

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 17
2021
№ 3 (195)
март

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

д.т.н., проф., заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф. В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф. А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф. О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.
В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.

В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.

Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.

Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.

Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.

В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Ян СУХАНЭК
Мариан СЧЕРЕК

Войтек ХОМИК

Редакция:

А.В. ОРЛОВА
С.В. ЧЕРНЫЙ

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Жуков В.В., Степанов С.А. Разделение кремниевых пластин на диски-кристаллы методом струйно-абразивной обработки 99



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Исаев А.Н., Власкин С.В., Лебедев В.А., Гавриленко М.Д. Деформационные искажения геометрической формы трубчатых заготовок в процессе дорнования отверстий 104

Мокрицкий Б.Я. Использование покрытий инструментального материала для диагностики технологической системы токарной обработки нержавеющей стали по составляющим силы резания 110

Табаков В.П., Адакин В.А., Чихранов А.В. Исследование остаточных напряжений в накатных роликах для холодного пластического деформирования шлицевого профиля на валах 113



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Агеева Е.В. Свойства псевдосплава ВНЖ-95, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в керосине 117



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Филатов Е.А., Ворначева И.В., Деденко В.Э. Изучение отливок из модифицированного жаропрочного сплава ЖСЗДК, их структура, фазовый состав и физико-механические свойства 122

Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Влияние дипинаконборатов на коррозионную стойкость стали Ст3 в растворах синтетических моющих средств 131

Усольцев А.А., Козырев Н.А., Михно А.Р., Тюрин А.А., Уманский А.А. Влияние введения титана в состав порошковой проволоки типа 25X5ФМС 135



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Поташникова Н.С., Смоленцев В.П., Поташников М.Г. Аддитивная технология создания инструмента для электроабразивной обработки 138

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 17
2021
№ 3 (195)
March

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council

Dr. of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYZYCHNYI

Editorial Assistant

Dr. of Phys.-Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:

Dr. of Eng. Sci. V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr. of Eng. Sci. A.V. KIRICHEK
Dr. of Eng. Sci. O.V. CHUDINA

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
S.A. KLIMENKO
N.K. KRIONI
V.P. KUZNETSOV
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAKHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.V. SLEPTSOV
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUKHOICHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS
Jan SUCHANEK
Marian SZCZEREK
Wojciech HOMIK

Edition:

A.V. ORLOVA
S.V. CHERNY

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Zhukov V.V., Stepanov S.A. Silicon wafers separation to disk-crystals by jet-abrasive processing 99



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Isaev A.N., Vlaskin S.V., Lebedev V.A., Gavrilenko M.D. Deformation distortions of geometric form tube blanks in the process of drilling holes 104

Mokritsky B.Ya. Use of tool material coatings for diagnostics of the technological system of turning stainless steels by the components of the cutting force 110

Tabakov V.P., Adakin V.A., Chikhranov A.V. Investigation of residual stresses in rolling rollers for cold plastic deformation of spline profile on shafts 113



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Ageeva E.V. Properties of WNiFe-95 pseudoalloy sintered from electroerosive powders obtained in kerosene 117



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Gadalov V.N., Petrenko V.R., Filatov E.A., Vornacheva I.V., Dedenko V.E. Study of structure, phase composition and physicomechanical properties of modified castings from heat-temperature ZhS3DK alloy 122

Strel'nikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Influence of dipinaconborates on the corrosion resistance of ST3 steel in synthetic detergent solutions 131

Usol'tsev A.A., Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Tyurin A.A., Umansky A.A. Influence of introduction of titanium into the composition of a powder wire of type 25X5FMS 135



PROCESSING BY COMBINED METHODS

Potashnikova N.S., Smolentsev V.P., Potashnikov M.G. Additive technology to create a tool for electroerosive processing 138

Reprint is possible only with the reference to the journal
"Strengthening technologies and coatings"

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology; 05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment; 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue "Pressa Rossii" 39269) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by Roskomnadzor. The certificate of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015



В.В. Жуков, канд. техн. наук, **С.А. Степанов**

(Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)

E-mail: zhukov-vv@yandex.ru

Разделение кремниевых пластин на диски-кристаллы методом струйно-абразивной обработки

Проанализированы способы применения метода струйно-абразивной обработки в электронной промышленности. Освещены особенности технологии и оборудования при разделении кремниевых пластин на диски-кристаллы круглой формы. Проведен сравнительный анализ результатов струйно-абразивной обработки и резки кремниевых пластин лазерным диском.

Ключевые слова: кремниевая пластина, диск-кристалл, струйно-абразивная обработка, абразивный материал, защитное покрытие.

The variants of application of the method of abrasive jet processing in the electronics industry are analyzed. The features of technology and equipment for dividing silicon wafers into circular disk crystals are highlighted. A comparative analysis of the results of jet-abrasive processing and cutting of silicon wafers with a laser disk is carried out.

Keywords: silicon plate, disk-crystal, jet-abrasive processing, abrasive material, protective coating.

Технология струйно-абразивной обработки находит широкое применение в электронной промышленности. Она используется для очистки поверхностей изделий электронной техники — технология Micro Blasting [1, 2], позволяющая обрабатывать хрупкие и тонкие детали уже готового изделия очень мелкими абразивными частицами (17,5...350 мкм).

Данная технология применяется для очистки поверхностей от оксидов и нежелательных включений, удаления защитных конформных покрытий с печатной платы при ее ремонте, удаления лака и других защитных покрытий с тонких проводников. Используемые при этом режимы обработки, материал абразива и его размер сильно разнятся в зависимости от обрабатываемой поверхности.

Так, технология Cold Jet использует ледяной абразив — сжатый воздух подхватывает сухой лед, в результате чего образуется струя быстро испаряющегося абразива. При этом температура абразива составляет $-78,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, что при соударении его с поверхностью создает уникальные термодинамические условия для термического удара и вследствие большой разницы температур взаимодействующий с абразивом слой материала скалывается. Затем углекислый газ начинает быстро расширяться и окончательно удаляет частицы материала, что можно сравнить с взрывным харак-

тером удаления. Давление при такой обработке колеблется в пределах от 0,5 до 2 МПа в зависимости от размера абразивных частиц.

Струйно-абразивный инструмент применяется также для резки, сверления, снятия заусенцев и фаски с кремниевых пластин, для маркировки электрических компонентов методом гравировки.

Этот способ обработки экологически чистый, не оставляет после себя химически опасных отходов и других загрязнений. При этом работу необходимо проводить без повреждения окружающих элементов или нижележащих слоев обрабатываемого материала, что обеспечивается точной настройкой режимов работы и применением временных защитных покрытий, закрывающих те участки поверхности, которые не должны подвергнуться воздействию абразивной струи. Таким покрытием является, например, защитная маска, применяемая при разрезании кремниевых пластин на отдельные компоненты для полупроводниковых приборов.

При изготовлении компонентов, выполненных по планарной технологии, разделение производится по изолирующим дорожкам (рис. 1, а). В случае если на пластине сформирована единая структура, на ее поверхность наносят маскирующее покрытие, повторяющее форму необходимых полупроводниковых элементов (рис. 1, б). После

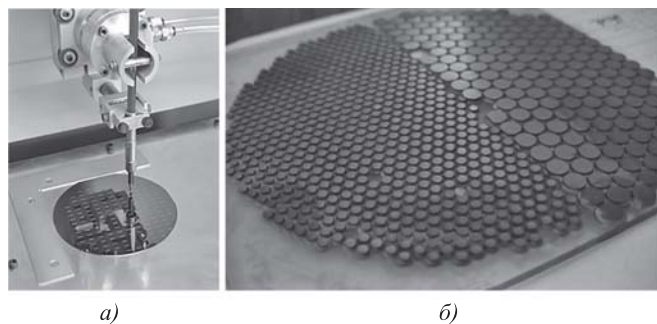


Рис. 1. Разделение полупроводниковых пластин:
 а — по изолирующим дорожкам; б — через маскирующее покрытие

Рис. 2. Выпрямительный диод в корпусе КД-29А:

а — общий вид диода; б — конструкция диода; 1 — кремниевый элемент; 2 — молибденные штифты; 3 — выводы; 4 — остеклованная поверхность



этого пластина подвергается струйно-абразивной обработке, в результате которой неизолированные участки кремния удаляются, и пластина разделяется на элементы, повторяющие форму маскирующего покрытия, что позволяет получать элементы любой формы.

По такой технологии изготавливают диски-кристаллы диодов классической конструкции, напри-

мер, в корпусе КД-29А (рис. 2). Для этого кремниевую пластину со сформированными на ней $p-n$ -переходами наклеивают на стеклянную подложку, а с другой стороны пластины наносят маскирующее покрытие, представляющее набор круглых металлических дисков, после чего пластина подвергается струйно-абразивной обработке. В процессе обработки кремний на незащищенных участках прорезается насквозь, а на подложке остаются полупроводниковые элементы, повторяющие форму защитного покрытия.

Разделение пластины происходит в два приблизительно равных по времени этапа (рис. 3). На первом этапе прорезается слой незащищенного кремния. Кремниевая пластина оказывается разделенной на отдельные диски-кристаллы, закрепленные на стеклянной подложке и прикрытые маскирующими дисками.

Особенностью процесса струйно-абразивной резки пластины является то, что обработанная абразивными частицами поверхность между дисками-кристаллами в поперечном разрезе имеет форму "клина" с переменным углом 2α при вершине, который по окончании первого этапа составляет $55...45^\circ$, что не соответствует предъявляемым к дискам требованиям.

Уменьшение угла наклона до требуемых 24° происходит во время второго этапа, когда продолжается обработка стеклянной подложки вглубь, с одновременным подрезанием боковых кромок диска-кристалла и уменьшением диаметра его основания.

Схема установки, обеспечивающей непрерывную обработку кремниевых пластин, показана на рис. 4.

Для обработки маскированных пластин 8 в пескоструйной камере 4 используют струйно-абразивное сопло 9, в которое из бункера 6 по гибкому трубопроводу всасывается абразивный материал. Сжатый воздух поступает к обрабатываемому соплу 9 по гибкому шлангу 2. Разогнанные сжатым воздухом частицы абразивного материала ударяются в пластину 8 и кремний удаляется с открытых участков, а закрытый маской кремний остается нетронутым.

Для откачки отработанного воздуха вместе с циркулирующими в нем частицами абразивного материала, кремния, металла и стекла, в крыше камеры 4 предусмотрен патрубок вытяжной вентиляции 1, на входе кото-

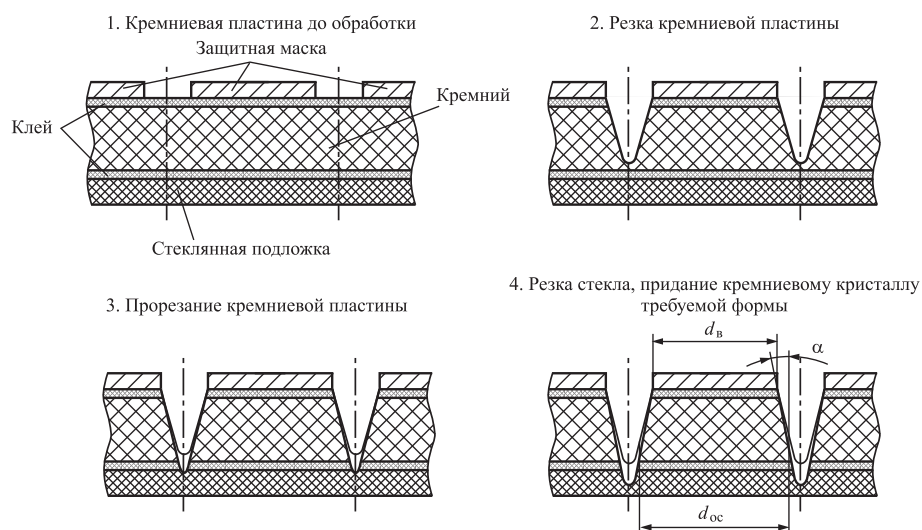


Рис. 3. Стадии разделения маскированной кремниевой пластины на диски-кристаллы при струйно-абразивной резке

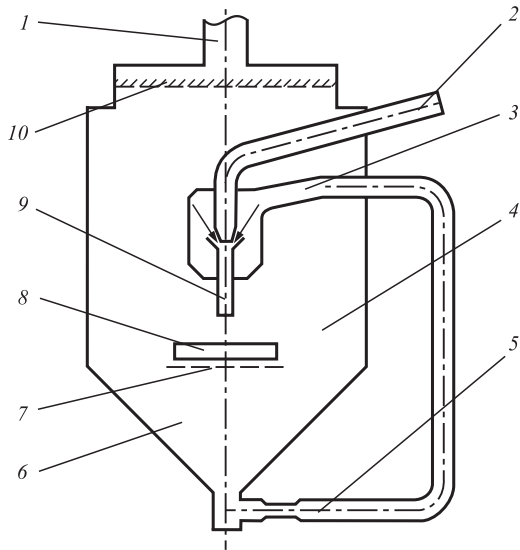


Рис. 4. Схема установки струйно-абразивной обработки кремниевой пластины:

1 — вытяжная вентиляция; 2 — гибкий трубопровод для подвода сжатого воздуха; 3 — трубопровод для абразивного материала; 4 — рабочая камера проходного типа; 5 — дозатор расхода абразивного материала; 6 — бункер для сбора абразива; 7 — механизм подачи пластин; 8 — обрабатываемая пластина; 9 — обрабатывающее сопло; 10 — фильтр осаждения абразивного порошка

рого для предотвращения выноса из камеры абразивных частиц установлен фильтр-отрагатель 10. Таким образом, выносятся более мелкие частицы кремния и металла, но задерживается абразивный материал, который в итоге осыпается обратно в бункер 6 для повторного использования.

Обработка обычно осуществляется в режиме непрерывной подачи пластин 8 с помощью транспортера 7 через шлюзы рабочей камеры при быстром

возвратно-поступательном движении обрабатывающих сопел 9, поэтому за счет взаимно-перпендикулярных движений пластины и сопла обеспечивается обработка всей поверхности пластины.

Описанный выше процесс обработки кремниевой пластины и параметры, обеспечивающие требуемые режимы работы, схематично показаны на рис. 5.

Для подготовки, нанесения и последующего удаления защитной маски используется вспомогательное оборудование: пресс для штамповки металлических защитных дисков или плоттер для резки ПВХ-пленки, специальные приспособления для нанесения на кремниевую пластину маскирующего покрытия, печь для сушки клеевого слоя — на этапе подготовки, а также ванны для травления дисков-кристаллов после резки, для размывки клеевого слоя, набор приспособлений для сепарации и измерительное оборудование для проверки электрических параметров — для последующей обработки кристаллов.

Маскирующее покрытие (рис. 6) характеризуется материалом маскирующего покрытия, способом его изготовления и нанесения на пластину, диаметром d маскирующего элемента размером зазора e между маскирующими элементами.

Типовым объектом обработки являются кремниевые пластины толщиной 150...350 мкм, однако проведенные опытные работы показывают, что метод также может применяться для обработки и разделения пластин из неметаллических материалов (керамика, стекло и т. п.) толщиной более 500 мкм.

Альтернативным методом разделения в условиях серийного выпуска компонентов для полупроводниковых диодов является резка алмазны-

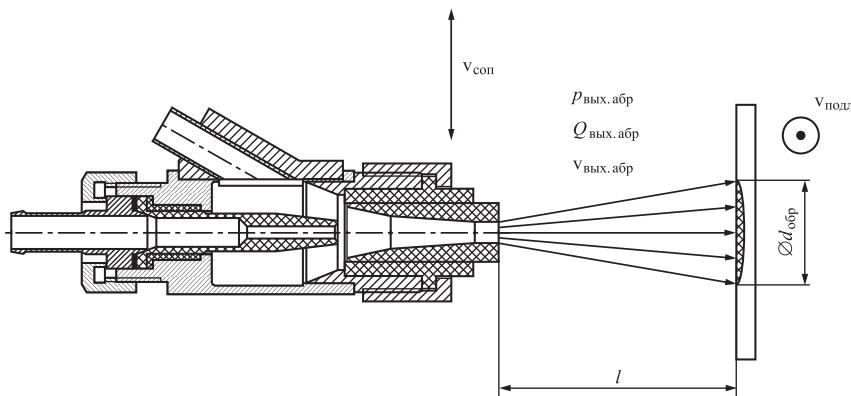


Рис. 5. Схема процесса обработки кремниевой пластины:

$P_{\text{вых.абр}}$, $Q_{\text{вых.абр}}$, $v_{\text{вых.абр}}$ — давление, расход и скорость абразивной режущей струи соответственно; $v_{\text{соп}}$ — скорость перемещения обрабатывающих сопел; $v_{\text{подл}}$ — скорость перемещения обрабатываемых подложек; l — расстояние между обрабатывающим соплом и обрабатываемой пластиной

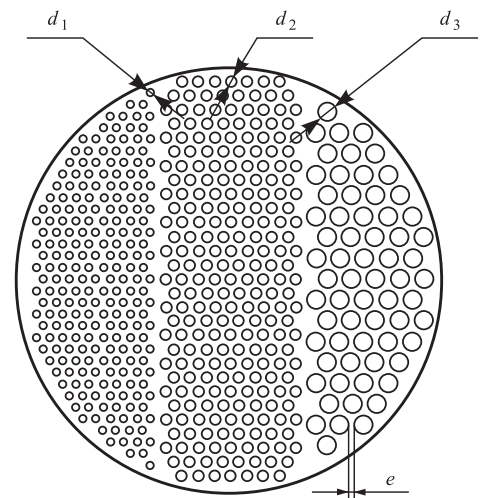


Рис. 6. Маскирующее покрытие

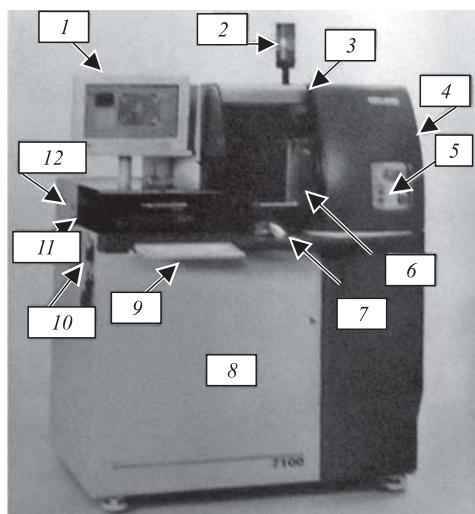


Рис. 7. Установка алмазной резки модели 7100:
 1 — монитор; 2 — световая вышка; 3 — блокировочный замок крышки режущего блока; 4 — основной автоматический выключатель; 5 — передняя панель; 6 — крышка режущего блока; 7 — мышка; 8 — передняя дверца; 9 — клавиатура; 10 — пневматический и водный пульверизаторы; 11 — крышка секции загрузки/разгрузки; 12 — блокировочный замок секции

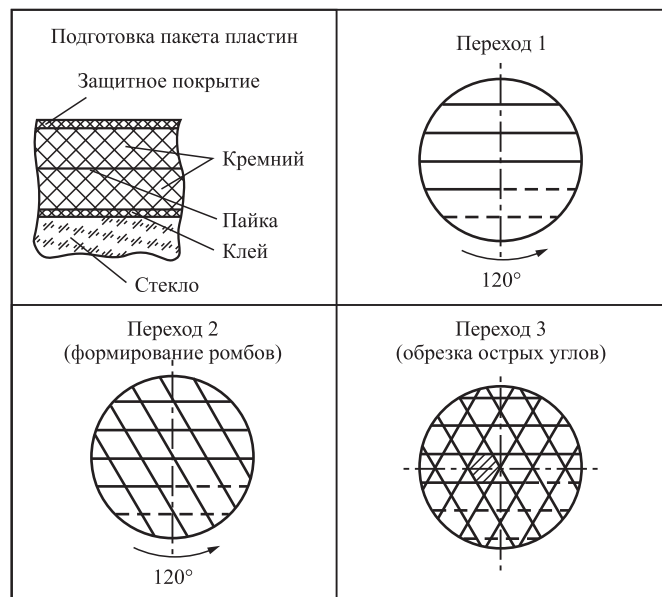


Рис. 8. Схема разделения маскированной кремниевой пластины на диски-кристаллы при алмазной резке

ми дисками. На рис. 7 представлен общий вид установки алмазной резки модели 7100 фирмы Advanced Picing Technologies Ltd. (ADT) (Израиль) [3]. Установка позволяет изготавливать диски-кристаллы, контур которых составлен из прямых линий (квадрат, ромб, шестиугольник и т. п.).

На рис. 8 приведена схема алмазной резки полупроводниковой подложки на шестигранные

диски-кристаллы, включающая три перехода операции резки с поворотом заготовки на угол 120°. Максимально возможная глубина резки алмазным диском составляет 10 мм. Форма диска-кристалла — шестигранник (см. рис. 6, переход 3) в отличие от круглого диска, получаемого при струйно-абразивной резке.

Резку пакета полупроводниковых пластин на шестигранные диски-кристаллы производили алмазным диском диаметром 30 мм и 25 мкм при частоте вращения диска $(30...40) \cdot 10^3 \text{ мин}^{-1}$, скорость подачи алмазного диска до 5 мм/с; время резки пакета из двух тонких кремниевых пластин составило 17 мин.

По условиям технологии пакет пластин может прорезаться на всю глубину только за один проход алмазного диска по заготовке, поэтому скорость его подачи существенно зависит от толщины пакета. При резке пакета из трех-четырех пластин ско-

Сравнительная оценка пескоструйной обработки и резки алмазным диском кремниевых пластин

Наименование параметра	Пескоструйная обработка	Резка алмазным диском
Время резки пакета из двух пластин, мин, не более	10	17
Количество разрезанных пластин в месяц (план), шт.	550	550
Подготовительные этапы при резке пакета пластин	Маскирование металлическими дисками	Маскирование, наклеивание на оснастку координатного стола
Потери кремния при производстве одного и того же количества кристаллов, %	34	30
Выход годных дисков-кристаллов, %	55	70
Количество дисков-кристаллов с условным диаметром 2 мм на одном пакете, шт.	840	840
Затраты на замену изношенного инструмента и материалов в месяц, руб.	До 6000	До 9000
Амортизационные отчисления, руб./год (срок окупаемости — 5 лет)	220 000	380 000

рость подачи алмазного инструмента необходимо снижать до 2 мм/с, что, соответственно, увеличивает время резки пакета пластин до 45...50 мин.

В таблице приведены сравнительные данные оценки струйно-абразивной обработки [4–7] и резки алмазным диском кремниевых пластин на примере месячной программы предприятия по резке пакетов пластин в количестве 550 штук (заготовка в виде пакета из двух кремниевых пластин толщиной 2 × 250 мкм).

