

M.N. Mikheev Institute of Metal Physics

of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

18 S. Kovalevskaya str.,

620137, Ekaterinburg, Russian Federation

Tel.: +7-950-200-56-79, e-mail: zamaraevajulia@yandex.ru

3. Proust G. Processing magnesium at room temperature. *Science*, 2019, vol. 364 (6448), pp. 30–31. DOI: 10.1126/science.aax9732.
4. Chang L.L., Wang Y.N., Zhao X., Huang J.C. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, vol. 496, iss. 1–2, pp. 512–516. DOI: 10.1016/j.msea.2008.06.015.
5. Loginov Yu.N., Kamenetsky B.I., Zamaraeva Yu.V. Mezhsloinoe vzaimodeistvie pri osadke bimetallicheskoj zagotovki [Interlayered interaction in the upsetting of the bimetallic billets]. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2019, no. 7, pp. 41–45.
6. Pan F., Wang Q., Jiang B., He J., Chai Y., Xu J. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, vol. 655, pp. 339–345. DOI: 10.1016/j.msea.2015.12.098.
7. Khanawapee U., Butdee S. A study of barreling and DEFORM 3D simulation in cold upsetting of bi-material. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, pt. 2, pp. 1262–1270. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.252.
8. Malcher L., Mamiya E.N. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant. *International Journal of Plasticity*, 2014, vol. 56, pp. 232–261. DOI: 10.1016/j.ijplas.2014.01.002.
9. Yoon J.W., Lou Y., Yoon J., Glazoff M.V. Asymmetric yield function based on the stress invariants for pressure sensitive metals. *International Journal of Plasticity*, 2014, vol. 56, pp. 184–202. DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.11.008.
10. Driemeier L., Micheli G., Alves M., Brünig M. Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys. *Mechanics of Materials*, 2010, vol. 42, iss. 2, pp. 207–217. DOI: 10.1016/j.mechmat.2009.11.012.
11. Xiao X., Mu Z., Pan H., Lou Y. Effect of the lode parameter in predicting shear cracking of 2024-t351 aluminum alloy Taylor rods. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, vol. 120, pp. 185–201. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.06.008.
12. Mirone G., Corallo D. A local viewpoint for evaluating the influence of stress triaxiality and lode angle on ductile failure and hardening. *International Journal of Plasticity*, 2010, vol. 26, iss. 3, pp. 348–371. DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.07.006.
13. Kamenetsky B.I., Loginov Yu.N., Volkov A.Yu. Metody i ustroystva dlya povysheniya plastichnosti khrupkikh materialov pri kholodnoi osadke s bokovym podporom [Methods and apparatus for increase of brittle materials plasticity under cold upsetting with lateral support]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking productions in mechanical engineering*, 2013, no. 9, pp. 15–22.
14. Volkov A.Yu., Antonova O.V., Kamenetskii B.I., Klyukin I.V., Komkova D.A., Antonov B.D. Poluchenie, struktura, tekstura i mekhanicheskie svoystva sil'no deformirovannykh obrabotok magniya [Production, structure, texture, and mechanical properties of severely deformed magnesium]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, iss. 5, pp. 518–528. DOI: 10.1134/S0031918X16050161. (In Russian).
15. Kamenetsky B.I., Loginov Yu.N., Kruglikov N.A. Vliyanie uslovii bokovogo podpora na plastichnost' magniya pri kholodnoi osadke [The effect of lateral back pressure conditions on magnesium plasticity during cold upsetting]. *Tekhnologiya legkikh spлавov = Technology of light alloys*, 2012, no. 1, pp. 86–92.
16. Design Environment for forming: website. 2021. Available at: <http://www.DEFORM.com> (accessed 08.02.2021).
17. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal processing by pressure]. Ekaterinburg, Ural State Technical University Publ., 2001. 834 p.
18. Loginov Yu.N., Zamaraeva Yu.V., Kamenetskiy B.I. Osadka tsilindricheskoi magnievoi zagotovki v mednoi obolochke bez ee obzhatiya [Upsetting of cylinder magnesium blanks in copper casing without compression]. *Tsvetnye metally*, 2020, no. 4, pp. 77–82. DOI: 10.17580/tsm.2020.04.09. (In Russian).
19. Komkova D.A., Volkov A.Yu. Struktura i tekstura magniya posle nizkotemperaturnoi megaplasticheskoi deformatsii [Magnesium structure and texture after the low-temperature megaplastic deformation]. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta = Science Vector of Togliatti State University*, 2017, no. 3 (41), pp. 70–75.

20. Narayanasamy R., Pandey K.S. Phenomenon of barrelling in aluminium solid cylinders during cold upset-forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 70, iss. 1–3, pp. 17–21. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00035-6.

21. Ganjiani M. A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 2020, vol. 84, p. 104048. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2020.104048.

22. Smirnov S.V., Vichuzhanin D.I., Nesterenko A.V. Kompleks ispytaniy dlya issledovaniya vliyaniya napryazhennogo sostoyaniya na predel'nyuyu plastichnost' metalla pri povyshennoi temperature [A set of tests for studying the effect of the stress state on ultimate metal plasticity at high temperature]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika = PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, vol. 3, pp. 146–164. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.11.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ НАУЧНОЙ СТАТЬИ

Оформление статьи, подаваемой в научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» должно соответствовать по стилю и содержанию требованиям журнала http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules. Статьи, не соответствующие этим требованиям, отклоняются и не рассматриваются редакционным советом. Кроме того, текст работы должен быть внимательно прочитан всеми авторами (а не одним автором, как это зачастую бывает), так как все авторы несут коллективную ответственность за содержание работы.

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.

Избегайте:

- неряшливости, например, многочисленных опечаток, небрежного стиля, маленьких иллюстраций, уравнений с ошибками и др.;

- длинного текста (абзаца), содержащего избыточные высказывания.

Научная статья должна иметь структуру **IMRAD (Introduction, Methods, Results And Discussion)**:

- название (*Title*);
- аннотация (*Abstract*);
- введение (*Introduction*);
- методы (*Methods*);
- результаты (*Results*);
- обсуждение (*Discussion*);
- заключение (*Conclusion*);
- благодарности, финансирование (*Acknowledgements / Funding*);
- список литературы (*References*).

ЗАГЛАВИЕ

Название должно отражать основную идею выполненного исследования и быть по возможности кратким.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны имя и фамилия автора (ов). Ниже – полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны. Для каждого из авторов обязательно указывается его уникальный идентификационный код *ORCID (Open Researcher and Contributor ID)* и электронная почта (*e-mail*). Если отсутствует *ORCID*, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Указывается индекс универсальной десятичной классификации (УДК). Для англоязычной части статьи УДК указывать не надо.

Ключевые слова

Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний) должны отображать и покрывать содержание работы. Ключевые слова служат профилем вашей работы для баз данных.

АННОТАЦИЯ (РЕФЕРАТ)

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен

быть 200...250 слов. **Объем аннотации/реферата на английском языке должен быть не менее 250 слов!** Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05–2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.

АДРЕС ДЛЯ ПЕРЕПИСКИ

Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СТАТЬИ

ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Введение» должен быть использован для того, чтобы определить место вашей работы (подход, данные или анализ). Подразумевается, что существует нерешенная или новая научная проблема, которая рассматривается в вашей работе. В связи с этим в разделе следует представить краткий, но достаточно информированный литературный обзор (до 2 стр.) по состоянию обозначенной проблемы. 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.

МЕТОДЫ / МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

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 Государственному стандарту.

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 прочее; для величин, которые были вычислены, – методы, используемые для их вычисления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации, перечисленные выше, 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 выявления причинно-следственных связей не украшают работу.

Сравнение ваших числовых результатов с числовыми результатами, полученными кем-то другим, может быть информативным. Однако оно ничего не доказывает. Контроль при помощи сравнения с общеизвестными решениями и проверка при помощи сравнения с экспериментальными данными являются обязательными.

Обсуждение

Необходимо использовать этот раздел, для того чтобы в полном объеме объяснить значимость вашего подхода, данных или анализа и результатов, а также для упорядочения и интерпретации результатов. Цель данного раздела – показать, какие знания были получены в результате вашей работы, и обозначить 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. Обязанностью автора является упорядочение данных и систематическое представление результатов. Так, простой отчет о результатах испытаний без попытки исследовать внутренние механизмы не имеет большой ценности.