Из таблицы видно, что по сравнению с резкой алмазными дисками способ маскирования и струйно-абразивной резки является более производительным и менее затратным. Вместе с тем очевидна необходимость совершенствования технологии и повышения выхода годных по размерам дисков-кристаллов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Удаление** защитного покрытия // Оборудование и материалы для микробластинга COMCO [электронный ресурс]. URL: <https://www.comcoinc.com/conformal-coating-removal/> (дата обращения: 24.11.2020).

2. **3 способа** микроабразивной обработки в электронной промышленности // Микроабразивно-струйное оборудование Airbrasive [электронный ресурс]. URL: <http://www.airbrasive.com/3-ways-micro-abrasive-blasting-powers-the-electronics-industry/> (дата обращения: 24.11.2020).

3. **Руководство** по установке, эксплуатации и техническому обслуживанию линии резки Pro VECTUS/ Фирма-изготовитель: Advanced Picing Technologies Ltd/ (ADT). Израиль. 2014. Полуавтоматическая установка дисковой резки серии ADT 7100. С. 24–32.

4. **Жуков В.В., Степанов С.А.** Исследование точности пескоструйной резки маскированных кремниевых пластин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 4. С. 43–47.

5. **Жуков В.В., Степанов С.А.** Универсальная камера для обработки маскированных поверхностей мелкодисперсным абразивным порошком // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 5. С. 11–16.

6. **Жуков В.В., Степанов С.А., Бычков С.П.** Разработка системы регенерации абразивного порошка для установок резки маскированных кремниевых пластин // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 4. С. 24–28.

7. **Жуков В.В., Степанов С.А., Горничев А.А.** Исследование процесса формообразования при пескоструйной обработке пакетированных кремниевых подложек // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электр. журн. 2016. № 1. С. 9.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

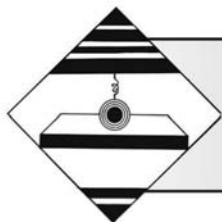
Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



А.Н. Исаев, д-р техн. наук, С.В. Власкин, В.А. Лебедев, д-р техн. наук, М.Д. Гавриленко
(Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону)
E-mail: anis101@yandex.ru

Деформационные искажения геометрической формы трубчатых заготовок в процессе дорнования отверстий

Рассмотрено влияние отклонений формы от округлости поперечных сечений труб на осесимметричное напряженное состояние и учет этого фактора в теоретических исследованиях и методах решения задач дорнования отверстий в упругопластическом режиме. Выявлены особенности выбора трубчатых заготовок, способствующие уменьшению неравномерности деформации и повышению точности обработки в процессе дорнования отверстий. Приведены рекомендации по устранению разностенности заготовок на этапе их подготовки к операции дорнования.

Ключевые слова: дорнование, напряжения, деформация, трубчатые заготовки, отклонения от округлости, разностенность, овальность сечения.

The influence of deviations of the shape of the cross-sections of pipes from roundness on the axisymmetric stress state and taking this factor into account in theoretical studies and methods for solving problems of mandrel drilling in the elastic-plastic mode are considered. The features of the choice of tubular blanks, which help to reduce the unevenness of deformation and increase the accuracy of processing in the process of mandrel drilling, are revealed. Recommendations are given for eliminating the variance in wall thickness of blanks at the stage of their preparation for the mandrel operation.

Keywords: hole tapping, stresses, deformations, tubular billets, deviations from roundness, difference, section ovality.

Введение

Для изготовления деталей с кольцевым поперечным сечением чаще всего используют бесшовные горячедеформированные трубы, выпускаемые в соответствии с ГОСТ 8732—78 и ГОСТ Р 53383—2009. При этом существует типовой разброс геометрических характеристик труб (разностенность, отклонение от округлости в сечении, нарушение соосности внутренних и внешних образующих), что необходимо учитывать при последующем применении.

Разностенность [wall thickness variation, non-uniform thickness] является дефектом формы трубы в виде неравномерной толщины стенки [1]. Различают продольную и поперечную разностенности труб, которые оценивают абсолютной или относительной величиной. Основные причины образования разностенности при производстве бесшовных труб: неравномерный нагрев заготовки, неправильная настройка стана, недостаточное обжатие перед носком оправки при прошивке.

На рис. 1 изображены некоторые возможные варианты форм поперечных сечений труб, позволяющие сопоставить влияние разностенности и отклонений внутренних и наружных контуров поверхностей от округлости на процессы их механической обработки.

Для устранения этих дефектов применяют растачивание трубной заготовки по внутренней поверхности и обтачивание снаружи. Характерная для механической обработки жесткость системы станок — приспособление — инструмент — деталь позволяет делать это сравнительно просто и с высокой точностью устранять исходные погрешности формы и взаимного расположения наружного и внутреннего контуров сечений труб.

При выборе конкретного варианта заготовки руководствуются правилом: минимальная толщина ее стенки должна превышать толщину стенки детали, а наружный и внутренний диаметры должны быть приближены к ее соответствующим размерам. Растачиваемый ($d_{\text{раст}}$) и обтачиваемый ($D_{\text{обт}}$) диаме-

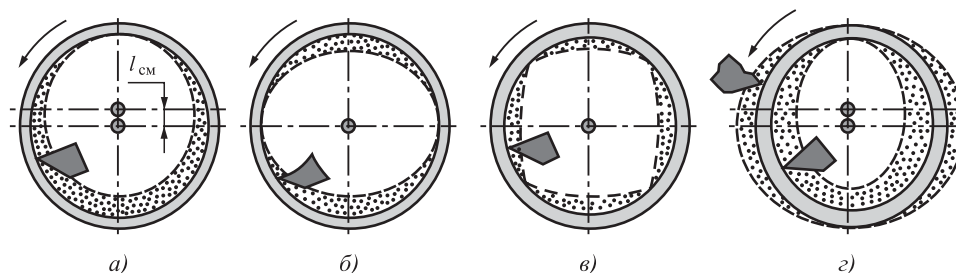


Рис. 1. Допустимые стандартом формы поперечной разностенности труб:

a — эксцентричные; *б, в* — с отклонениями от округлости при сохранении соосности; *з* — эксцентричные с отклонениями внутренних и наружных поверхностей от округлости

тры заготовки назначаются с учетом операционных припусков на последующую чистовую обработку ее внутренней и наружной поверхностей.

То есть, размеры сечения выбранной трубчатой заготовки под обработку резанием должны удовлетворять соотношениям:

$$d_{рез} \leq d_{дет}; D_{рез} \geq D_{дет}; S_{рез} \geq S_{дет}; m_{рез}^{min} \geq D_{рез}/d_{рез},$$

где $d_{рез}$, $D_{рез}$ и $S_{рез}$ — соответственно внутренний и наружный диаметры и толщина стенки трубной заготовки, предназначенной для обработки резанием; $d_{дет}$, $D_{дет}$ и $S_{дет}$ — аналогичные параметры готовой детали после обработки; $m_{рез}^{min}$ — минимально допустимое значение относительного показателя разностенности m для заготовки.

Обработка резанием выбранных таким образом заготовок устраняет фактическое отклонение формы отверстий от округлости и неравномерность толщин стенок. Обработанные поверхности в дальнейшем используются в качестве технологической базы для выполнения последующих операций, таких, например, как дорнование.

Процессы дорнования основаны на локальном осесимметричном пластическом деформировании. Дорнование отличается простотой кинематической схемы обработки, высокой производительностью, точностью и стабильностью диаметрального размера отверстия. Заданный размер отверстия можно получить за один проход инструмента с уточнением обработанной поверхности отверстия в 10...25 раз, что практически исключено при поверхностном пластическом деформировании. Шероховатость упрочненных поверхностей соизмерима с шероховатостью, имеющей место при финишных операциях.

Технологические основы дорнования отверстий трубчатых заготовок

Эффективность технологических процессов дорнования отверстий достигается за счет более

высокой (в десятки раз) производительности этой операции по сравнению с растачиванием [2]. При дорновании материал не удаляется с поверхности отверстия (рис. 2), поэтому исходная стенка заготовки может быть более тонкой и, одновременно, согласно стандарту, обладать меньшими отклонениями от номинала. Это означает, что заготовка имеет более точные геометрические размеры исходных поверхностей, в частности, меньшую овальность сечения и меньшую разностенность трубчатой заготовки, что обеспечивает и меньшее поле рассеяния натяга на дорн. При этом, благодаря деформационному упрочнению материала, уменьшенная толщина стенки не снижает прочности конечной продукции, что дает возможность снизить расход трубного проката на 15...20 %.

Для изготовления деталей с применением дорнования отверстий используются стандартные трубы с заданными отклонениями по наружному D или внутреннему d диаметрам и толщине стенки S (форма заказа $D \times S$ или $d \times S$). Размерными характеристиками поперечных сечений стандартных труб являются относительные показатели, определяемые отношением наружного диаметра к толщине стенки (D/S) или к диаметру отверстия ($m = D/d$). В зависи-

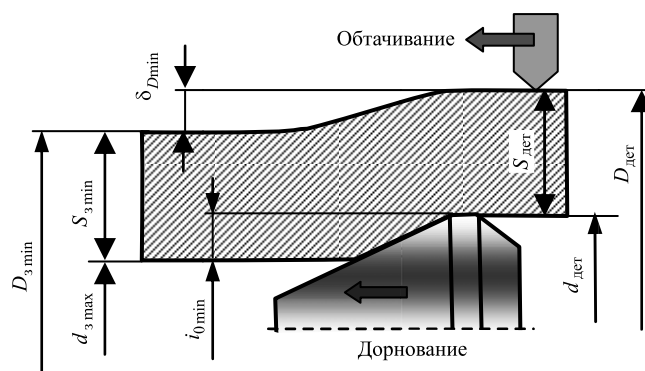


Рис. 2. Расчетная схема к определению размеров заготовки под механическую обработку дорнованием и обтачиванием

мости от их значений трубы подразделяются на особотонкостенные (D/S более 40; $m \leq 1,05$), тонкостенные (D/S от 12,5 до 40; $1,05 < m \leq 1,2$), толстостенные (D/S от 6 до 12,5; $1,2 < m \leq 1,5$) и особотолстостенные (D/S менее 6; $m \geq 1,5$). Практически весь стандартный трубный прокат ограничен показателем $m \leq 2$, а для дорнования в основном используются трубы с $m = 1,05...1,75$.

Размерные характеристики поперечных сечений стандартных труб D/S и $m = D/d$ универсальны и их преимущественно применяют для анализа напряженно-деформированного состояния подвергаемых дорнованию деталей. За счет универсальности относительных размерных характеристик поперечных сечений стандартных труб D/S и $m = D/d$ достигается и высокий уровень универсальности методов аналитических исследований, что позволяет существенно упростить решение большинства практических задач, относящихся к дорнованию трубчатых заготовок. Естественные связи между D/S и m в диапазоне их фактического использования определяются соотношением

$$D/S = 2m/(m - 1),$$

откуда

$$m = (D/S)/(D/S - 2),$$

или в общем виде

$$m = f(D/S).$$

С увеличением диаметров разностенность труб уменьшается за счет уменьшения разрешенных стандартом отклонений толщины стенок от номинальных значений (рис. 3).

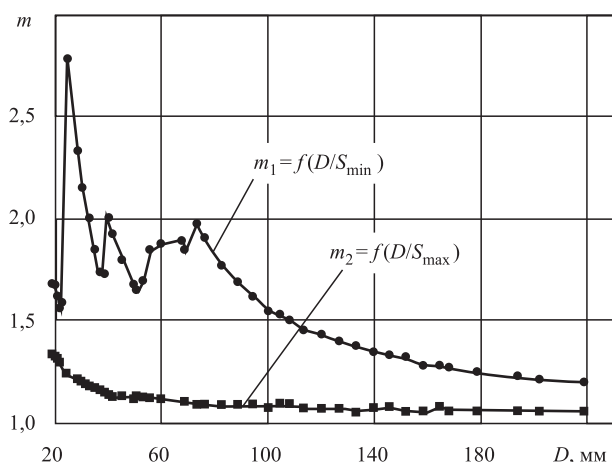


Рис. 3. Изменение относительной толщины m стенок трубчатых заготовок в зависимости от наружного диаметра D

Место и порядок выполнения операции дорнования в структуре типового технологического маршрута зависят от требований к точности и шероховатости обработанного отверстия. С точки зрения экономии материала и при сравнительно невысоких требованиях к точности и качеству наиболее эффективны технологические маршруты, в которых дорнование отверстия выполняется первым, что позволяет минимизировать размеры заготовки и повысить коэффициент использования материала. При этом теоретическое обоснование результатов дорнования обычно рассматривают на основе теории осесимметричной задачи пластического формоизменения материала трубчатых заготовок, имеющих кольцевую форму поперечных сечений.

Возникающие в процессе производства труб фактические отклонения контуров поперечного сечения трубчатой заготовки от условий симметрии считаются малыми и не учитываются в теоретических расчетах. Это допущение позволяет существенно упростить анализ напряженно-деформированного состояния материала в процессе деформирования. Теоретически окружные напряжения и давление на поверхности контакта дорна с заготовкой считаются независимыми от угловой координаты. Однако следует помнить, что на практике реально существующие отклонения от условий осесимметричной задачи пластического деформирования могут оказать существенное влияние на конечный результат обработки.

Главные особенности трубного проката — наличие разностенности, которая существенно затрудняет теоретический анализ процессов дорнования на основе математического аппарата теории обработки металлов давлением; на сегодняшний день не разработано приемлемых аналитических решений задач рассматриваемого типа с контурами произвольной формы поперечного сечения.

На основе анализа теоретических и экспериментальных исследований, относящихся к теме настоящей статьи (см. [2, 5]), можно сделать вывод, что главными факторами, влияющими на изменение разностенности, являются геометрические отклонения размеров D , S и d и допустимые стандартом отклонения формы поперечного сечения заготовок от округлости.

В процессе изготовления труб практически всегда образуются отклонения формы поперечных сечений от округлости на участках, где существует разностенность труб; однако эти неизбежные **геометрические** погрешности формы и размеров могут находиться в пределах допустимых отклонений, предусмотренных стандартами,

и сравнительно легко удаляются методами резания — растачиванием или обтачиванием.

Последующая обработка отверстий дорнованием во многих случаях еще больше снижает геометрические погрешности формы отверстия, но одновременно может породить образование новых **деформационных** искажений.

Поэтому выбору заготовки под дорнование должен предшествовать специальный анализ исходной геометрии поперечного сечения с оценкой влияния разного вида геометрических и деформационных отклонений на напряженно-деформированное состояние. Это означает, что между геометрическими и деформационными отклонениями формы обрабатываемых дорнованием отверстий трубчатых заготовок отсутствуют функциональные закономерные связи, что существенно усложняет их использование в практических расчетных методиках.

На практике, если геометрические отклонения трубчатой заготовки не устранены во время предварительной обработки резанием, то это может в значительной степени отрицательно повлиять на конечные результаты дорнования. Проведенные в этих случаях измерения толщины стенок и диаметров неравностенных образцов подтвердили наличие неравномерности деформации в их поперечных сечениях и существенном отклонении от теоретических постулатов осесимметричного напряженного состояния.

Экспериментально установлено, что в результате дорнования отверстия неравностенного образца окружные и радиальные деформации концентрируются в области тонкой стенки (рис. 4).

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований искажений формы отверстий в цилиндрических образцах с местным (локальным) утонением стенки со стороны наружной поверхности. Исходные разностенности подготовленных образцов отличались соотношениями толщин их стенок S_2/S_1 в тонком (S_2) и толстом (S_1) местах поперечных сечений каждого образца: 1 — $6,25/7,85 = 0,80$; 2 — $4,64/7,93 = 0,59$; 3 — $2,93/7,88 = 0,37$; 4 — $2,14/7,85 = 0,27$. Обработку образцов выполняли последовательно дорнующими зубьями с равно увеличивающимися диаметрами. После прохода каждого зуба через отверстие образца измеряли диаметры отверстий в сечениях с толстой и тонкой стенками. Отклонения формы полученных отверстий от округлости (овальность) определяли разностью измеренных диаметров $\delta_d = d_2 - d_1$. Построенные по полученным данным графики подтверждают существенную зависимость образующейся овальности отверстия от относительного



Рис. 4. Деформация координатной сетки неравностенного образца из АРМКО-железа при дорновании отверстия с натягом 2,4 мм

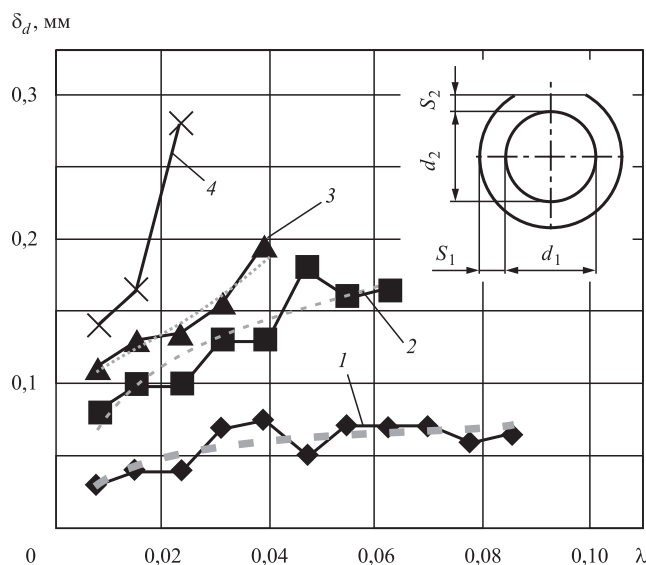


Рис. 5. Зависимости овальности отверстий $\delta_d = d_2 - d_1$ от относительного натяга дорнования λ трубчатых образцов с локальным утонением стенки (с лыской)

натяга λ , особенно у образцов с увеличенной исходной разностенностью.

Анализ полученных результатов показал, что даже небольшие исходные отклонения от кольцевой формы поперечного сечения трубы нарушают условия осесимметричной задачи пластического формоизменения материала трубчатых заготовок и приводят к неопределенности оценки их влияния на конечные результаты деформационной обработки. Поэтому при повышенных требованиях к качеству отверстий оправдана и, в ряде случаев,

необходима предварительная или дополнительная обработка цилиндрических поверхностей растачиванием и/или обтачиванием.

В приведенном примере рассмотрен один геометрический тип разностенности — локальное утонение стенки с внешней стороны заготовки. Фактически типов макроотклонений и вариантов их расположения в кольцевом контуре заготовки, как показано на рис. 1, значительно больше. Поэтому для объективной оценки влияния специфических отклонений формы поперечных сечений от условий осесимметричного напряженного состояния и предсказания результата обработки в методику аналитических расчетов вводятся специальные поправки и пояснения о возможном образовании дополнительных погрешностей и способах их устранения. В любом случае основным требованием к теории является достоверность результатов расчета, продиктованная потребностями практики [3].

Выбор трубчатой заготовки и технологии ее обработки дорнованием

Методика выбора трубчатой заготовки под обработку дорнованием предполагает решение двух задач: геометрической и деформационной. Первая задача связана с заданными стандартом отклонениями формы и размеров отверстия заготовки. Например, овальность и разностенность труб не должны выводить наружный диаметр и толщину стенки за пределы допустимых значений (см. например, ГОСТ Р 53383—2009). Основным способом устранения отклонений и исправления формы отверстий, как было сказано выше, является предварительное растачивание отверстия заготовки до диаметра, обеспечивающего требуемое деформационное увеличение наружного диаметра $\delta_{D_{\min}}$ при минимальном натяге дорнования $i_{\min} = d_{\text{дет}} - d_{\text{заг max}}$, при котором $\delta_{D_{\min}} = D_{\text{дет}} - D_{\text{заг min}}$.

Размеры детали $D_{\text{дет}}$ и $d_{\text{дет}}$ должны быть назначены с учетом припусков на последующую механическую обработку, а выбранные стандартные размеры заготовки D_0 , d_0 , по которым определяются деформационные приращения наружного и внутреннего диаметров $\delta_{D_{\min}}$ и i_{\min} и $S_0 = 0,5(D_0 - d_0)$, пересчитаны на предельные $D_{0\min}$, $d_{0\max}$.

В отличие от процессов резания диаметр $d_{1\text{дорн}}$ образуется в процессе дорнования, поэтому его величина может быть рассчитана только после выбора размеров поперечного сечения трубчатой заготовки с использованием методики, приведенной, например, в работе [2, табл. 5.10]. Методика основана на предварительном многоступенчатом

определении размеров сечения при условии максимальной экономии материала. Особенность и трудность выбора требуемой заготовки заключается в том, что ее исходный наружный диаметр изначально выбирается меньшим, чем требуемый диаметр готовой детали, а натяг дорнования должен быть достаточным, чтобы компенсировать эту разницу. К такому же результату ведет выбор более толстостенной заготовки. В случае получения неудачного расчетного результата рекомендуется повторить расчет для более точных труб или предусмотреть в технологическом процессе предварительное растачивание отверстия до требуемого размера.

Таким образом, при выборе заготовки под дорнование необходимо учитывать, что ее конечные параметры формируются в результате преобразования геометрических отклонений от осевой симметрии сечений в деформационные. При этом в качестве исходных данных используются:

$$\begin{aligned} d_{0\max} &\leq d_1 - i_{0\min}; D_{0\min} \leq D_1 - \delta_{D_{\min}}; S_{0\min} \geq S_1; \\ m_{0\min} &= (D_1 - \delta_{D_{\min}})/(d_1 - i_{\min}); i_{\min} \geq \delta_{D_{\min}}; \\ \delta_{D_{\min}} &= D_1 - D_{0\min}. \end{aligned}$$

Из приведенных соотношений следует, что для дорнования предпочтительнее использовать трубы с более тонкими стенками. Формально это способствует уменьшению допустимых стандартом отклонений размеров и формы сечения выбираемой трубы от округлости и получению более точных отверстий.

Трубные заготовки, несмотря на различные по форме поперечные сечения (см. рис. 1), согласно стандарту могут иметь одинаковую разностенность. Однако при этом они не одинаково отвечают условиям осесимметричного напряженного состояния, так как различны координаты точек на деформируемой поверхности (радиус-вектор r , полярный угол θ и положение вдоль оси Z цилиндра). Как следствие, и напряжения (окружные σ_r , радиальные σ_r и осевые σ_z), создаваемые в этих точках и на участках поверхности в целом распределены неравномерно относительно оси деформируемого контура заготовки и неодинаковы в различных осевых сечениях. Поэтому при выборе заготовок из трубного проката необходимо придерживаться определенных рекомендаций, выполнение которых способствует достижению лучшего результата. В частности, в первую очередь это относится к выбору варианта изготовления труб. Практически, согласно стандарту, могут быть использованы три варианта заказа — с замыкающим звеном $d_{\text{заг}}$, $D_{\text{заг}}$ или $S_{\text{заг}}$:

1. $D_{\text{заг}} \times S_{\text{заг}}$: замыкающее звено
 $d_{\text{заг}} = D_{\text{заг}} - 2S_{\text{заг}}$; $d_{\text{паст}} = D_{\text{заг min}} - 2S_{\text{заг min}}$.