ВЫВОДЫ

Этот раздел обычно начинается с нескольких фраз, подводящих итог проделанной работе, а затем в виде списка представляются основные выводы. Следует быть лаконичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области. Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие **DOI** публикации. Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников. Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте. Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий. Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности. Ссылки на неопубликованные работы недопустимы. Самоцитирование не должно превышать 15–17 %. Если работа была издана и на русском, и на английском (или других) языках, то в **Списке литературы** и в **References** лучше давать ссылку на переводную работу. В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5–2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе **BSI** (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>). Правила оформления англоязычного блока статьи представлены на сайте журнала в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторам необходимо указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

В этом разделе необходимо указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых следует использовать следующую формулировку: «**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов**» (соответственно в англоязычной части необходимо использовать следующую формулировку: «**The author declare no conflict of interest**»).

Общие рекомендации по набору текста представлены на сайте в разделе «Правила оформления» http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov/rules.

*Редакция и редакционный совет 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 девяти 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 ^{31}P spectroscopy) are related to several pathophysiologic indices of epileptic dysfunction. With patients undergoing hippocampal resection, intraoperative ^{13}C -glucose turnover studies show a profound decrease in neurotransmitter (glutamate-glutamine) cycling relative to oxidation in the sclerotic hippocampus. Increased extracellular glutamate (which has long been associated with increased seizure likelihood) is significantly linked with declining energetics as measured by ^{31}P MR, as well as with increased EEG measures of Teager energy, further arguing for a direct role of glutamate with hyperexcitability.

Discussion: Given the important contribution that metabolic performance makes toward excitability in brain, it is not surprising that numerous aspects of mitochondrial and energetic state link significantly with electrophysiologic and microdialysis measures in human epilepsy. This may be of particular relevance with the self-propagating nature of mitochondrial injury, but may also help define the conditions for which interventions may be developed. © 2008 International League Against Epilepsy.

Фрагменты из рекомендаций авторам журналов издательства Emerald

Авторское резюме (реферат, abstract) является кратким резюме большей по объему работы, имеющей научный характер, которое публикуется в отрыве от основного текста и, следовательно, само по себе должно быть понятным без ссылки на саму публикацию. Оно должно излагать существенные факты работы и не должно преувеличивать или содержать материал, который отсутствует в основной части публикации. Авторское резюме выполняет функцию справочного инструмента (для библиотеки, реферативной службы), позволяющего читателю понять, следует ли ему читать или не читать полный текст.

Авторское резюме включает следующее.

1. Цель работы в сжатой форме. Предыстория (история вопроса) может быть приведена только в том случае, если она связана контекстом с целью.

2. Кратко излагая основные факты работы, помните 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, а также имейте 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 одно 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 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

Уважаемые Авторы, внимательно ознакомьтесь с правилами оформления статьи на сайте журнала!

ШАБЛОН ДЛЯ ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСИ

Синим цветом обозначены пояснения относительно того, что именно и как должно быть написано в данном разделе / подразделе.

После внесения соответствующих правок в разделы статьи необходимо удалить **синие подсказки**. В шаблон следует поместить все материалы и данные, которые, по вашему мнению, должны быть напечатаны в журнале (в том числе рисунки и таблицы). Заполненный шаблон статьи следует сохранить на компьютере и загрузить на сайт журнала.

Структурные особенности плазменных покрытий $B_4C-Ni-P$

(Заглавие статьи на русском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Елена Корниенко^{1, a, *}, Виктор Кузьмин^{2, b}, Александр Сивков^{3, c}

(Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a  <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  kormienko_ee@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  vikuzmin57@mail.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>,  SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793.71 *(Указывается индекс универсальной десятичной классификации)*

История статьи:

Поступила: 1 июня 2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: работа должна поступить не позже чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Рецензирование: *(Дата указывается редакцией)*

Принята к печати: *(Дата указывается редакцией)*

Доступно онлайн: *(Дата указывается редакцией)*

Ключевые слова:

Плазменное напыление,

Карбид бора,

$B_4C-Ni-P$,

Покрытие.

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

АННОТАЦИЯ

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **200...250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Для цитирования: Корниенко Е.Е., Кузьмин В.И., Сивков А.А. Структурные особенности плазменных покрытий $B_4C-Ni-P$ // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 30–50. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50.