2. $d_{\text{заг}} \times S_{\text{заг}}$: замыкающее звено
 $D_{\text{заг}} = d_{\text{заг}} + 2S_{\text{заг}}$; $D_{\text{обт}} = d_{\text{заг max}} + 2S_{\text{заг min}}$.
3. $D_{\text{заг}} \times d_{\text{заг}}$: замыкающее звено
 $2S_{\text{заг}} = D_{\text{заг}} - d_{\text{заг}}$; $2S_{\text{заг min}} = 0,5[D_{\text{заг min}} - d_{\text{раст}}]$.

В таблице приведены рекомендации по формированию маршрутов изготовления деталей из трубчатых заготовок с применением дорнования отверстий, в которых отражены технические требования к точности и качеству обработанных поверхностей.

Предельные размеры, относительное расположение и форма отверстия заготовки носят случайный характер, что негативно влияет на параметры осевой симметрии и образование деформационных искажений. Поэтому технология подготовки трубчатых заготовок под дорнование отверстий высокоточных деталей со стабильными механическими характеристиками материала должна дополняться операциями предварительного растачивания отверстия и (при необходимости) обтачивания наружной поверхности (рис. 6).

Рекомендуемые в приведенной таблице маршруты № 1 и 2 не требуют черного растачивания

Методы обработки отверстий трубчатых заготовок с применением дорнования

Номер маршрута	Квалитет точности отверстия детали	Параметр шероховатости поверхности отверстия детали Ra, мкм	Операции		
			Черное растачивание	Дорнование	Чистовое растачивание (раскатывание, хонингование)
1	11...13	1,25...2,5	—	+	—
2	9...11	0,32...1,25	—	+	+
3	8...9	0,16...0,32	+	+	—
4	7...8	0,16...0,32	+	+	+

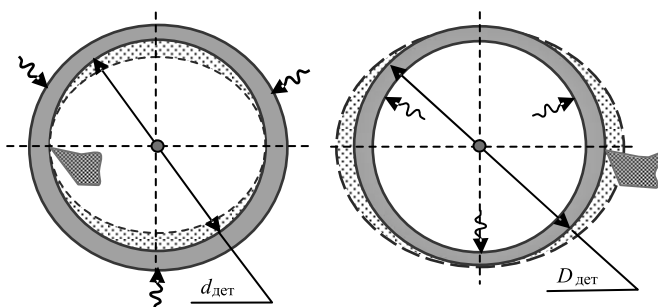


Рис. 6. Схемы предварительной механической обработки трубчатой заготовки:
 а — растачиванием отверстия ($d_{\text{рас}}$); б — обтачиванием наружной поверхности ($D_{\text{обт}}$)

и, очевидно, они предпочтительнее с точки зрения экономии материала. В составы маршрутов № 3 и 4 включены предварительное растачивание и дополнительные механические операции, которые обеспечивают минимальные натяги дорнования, стабильное качество обработанных поверхностей отверстий, постоянство механических свойств материала и степени упрочнения поверхностного слоя.

Для всех маршрутов эффективнее применять заготовки, у которых диаметр отверстия является составляющим звеном размерной цепи поперечного сечения с наименьшим полем рассеяния, т. е. заказ по форме $d_{\text{заг}} \times S_{\text{заг}}$ вместо $D_{\text{заг}} \times S_{\text{заг}}$. Однако во всех случаях дорнования отверстий необходимо учитывать факторы неравностенности и отклонений формы отверстия заготовки от округлости, которые приводят к неравномерному нагружению деформируемой заготовки по всему поперечному сечению. При этом неизбежно снижаются все качественные показатели обработки и достоверность применения основных положений теории упруго-пластической деформации в условиях осесимметричного напряженного состояния материала.

Проведенные исследования могут быть использованы для совершенствования методов подготовки трубчатых заготовок под дорнование отверстий высокоточных деталей, совершенствования конструкций дорнующего инструмента, определения наиболее рациональной схемы дорнования и модернизации применяемой оснастки.

Выводы

1. В процессе дорнования отверстий трубчатых заготовок вследствие разностенности изменяются направления главных осей напряжений и деформаций. В теоретических исследованиях эти отклонения считаются незначительными и на этом основании допустимо применение теории упруго-пластической деформации с использованием условий осесимметричного напряженного состояния.

2. Приведены рекомендации по формированию технологических маршрутов обработки трубчатых деталей с применением дорнования, направленных на устранение отклонений от условий осесимметричного напряженного состояния.

3. Для повышения эффективности операции дорнования и стабилизации величины расчетного натяга дорнования и механических характеристик деформируемого материала необходимо устранять исходные отклонения формы отверстий от округлости и разностенности заготовки путем предварительной механической обработки (растачивания).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лякишев Н.П.** Энциклопедический словарь по металлургии: справочник. В 2 т. Т. 1. 412 с., Т. 2. 409 с. М.: Интермет Инжиниринг, 2000.
2. **Технология** и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. В 2 т. Т. 1 / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2014. 480 с.
3. **Смирнов-Аляев Г.А.** Сопrotивление материалов пластическому деформированию. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.

4. **Справочник** технолога / под общ. ред. А.Г. Сулова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.

5. **Исаев А.Н., Власкин С.В., Гавриленко М.Д.** Влияние геометрических отклонений формы и размеров поперечных сечений трубчатых заготовок на качество обработки отверстий дорнованием // Труды научного симпозиума технологов машиностроителей. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2019. С. 245–252.

УДК 621.9

DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-3-110-113

Б.Я. Мокрицкий, *д-р техн. наук*
(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)
E-mail: boris@knastu.ru

Использование покрытий инструментального материала для диагностики технологической системы токарной обработки нержавеющей стали по составляющим силы резания

Обработка нержавеющей стали является сложным процессом и требует соответствующего состояния технологической системы резания. Показана возможность поддержания системы резания в благоприятном состоянии за счет применения покрытий на сменных твердосплавных типовых пластинах из сплава ВК8. Приведены результаты, показывающие взаимосвязь применяемых инструментальных покрытий с качеством обработки и с работоспособностью инструмента.

Ключевые слова: точение нержавеющей стали, упрочняющие покрытия, режущие пластины, шероховатость поверхности, работоспособность режущего инструмента.

The machining of stainless steels is a complex process and requires an appropriate state of the cutting technology. The possibility of maintaining the cutting system in a favorable state is shown due to the use of coatings on replaceable carbide type plates made of VK8 alloy. The results are given showing the relationship of the applied tool coatings with the quality of processing and with the performance of the tool.

Keywords: turning of stainless steels, strengthening coatings, cutting plates, surface roughness, working capacity of the cutting tool.

Обработка нержавеющей стали, способных работать в агрессивных средах и сложных природных условиях, сопровождается значительным расходом металлорежущего инструмента [1–5]. Для сокращения расхода инструмента наносят упрочняющие покрытия на твердосплавный субстрат [6–15].

В данной работе показано, каким образом упрочняющие покрытия режущего инструмента влияют на динамическое состояние технологической системы резания. Показана связь состояния системы с качеством обработанной поверхности и периодом работоспособности металлорежущего инструмента.

Общеизвестна [6–15] взаимосвязь силы резания с выходными параметрами технологической системы резания. Однако применение новых ин-

струментальных материалов требует дополнительного изучения и получения новой эмпирической информации. Для этого проведены исследования процесса точения труднообрабатываемых специализированных сталей 09X17N7Ю, 12X18N10T, 13X15N5AM3 инструментальными материалами с различными упрочняющими покрытиями. В частности, изучен характер изменения составляющих силы резания при изменении динамического состояния технологической системы.

На рис. 1, а показаны уровни составляющих сил резания при использовании инструмента из сплава ВК8. Диаграмма иллюстрирует диапазон возможных значений сил резания при точении стали 09X10N7Ю инструментом из сплава ВК8. Диапазон значений силы резания и ее составля-

ющих отражает динамические свойства процесса точения; его контроль позволяет диагностировать качество и стабильность этого процесса.

Различия в механических характеристиках обрабатываемых материалов требуют и различных сил резания при их обработке. Это естественно отражается и на значениях продольной, поперечной и вертикальной составляющих силы резания. На рис. 1, б показаны примеры таких различий. Отчетливо видно, что значения составляющих и их соотношения в каждом конкретном случае имеют индивидуальный характер. Контроль этих факторов также является важным элементом системы диагностики технологического процесса.

Для получения конкретных сравнительных данных исследован процесс точения стали 09Х17Н7Ю инструментами из сплава без покрытия ВК8 и с покрытием ВК8 + TiCN + (TiAl)N + TiN при

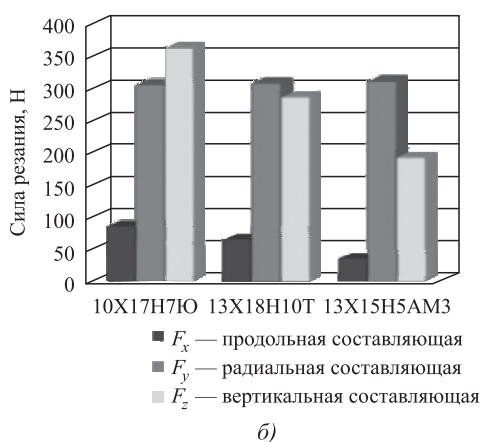
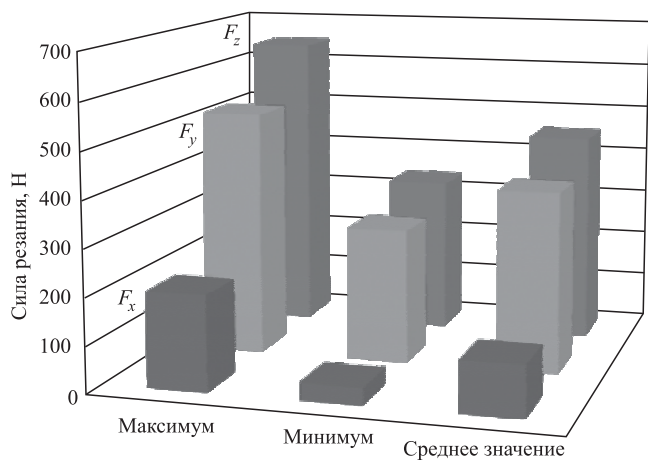


Рис. 1. Изменение составляющих сил резания при обработке разных материалов одинаковым инструментом ВК8 без покрытия:

a — точение стали 09Х17Н7Ю инструментом ВК8 без покрытия; *б* — точение разных марок сталей при одинаковых условиях

скорости резания 50 м/мин, подаче 0,21 мм/оборот заготовки и при двух разных глубинах резания. В ходе эксперимента производили оценку параметров шероховатости обрабатываемой поверхности и продолжительности сохранения работоспособности режущего инструмента (до износа 0,5 мм по его задней грани). Исследовали 10 инструментальных материалов с разными покрытиями, одно из которых представлено в таблице.

В качестве образца использовали квадратную пластину с отверстием в центре диаметром 16 мм.

Приведенные в таблице значения параметров шероховатости свидетельствуют, что применение упрочняющего покрытия улучшает показатели качества обработанной поверхности, причем в данном случае это в большей степени проявилось при большей глубине резания.

Покрытие увеличивает также период работоспособности инструмента (до заданного износа), а продолжительность этого периода существенно зависит от глубины резания: при увеличении глубины резания она снижается.

Пример изменения времени работы инструмента при применении разных покрытий иллюстрирован на рис. 2. Применением покрытия можно достичь повышения работоспособности инструмента в 2 и более раз. Поскольку есть основания полагать [9–12], что покрытия снижают значения всех составляющих силы резания, то этот факт можно использовать для управления состоянием

Параметры шероховатости и период работоспособности инструмента при разной глубине резания

Глубина резания, мм	Инструментальный материал ВК8			Инструментальный материал ВК8 + TiCN + (TiAl)N + TiN		
	Параметры шероховатости	Период работоспособности инструмента, мин		Параметры шероховатости	Период работоспособности инструмента, мин	
1	<i>Ra</i>	5,430	45	<i>Ra</i>	5,220	160
	<i>Rq</i>	7,092		<i>Rq</i>	6,825	
	<i>Rz</i>	30,905		<i>Rz</i>	29,054	
	<i>Rt</i>	31,472		<i>Rt</i>	29,685	
	<i>Rp</i>	15,450		<i>Rp</i>	12,456	
	<i>R3z</i>	12,654		<i>R3z</i>	11,658	
	<i>R3z</i>	12,654		<i>R3z</i>	11,658	
2	<i>Ra</i>	6,800	15	<i>Ra</i>	5,346	26
	<i>Rq</i>	9,354		<i>Rq</i>	8,235	
	<i>Rz</i>	45,320		<i>Rz</i>	42,116	
	<i>Rt</i>	48,985		<i>Rt</i>	44,012	
	<i>Rp</i>	17,80		<i>Rp</i>	14,021	
	<i>R3z</i>	15,545		<i>R3z</i>	12,565	
	<i>R3z</i>	15,545		<i>R3z</i>	12,565	

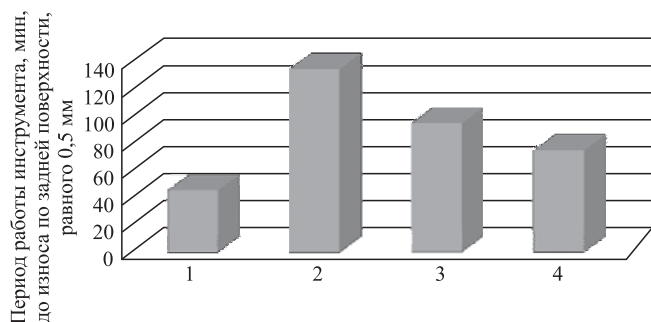


Рис. 2. Работоспособность различных инструментальных материалов:

1 — BK8 без покрытия; 2 — BK8 + Ti + TiN + (NbZrTiAl)N; 3 — BK8 + TiC + TiN + (TiAl)N + TiN; 4 — BK8 + (AlCr)N + (AlTi)N

технологической системы резания и для поднастройки ее на необходимый уровень. В таблице показано влияние изменения глубины резания на изменение параметров шероховатости и на период работоспособности инструмента. Эта взаимосвязь может служить примером того, как можно реализовать поднастройку системы путем изменения глубины резания; это является дополнением к уже упомянутому варианту управления наряду со способом замены инструментального материала.

Таким образом, данные, представленные в таблице и на рис. 1 и 2, позволяют считать, что, оперируя как инструментальным материалом, так и глубиной резания, а значит, опосредовано, и силой резания, можно управлять динамическим состоянием системы резания и поднастраивать ее на нужный уровень.

Для различных обрабатываемых материалов и различных инструментов периоды работоспособности инструмента до наступления износа 0,5 мм по задней грани показаны на рис. 3. Это создает

широкие возможности для создания и поддержания благоприятного состояния технологической системы резания без ухудшения значений параметров шероховатости за счет рационального применения инструментального материала.

Примеры на рис. 3 позволяют заключить, что, даже оперируя только инструментальным материалом, можно выбирать оптимальную силу резания, обеспечивающую требуемое качество обработанной поверхности. Это означает, что существует возможность эффективно управлять динамическим состоянием системы резания и поднастраивать ее на нужный уровень при обработке всех рассматриваемых труднообрабатываемых нержавеющей сталей.

Кроме указанных выше инструментальных материалов разработаны рекомендации применительно к следующим инструментальным материалам: BK8 + TiCN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (5 мкм) + TiC (5 мкм); BK8 + Al₂O₃ (2 мкм) + (Ti)CN (5 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + TiN (3 мкм); BK8 + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм) + (TiAl)N (3 мкм) + Al₂O₃ (3 мкм); BK8 + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + TiC (3 мкм); BK8 + TiC (3 мкм) + TiN (3 мкм) + (TiAl)N (2 мкм); BK8 + TiCN (2 мкм) + TiC (3 мкм) + TiN (1,5 мкм); BK8 + TiC (1,5 мкм) + TiN (3 мкм); BK8 + TiN (2 мкм) + TiC (5 мкм); BK8 + TiCN (0,5 мкм) + TiN (1 мкм); BK8 + TiN (0,5 мкм) + TiC (1 мкм). В скобках указана толщина соответствующего слоя покрытия.

Заключение

Показана возможность контролировать (диагностировать и поднастраивать) состояние технологической системы резания при точении труднообрабатываемых специализированных сталей 09X17H7Ю, 12X18H10T, 13X15H5AM3 по состав-

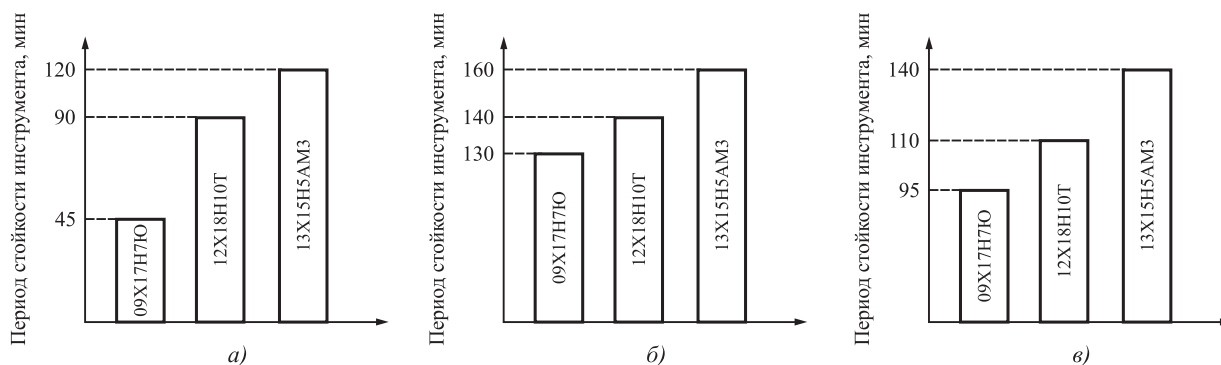


Рис. 3. Изменение периода стойкости инструментальных материалов при точении различных труднообрабатываемых материалов:

а — BK8 без покрытия; б — BK8 + Ti (1 мкм) + (NbZrTiAl)N (2,5 мкм); в — BK8 + Ti (1 мкм) + TiN (1 мкм) + (TiAl)N (2 мкм) + TiN (0,5 мкм)

ляющим силы резания. Рассмотрено влияние составляющих силы резания на качество обработанной поверхности, выраженное через величины параметров шероховатости и на работоспособность режущих пластин (период работы типовой режущей пластины до износа 0,5 мм).

Показана возможность использования составляющих силы резания для диагностики и подстройки состояния технологической системы резания при точении труднообрабатываемых специализированных нержавеющей сталей 09X17H7Ю, 12X18H10T, 13X15H5AM3.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зорев Н.Н. Обработка сталей твердосплавным инструментом в условиях прерывистого резания // Вестник машиностроения. № 2. 1963. С. 34—36.
2. Андреев Г.С. Влияние тепловых и адгезионных явлений на работоспособность твердосплавного инструмента при периодическом резании // Вестник машиностроения. 1974. № 10. С. 71—74.
3. Андреев Г.С. Повышение производительности обработки деталей в условиях периодического прерывистого резания // Вестник машиностроения. 1978. № 12. С. 48—52.
4. Синопальников В.А., Гурин В.Д. Температурное поле в режущем клине инструмента при прерывистом резании // Вестник машиностроения. 1981. № 4. С. 44—47.

5. Kaning W. Der Werkzeugverschleiß bei der spanenden bearbeitung von Stahlwerkstoffen. Werkstatechnir. 1966. 56. No. 5. P. 229—234.

6. Opitz H., Schilling W. Untersuchung der Verschleißreaktionen bei der Bearbeitung Von Stahl mit Schnellarbeitsstahlwerkzeugen. Forschungsber. Landes Nordrhein-Westfalen. 1967. No. 17. 196. P. 3—95.

7. Безязычный В.Ф. Метод подобию в технологии машиностроения. М.: Машиностроение. 2012. 320 с.

8. Фоменко Р.Н. Исследование процесса обработки точением инструментами с нанопокрывтиями с целью обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2010.

9. Мокрицкий Б.Я., Безолукова Е.В., Ситамов Э.С. Применение покрытий для создания инструментальных материалов. Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ. 2019. 118 с.

10. Two-component end mills with multilayer composite nano-structured coatings as a viable alternative to monolithic carbide end mills / A. Vereschaka, B. Mokritskii, E. Mokritskaya et al. // Mechanics & Industry 18, 705 (2017).

11. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 380 с.

12. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method / A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, Andre DL Batako et al. // Nanomaterials and Nanotechnology Vol. 7. 2017. P. 1—13. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1847980416680805>.

УДК 621.77

DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-3-113-116

В.П. Табаков, *д-р техн. наук*
(Ульяновский государственный технический университет),
В.А. Адакин, *канд. техн. наук*, **А.В. Чихранов**, *канд. техн. наук*
(Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева)
E-mail: AWA-adakin@yandex.ru

Исследование остаточных напряжений в накатных роликах для холодного пластического деформирования шлицевого профиля на валах

Исследованы остаточные напряжения, возникающие в накатных роликах для холодного пластического деформирования шлицевого профиля на валах при их изготовлении, а также в процессе их наработки на отказ. Исследованы остаточные напряжения в накатных роликах при нанесении на рабочие поверхности однослойных износостойких покрытий.

Ключевые слова: пластическое деформирование, остаточные напряжения, накатной ролик, износостойкость, однослойное покрытие.

The residual stresses that occur in rolling rollers for cold plastic deformation of the spline profile on the shafts, during their manufacture, as well as during their operating time to failure are studied. Investigated residual stresses in rolling the rollers when applied to the working surfaces of a single-layer of wear-resistant coatings.

Keywords: plastic deformation, residual stress, knurling roller, wear resistance, single-layer coating.

Одним из перспективных направлений развития машиностроения является пластическое деформирование металлов. И особое место занимает пластическое деформирование в холодном состоянии как окончательная операция изготовления деталей. Один из таких способов — изготовление профилей на валах путем холодного накатывания [1—3]. При данном способе снижается время изготовления изделий, отсутствуют отходы металла в стружку, сокращается расход электроэнергии, освобождаются металлорежущие станки и производственные площади, повышается производительность. Кроме того, при такой технологии не образуются перерезаемые волокна металла, повышаются механические свойства изделий; обеспечивается прочность изделий, сопоставимая с аналогичной при термической обработке; износостойкость повышается на 30...40 %; параметр шероховатости поверхности достигает значений $Ra = 1,6...2,5$ мкм.

Однако, наряду со всеми достоинствами, имеется недостаток, заключающийся в низкой износостойкости инструмента (накатного ролика) для пластического деформирования материала. Повышение износостойкости инструмента может быть обеспечено нанесением на него упрочняющих покрытий с более высокими эксплуатационными свойствами [4—6].

Цель исследования — изучение остаточных напряжений в накатном ролике и параметров струк-

туры износостойких покрытий на основе нитрида титана циркония (TiZrN).

Для исследования остаточных напряжений были подготовлены образцы новых накатных роликов, изношенных роликов, а также вышедших из строя из-за поломки (разрушенных). Сравнивали накатные ролики как без покрытия, так и с многокомпонентными покрытиями TiZrN.

Покрытия наносили на инструмент из быстрорежущей стали Р6М5 на установке "Булат-6" с использованием катодов из титана и циркония. Параметры структуры покрытий и остаточные сжимающие напряжения σ_0 исследовали с помощью дифрактометра ДРОН-3М с использованием фильтрованного $Cu K\alpha$ -излучения.

В процессе исследований были получены и обработаны следующие параметры (таблица):

- период кристаллической решетки a ;
- показатель текстурированности — отношение интенсивностей рентгеновских линий J_{111}/J_{200} ;
- истинное физическое уширение рентгеновской линии β_{111} , характеризующее степень дефектности структуры покрытия;
- остаточные напряжения первого рода σ_0 .

Покрытия TiZrN наносили с помощью двух катодов из циркония, установленных противоположно друг другу, между которыми располагали катоды из титана. Технологические параметры нанесения покрытий задавали путем изменения опорного напряжения, тока дуги и времени осаж-

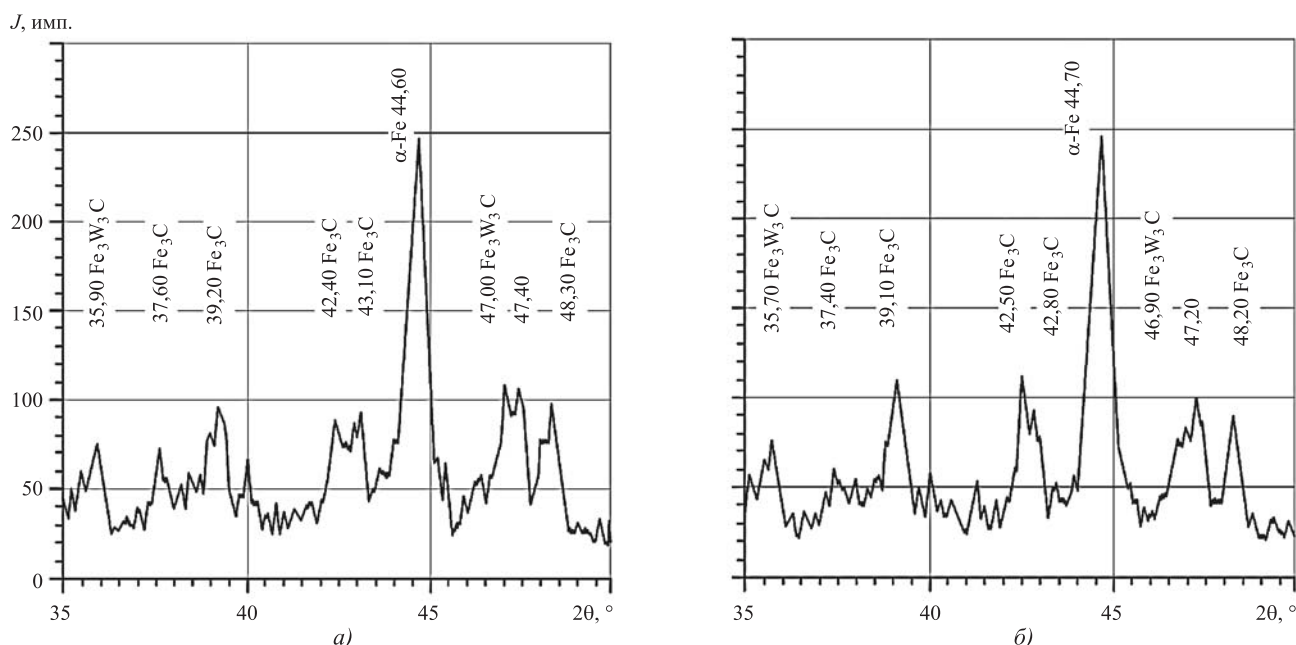


Рис. 1. Дифрактограммы содержания карбидов на поверхности изношенного инструмента (из стали Р6М5) без покрытия:

a — левая сторона; *б* — правая сторона

дения покрытий, — для достижения требуемой толщины покрытий. Толщина покрытий варьировалась в пределах от 2,0 до 2,5 мкм.

Далее проводили исследования образцов: изучали рабочие конические поверхности накатного ролика с двух сторон. В результате получили диаграммы содержания карбидов в поверхностном слое накатного ролика и совокупность параметров, отражающих структурные и механические свойства накатных роликов как с нанесенными упрочняющими покрытиями, так и без таковых.

Как видно из дифрактограмм (рис. 1 и 2), карбиды симметрично расположены по обеим сторонам накатного ролика. На образцах без покрытия виден пик α -Fe, а на образцах с покрытием выделяется пик излучения TiZrN (см. рис. 2). Данные пики также расположены симметрично с обеих сторон накатного ролика. Эти всплески свидетельствуют о попадании материала заготовки в микротрещины рабочей части накатного ролика, что приводит к ускорению процесса разрушения накатного ролика.

На рис. 1 видно множество дифракционных пиков карбидов железа как с левой стороны накатного ролика, так и с правой. Картина распределения карбидов на деформирующем инструменте равномерная. Для α -Fe характерно наличие дифракционных пиков на углах $2\theta = 44,6^\circ$ с правой и $2\theta = 44,7^\circ$ с левой стороны накатного ролика, т.е. дифракционные пики также равномерно и

симметрично распределены на рабочих сторонах накатного ролика.

Известно, что увеличению износостойкости ролика способствует наличие остаточных напряжений сжатия. Это подтверждается тем, что новый ролик имеет остаточные напряжения $-940...-960$ МПа, а изношенный — около $-10...-35$ МПа (рис. 3, см. обложку). При этом разрушенный накатной ролик, вышедший из рабочего состояния из-за излома, имеет неизрасходованный потенциал остаточных напряжений $-200...-225$ МПа (см. таблицу). В этом случае выход из строя накатных роликов обусловлен повышенной твердостью заготовки и высокими усилиями процесса холодного деформирования.

На рис. 2, а — для левой стороны накатного ролика с покрытием TiZrN характерно наличие дифракционных пиков на отметках с углами $2\theta = 36,55$ и $42,5^\circ$. Эти пики идентифицируются как TiZrN и подобны таким же дифракционным пикам для правой стороны накатного ролика (см. рис. 2, б) и располагаются на таких же отметках $2\theta = 36,5$ и $42,5^\circ$ соответственно. Это очевидно свидетельствует о равномерном распределении пиков на рабочих сторонах накатного ролика.

Дифракционные пики α -Fe размещены на углах $2\theta = 44,60^\circ$ для каждой стороны накатного ролика с покрытием. Сжимающие остаточные напряжения σ_0 на роликах с покрытием имеют значения $-1000...-1015$ МПа, что свидетельствует

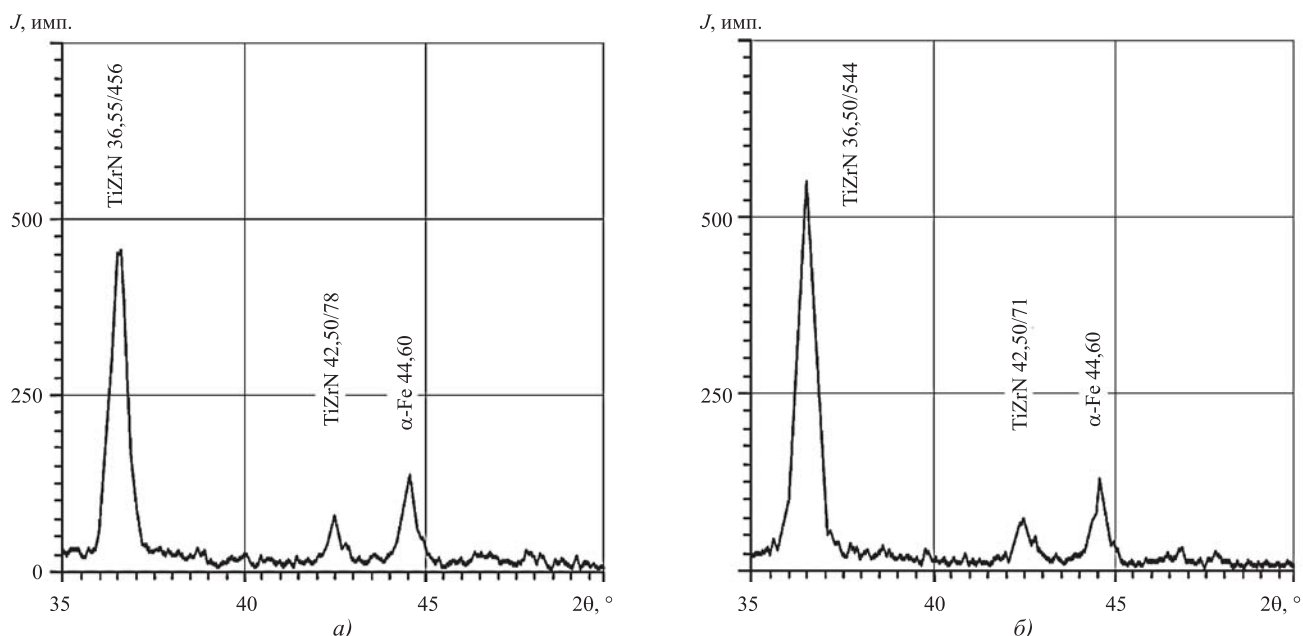


Рис. 2. Дифрактограммы содержания карбидов на поверхности изношенного инструмента с покрытием TiZrN, нанесенным на сталь Р6М5:

а — левая сторона; б — правая сторона

Структурные параметры и механические свойства образцов накатных роликов при исследовании на дифрактометре "ДРОН-3М"

Образец	Сторона накатного ролика	Период кристаллической решетки a , нм	Полуширина рентгеновской линии β , °	Параметр текстуры J_{111}/J_{200}	Остаточные напряжения σ_0 , кг/мм ²	
					α -Fe	TiZrN
Новый без покрытия	Левая	—	—	—	-96,3±15,7	—
	Правая	—	—	—	-93,9±21,5	—
Разрушенный без покрытия	Левая	—	—	—	-20,0±7,3	—
	Правая	—	—	—	-22,4±6,4	—
Изношенный без покрытия	Левая	—	—	—	-1,1±8,1	—
	Правая	—	—	—	-3,4±6,6	—
Новый с покрытием	Левая	0,42560	0,54	5,9	-15,1±2,8	-100,3±4,7
	Правая	0,42588	0,52	7,7	-3,4±2,1	-101,5±19,4
Разрушенный с покрытием	Левая	0,42484	0,43	8,2	-3,0±0,3	-99,8±19,9
	Правая	0,42484	0,57	3,7	-4,4±1,8	-99,7±3,2
Изношенный с покрытием	Левая	0,42512	0,59	3,9	+6,2±4,4	-102,6±12,4
	Правая	0,42536	0,51	5,0	+11,7±4,6	-73,6±20,4

о повышении работоспособности накатных роликов. При этом сам процесс нанесения износостойких покрытий усугубляет состояние материала подложки (накатного ролика), а именно: приводит к значительному снижению остаточных напряжений базового материала, что неизбежно повлечет за собой быстрый выход из строя накатного ролика в случае износа упрочняющего покрытия. Такое снижение остаточных напряжений подложки определяется технологией и связано с режимами нанесения износостойких покрытий.

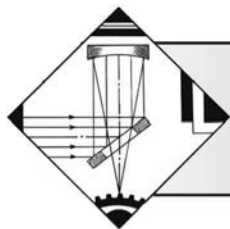
В процессе эксплуатации деформирующего инструмента, остаточные напряжения снижаются и, к моменту выхода инструмента из строя, в подложке накатных роликов наблюдается переход остаточных напряжений сжатия в напряжения растяжения +62...+117 МПа (см. рис. 3).

Однако накатные ролики с покрытием TiZrN, по сравнению с накатными роликами без покрытий, имеют более высокий уровень сжимающих остаточных напряжений, что связано с различием теплофизических характеристик покрытий по сравнению с материалом подложки. Остаточные напряжения в покрытии незначительно снижаются в процессе эксплуатации инструмента, что свидетельствует о их высокой стойкости к разрушениям и способствует повышению износостойкости накатных роликов.

Для окончательного решения вопроса о фазовом составе покрытий требуются более широкие исследования по влиянию содержания дополнительного элемента на параметры структуры покрытий и износостойкость деформирующего инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федотов Г.Д., Адакин В.А. Контактные напряжения в зоне инструмент—деталь при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах в холодном состоянии. Ульяновск: ГСХА, 2012. Т. II. С. 13—18.
2. Адакин В.А., Федотов Г.Д. Износостойкость накатных роликов с однослойными износостойкими покрытиями при холодном пластическом деформировании // Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Инновационное машиностроение. 2019. № 2. С. 61—64.
3. Адакин В.А. Инструмент для многопроходного холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09. СПбПУ, 2014. 16 с.
4. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
5. Адакин В.А., Чихранов А.В. Напряженные состояния инструмента и заготовки при многопроходном холодном накатывании прямоугольных шлицев на валах // Вестник машиностроения. 2020. № 7. С. 78—81.
6. Адакин В.А. Повышение долговечности деформирующего инструмента применением износостойких покрытий // Вестник УлГТУ. Ульяновск: ГТУ. 2012. № 4. С. 32—36.



Е.В. Агеева, канд. техн. наук
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)
E-mail: ageeva-ev@yandex.ru

Свойства псевдосплава ВНЖ-95, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в керосине*

Представлены результаты экспериментальных исследований состава, структуры и свойств псевдосплава ВНЖ-95, спеченного из электроэрозионных порошков, полученных в керосине осветительном. Показано, что использование метода искрового плазменного спекания для получения изделий из порошка, полученного электродиспергированием данного псевдосплава, позволит обеспечить высокую работоспособность деталей за счет однородности поверхности, благоприятной структуры и низкой пористости изделия.

Ключевые слова: тяжелые вольфрамовые псевдосплавы, электроэрозионное диспергирование, порошок, искровое плазменное спекание, спеченное изделие, микроструктура, пористость, микротвердость.

The results of experimental studies of the composition, structure, and properties of WNiFe-95 pseudoalloy sintered from electroerosive powders obtained in lighting kerosene are presented. It is shown that the use of the spark plasma sintering method to produce products from powder obtained by electrodispersing of this pseudoalloy will ensure high performance of parts due to the surface uniformity, favorable structure and low porosity of the product.

Keywords: heavy tungsten pseudo-alloys, electroerosive dispersion, powder, spark plasma sintering, sintered product, microstructure, porosity, microhardness.

Введение

Тяжелые вольфрамовые псевдосплавы ВНЖ-95 обладают уникальными свойствами, благодаря которым их эффективно используют во многих областях промышленности [1–6]. В настоящее время одной из основных проблем использования псевдосплавов ВНЖ-95 является переработка их отходов и дальнейшее использование [7, 8]. Существующие промышленные технологии измельчения таких псевдосплавов отличаются крупнотоннажностью, высокими энергетическими затратами и экологическими проблемами технологических процессов. Один из перспективных и промышленно неприменяемых способов измельчения любого электропроводного материала — электроэрозион-

ный способ. К настоящему времени в современной научно-технической литературе отсутствуют полноценные сведения об использовании диспергированных электроэрозией частиц псевдосплава ВНЖ-95 в качестве шихты для повторного производства из них псевдосплавов. Для этих целей требуется проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований.

Проведенные исследования позволяют осуществить постепенный переход к передовым производственным технологиям и материалам посредством применения прогрессивной, экологически чистой, малотоннажной и безотходной технологии электроэрозионного диспергирования при получении новых порошковых материалов из отходов (стружки) псевдосплава ВНЖ-95 [9–12].

Цель настоящей работы — проведение экспериментальных исследований состава, структуры и свойств спеченного псевдосплава ВНЖ-95 из электроэрозионных порошков, полученных в керосине осветительном.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (НШ-2564.2020.8).

Материалы и методы проведения исследований

Для выполнения намеченных исследований выбраны отходы (стружка) псевдосплава ВНЖ-95. В качестве рабочей жидкости была выбрана углерод-содержащая жидкость — керосин осветительный. Для диспергирования отходов (стружки) псевдосплава ВНЖ-95 использовали установку, защищенную Патентом 2449859 РФ. Режимы диспергирования: частота следования импульсов 100 Гц; напряжение 100 В; емкость разрядных конденсаторов 24 мкФ. В результате электродиспергирования псевдосплава ВНЖ-95 были получены частицы порошка (рис. 1).

Консолидация полученных электроэрозионных порошков проведена методом искрового плаз-

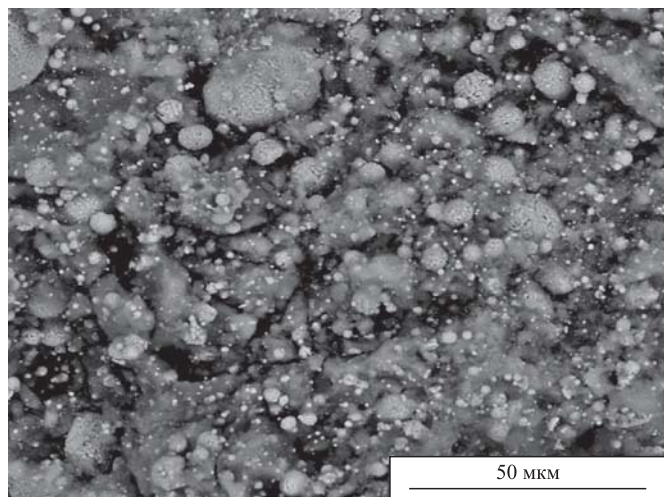


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение частиц порошка псевдосплава ВНЖ-95

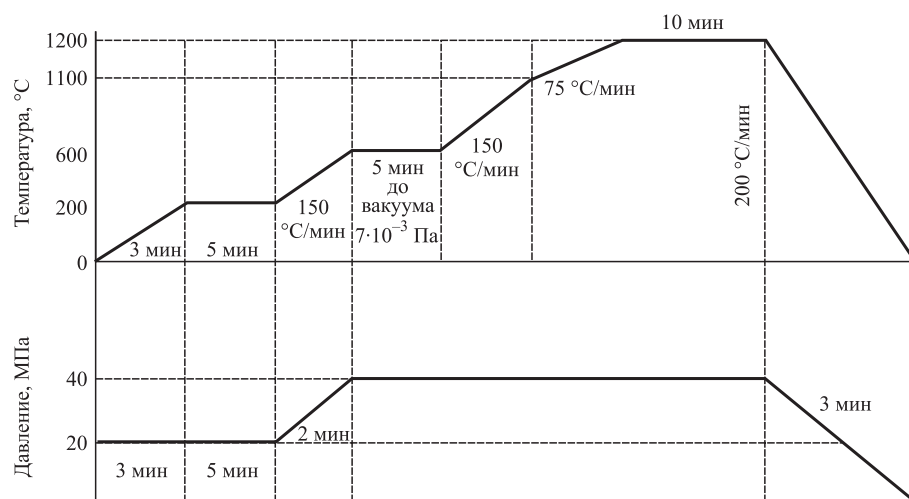


Рис. 2. Схема консолидации порошков методом ИПС

менного спекания (ИПС) с использованием системы искрового плазменного спекания SPS 25-10 (Thermal Technology, США) по схеме, представленной на рис. 2. Образцы спеченного псевдосплава получали из частиц, диспергированных в керосине, при температуре $T = 1200$ °С, давлении $p = 40$ МПа и времени выдержки $t = 5$ мин. Исходный материал размещали в матрице из графита, устанавливаемой под пресс в вакуумной камере. Электроды, интегрированные в механическую часть пресса, подводят электрический ток к матрице и создают искровые разряды между спекаемыми частицами материала, обеспечивая их интенсивное взаимодействие.

Поверхность полученного спеченного образца псевдосплава шлифовали и полировали. Шлифование производили металлографической бумагой с крупным (P60) и мелким зерном (P220–240). В процессе шлифования образец периодически поворачивали на 90°. Смывали частицы абразива водой и полировали на круге суспензиями из оксидов металла (Fe_3O_4 , Cr_2O_3 , Al_2O_3). После достижения зеркального блеска поверхность шлифа промывали водой, спиртом и просушивали фильтровальной бумагой. С помощью энергодисперсионного анализатора рентгеновского излучения фирмы EDAX, встроенного в растровый электронный микроскоп Quanta 600 FEG, были получены спектры характеристического рентгеновского излучения в различных точках на поверхности образца и по поперечному шлифу.

Пористость определяли с помощью оптического инвертированного микроскопа Olympus GX51 с программным обеспечением для количественного анализа изображения. Подготовленные образцы не имели следов шлифования, полирования или выкрашивания структурных составляющих.

Программное обеспечение SIAMS Photolab, которым оснащен микроскоп, разработано с учетом специфики применения методов цифровой микроскопии и анализа изображений для металлографического анализа соединений.

Испытания микротвердости образцов по поперечному шлифу проводили с помощью автоматической системы анализа микротвердости DM-8 по методу Виккерса при нагрузке на индентор 20 г по десяти отпечаткам со свободным выбором места укола в соответствии

с ГОСТ 9450–76 (измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников). Время нагружения индентора составило 15 с.

Результаты исследований и их обсуждение

Обобщенные данные по результатам исследования микроструктуры и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) тяжелых вольфрамовых сплавов из диспергированных электроэрозией частиц сплава ВНЖ-95 в керосине осветительном представлены в табл. 1 и на рис. 3 и 4. Точкам 1 и 2 на рисунках соответствуют спектры характеристического рентгеновского излучения. На изображениях спектров каждому химическому элементу соответствует пик определенной высоты.

Экспериментально установлено, что единственный пик углерода в данном случае обусловлен применением углеродсодержащей рабочей жидкости (керосина осветительного), а все остальные элементы распределены по объему относительно равномерно. Основные элементы в тяжелых вольфрамовых псевдосплавах из диспергированных электроэрозией частиц псевдосплава ВНЖ-95 — W, Ni и Fe.

Результаты исследования рентгеноструктурного (фазового) состава спеченных образцов псевдосплава ВНЖ-95 из диспергированных электроэрозией частиц в керосине осветительном представлены на рис. 4. Диспергирование электроэрозией псевдосплава ВНЖ-95 в керосине осветительном способствует образованию фаз W, Ni и Fe, и FeNi₃.

Результаты исследования пористости образцов металлографическим методом приведены в табл. 2 и на рис. 5.

В результате исследования пористости спеченных образцов металлографическим методом было установлено, что она составляет порядка 0,85 %.