(Авторами указывается примерная ссылка согласно ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка» на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

***Адрес для переписки**

Корниенко Елена Евгеньевна, к.т.н., доцент
Новосибирский государственный технический университет
пр. К. Маркса, 20,
630073, г. Новосибирск, Россия
Тел.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

Основная часть статьи

1. Введение

До двух страниц краткий обзор литературы по проблеме исследования, указаны нерешенные ранее вопросы, сформулирована и обоснована **цель и задачи** исследований.

2. Методика исследований

Теория (для теоретических работ) или **методика экспериментального исследования** (для экспериментальных работ). Следует избегать повторений, излишних подробностей и известных положений, подробных выводов формул и уравнений (приводить лишь окончательные формулы, пояснив, как они получены).

3. Результаты и их обсуждение

Раздел, содержащий краткое описание полученных экспериментальных и/или теоретических данных. Изложение результатов должно заключаться в выявлении обнаруженных закономерностей, а не в механическом пересказе содержания таблиц и графиков. Результаты рекомендуется излагать в прошедшем времени. Обсуждение должно содержать интерпретацию полученных результатов исследования (соответствие результатов гипотезе исследования, обобщение результатов исследования, предложения по практическому применению, предложения по направлению будущих исследований).

Рекомендации по набору текста

Текст набирается в русифицированном редакторе Microsoft Word. Формат оригиналов – А4. Старайтесь использовать только следующие шрифты: Times New Roman – для текста, Symbol – для греческих букв. Размер шрифта основного текста – 14 пт, параметры страницы – все поля 2 см. Выравнивание по ширине. Межстрочный интервал полуторный. Абзацный отступ – 1,25 см. Переносы включены. Рисунки, таблицы, графики, фотографии должны быть включены в текст статьи.

Не используйте более одного пробела – применяйте абзацные отступы и табуляцию.

Не заканчивайте строку нажатием клавиши «Enter» – используйте ее только для начала нового абзаца.

Реализуйте возможности, предоставляемые текстовым редактором: автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т. п.

Не набирайте кириллицу сходными по начертанию латинскими буквами, и наоборот.

Буква «ё» везде заменяется на «е», кроме фамилий и особых случаев.

Недопустимо тире «–» заменять дефисом «-».

В тексте и формулах (в том числе в индексах) латинские буквы набираются курсивом, а греческие и русские – прямым шрифтом.

Десятичные цифры в русскоязычных текстах набираются через запятую (0,5), а в англоязычных – через точку (0.25 вместо 0,25).

Рекомендации по набору формул

Формулы, структурные химические формулы и схемы располагаются по месту в тексте статьи.

Знаки *, ', $\pm$, одиночные буквы греческого алфавита, одиночные наклонные или полужирные буквы, одиночные переменные или обозначения, у которых есть только верхний или только нижний индекс, единицы измерения, цифры в тексте, а также простые математические или химические формулы (например, $a^2 + b^2 = c^2$, H_2SO_4) должны набираться в текстовом режиме **без использования редактора формул**.

Выносные математические формулы (оформляемые отдельной строкой) должны набираться с использованием редактора формул (Microsoft Equation). Набор формул из составных элементов, где часть формулы – таблица, часть – текст, часть – внедренная рамка, не допускается.

Для формул, набранных в редакторе формул, должны использоваться общие установки шрифтов, размера символов и их размещения. Их принудительное ручное изменение для отдельных символов или элементов формул не допускается!

Рекомендации по набору таблиц

Таблицы располагаются в тексте рукописи.

Таблицы нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. После номера должно следовать ее **название (на русском и на английском языке!)**.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблиц по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения. Например: t , °C; V , об.%; HV, МПа и т.п.

Сокращения слов в таблицах не допускаются.

Создавайте таблицы, используя возможности MS Word (Таблица – Добавить таблицу) или MS Excel. Таблицы, набранные вручную с помощью пробелов или табуляций, не могут быть использованы.