Результаты измерений микротвердости спеченных образцов приведены в табл. 3.

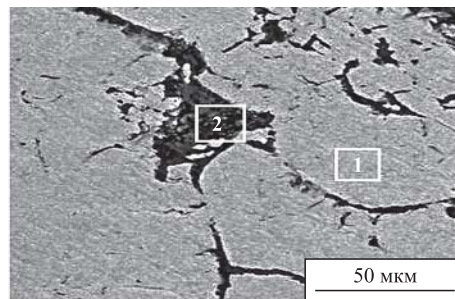
Таблица 1

Результаты рентгеноспектрального микроанализа

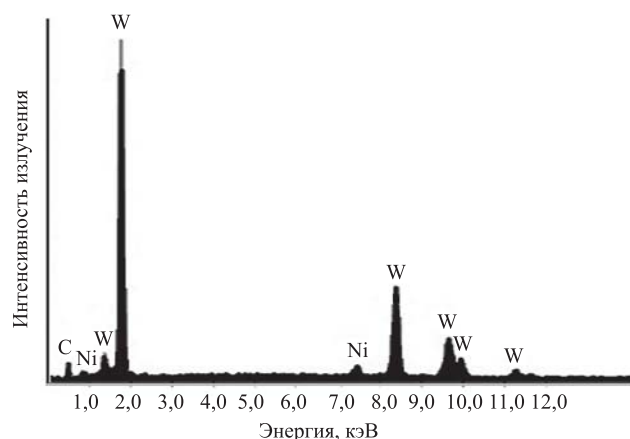
Точка	Содержание элемента, %			
	W	Ni	Fe	C
1	24,56	71,48	1,4	2,56
2	66,48	9,46	7,5	16,56

Примечание. Приведены значения массовых долей элементов в точках 1 и 2, см. рис. 3.

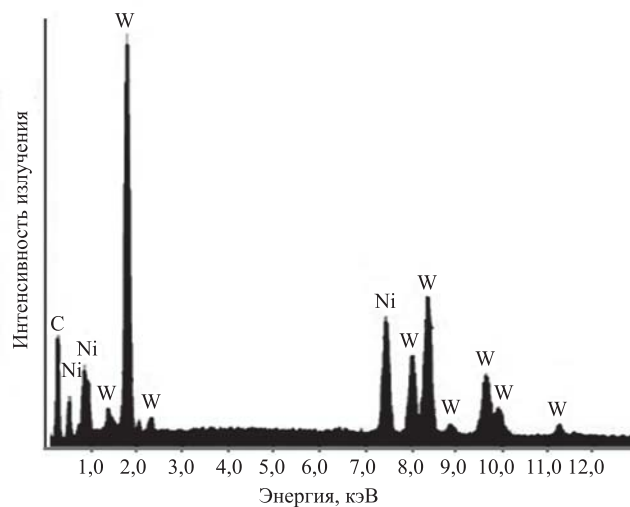
Экспериментально установлено, что микротвердость спеченных образцов, полученных методом искрового плазменного спекания из диспергированных электроэрозией частиц псевдосплава ВНЖ-95, составляет 259 HV_{0,2}.



a)



b)



v)

Рис. 3. Тяжелые вольфрамовые псевдосплавы из диспергированных электроэрозией частиц в керосине осветительном:

a — микроструктура образца с точками проведения РСМА; б — элементный состав в точке 1; в — элементный состав в точке 2

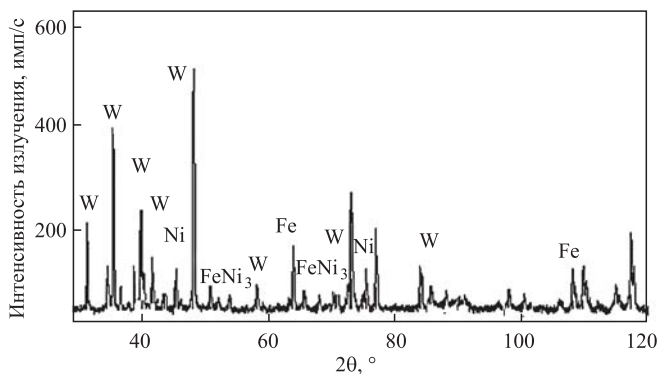
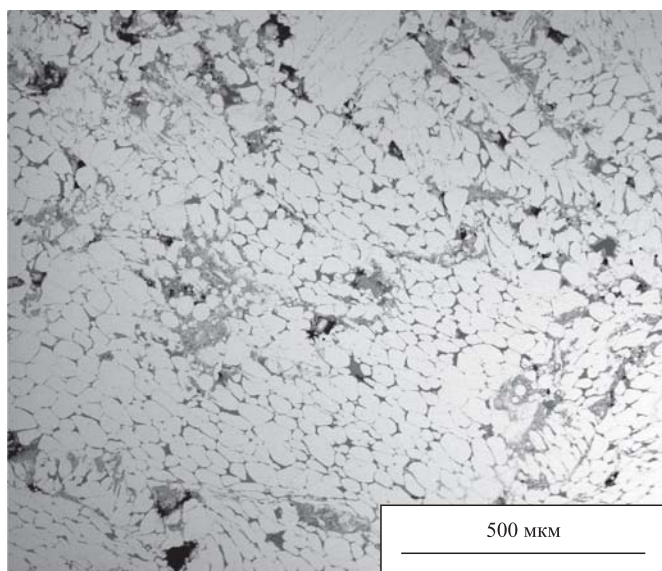
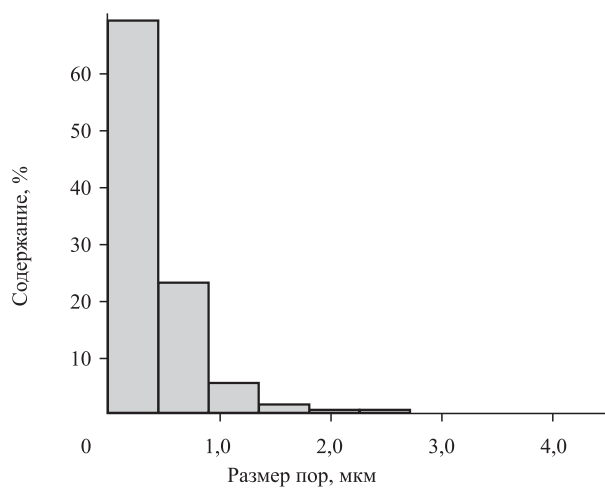


Рис. 4. Дифрактограмма псевдосплава ВНЖ-95



а)



б)

Рис. 5. Результаты исследования пористости:
а — микроструктура поперечного шлифа образца;
б — гистограмма распределения пор по размеру

Таблица 2

Результаты определения пористости металлографическим методом

Исследуемый параметр	Площадь анализа, мкм ²	Пористость, %	Размер пор, мкм		
			Минимальный	Максимальный	Средний
Значение параметра	453 359,4	0,85	0,2	3,4	1,8

Таблица 3

Микротвердость спеченных образцов псевдосплава ВНЖ

Номер отпечатка	HV0,2
1	244
2	258
3	235
4	350
5	213
6	218
7	234
8	237
9	295
10	301

Микротвердость тяжелых вольфрамовых псевдосплавов из диспергированных электроэрозией частиц псевдосплава ВНЖ-95 увеличивается с уменьшением пористости. Такое изменение объясняется концентрацией напряжений в порах, являющихся местами зарождения и распространения трещины при нагружении. С уменьшением размера зерна тяжелых вольфрамовых псевдосплавов из диспергированных электроэрозией частиц псевдосплава ВНЖ-95 микротвердость возрастает.

Выводы

1. На основании проведенных экспериментальных исследований можно заключить, что использование метода искрового плазменного спекания для получения изделий из порошка, полученного электроэрозионным диспергированием псевдосплава ВНЖ-95, позволит обеспечить высокую работоспособность деталей за счет однородности поверхности, благоприятной структуры и низкой пористости изделия.

2. Тяжелые вольфрамовые псевдосплавы из диспергированных электроэрозией частиц псевдосплава ВНЖ-95, полученные искровым плазменным спеканием в условиях быстрого нагрева и малой продолжительности рабочего цикла, обладают более высокими физико-механическими свойствами по сравнению с промышленными псевдосплавами марки ВНЖ-95, из которых были получены исходные частицы порошка, за счет подавления роста зерна и получения равновесного состояния с субмикронным и наномасштабным зерном.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование** структуры и механических свойств нано- и ультрадисперсных механоактивированных вольфрамовых псевдосплавов / В.Н. Чувильдеев и др. // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2010. № 2—1. С. 47—59.
2. **Исследование** процессов спекания нано- и ультрадисперсных механоактивированных порошков системы W—Ni—Fe и получение сверхпрочных тяжелых вольфрамовых сплавов / В.Н. Чувильдеев и др. // Металлы. 2014. № 2. С. 51—66.
3. **Особенности** диффузионной сварки вольфрамового сплава ВНЖ-95 / А.В. Люшинский и др. // Сварочное производство. 2008. № 8. С. 26—28.
4. **Динамическая прочность** тяжелого сплава ВНЖ-90, полученного методом электроимпульсного плазменного спекания / А.М. Брагов и др. // Физическая мезомеханика. 2018. Т. 21. № 2. С. 96—102.
5. **Электрохимическое окисление** тяжелого вольфрамосодержащего сплава типа ВНЖ и его компонентов

в аммиачно-щелочных электролитах / О.Г. Кузнецова и др. // Металлы. 2019. № 3. С. 26—30.

6. **Откольное разрушение** сплава ВНЖ-90 при его нагружении ударными волнами / И.Р. Трунин и др. // Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60. № 5 (357). С. 194—201.
7. **Ageev E.V., Latypov R.A.** Fabrication and investigation of carbide billets from powders prepared by electroerosive dispersion of tungsten-containing wastes // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2014. Т. 55. No. 6. P. 577—580.
8. **Elemental composition** of the powder particles produced by electric discharge dispersion of the wastes of a VK8 hard alloy / R.A. Latypov et al. // Russian metallurgy (Metally). 2017. Т. 2017. № 12. P. 1083—1085.
9. **Properties of the coatings** fabricated by plasma-jet hard-facing by dispersed mechanical engineering wastes / R.A. Latypov et al. // Russian metallurgy (Metally). 2018. Т. 2018. № 6. P. 573—575.
10. **Рентгеноструктурный анализ** порошков, полученных электроэрозионным диспергированием сплава ВНЖ / Е.В. Агеева и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. № 3 (24). С. 60—68.
11. **Селютин В.Л., Латыпова Г.Р., Осьминина А.С.** Размерный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием сплава ВНЖ // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8. № 2 (27). С. 20—31.
12. **Агеев Е.В., Латыпов Р.А.** Получение и исследование заготовок твердого сплава из порошков, полученных электроэрозионным диспергированием вольфрамосодержащих отходов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 5. С. 50—53.



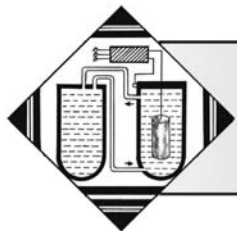
ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,
тел.: (495) 785-6069,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru



¹В.Н. Гадалов, *д-р техн. наук*, ²В.Р. Петренко, *д-р техн. наук*,
¹Е.А. Филатов, ¹И.В. Ворначева, ¹В.Э. Деденко
(¹Юго-западный государственный университет, г. Курск,
²Воронежский государственный технический университет)
E-mail: vornairina2008@yandex.ru

Изучение отливок из модифицированного жаропрочного сплава ЖСЗДК, их структура, фазовый состав и физико-механические свойства

Проведено исследование структуры и свойств отливок, изготовленных с применением различных модификаторов. Установлено, что при модификации сплавов карбонитридом титана и всеми применяемыми модификаторами, кроме карбида вольфрама, размеры зерен уменьшаются, а карбидные выделения равномерно распределяются, способствуя увеличению механических свойств. С помощью метода дифференциального термического анализа установлены критические температуры, при которых происходят фазовые превращения в литом сплаве ЖСЗДК и его аналогах с модификаторами. Уточнены режимы термической обработки модифицированных литых жаропрочных сплавов типа ЖСЗДК.

Ключевые слова: *отливка, жаропрочный сплав, модифицирование, макро- и микроструктура, фазовый состав, механические свойства, дифференциальный термический анализ, термическая обработка, γ' -фаза, карбид.*

A study of the structure and properties of castings made with the use of various modifiers has been carried out. It was found that when the alloys are modified with titanium carbonitride and all used modifiers except tungsten carbide, the grain size decreases, and carbide precipitates are evenly distributed, contributing to an increase in mechanical properties. Using the method of differential thermal analysis, the critical temperatures at which phase transformations occur in the cast ZhS3DK alloy and its analogs with modifiers have been established. The modes of heat treatment of modified cast heat-resistant alloys of the ZhS3DK type have been specified.

Keywords: *casting, heat resistant alloy, modification, macro- and microstructure, phase composition, mechanical properties, differential thermal analysis, heat treatment, γ' -phase, carbide.*

Известно, что на турбонасосные агрегаты (ТНА) жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) при эксплуатации оказывают значительные воздействия знакопеременные нагрузки и повышенные температуры. Форсирование режимов работы ТНА повышает воздействие нагрузок на рабочее колесо турбины. На сегодняшний день при производстве таких агрегатов применяются специальные жаропрочные сплавы на основе никеля (НЖС). Колесо турбины изготавливают методами обработки давлением, порошковой металлургии, а также литьем.

Применяя различные методы литья, получают сравнительно точную заготовку с высоким ка-

чеством поверхности и сложными внутренними полостями. Использование метода с направленной кристаллизацией дает возможность получать отливки с максимально возможным комплексом свойств, однако часто это экономически обоснованно из-за высокой себестоимости продукции. Поэтому основную массу отливок изготавливают методом литья по выплавляемым моделям.

Известно, что лопатки работают в экстремальных условиях, а их возможное разрушение влечет за собой тяжелые последствия, следовательно вопрос о выборе оптимальных параметров литья, разработке и внедрении новых режимов термической обработки, обеспечивающих максимальное

повышение эксплуатационных характеристик никелевых жаропрочных сплавов, весьма актуален.

Необходимый комплекс свойств, который закладывается в сплав в процессе легирования, можно получить с помощью формирования структуры, что определяется выбором оптимальных методов литья и режимов термической обработки. Формируемая при этом конечная микро- и субмикроструктура обеспечивает термическую стабильность изделия [1—4, 6—11, 13, 14, 16—19, 23].

При кристаллизации сплавов типа ЖС возникает дендритная структура с крупными зернами и с большой протяженностью первичных осей дендритов, что не позволяет использовать деталь при форсированных режимах, требующих повышенных эксплуатационных характеристик. Повысить их механические и эксплуатационные свойства можно путем использования методов регулируемого структурообразования, вводя в расплав тугоплавкие ультрадисперсные порошки, играющие роль дополнительных центров кристаллизации структурных составляющих при первичной кристаллизации, т. е. использование модификаторов второго рода [5, 12].

Цель работы — подбор модификатора и его концентрации для оптимизации структуры и обеспечения высоких механических и эксплуатационных свойств колес турбины, не изменяя химический состав сплава ЖСЗДК.

Работу проводили в рамках промышленного эксперимента и она включала в себя изучение влияния условий модифицирования на макро- и микроструктуру и механические свойства изделий при температурах испытаний $T_{исп} = 20$ и 550 °С.

Методика и объект исследований

Сплав ЖСЗДК представляет собой высоколегированный, жаропрочный литейный сплав на никелевой основе с интерметаллидным и карбидным упрочнением. Химический состав сплава представлен в табл. 1.

Основной упрочняющей фазой является интерметаллидная γ' -фаза (среднее содержание ~ 50 %), кристаллическая ГЦК-структура которой аналогична структуре твердого раствора на основе никеля. Но в отличие от неупорядоченного γ -твердого раствора γ' -фаза полностью или частично упорядочена химическим соединением на

основе $Ni_3(Al, Ti)$. Атомы алюминия и титана расположены преимущественно в вершинах, а атомы никеля — в центрах граней гранецентрированной кубической решетки. Параметр кристаллической решетки γ' -фазы зависит от ее химического состава, в частности он наименьший для γ' -фазы состава Ni_3Al ($a = 5,56$ Å), повышается с увеличением содержания Ti и в метастабильной фазе Ni_3Ti достигает ~ 3,60 Å [1].

Дополнительное упрочнение создается карбидами (TiC) или карбонитридами титана (Ti(C, N)) (при достаточном количестве азота, входящего в шихту главным образом через хром), двойными карбидами вида $(Ni, Co, Fe)_n(W, Mo, Cr)_mC$. Индексы m и n в зависимости от локального химического состава сплава могут принимать значения соответственно: 2 и 4; 3 и 3; 4 и 2; 6 и 6. Но образование двойных карбидов в сплаве ЖСЗДК зачастую подавлено и возможно только в случае содержания титана на нижнем, а молибдена и вольфрама — на верхнем пределе. Значительную долю карбидной фазы составляет кубический карбид вида $Me_{23}C_6$, являющийся фазой широкого переменного состава на основе Cr, его можно записать в виде $(Cr, Fe, Ni, W, Mo)_{23}C_6$ [1, 2, 6—9].

Согласно [1, 2] параметры кристаллической решетки фазы Ti(C, N) в сплавах типа ЖС изменяются в пределах 4,25...4,32 Å. Параметры кристаллических решеток двухкомпонентных фаз TiN и TiC равны соответственно 4,25 и 4,32 Å. Карбонитрид титана является основным модификатором сплавов типа ЖС. Его присутствие приводит к измельчению зерна, повышению плотности сплава, уменьшению склонности к межкристаллической пористости. В настоящей работе в целях повышения содержания карбида и карбонитрида титана дополнительно вводили указанные фазы в виде ультрадисперсных порошков [5, 12], состав и концентрация которых приведены в табл. 2.

Наполнителем для порошковых модификаторов служил тугоплавкий ультрадисперсный карбид вольфрама. В связи с тем, что сплав имеет сложный фазовый состав, было изучено влияние наполнителя на полученную в процессе кристаллизации структуру. Для этого в расплав был добавлен только карбид вольфрама (отливка № 2-2). Основным условием выбора материала модификатора было сохранение химического состава.

Таблица 1

Химический состав, % мас., сплава ЖСЗДК

W	Co	Cr	Mo	Al	Ti	C	Fe	Mn	Si	S	P
3,5...5,0	6,5...11,0	11,0...14,0	3,5...5,0	4,0...4,8	2,5...3,2	0,07...0,12	≤ 2,0	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,01	≤ 0,015

Таблица 2

Состав модификаторов для литых и термообработанных отливок сплава ЖСЗДК

Номер литой отливки	Номер термообработанной отливки	Вид модификатора	Содержание, % мас.
1-1	1-2	—	—
—	2-2	WC	0,3
3-1	3-2	WC + Ti	
4-1	4-2	WC + Ti (C, N)	
5-1	5-2	WC + Ti (C, N)	0,45

В качестве материала для испытания использовали образцы-свидетели, вырезанные из отливок до и после модифицирования, подвергнутые термической обработке (ТО) и без нее и такие же отдельно отлитые образцы-свидетели к ним. Термообработку проводили по серийному режиму: 1210 °С, 4 ч, вакуум, охлаждение с напуском аргона.

Дифференциальный термический анализ сплава ЖСЗДК до и после модифицирования. Для определения критических температур фазовых превращений был выполнен дифференциальный термический анализ (ДТА), а также исследование влияния стандартной ТО на изменение этих температур в сплаве ЖСЗДК. Испытания проводили на дериватографе Q-1500 системы "Паулик-Эрдей" в защитной атмосфере аргона.

Образцы нагревали до 1280 °С со скоростью 14 °С/мин, затем охлаждали с печью до 800 °С. Температуру во время эксперимента контролировали термомпарами ПП (типа S), которые зачеканивали в тело образца. Максимальная температура испытания была ограничена температурой начала локального оплавления эвтектической γ - γ' -фазы сплава, так как жидкий расплав мог вывести из строя термопары.

В качестве образца для ДТА применяли Ni 99,999 %, который до температуры плавления не претерпевает никаких фазовых превращений с выделением или поглощением энергии (теплоты) за исключением изменения магнитных свойств кристаллической ГЦК-решетки при переходе через критическую точку 358 °С. Указанная температура находится значительно ниже интервалов температур структурных и фазовых превращений в никелевых жаропрочных сплавах и не наносит ущерба в экспериментах ДТА.

Испытания выполнялись на образцах, вырезанных из термообработанных отливок № 1-2, 2-2...5-2 (см. табл. 2).

На рис. 1 (см. обложку) представлены графики изменения разности температур образцов литого термообработанного жаропрочного сплавов ЖСЗДК (см. табл. 1) без модификаторов сплав № 1-2 и с модификатором сплав № 5-1.

Согласно кривой 1 (рис. 1, а) температура начала растворения упрочняющей γ' -фазы составляет 855 °С, что соответствует перегибу кривой ДТА (точка I). При дальнейшем нагреве происходит постепенное растворение упрочняющей γ' -фазы (эндотермическая реакция) вплоть до полного ее растворения, которое характеризуется перегибом в точке II и соответствует температуре 1225 °С. На участке кривой II—III происходит выравнивание температур исследуемого образца и эталона. При температуре 1240 °С (точка III) происходит начало плавления эвтектической (перитектической) $\gamma + \gamma'$ -фазы. При достижении температур подплавления эвтектической $\gamma + \gamma'$ -фазы отключали нагрев печи дериватографа, затем снимали показания при охлаждении системы исследуемый образец — эталон. Анализ кривой охлаждения 2 указывает, что формирование эвтектики происходит при температуре 1255 °С (точка IV), а распад пересыщенного γ -твердого раствора и выделение упрочняющей γ' -фазы начинается при 1170 °С.

Анализ кривой нагрева 1 на рис. 1, б показал, что растворение упрочняющей γ' -фазы сплава № 5-1 в процессе нагрева начинается при 845 °С (точка I), при достижении температуры 1215 °С этот процесс прекращается (точка II). Оплавление эвтектики происходит при температуре 1270 °С (точка III). Согласно кривой 2, обратное формирование эвтектики происходит при 1250 °С (точка IV), при температуре 1180 °С начинается распад пересыщенного γ -твердого раствора (точка V).

На основании исследований откорректированы режимы ТО модифицированных литых сплавов ЖСЗДК. Так, для сплавов № 2-2; 3-2; 4-2 и 5-2 температуры гомогенизации определены следующие: 2020; 2020, 2030 и 2030 °С, 4 ч, вакуум, охлаждение с напуском аргона соответственно.

Полученные результаты не противоречат ранее проведенным исследованиям по данному вопросу [1, 4, 6—9, 11, 16, 18, 21].

Микро- и макроструктура сплавов. Для исследования микроструктуры деталь разрезали на несколько образцов, включая сечения различной толщины, а также места перехода от сечения одной толщины к другой, т. е. тепловые узлы.

Установлено, что термическая обработка практически не оказывает влияние на вид макроструктуры, поэтому для ее изучения использовали отливки в литом состоянии. Структуру отливок



Рис. 3. Микроструктура сплава ЖСЗДК на примере структуры сечения толщиной ≈ 30 мм отливки № 5-1 ($\times 100$)

изучали после травления в реактиве Круппа следующего состава: 500 мл HCl, 50 г HNO₃, 450 мл H₂O.

Типичный вид макроструктуры и результаты оценки размера зерна представлены на рис. 2, 3 (см. обложку). Размер зерна оценивали по утвержденной ВИАМ шкале № 4 "Для оценки макрозерна на турбинах из сплава ЖСЗДК, $\times 1$ ", согласно которой больший размер зерна соответствует большему значению балла.

Исследование макроструктуры немодифицированной и модифицированных отливок показало следующее:

- размер зерна в отливках № 2-2, 3-1, 4-1 идентичен макроструктуре немодифицированной отливки, различие в размере зерен в сечении обода несущественно;

- модифицирование сплава ЖСЗДК ультрадисперсными порошками WC + Ti(C, N), WC + TiC, WC (0,3 %, мас.) на размер зерна не повлияло;

- модифицирование сплава ЖСЗДК ультрадисперсным порошком WC + Ti(C, N) (0,45 %, мас.) уменьшило размер зерна.

Степень влияния на размер зерна при модифицировании смесью WC + Ti (C, N) зависит от концентрации порошка. При увеличении концен-

трации модификатора в 1,5 раза (отливка № 5-1) размер зерна уменьшился на 2 балла.

Зависимость размера зерна от толщины сечения отливки и степени влияния модификатора при сохранении одинаковых условий литья объясняется различной скоростью затвердевания в процессе кристаллизации [12]. Нерастворимые примеси, изоморфные с кристаллами расплава, являющиеся модификаторами второго рода, снижают интервал метастабильности расплава. Это возможно благодаря уменьшению поверхностного натяжения между возникающим зародышем и примесью [16–20].

Структура сплава в литом состоянии без термообработки представляет собой твердый раствор с сильно выраженной дендритной ликвацией, в которой видны выделения вторичных фаз (см. рис. 3). Очевидно, что по осям дендритов наблюдается обогащение более тугоплавкими элементами и фазами, образующимися в процессе затвердевания. Основное упрочнение создается частицами γ' -фазы на основе Ni₃ (Al, Ti), дополнительное — карбидами [4, 5–9].

При оценке микроструктуры использовали шкалу 1 "Для оценки расположения карбидной фазы (нетравленный шлиф), $\times 100$ ", согласно которой с увеличением балла зерна уменьшается плотность распределения карбидов на микрошлифе, которая характеризует скорость затвердевания [1, 20], что, соответственно, при идентичных условиях кристаллизации характеризует степень влияния модификатора [5, 12].

Основной карбидной фазой в исследуемом сплаве ЖСЗДК является карбид титана, в котором растворяется 15...17 % Mo и 5...7 % W. В сплаве, как в литом, так и термообработанном состоянии выявлен карбонитрид титана.

Состав и морфология первичных карбидных фаз формируются в результате сложных карбидных реакций, протекающих при кристаллизации сплавов. Характерной особенностью морфологии первичных карбидных фаз является их выделение по границам зерен в междендритных про-

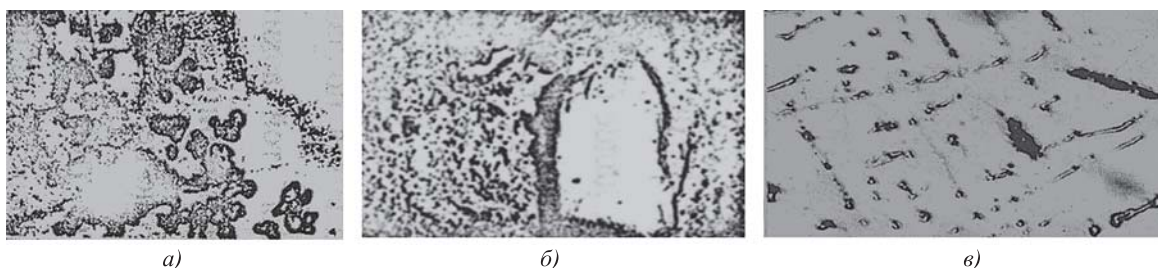


Рис. 4. Структурные составляющие литого сплава ЖСЗДК:

a — карбиды титана ($\times 1000$); *b* — карбид титана, легированный Mo ($\times 2000$); *c* — карбид титана в виде одномерных цепочек ($\times 500$)

Состав карбидных фаз в сплаве ЖСЗДК после термической обработки

Содержание элементов, % мас.										Состав карбидных фаз, ат. доли
Ti	Nb	Mo	W	Cr	Ni	Co	Fe	C	N	
$\frac{64,1}{76,9}$	—	$\frac{10,0}{1,1}$	$\frac{10,5}{1,5}$	$\frac{0,2}{0,6}$	$\frac{0,9}{1,6}$	—	—	$\frac{12,1}{10,8}$	$\frac{—}{8,2}$	$\frac{(Ti_{0,75}Mo_{0,11}W_{0,12}Cr_{0,02})C}{(Ti_{0,95}Me_{0,05})(C_{0,55}N_{0,45})}$

Примечание. В числителе — карбиды, в знаменателе — карбонитриды.

странствах (рис. 4, а), а также переменная дисперсность от 0,03...0,06 до 60...70 мкм и изменение формы в зависимости от состава и технологической обработки. В сплавах с содержанием углерода до 0,08 % карбидные фазы образуют почти непрерывную карбидную цепь по границам зерен. Вплотную или на некотором расстоянии друг от друга выделяются наиболее массивные карбиды типа (Ti, Mo, W)C (рис. 4, б), промежутки между которыми заполнены дисперсными карбидными частицами. Межосные участки дендритов менее насыщены карбидными частицами, которые разбросаны в ликвационной зоне. В этих участках выделяются как карбонитриды, так и карбиды. Карбонитриды часто группируются в колонии, особенно вблизи усадочных и газовых раковин.

Карбидные частицы могут иметь округлую, глыбообразную, клиновидную, скелетообразную или другую форму, распределяться в виде отдельных включений и образовывать различные блоки с другими фазами. В тонкостенных участках отливок или в отдельно отлитых образцах карбиды часто выделяются в виде мелких включений, образующих колонии. Сложные карбиды имеют неправильную форму и располагаются как в междендритных, так и в межзеренных пространствах.

В табл. 3 представлен состав карбидных и карбонитридных фаз в исследуемом литом сплаве ЖСЗДК.

Анализ типичных микроструктур сплава ЖСЗДК в различных сечениях отливок установил для немодифицированного состояния распределение карбидов в виде протяженных одномерных цепочек (рис. 4, в). Такое расположение карбидов наблюдается также в сплаве ЖСЗДК, модифицированном карбидом вольфрама. Другие виды модификаторов способствовали коагуляции карбидных выделений, размер и распределение которых зависят от места их расположения в отливке. Более рассредоточенное расположение характерно для большого сечения. При толщине сечения больше ~ 10 мм распределение карбидов в виде протяженных одномерных цепочек не наблюдается.

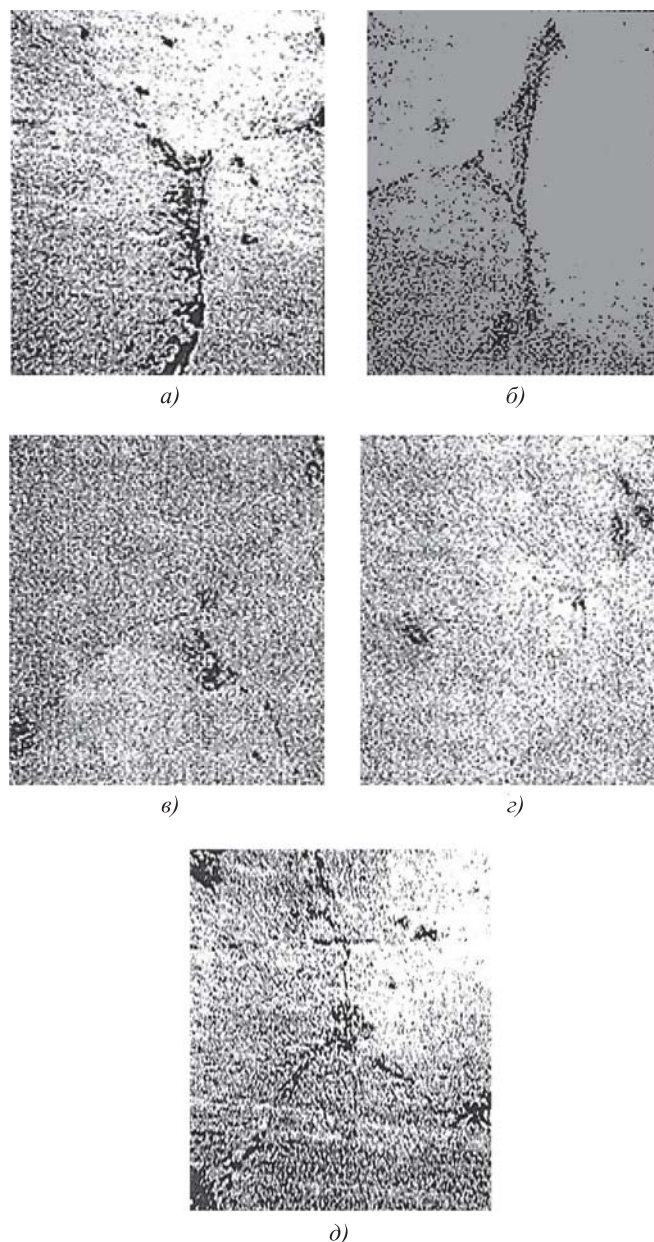


Рис. 6. Микроструктура зернограницных выделений материала отливок № 1-1 (а), 2-2 (б), 3-2 (в), 4-2 (г), 5-1 (д), ×1000

Таблица 4

Дендритная ликвация в литом сплаве ЖСЗДК, толщина стенки отливки 30 мм, центральная зона

Содержание элементов в осевых (числитель) и межосных (знаменатель) участках, % мас.								
Ni	Cr	Al	Ti	Nb	Mo	W	Co	Fe
60,4	11,2	4,6	1,6	—	3,5	4,3	9,8	—
60,5	13,1	4,3	3,9	—	4,6	4,8	8,2	—

На рис. 5 приведены результаты оценки распределения карбидов в зависимости от толщины сечения отливки.

Анализируя графики, представленные на рис. 5 (см. обложку), можно сделать вывод, что наибольшее влияние на расположение карбидов, по сравнению с немодифицированной отливкой № 1-1, оказало модифицирование отливок № 3-1, 4-1 и 5-1. Очевидно, что при большем балле, характеризующем распределение карбидов в сравнительно тонком сечении, более массивным сечениям соответствует меньший балл распределения карбидов модифицированных отливок по сравнению с аналогичными сечениями немодифицированной отливки. При этом распределение карбидов в отливке с порошком карбида вольфрама идентично распределению карбидов в немодифицированной отливке.

Помимо зернограничных выделений карбиды в теле зерна также изменили свою форму: имевшие протяженную форму в модифицированной отливке (рис. 6, а), они стали глобулярными (рис. 6, в) или приобрели огранку кристаллических включений (рис. 6, з). Предполагается, что частицы порошков стали центрами кристаллизации, изоморфными с кристаллами соответствующих фаз. Применение карбида вольфрама (отливка № 2-2) не изменило форму карбидных выделений (рис. 6, б).

Анализ микроструктуры позволяет сделать вывод, что карбид вольфрама практически не влияет на структуру сплава ЖСЗДК в отличие от воздействия порошков карбида и карбонитрида титана, добавление которых приводит к изменению распределения карбидных выделений и их коагуляции (рис. 7). Поскольку формирование структуры сплава ЖСЗДК заканчивается эвтектической кристаллизацией, он обладает значительной ликвацией (табл. 4) [21].

Дендритная ликвация в литом сплаве ЖСЗДК. Микрорентгеноспектральное исследование распределения легирующих элементов в сплавах показало, что Ni и Cr, составляющие основу сплавов, распределены равномерно или имеют незначительную ликвацию. Наибольшую степень дендритной ликвации обладают Ti, Mo, W. Титан и молибден обогащают, а вольфрам обедняет междендритные пространства. Ликвация алюминия и кобальта незначительна [21]. При такой ликвации карбидная

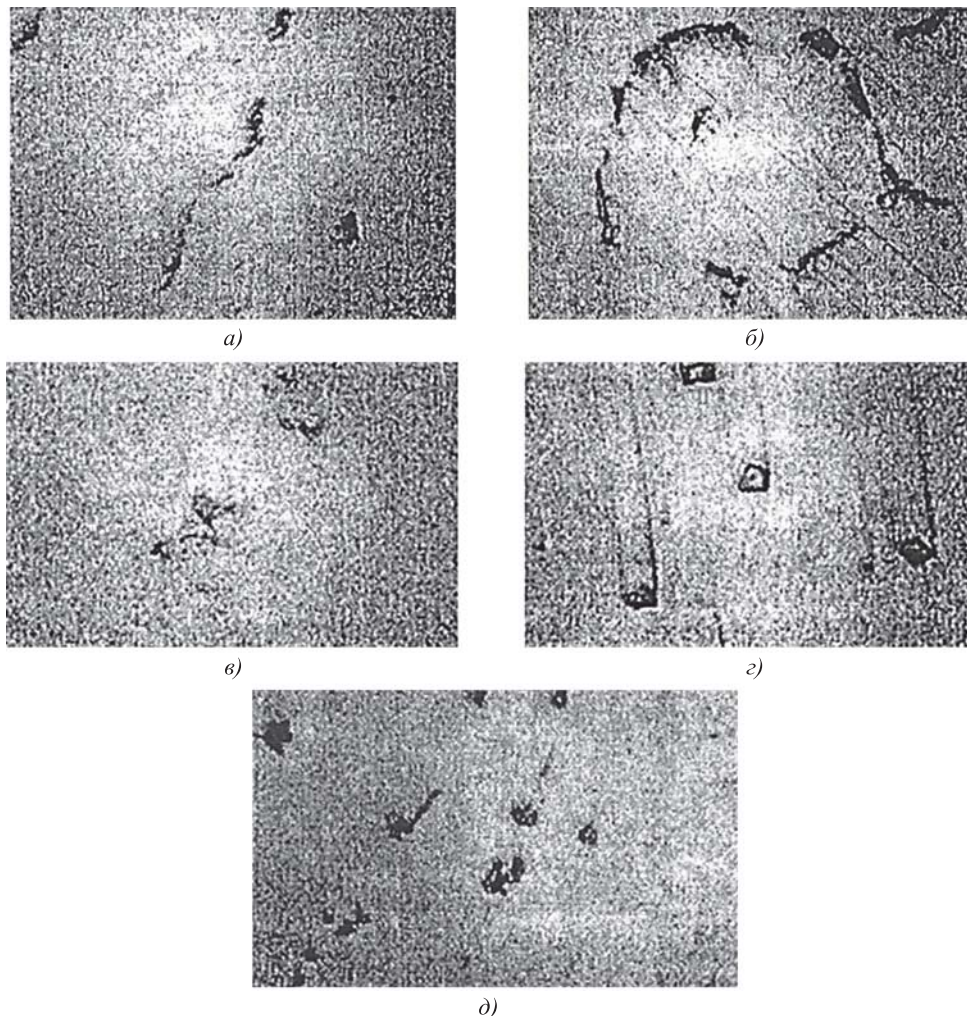


Рис. 7. Микроструктуры литых и термообработанных отливок сплава ЖСЗДК до и после модифицирования: 1-1 (а), 2-2 (б), 3-1 (в) 4-1 (г), 5-2 (д), (×1000)

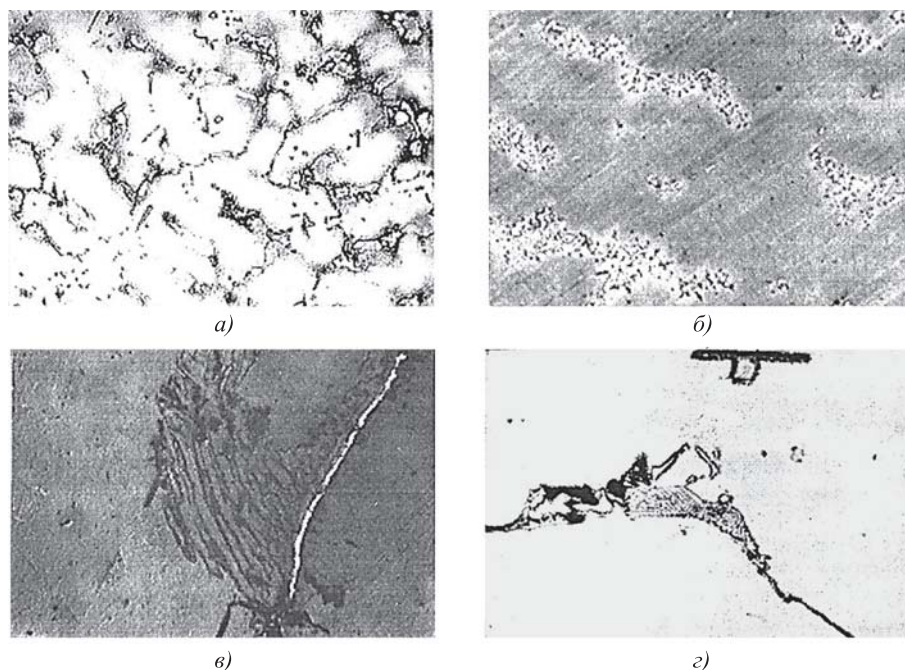


Рис. 8. Микроструктура литого жаропрочного сплава ЖСЗДК:
a — фрагмент ($\times 300$); *b* — фрагмент ($\times 500$); *в* — эвтектика на границе зерна ($\times 600$); *г* — эвтектика внутри дендритных участков ($\times 1000$)

эвтектика становится все более разветвленной, в ней появляются глобулы первичной γ' -фазы, входящие в эвтектику. Эвтектические прослойки становятся более явными и грубыми (рис. 8, *в*, *г*).

тистический (определенный на 40 отливках) уровень механических свойств материала немодифицированных термообработанных отливок и образцов-свидетелей к ним. Также указан среднестатистический (определенный на 40 отливках) уровень механических свойств материала немодифицированных термообработанных отливок и образцов-свидетелей к ним.

Общими признаками макро- и микроструктуры изучаемых сплавов как в литом, так и в термообработанном состоянии, являются крупное разнородное макро- и микрозерно, разветвленное дендритное строение и явно выраженная дендритная ликвация [21], в результате которой в приграничных объемах образуются участки, перенасыщенные отдельными легирующими элементами, что оказывает значительное влияние на формирование интерметаллидных фаз при охлаждении и старении (рис. 9).

Механические свойства при температуре испытания 20 °С [22]. На рис. 10, 11 представлен сравнительный анализ механических свойств образцов из термообработанных модифицированных отливок и образцов-свидетелей к ним.

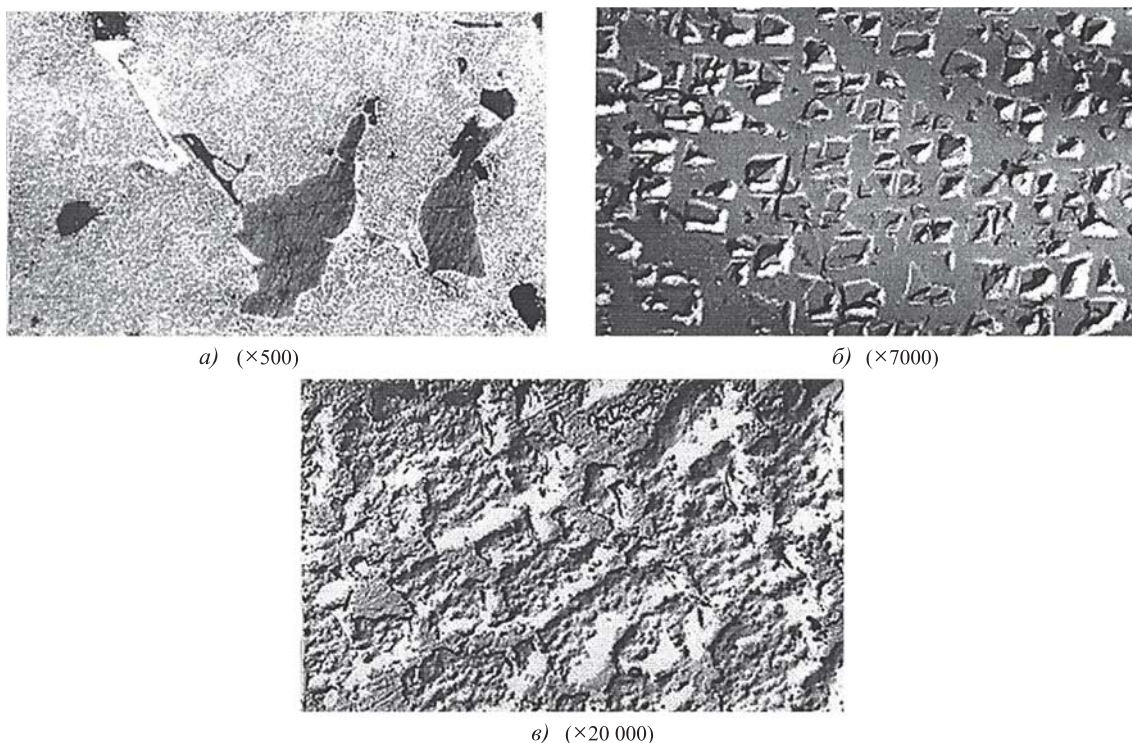


Рис. 9. Интерметаллидная γ -фаза в литом сплаве ЖСЗДК:
a — первичная γ -фаза в сплаве после литья; *б*, *в* — упрочняющая γ -фаза после термообработки

Механические свойства материала отливок, полученных с использованием карбида вольфрама, близки к среднестатистическому уровню механических свойств модифицированных образцов, что свидетельствует об отсутствии влияния данного порошка.

Предел прочности и условный предел текучести образцов модифицированных отливок незначительно отличаются между собой и близки к среднестатистическому уровню (рис. 11). Максимальные значения указанных свойств и относительного удлинения соответствуют материалу модифицированной отливки № 5-2. Ударная вязкость превышает среднестатистический уровень на ~ 45 %.

При сохранении уровня относительного удлинения близким к среднестатистическому значению материал модифицированных отливок № 3-2, 4-2 имеет более высокий уровень ударной вязкости, превышающий среднестатистическое значение на 27 и 50 % соответственно.