Т а б л и ц а
Table

Данные микрорентгеноспектрального анализа различных участков покрытия
The data of micro-X-ray spectral analysis of various areas of coating

№ участка / No area	Химический элемент, ат. % / Chemical element, at. %				
	Ni	B	C	O	P
1	0.08	86.55	13.03	0.3	0.02
2	57.71	22.73	8.22	2.12	9.22
3	40.37	44.53	10.23	2	2.87
4	49.65	25.69	13.10	3.23	8.33
5	44.26	26.06	7.35	9.36	12.97

Сокращения и аббревиатуры

Следует избегать сокращений. Все имеющиеся в тексте сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

Сокращения из нескольких слов разделяются пробелами (760 мм рт. ст.; т. пл.; пр. гр.), за исключением общеупотребительных (и т.д.; и т.п.; т.е.) и аббревиатур (РФА, КПД и т. п.).

Аббревиатуры или формулы химических соединений, употребляемые как прилагательные, пишутся через дефис: ИК-спектроскопия, ПЭ-пленка, ЖК-состояние, Na^+ -форма, ОН-группа, но группа ОН.

Размерности

Размерности отделяются от цифры пробелом (17,5 моль/м³ (17.5 mol/m³); 77 К; 58 Дж/моль (58 J/mol), 50 м/с², 20 °C, 50 %, 10 ‰), кроме угловых градусов (90°).

Точка после размерностей не ставится (с – секунда, г – грамм, сут – сутки, град – градус). В сложных размерностях обязательно указывается знак умножения (·): Н·м/с или кг/(с·м·Па).

Для сложных размерностей допускается использование как отрицательных степеней: Дж·моль⁻¹·К⁻¹ или $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, так и скобок: $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ или $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$, если это облегчает их прочтение.

Главное условие – соблюдение единообразия одинаковых размерностей по статье.

При перечислении, а также в числовых интервалах размерность приводится лишь для последнего числа (10, 15 и 45 мин; от 18 до 20 мм; 30–40 Дж/моль), за исключением угловых градусов: 5°–10°, а не 5–10°.

Размерности переменных пишутся через запятую (E , Дж/моль или E , J/mol), а подлогарифмических величин – в квадратных скобках, без запятой: $\ln t$ [мин].

Точки и пробелы

Точка не ставится после названия статьи, списка авторов, списка организаций, заголовков и подзаголовков, названий таблиц и подрисуночных подписей.

Точка после сокращений не ставится в подстрочных индексах ($T_{\text{пл}}$ – температура плавления).

Ссылки на рисунки и таблицы набираются с пробелами (рис. 5, табл. 2).

Кавычки и скобки не отделяются пробелами от заключенных в них слов: (при 300 К), (а).

Между знаком номера или параграфа и числом должен быть пробел (№ 1; § 5.5).

Числа с буквами в обозначениях набирают без пробелов (IVd; 1.3.14a; рис. 1, а).

В географических координатах широты отделяются пробелами: 56,5 °С или 56,5 °N; 85,0 °В или 85,0 °E.

В географических названиях после точки ставится пробел: р. Енисей, г. Новосибирск.

Требования к иллюстрациям

Иллюстрации и подписи к ним располагаются в тексте рукописи.

Иллюстрации нумеруются по порядку упоминания их в тексте арабскими цифрами. В тексте должны быть ссылки на все рисунки.

Под каждым рисунком должна находиться соответствующая подрисуночная подпись (**на русском и на английском языке!**).

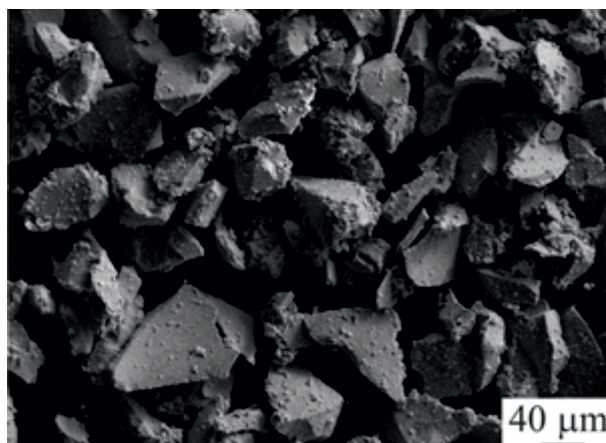


Рис. 1. Внешний вид частиц порошка $B_4C-Ni-P$

Fig. 1. The particles of $B_4C-Ni-P$ powder

Общие технические требования:

иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку) либо 17–17,5 см (на две колонки);

надписи и обозначения на иллюстрациях могут меняться между русской и английской версиями при переводе, поэтому для фотографий желательно предоставить второй вариант без текста и всех обозначений, для остальных иллюстраций – располагать надписи на иллюстрации так, чтобы они не соприкасались ни с какими ее частями;

на фотографиях (например, структур) обязательно должны быть указаны размерные метки;

для надписей и обозначений используйте стандартные TrueType шрифты;

просьба не добавлять на задний план иллюстраций серый (цветной) фон или сетки;

графики и диаграммы желательно готовить в векторных графических редакторах:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi;
- толщина линий должна быть не меньше 0,5 pt;

- векторные иллюстрации не должны содержать точечных закрасок, таких как «Noise» «Black&white noise» «Top noise»;

- для векторной графики все использованные шрифты должны быть включены в файл.

Штриховые иллюстрации и полутоновые иллюстрации:

- должны иметь разрешение не ниже 300 dpi;

комбинированные полутоновые/штриховые иллюстрации:

- должны иметь разрешение не ниже 600 dpi.

4. Выводы

Выводы по результатам работы, описанным в данной статье, должны быть лаконичным.

Список литературы

Список цитируемой литературы включает в себя источники, содержащие материалы, которые автор использовал при написании статьи, и оформляется по образцам, приведенным ниже. Состав литературных источников должен отражать состояние научных исследований в разных странах в рассматриваемой проблемной области.

Ссылки должны быть доступны научной общественности, поэтому приветствуется наличие DOI публикации.

Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.

Ссылки в тексте даются в квадратных скобках, например, [1] или [2–5]. Нумерация источников должна соответствовать очередности ссылок на них в тексте.

Ссылки на авторефераты диссертаций, диссертации на соискание ученой степени допускаются при наличии их доступных электронных версий.

Ссылки на учебники, учебные пособия, монографии должны иметь подчиненное значение и составлять не более 10–15 %, поскольку малодоступны широкой научной общественности.

Ссылки на неопубликованные работы недопустимы.

Самоцитирование не должно превышать 15–17 %.

Если работа была издана и на русском, и на английском языке (или других), то в Списке литературы и в References лучше давать ссылку на переводную работу.

В связи с вхождением журнала в базы цитирования научных публикаций помимо традиционного списка литературы (ГОСТ 7.0.5-2008) необходим дополнительный список с переводом русскоязычных источников на латиницу и английский язык. Применяется транслитерация строго по системе BSI (см. <http://ru.translit.net/?account=bsi>).

Финансирование

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Конфликт интересов

Указать наличие так называемого конфликта интересов, т. е. условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов».

Выражение признательности

Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем авторы статьи считают его значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Англоязычный блок статьи

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

(Заглавие статьи на английском языке. Название должно отражать основную идею выполненного исследования, быть по возможности кратким)

Elena Kornienko^{1, a, *}, Viktor Kuz'min^{2, b}, Alexander Sivkov^{3, c}

(Полный список авторов с указанием ФИО. Полностью должны быть написаны Имя и Фамилия автора (ов))

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institut'skaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

(Полное название организации для каждого из авторов с указанием улицы, номера дома, города, почтового индекса и страны)

^a  <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>,  kornienko_ee@mail.ru, ^b  <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>,  vikuzmin57@mail.ru,

^c  <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>,  SivkovAA@mail.ru

(Для каждого из авторов ОБЯЗАТЕЛЬНО указываются его уникальный идентификационный код ORCID (Open Researcher and Contributor ID) и электронная почта. Если отсутствует ORCID, то необходимо пройти по ссылке <https://orcid.org/> и зарегистрироваться в системе. После регистрации необходимо отредактировать свои персональные данные и список публикаций.)

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 1 June 2017 (Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)

Revised: (Дата указывается редакцией)

Accepted: (Дата указывается редакцией)

Available online: (Дата указывается редакцией)

Keywords:

Plasma spraying

Boron carbide

B₄C-Ni-P

Coating

(Ключевые слова (не более 15 слов и сочетаний))

ABSTRACT

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть **не менее 250 слов**. Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

For citation: Kornienko E.E., Kuz'min V.I., Sivkov A.A. Structure Features of B₄C-Ni-P Plasma Coatings. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 30–50. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-30-50. (in Russian)

(Авторами указывается примерная ссылка на будущую работу в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта)

* Corresponding author

Kornienko Elena E., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Novosibirsk State Technical University,

20 Prospekt K. Marksa,

630073, Novosibirsk, Russian Federation

Tel.: 8 (383) 346-11-71, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

(Указывается полностью ФИО, степень, звание, должность и место работы автора для переписки. Также в обязательном порядке должны быть представлены адрес, телефон и его электронная почта!)