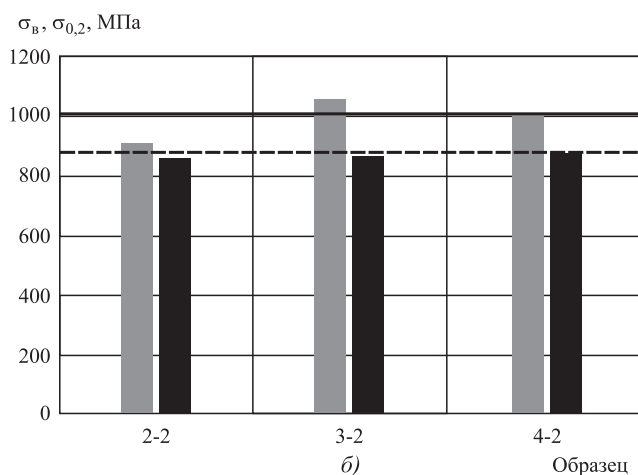
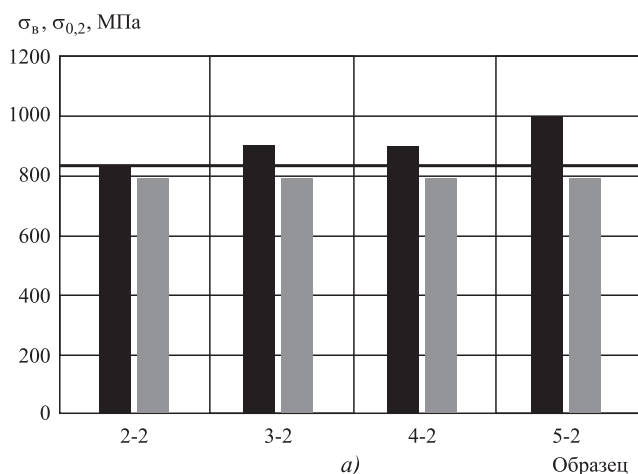


Рис. 10. Предел прочности σ_v и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ образцов, изготовленных из деталей (а) и образцов-свидетелей (б):
— — средний уровень σ_v ; --- — средний уровень $\sigma_{0,2}$

Высокотемпературные испытания [22]. Кратковременная прочность, как ускоренный метод испытания при определении характеристик материала, позволяет оценить работоспособность изделия в условиях кратковременного воздействия высоких температур и нагрузок [1—4, 9, 13, 14, 21]. В настоящей работе изучены механические свойства образцов-свидетелей модифицированных отливок из сплава ЖСЗДК при температуре испытания 550 °С. Результаты высокотемпературного испытания приведены на рис. 12.

Материал образцов-свидетелей модифицированной отливки № 4-2 имеет более высокий уровень механических свойств по сравнению с материалом образцов-свидетелей отливки № 2-2, в частности значение предела прочности выше на 10 %, предела текучести — на 4 %.

Таким образом, в результате изучения структуры и свойств отливок, полученных с использованием различных модификаторов, было показано,

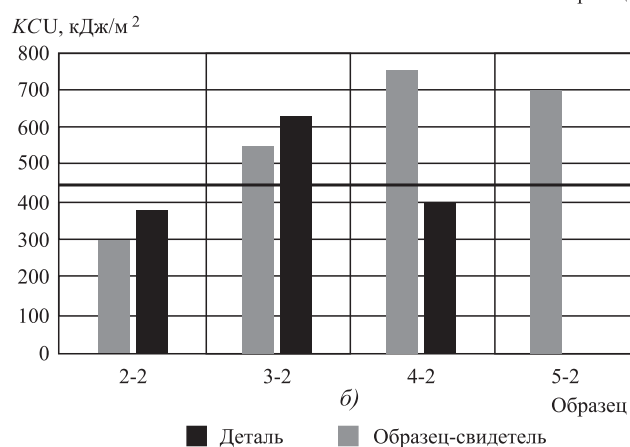
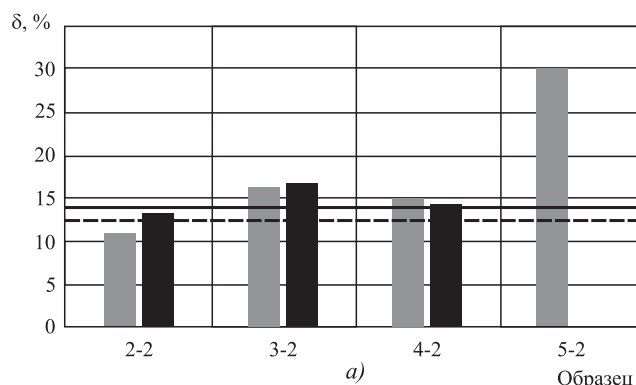


Рис. 11. Относительное удлинение δ (а) и ударная вязкость KCU (б) образцов, изготовленных из отливок и образцов-свидетелей:
— — средний уровень свойств материала образцов-свидетелей; --- — средний уровень материала образцов, изготовленных из отливок

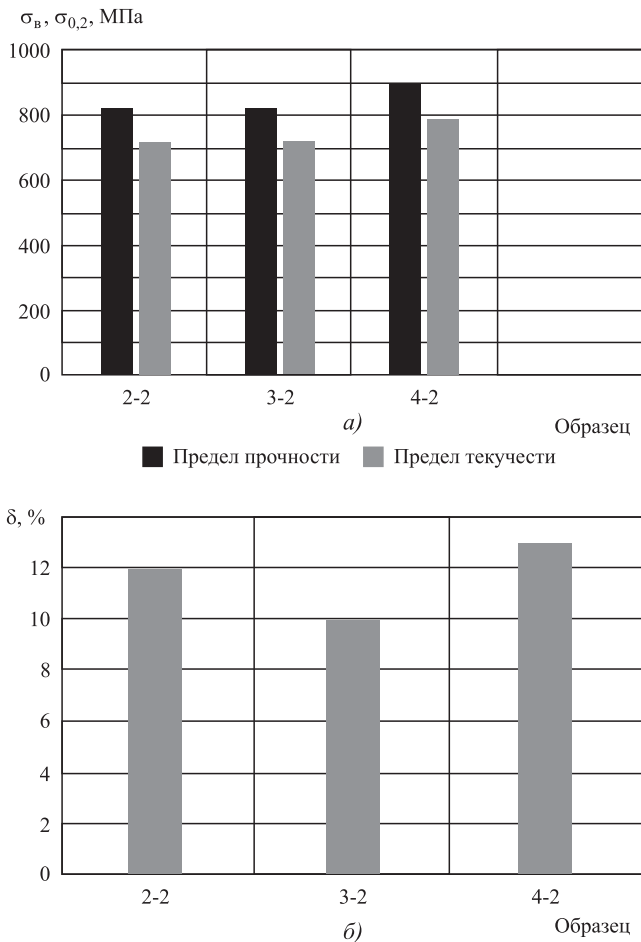


Рис. 12. Результаты механических испытаний при $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$

что введение модификатора карбонитрида титана приводит к уменьшению зерна, равномерному распределению карбидных выделений, увеличению механических свойств. Его использование в дальнейшем может оказать решающее влияние при изготовлении ответственных деталей ТНА.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гадалов В.Н., Рыжков Ф.Н. Литые сплавы на никельхромовой основе, способы их термообработки // Москва: Российская инженерная академия; Курский госуд. техн. ун-т. Курск. 1994. 105 с.
2. Симс Ч.Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. В 2 кн. Кн. 1 / Ч.Т. Симс, Н.С. Столофф, У.К. Хагель; пер. с англ. / под ред. Р.Е. Шалина. М.: Металлургия, 1995. 384 с.
3. Гадалов В.Н., Рыжков Ф.Н., Корневский Н.А. Внутреннее трение, структура и физико-механические свойства литых жаропрочных сплавов на никелевой основе. Курск: Изд-во Курского гос. техн. ун-та. 1996. 215 с.

4. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотрубных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС. 2001. 632 с.
5. Жеребилов Н.С., Гамлер В.В., Жеребилова М.Л. Электрошлаковое литье жаропрочного сплава с модифицированием TiCN // Проблемы и перспективы развития литейного производства / под ред. В.А. Маркова. Барнаул. 2000. Вып. 2. С. 26–28.
6. Каблов Е.Н., Логунов А.В., Сидоров В.В. Особенности легирования и термообработки литых жаропрочных никелевых сплавов. Ч. I // Материаловедение. 2001. № 4. С. 9–15.
7. Каблов Е.Н. Литые жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука. 2006. 272 с.
8. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Литые жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 17–23.
9. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. Кн. 1. Рыбинск: Газотурбинные технологии, 2010. 611 с.
10. Логунов Л.В., Шмотин Ю.Н., Рагозина В.В. Распределение легирующих элементов в γ и γ' -фазах современных высокопрочных никелевых сплавов // Вестник МГОУ. Серия "Техника и технология". 2011. № 3. С. 5–9.
11. Патент 2519075. Российская Федерация, МПК⁷C22C19/05. Жаропрочный сплав на основе никеля для литья деталей горячего тракта газотурбинных установок / В.П. Лубенец, Э.Л. Кац, А.В. Дуб и др. Заявитель и патентообладатель ОАО "НПО Сатурн". № 2013104628/02. Заявл. 05.02.2013. Оpubл. 10.06.2014. Бюл. № 16. 6 с.
12. Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Скрипкина Ю.В. Модифицирование — метод управления структурой и свойствами металлов, сплавов и покрытий // Известия ЮЗГУ. Серия "Техника и технология". 2013. № 2. С. 12–15.
13. Гадалов В.Н., Ляхов А.В., Абакумов А.В. Инно- и реновационные технологические процессы при изготовлении и ремонте газотурбинных установок // Ремонт. Восстановление. Реновация. Материалы VI Всероссийской НПК (3–5 марта 2015 г.). УФА: Башкирский гос. авиационный ун-т. 2015. С. 47–54.
14. Гадалов В.Н., Ковалев С.В., Скрипкина Ю.В. К оценке характеристик жаропрочности на основе метода многофакторного планирования эксперимента // Сб. трудов Всероссийского совещания зав. кафедрами материаловедения и технологии металлов "Междисциплинарные подходы в материаловедении и технологии". (6–8 октября 2015 г.) Белгород: изд-во БГТУ. 2015. С. 7–14.
15. Гадалов В.Н., Филонович А.В., Филатов Е.А. Жаропрочный дисперснотвердеющий сплав ХН67МВТЮ (ЭП202) на никельхромовой основе, некоторые сведения // Естественные и технические науки. 2017. № 8. С. 74–80.
16. Гадалов В.Н., Макарова И.А., Филатов Е.А. Некоторые сведения по изготовлению высококачественных отливок способом литья по выплавляемым моделям (ЛПМ) жаропрочного сплава ЭИ598 // Сб. матер. VII межд. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" (7–10 ноября 2017 г.). М.: ИМЕТ РАН. 2017. С. 534–537.

17. **Использование** фрактографии для оценки надежности жаропрочных литейных сплавов с никельхромовой основой / В.Н. Гадалов, А.Б. Коломенский, И.А. Макарова, Е.А. Филатов // Сб. матер. VII Межд. конф. "Деформация и разрушение материалов и наноматериалов" (7–10 ноября 2017 Т). М.: ИМЕТ РАН. 2017. С. 753–755.

18. **Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Романенко Д.Н.** Влияние структуры на характер разрушения свариваемых литейных никелевых сплавов // Сварочное производство. 2017. № 12. С. 26–32.

19. **Определение** температурного интервала повреждаемости жаропрочного сплава ЭП202 методом внутреннего трения / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, И.А. Макарова и др. // Естественные и технические науки. 2018. № 5 (119). С. 218–221.

20. **Баландин Г.Ф.** Основы теории формирования отливки // М.: Машиностроение. 1976. 328 с.

21. **Гадалов В.Н., Тутов Н.Д., Абашкин Р.Е.** Дендритная ликвация и ее влияние на распределение упрочняющей γ' -фазы в жаропрочном литейном сплаве с никелевой матрицей (ЖСН) // Технология металлов. 2009. № 7. С. 30–33.

22. **Металловедение** и термическая обработка стали: справочник. Том I. Кн. 2. Методы испытаний и исследования / под ред. М.Л. Бернштена, А.Г. Рахштадта. М.: Металлургия, 1991. 462 с.

23. **Изучение** порошков на основе титана и никеля, повышение эксплуатационных характеристик титановых сплавов / В.Н. Гадалов, А.В. Филонович, И.В. Ворначева и др. Курск: Университетская книга, 2018. 121 с.

УДК 620.193

DOI: 10.36652/1813-1336-2021-17-3-131-134

И.А. Стрельников, канд. техн. наук, Д.А. Пестряев, Ш.В. Садетдинов, д-р хим. наук
(Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)
E-mail: strelnikov.15@mail.ru

Влияние дипинаконборатов на коррозионную стойкость стали Ст3 в растворах синтетических моющих средств

Получены экспериментальные данные по влиянию дипинаконборатов лития (ДПКБЛ), натрия (ДПКБН) и калия (ДПКБК) на коррозионную стойкость стали Ст3 в 3 %-ных водных растворах синтетических моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А. Методом измерения стационарных потенциалов стали в растворах синтетических моющих средств выявлена оптимальная концентрация дипинаконборатов, которая равна 20 г/л, при которой достигается наивысшая коррозионная стойкость стали. Исследования коррозионно-электрохимического поведения стали Ст3 в 3 %-ных водных растворах моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А показали, что в присутствии дипинаконборатов плотность анодного тока, при тех же потенциалах, значительно меньше, а область пассивации больше, чем в растворах СМС. Установлено, что ингибирующая коррозию способность дипинаконборатов в растворах СМС увеличивается в ряду ДПКБЛ < ДПКБН < ДПКБК и наибольшим противокоррозионным свойством обладает дипинаконборат калия. Дипинаконбораты понижают скорость коррозии стали при температуре моющего раствора 80 °С, степень защиты находится в пределах от 71,4 до 90,6 %. А коэффициент торможения от 3,6 до 10,4. Путем анализа полученных экспериментальных данных сделано заключение, что дипинаконбораты повышают коррозионную стойкость стали Ст3 и могут быть рекомендованы в качестве противокоррозионной присадки к синтетическим моющим средствам.

Ключевые слова: дипинаконбораты лития, натрия, калия, сталь Ст3, сталь 10, синтетические моющие средства, Лабомид-203, МС-8, Темп-100А, электродные потенциалы стали, концентрация 20 г/л, скорость коррозии, степень защиты, ингибиторный эффект, противокоррозионная присадка.

Experimental data on the effect of lithium dipinaconborates (DPKBL), sodium (DPKBN) and potassium (DPKKB) on the corrosion resistance of St3 steel in 3 % aqueous solutions of Labomid-203, MS-8 and Temp-100A synthetic detergents have been obtained. By measuring the stationary potentials of steel in solutions of synthetic detergents, the optimal concentration of dipinaconborates was revealed, which is 20 g/l, at which the highest corrosion resistance of steel is achieved. Studies of the corrosion-electrochemical behavior of St3 steel in 3 % aqueous solutions of Labomid-203, MS-8 and Temp-100A detergents showed that in the presence of dipinaconborates, the anode current density, at the same potentials, is much lower, and the passivation region is larger than in CMC solutions. It was found that the corrosion-inhibiting ability of dipinaconborates in CMC solutions increases in the series DPKBL < DPKBN < DPKKB, and potassium dipinaconborate has the greatest anticorrosive property. Dipinaconborates reduce the corrosion rate of steel at a washing solution temperature of 80 °C, the degree of protection is in the range from 71.4 to 90.6 %. And the braking coefficient is from 3.6 to 10.4. By analyzing the obtained experimental data, it was concluded that dipinaconborates increase the corrosion resistance of St3 steel and can be recommended as an anticorrosive additive to synthetic detergents.

Keywords: lithium, sodium, potassium dipinaconborates, steel St3, steel 10, synthetic detergents, Labomid-203, MS-8, Temp-100A, electrode potentials of steel, concentration 20 g/l, corrosion rate, degree of protection, inhibitory effect, anti-corrosive additive.

Водорастворимые негорючие синтетические моющие средства (СМС) Лабомид-203, МС-8, Темп-100А, боратфосфатные и другие широко применяются в качестве средства для очистки металлической поверхности от консервационных смазок и жировых загрязнений перед проведением ремонта и сервисного обслуживания различного оборудования. Мойка деталей и узлов машин является одной из важных операций технологического процесса в планово-предупредительном ремонте [1–3].

Одним из существенных недостатков СМС является их относительно большая коррозионная активность по отношению к деталям из стали марки Ст3. Для повышения коррозионной стойкости стали Ст3 к водным растворам СМС добавляют ингибиторы коррозии металлов — нитраты, хроматы, фосфаты, бораты, силикаты и некоторые органические соединения. Боратные соединения характеризуются как противокоррозионные присадки с высоким ингибирующим эффектом и широким спектром действия по отношению к различным видам коррозии [4–7].

Защита металлов с помощью ингибиторов коррозии не является универсальной. Каждый вид ингибитора в определенной среде и определенных условиях действует по-разному. Поэтому разработка новых ингибиторов коррозии металлов, расширение их ассортимента является актуальной проблемой и имеет большую научно-практическую значимость.

Влияние дипинаконборатов (ДПКБ) на коррозионную стойкость стали Ст3 изучали путем добавления 3%-ного водного раствора синтетических моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А дипинаконбората лития (ДПКБЛ) формула которой $\text{Li}[\text{V}(\text{O}_2\text{C}_6\text{H}_{12})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, дипинаконбората натрия (ДПКБН) — $\text{Na}[\text{V}(\text{O}_2\text{C}_6\text{H}_{12})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и дипинаконбората калия (ДПКБК) — $\text{K}[\text{V}(\text{O}_2\text{C}_6\text{H}_{12})_2] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Составы дипинаконборатов лития, натрия и калия установлены химическим анализом, а индивидуальность соединений подтверждена результатами кристаллооптических исследований [8].

Исходя из принципов управления свойствами ингибиторов коррозии, определяли максимальное смещение потенциала активации стали Ст3 в потенциостатическом режиме поляризации в растворах СМС при различных концентрациях дипинаконборатов. Измерения стационарных потенциалов выполняли с помощью высокоомного вольтметра потенциостата П-5848. Электрод сравнения — хлоридсеребряный (х.с.э.). Без внешней поляризации стационарный потенциал стали Ст3 в 3%-ных водных растворах синтетических моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А со временем разблагораживается и через 24 ч принимает значение $-0,26$, $-0,23$ и $-0,21$ В соответственно. Электродные потенциалы стали приобретают более положительные значения в растворах СМС в присутствии дипинаконборатов. В частности, введение в 3%-ные водные растворы моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А дипинаконбората калия в количестве 20 г/л способствует облагораживанию потенциала стали до $-0,14$; $-0,08$ и $-0,04$ В соответственно (рис. 1). Дальнейшее увеличение концентрации дипинаконборатных добавок не оказывает существенного влияния на изменение стационарного потенциала исследуемой стали и поэтому последующие исследования проводили с концентрацией 20 г/л ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК.

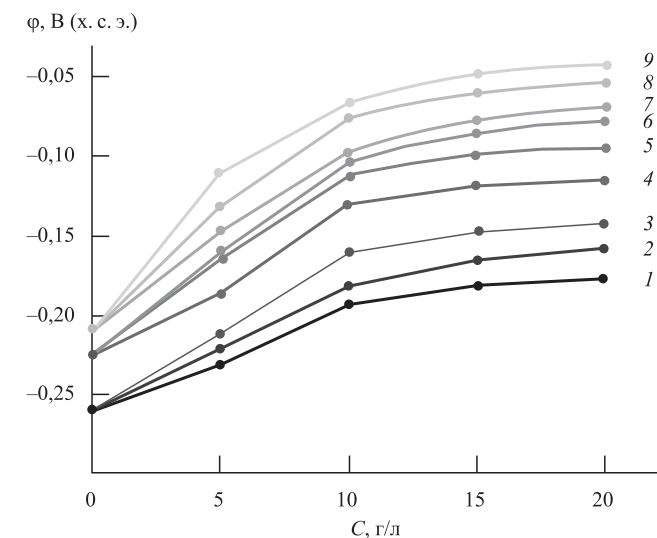


Рис. 1. Изменение стационарного потенциала стали Ст3 в 3%-ных водных растворах СМС при различных концентрациях ДПКБ через 24 ч:

1 — Лабомид-203 + ДПКБЛ; 2 — Лабомид-203 + ДПКБН; 3 — Лабомид-203 + ДПКБК; 4 — МС-8 + ДПКБЛ; 5 — МС-8 + ДПКБН; 6 — МС-8 + ДПКБК; 7 — Темп-100А + ДПКБЛ; 8 — Темп-100А + ДПКБН; 9 — Темп-100А + ДПКБК

раживается и через 24 ч принимает значение $-0,26$, $-0,23$ и $-0,21$ В соответственно. Электродные потенциалы стали приобретают более положительные значения в растворах СМС в присутствии дипинаконборатов. В частности, введение в 3%-ные водные растворы моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А дипинаконбората калия в количестве 20 г/л способствует облагораживанию потенциала стали до $-0,14$; $-0,08$ и $-0,04$ В соответственно (рис. 1). Дальнейшее увеличение концентрации дипинаконборатных добавок не оказывает существенного влияния на изменение стационарного потенциала исследуемой стали и поэтому последующие исследования проводили с концентрацией 20 г/л ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК.

Электрохимические исследования показали, что ДПКБ являются ингибиторами анодного действия. При анодной поляризации металл сразу переходит в пассивное состояние. По анодным потенциодинамическим поляризационным кривым были определены значения плотности анодного тока в области пассивного состояния для стали Ст3 в присутствии ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК при различных значениях потенциалов (ϕ , В по х.с.э.). По результатам гравиметрических исследований рассчитывали значения ингибиторного эффекта (коэффициента торможения) по формуле:

$$\gamma = K_0/K,$$

Влияние дипинаконборатов на коррозионно-электрохимическое поведение стали Ст3 в растворах СМС

Испытуемая среда	Коэффициент торможения γ	Степень защиты Z , %	Плотность анодного тока при стационарном потенциале стали ϕ , В				
			-0,2	0	0,2	0,4	0,6
			i_a , мкА/см ²				
3%-ный раствор Лабомид-203 (фон)	1,0	0	0,9	2,6	3,1	3,4	3,7
3%-ный раствор МС-8 (фон)			0,7	2,3	2,8	3,0	3,3
3%-ный раствор Темп-100А(фон)			0,6	2,1	2,6	2,8	3,1
3%-ный раствор Лабомид-203 + ДПКБЛ	5,42	81,58	0,8	1,8	2,5	3,0	3,3
3%-ный раствор Лабомид-203 + ДПКБН	6,48	84,61	0,6	1,5	2,1	2,7	3,0
3%-ный раствор Лабомид-203 + ДПКБК	8,14	87,76	0,4	1,2	1,9	2,5	2,8
3%-ный раствор МС-8 + ДПКБЛ	5,91	83,08	0,6	1,7	2,0	2,3	2,6
3%-ный раствор МС-8 + ДПКБН	7,65	86,92	0,5	1,3	1,7	2,0	2,3
3%-ный раствор МС-8 + ДПКБК	10,56	91,54	0,4	1,1	1,5	1,8	2,0
3%-ный раствор Темп-100А + ДПКБЛ	6,84	85,38	0,4	0,9	1,6	1,9	2,2
3%-ный раствор Темп-100А + ДПКБН	9,02	92,54	0,2	0,6	1,2	1,5	1,8
3%-ный раствор Темп-100А + ДПКБК	12,83	96,77	0,1	0,4	0,9	1,2	1,4

где K и K_0 — скорость коррозии в присутствии ингибитора и без него соответственно. Степень защиты, характеризующую полноту подавления коррозии, определяли в %: $Z = [(K_0 - K)/K_0] \cdot 100$. Все измерения проводили при естественной аэрации и температуре $20 \pm 0,2$ °С известными и применяемыми в научных исследованиях методами [9, 10].