References

(Список используемой литературы на английском языке подготавливается согласно правилам, представленным на сайте журнала)

Funding (Финансирование)

Указать источник(и) финансирования исследования (при наличии таковых, например, грант), используя, к примеру, следующее: «Исследование выполнено при финансовой поддержке (финансовом обеспечении) ...».

Conflicts of Interest (Конфликт интересов)

(Указать наличие так называемого конфликта интересов, то есть условий и фактов, способных повлиять на результаты исследования (например, финансирование от заинтересованных лиц и компаний, их участие в обсуждении результатов исследования, написании рукописи и т. д.). При отсутствии таковых использовать следующую формулировку: «The author declare no conflict of interest».)

Acknowledgements (Выражение признательности)

(Предоставляется возможность выразить слова благодарности тем, чей вклад в исследование был недостаточен для признания их соавторами, но вместе с тем считается авторами значимым (консультации, техническая помощь, переводы и пр.).

Сведения для РИНЦ

Раздел МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹Корниенко Елена Евгеньевна, ²Кузьмин Виктор Иванович, ³Сивков Александр Анатольевич

¹Новосибирский государственный технический университет,
пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

²Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

³Томский политехнический университет,
проспект Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

Корниенко Е.Е. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Кузьмин В.И. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Сивков А.А. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru

Структурные особенности плазменных покрытий В₄С-Ni-P

Аннотация

Аннотация к статье должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); структурированной (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть 200...250 слов). Аннотация должна включать следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

УДК 621.793.71

Ключевые слова:

плазменное напыление, карбид бора, В₄С-Ni-P, покрытие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бор в ядерной технике / В.Д. Рисованный, А.В. Захаров, Е.П. Клочков, Т.М. Гусева. – Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2011. – 668 с. ISBN 5-9483-016-7.

2. Fabrication and Tribological Evaluation of Vacuum Plasma-Sprayed В₄С / Н. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, X. Zheng // Coating Journal of Thermal Spray Technology. – 2012. – Vol. 21. – Iss. 6. – P. 1216-1223. – doi: 10.1007/s11666-012-9815-5.

(Список литературы оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Количество литературных ссылок должно быть не менее 20 с большей (более 50 %) долей зарубежных источников.)

Финансирование статьи:

Работа выполнена в рамках программы повышения конкурентоспособности ТПУ среди ведущих мировых исследовательских центров.

Дата поступления: 01.06.2017 *(Дата поступления работы в редакцию. Важно: Работа должна поступить не позже чем за 3 месяца до официального выхода номера в свет согласно графику. В исключительных случаях, по согласованию с редакцией журнала, срок приема статьи в ближайший номер может быть продлен, но не более чем на две недели.)*

Раздел MATERIAL SCIENCE

(Авторами указывается примерный раздел, в котором будет опубликована работа в данном журнале. Редакция оставляет за собой право осуществлять редактирование данного пункта.)

¹ Kornienko Elena E., ² Kuz'min Viktor I., ³ Sivkov Alexander A.

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

³ National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Kornienko E.E. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5874-5422>, e-mail: kornienko_ee@mail.ru

Kuz'min V.I. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9951-7821>, e-mail: vikuzmin57@mail.ru

Sivkov A.A. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7685-5502>, e-mail: SivkovAA@mail.ru.

Structure features of B₄C-Ni-P plasma coatings

Аннотация к статье **на английском языке** должна быть информативной (не содержать общих слов); оригинальной; содержательной (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); **структурированной** (следовать логике описания результатов в статье). Объем аннотации (реферата) должен быть не **менее 250 слов**). Аннотация должна включать в себя следующие аспекты содержания статьи: обоснование, предмет, цель работы; метод или методологию проведения работы; результаты работы; область применения результатов; выводы.

Keywords:

Plasma spraying, Boron carbide, B₄C-Ni-P, Coating

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТЫ

ISSN 1994-6309 (Print)

ISSN 2541-819X (Online)

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

«Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» – рецензируемый научно-технический и производственный журнал, издающийся с 1999 года с периодичностью 4 раза в год.

В журнале публикуются в основном результаты оригинальных фундаментальных, прикладных и поисковых научных исследований и аспирантских работ. Значительное внимание уделяется публикациям обзорных, проблемных и дискуссионных работ по актуальным вопросам машиностроения, материаловедения и современной металлургии. Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование. **Публикация статей бесплатная.**

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций.

Присутствуют разделы: «Технология», «Оборудование», «Инструменты», «Материаловедение», «Научно-техническая информация» и др.



В 2017 году журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» вошел в индекс цитирования *Emerging Sources Citation Index (ESCI)* базы *Web of Science*. Журналы, представленные в индексе цитирования *ESCI*, отвечают большинству базовых критериев *Core Collection* и расцениваются компанией *Clarivate Analytics* как наиболее влиятельные и востребованные издания, имеющие большую вероятность высокого научного интереса.



Полный текст журнала «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» можно найти в базах данных компании EBSCO Publishing на платформе EBSCOhost. EBSCO Publishing является ведущим мировым агрегатором научных и популярных изданий, а также электронных и аудиокниг.



Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук».

Правила представления статей для публикации и другая информация о журнале размещены на сайте научного издания:



http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, корп. 5, к. 137 ВЦ



+7 (383) 346-17-75



metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-23961 от 05 апреля 2006 г.
Print ISSN: 1994-6309 Online ISSN: 2541-819X
Индекс журнала в каталоге агентства «Роспечать» – 70590



НОВОСИБИРСК

РАСПРОСТРАНЕНИЕ

Структура распространения:

- по подписке (Индекс в каталоге агентства «Роспечать» – 70590);
- адресная почтовая рассылка авторам статей, по промышленным предприятиям, научным и учебным заведениям России;
- на выставках, конференциях.

Регионы распространения:

- Сибирь, Алтай, Дальний Восток – 60 %;
- Урал, Европейская часть РФ – 40 %.

Структура читательской аудитории

Преподаватели учебных заведений и научные сотрудники	64 %
Руководители (инжиниринговых предприятий, фирм-разработчиков и др.)	8 %
Ведущие специалисты предприятий (главные инженеры, технологи, конструкторы и т.д.)	11 %
Инженерно-технический состав предприятий и организаций	17 %

С 2015 г. опубликованным в журнале статьям присваивается цифровой идентификатор - *Digital Object Identifier (DOI)*. Метаданные каждой работы обязательно регистрируются в международном реестре научно-информационных материалов *CrossRef*.

Журнал индексируется в зарубежных базах данных и агрегаторах:

- Emerging Sources Citation Index (ESCI) Web of Science Core Collection;
- EBSCO (core) в базе «Applied Science & Technology Source Ultimate»;
- Ulrich's Periodicals Directory;
- ICI Journals Master List
- WorldCat;
- The European Library;
- AcademicKeys;
- Research Bible.

Журнал представлен:

- сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov;
- база данных eLibrary.ru, журнал индексируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ);
- реферативный журнал и база данных ВИНИТИ;

- электронно-библиотечная система издательства «ЛАНЬ»;
- национальный цифровой ресурс «РУКОНТ».

График выхода журнала в течение текущего года

Номер	Выход (число, месяц)
1	15.03
2	15.06
3	15.09
4	15.12

Адрес редакции журнала:

630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ), корп. 5, к. 137 ВЦ, зам. гл. редактора – В. Ю. Скиба.

 http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

 +7 (383) 346-17-75

 metal_working@mail.ru
metal_working@corp.nstu.ru



МЕРОПРИЯТИЯ

С 2014 г. научно-технический и производственный журнал «Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)» является организатором ежегодной (третья декада марта) Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении»/ «Actual Problems in Machine Building» совместно с «ИТЕ Сибирь» в рамках Международной выставки оборудования для металлообработки и сварки Mashex Siberia. По результатам конференции издается сборник материалов конференции.

Тематика работы конференции:

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

Официальный сайт конференции:

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