Экспериментальные данные по влиянию ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК на коррозионно-электрохимическое поведение стали Ст3 в 3%-ных водных растворах моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А приведены в таблице. Полученные данные свидетельствуют о том, что в присутствии дипинаконборатов плотность анодного тока при тех же значениях потенциала значительно меньше, а область пассивации больше, чем в растворах СМС.

Ингибирующая коррозию способность дипинаконборатов в растворах СМС увеличивается в ряду ДПКБЛ < ДПКБН < ДПКБК и наибольшим противокоррозионным свойством обладает дипинаконборат калия. Результаты гравиметрических исследований и электрохимических измерений хорошо согласуются с ранее полученными данными [11, 12]. Повышение коррозионной стойкости стали Ст3 в растворах с участием боратных соединений объясняется, согласно литературным данным [13, 14], образованием на поверхности металла малорастворимых соединений, формирующих плотную пассивную пленку.

С учетом того, что синтетические моющие средства Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А приме-

няются при температурном режиме моющего раствора 80 °С, проведены коррозионные испытания при указанной температуре методом, описанным в работе [15]. Образцы из стали Ст3 погружали в 3%-ные водные растворы моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А, выдерживали 8 ч при перемешивании и температуре 80 °С, затем извлекали и оставляли на воздухе на 16 ч. Это составляло один цикл. Всего проводили 5 циклов испытаний (120 ч). После каждого цикла испытаний образцы взвешивали и по убыли массы образцов, отнесенной к единице поверхности за единицу времени, вычисляли скорость коррозии по формуле

$$K = (m_0 - m)/(St),$$

где m_0 и m — масса пластинки, г, до и после опыта соответственно;

S — площадь пластинки, м²;

t — время проведения опыта, ч.

Полученные сравнительные данные показали, что скорость коррозии стали Ст3 в присутствии дипинаконборатов лития, натрия и калия в 3%-ных водных растворах моющих средств Лабомид-203, МС-8 и Темп-100А понижается (рис. 2). Для ДПКБЛ степень защиты составляет от 62,9...85,2 %, коэффициент торможения 2,7...6,8; для ДПКБН — 66,7...88,9 % и 3,0...8,7; для ДПКБК — 71,4...90,6 % и 3,6...10,4 соответственно после 120 ч испытания.

Путем анализа полученных экспериментальных данных можно заключить, что ДПКБЛ, ДПКБН и ДПКБК повышают коррозионную стойкость

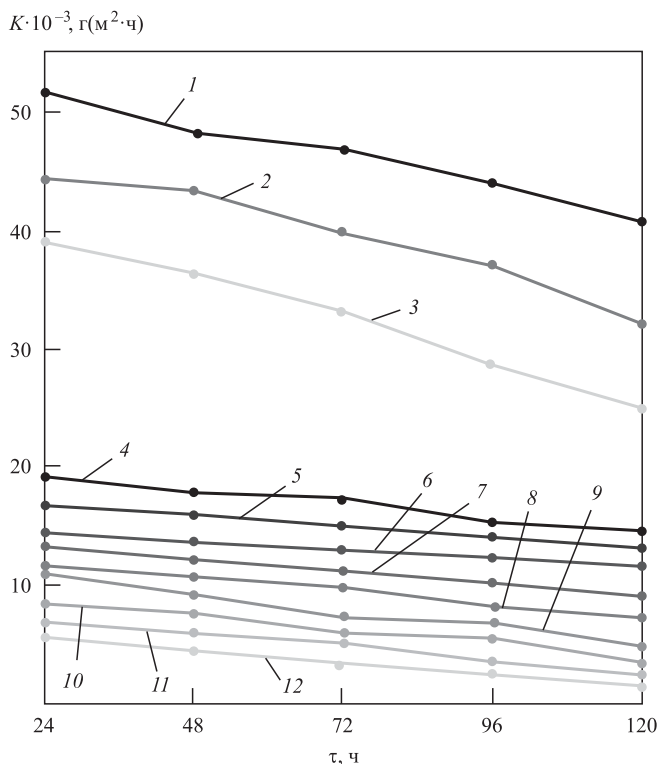


Рис. 2. Влияние дипинаконборатов на скорость коррозии стали Ст3:

1 — 3%-ный раствор Лабомид-203; 2 — 3%-ный раствор МС-8; 3 — 3%-ный раствор Темп-100А; 4 — 3%-ный раствор Лабомид-203 + ДПКБЛ; 5 — 3%-ный раствор Лабомид-203 + ДПКБН; 6 — 3%-ный раствор Лабомид-203 + ДПКБК; 7 — 3%-ный раствор МС-8 + ДПКБЛ; 8 — 3%-ный раствор МС-8 + ДПКБН; 9 — 3%-ный раствор МС-8 + ДПКБК; 10 — 3%-ный раствор Темп-100А + ДПКБЛ; 11 — 3%-ный раствор Темп-100А + ДПКБН; 12 — 3%-ный раствор Темп-100А + ДПКБК

стали Ст3 и могут быть рекомендованы в качестве противокоррозионной присадки к синтетическим моющим средствам.

Выводы

1. Дипинаконбораты лития, натрия и калия повышают коррозионную стойкость стали Ст3 в водных растворах синтетических моющих средств.
2. Наиболее эффективной противокоррозионной присадкой к СМС является дипинаконборат калия при концентрации 20 г/л.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Разработка** композиции технологической жидкости для увеличения долговечности деталей и узлов транспортных средств / И.В. Фадеев и др. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 3 (50). С. 90—97.

2. **Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В.** Влияние температуры раствора боратфосфатных моющих средств на качество очистки металла // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. № 2 (13). С. 23—28.

3. **Быков В.В.** Повышение эффективности мойки деталей при ремонте автомобилей // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1 (53). С. 358—363.

4. **Садетдинов Ш.В., Стрельников И.А., Пестряев Д.А.** Аминоборатные ингибиторы коррозии механического оборудования металлургических заводов // Механическое оборудование металлургических заводов. 2020. № 1 (14). С. 18—24.

5. **Новые ингибиторы** коррозии для защиты сельскохозяйственной техники / И.А. Успенский и др. // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 3 (59). С. 365—376.

6. **Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В., Пестряева Л.Ш.** Влияние некоторых боратов на электрохимическое поведение стали в растворах синтетических моющих средств // Перспективы развития технического сервиса в агропромышленном комплексе: сборник материалов Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции, посвященной 55-летию создания кафедры технического сервиса (ремонта машин и технологии конструкционных материалов). 2019. С. 145—152.

7. **Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В.** Влияние моноборатов лития, натрия, калия на моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств // Приволжский научный журнал. 2015. № 2 (34). С. 86—90.

8. **Садетдинов Ш.В.** Повышение коррозионной стойкости углеродистой стали с помощью дипинаконборатных соединений // Черные металлы. 2020. № 11. С. 40—45.

9. **Влияние** моноэтаноламинтетраборатаммония в составе защитного покрытия на электрохимическое поведение стали 08кп / И.В. Фадеев и др. // Грузовик. 2016. № 12. С. 15—20.

10. **Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В.** Противокоррозионная присадка триборатэтилендиамина к моющим средствам для агропромышленного комплекса // Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов "Молодежь и инновации". 2020. С. 261—265.

11. **Получение** ингибиторов коррозии черных металлов методом физико-химического анализа / И.А. Успенский и др. // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2020. № 2 (46). С. 90—95.

12. **Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В.** Коррозия черных металлов в средах, имитирующих условия эксплуатации автомобилей // Черные металлы. 2019. № 4. С. 67—72.

13. **Влияние** фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах / И.Е. Илларионов и др. // Черные металлы. 2018. № 5. С. 47—53.

14. **Фадеев И.В., Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В.** Аминоборатный раствор для получения магнетитных покрытий на стали // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2016. № 1 (44). С. 68—74.

15. **Влияние** боратов на противокоррозионную стойкость стали Ст3 в растворах синтетических моющих средств / И.Е. Илларионов и др. // Черные металлы. 2020. № 1. С. 50—55.

А.А. Усольцев, канд. техн. наук, Н.А. Козырев, д-р техн. наук,
А.Р. Михно, А.А. Тюрин, А.А. Уманский, канд. техн. наук
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Влияние введения титана в состав порошковой проволоки типа 25X5ФМС

Изучено влияние введения титана на микроструктуру и физико-механические свойства металла наплавленного порошковой проволокой 25X5ФМС. Наплавку исследуемых образцов осуществляли с использованием флюса, изготовленного из шлакового щебня, получаемого при производстве силикомарганца. Изучена микроструктура и неметаллические включения в наплавленном слое. Показано, что с повышением концентрации титана в наплавленном металле увеличивается твердость и снижается износ.

Ключевые слова: наплавка, порошковая проволока, сварочный флюс, шлак производства силикомарганца, техногенные отходы, микроструктура, неметаллические включения, твердость, износ.

The effect of titanium introduction on the microstructure and physical and mechanical properties of metal deposited with flux-cored wire 25X5FMS has been studied. Surfacing of the investigated samples was carried out using a flux made from crushed slag produced by silicomanganese. The microstructure and non-metallic inclusions in the deposited layer have been studied. It is shown that with an increase in the concentration of titanium in the deposited metal, the hardness increases and the wear decreases.

Keywords: surfacing, flux-cored wire, welding flux, silicomanganese production slag, industrial waste, microstructure, non-metallic inclusions, hardness, wear.

Введение

В развитых странах более 90 % всей выплавляемой стали разливается с применением технологии непрерывной разливки. Однако эффективность работы машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) во многом зависит от стойкости роликов, эксплуатируемых в условиях длительных циклических и термомеханических нагрузок в присутствии агрессивной среды. Разрушение рабочей поверхности роликов проявляется в виде износа поверхностного слоя и образования трещин разгара. Восстановительная наплавка роликов МНЛЗ наиболее эффективна с применением в качестве наплавочного материала порошковых проволок. Эффективность выработанного решения определяется стоимостью порошковой проволоки, производительностью процесса, толщиной наплавленного слоя, энергоемкостью всех этапов технологии, стоимостью монтажных работ, простоем оборудования.

В настоящее время для восстановительной наплавки роликов МНЛЗ традиционно применяются сплошные и порошковые проволоки таких марок как: 12X13, 20X17 в сочетании с флюсами АН20С и АН26П, обеспечивающие хромистый наплавленный металл с мартенситно-ферритной структурой, для которой характерно формирование больших полей δ-феррита, являющихся причиной образования трещин разгара и повышенного износа. Кроме того, процесс наплавки характеризуется риском отслоения шлаковой корки, что является причиной появления дефектов в виде

протяженных шлаковых включений и усложнения условий труда оператора наплавочной установки. Ресурс таких роликов составляет 300...400 тыс. т, что не отвечает современным требованиям. Причина этого — неудовлетворительное структурное состояние наплавленного металла [1–3].

Для устранения приведенных недостатков в РФ широко используется наплавка под флюсом порошковыми проволоками типа 25X5ФМС. Ряд технологий наплавки в сочетании с флюсами на основе шлака производства силикомарганца разрабатан в условиях СибГИУ [4–9].

В целях обеспечения высокой работоспособности наплавленного металла проведены лабораторные исследования по совершенствованию шихтовки порошковой проволоки марки 25XФМС путем введения в состав дополнительно порошка титана.

Материалы и методы исследования

Получали порошковую проволоку типа 25X5ФМС на лабораторном станке для изготовления порошковых проволок с использованием порошкообразных материалов: железного порошка ПЖВ-1 по ГОСТ 9849–86, порошка марганца МР-0 по ГОСТ 6008–90, порошка кремния КР-1 по ГОСТ 2169–69, порошка хрома ПХ1С по ТУ 14-1-1474–75, порошка никеля ПНК 1Л5 по ГОСТ 9722–97, порошка феррованадия марки ФВ50У 0,6 по ГОСТ 27130–94, молибденового порошка МПЧ по ТУ 48-19-69–80, порошка титана

Таблица 1

Химический состав наплавленного слоя

Маркировка образца	Массовая доля элемента, %												
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Ti	V	Mo	Al	Nb	S	P
T1	0,36	0,96	1,21	5,57	0,7	0,08	0,001	0,31	1,29	0,024	0,002	0,057	0,023
T2	0,42	0,9	1,18	5,63	0,72	0,08	0,021	0,38	1,37	0,027	0,004	0,055	0,024
T3	0,41	1,34	1,65	5,89	0,7	0,07	0,064	0,34	1,32	0,038	0,003	0,044	0,028
T4	0,39	0,98	1,24	5,45	0,71	0,05	0,067	0,32	1,25	0,038	0,002	0,051	0,029

ПТС по ТУ 14-22-57—92 и пыли газоочистки алюминиевого производства в качестве углеродфторсодержащего материала вместо графита аморфного.

Были изготовлены четыре порошковые проволоки типа 25X5ФМС с различным содержанием порошка титана. Далее с использованием этих порошковых проволок были изготовлены четыре образца наплавленного металла (рис. 1, см. обложку), которые и подвергали соответствующим исследованиям.

Наплавку образцов осуществляли с использованием разработанного в условиях СибГИУ [10] сварочного флюса, изготовленного из шлака, полученного при производстве силикомарганца, с химическим составом, % мас.: 0,52 FeO; 29,13 CaO; 16,15 MnO; 42,40 SiO₂; 1,39 MgO; 6,80 Al₂O₃; 0,17 TiO₂; 0,59 K₂O; 0,18 Na₂O; 0,024 C; 0,23 S; 0,022 P; 0,32 F; 0,004 ZnO; 0,033 Cr₂O₃. Наплавку исследуемых образцов выполняли по режиму, рекомендованному по ГОСТ 26101—84: сила тока 620 А, напряжение 32 В, скорость наплавки 20 см/мин.

Результаты исследования и их обсуждение

Химический состав наплавленного металла представлен в табл. 1.

Исследование образцов наплавленного слоя на наличие неметаллических включений (табл. 2, рис. 1, см. обложку) проводили по ГОСТ 1778—70. Полированную поверхность изучали при увеличении ×100.

Металлографические исследования полированных микрошлифов проводили с помощью оптического микроскопа OLYMPUS GX-51 в светлом поле в диапазоне увеличений от ×100 до ×1000. Микроструктуру наплавленных образцов изучали при увеличении ×500 (см. рис. 2 на обложке) после травления образцов в 4%-ном растворе HNO₃ в этиловом спирте.

Измерение твердости наплавленного слоя исследуемых образцов выполняли по методу Бринелля с помощью ультразвукового твердомера УЗИТ-3 в соответствии с требованиями ГОСТ 9012—59.

Износостойкость наплавленного слоя исследуемых образцов определяли по схеме диск—ко-

лодка путем проведения испытаний на машине 2070 СМТ-1. Результаты представлены в табл. 3.

На основе полученных данных по химическому составу, износостойкости и твердости исследуемых образцов построены зависимости, представленные на рис. 3.

Построенные зависимости указывают на влияние содержания титана в наплавленном слое на твердость и износостойкость исследуемых образцов. По результатам вычислений получены зависимости, адекватность которых фактическим значениям проверяли по показателю средней ошибки аппроксимации:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{Y_i - \tilde{Y}_i}{Y_i} \right| \cdot 100, \quad (1)$$

где m — число наблюдений; \tilde{Y}_i , Y_i — вычисленное и фактическое значение результирующего показателя.

Построены регрессионные модели износостойкости и твердости наплавленного слоя от массо-

Таблица 2

Неметаллические включения наплавленных образцов

Номер образца	Оксиды точечные	Силикаты недеформирующиеся
T1	2а	4а, 2б
T2	2а	4а, 1б
T3	2а	4а, 5б
T4	2а	4а, 5б

Таблица 3

Степень износа и твердость исследуемых образцов

Номер образца	Твердость НВ (среднее значение)	Твердость HRC (среднее значение)	Износостойкость, 10 ⁻⁵ , г/оборот
T1	402...573 (473)	40...46 (43)	2,94
T2	456...510 (484)	45...48 (45)	2,76
T3	475...561 (507)	45...50 (48)	2,37
T4	445...526 (487)	45...48 (46)	2,61

Выводы

1. Проведенные исследования указывают высокую степень угара титана в наплавленном слое и высокое содержание марганца.
2. Увеличение содержания титана в наплавленном металле способствует повышению твердости и износостойкости.
3. Математические модели степени износа и твердости от химического состава наплавленного слоя могут быть использованы при разработке новых порошковых проволок для наплавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлицын С.В., Зверева И.Н., Шекшеев М.А. Сварочные и наплавочные материалы [Электронный ресурс]: учебник. М.: Инфра-Инженерия, 2020. Режим доступа: <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785972904020.html>.
2. Восстановительная наплавка порошковой проволокой деталей металлургического и горнодобывающего оборудования / Л.Н. Орлов и др. // Автоматическая сварка. 2005. № 12. С. 45–50.
3. Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А. Исследование и разработка новых составов порошковой проволоки для наплавки прокатных валков, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик наплавленного металла // Производство проката. 2016. № 5. С. 43–47.
4. Влияние введения в шихту для производства порошковой проволоки системы С–Si–Mn–Cr–V–Mo углеродфторсодержащей добавки и никеля / Н.А. Козырев и др. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 2014. № 4. С. 34–37.
5. Влияние никеля и углеродфторсодержащей добавки на структуру и свойства наплавленной стали 25X5ФМС / Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2016. № 3. С. 54–59.
6. Уманский А.А., Козырев Н.А., Титов Д.А. Экспериментальные исследования влияния состава порошковых проволок систем легирования С–Si–Mn–Cr–V–Mo и С–Si–Mn–Cr–W–V // Бюллетень "Черная металлургия" 2016. № 4. С. 74–78.
7. Изучение влияния кобальта на структуру и свойства наплавленного порошковой проволокой системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V металла / И.В. Осетковский и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 2. С. 100–106.
8. Изучение структуры и свойств металла, наплавленного порошковой проволокой системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Mo–Ni–V–Co / А.И. Гусев и др. // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 2. С. 113–119.
9. Разработка новых порошковых проволок для наплавки. Порошковые проволоки с использованием углеродфторсодержащих материалов для ремонта прокатных валков / Н.А. Козырев и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. Вып. 1 (1417). С. 77–86.
10. Разработка новых сварочных флюсов на основе шлака силикомарганца / Н.А. Козырев и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 6 (1422). С. 55–66.

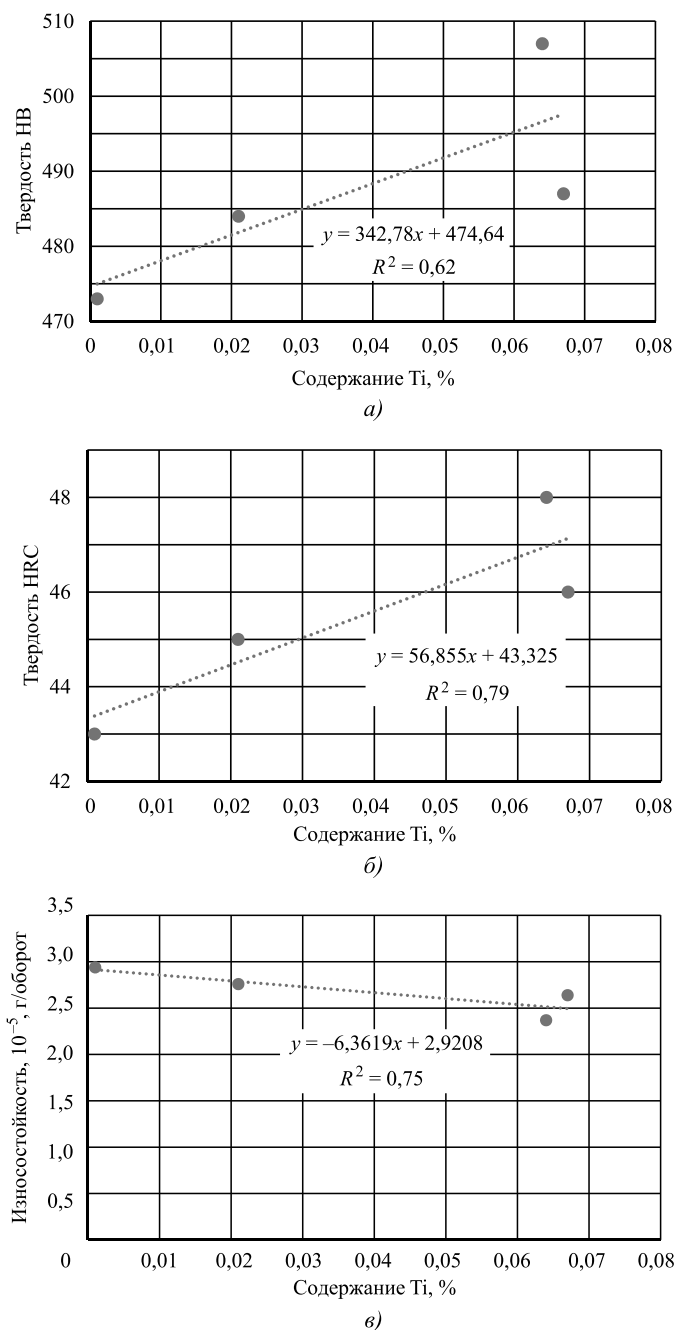


Рис. 3. Зависимости от содержания титана в наплавленном слое:
 а — твердости НВ; б — твердости HRC; в — износостойкости

вой доли элементов, в основном определяющих исследуемые свойства:

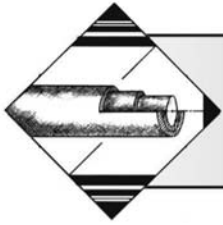
$$\begin{aligned} \text{износостойкость, } 10^{-5} \text{ (г/оборот)} &= \\ &= 6,946 + 0,18\text{Mn} - 0,757\text{Cr} - 6,459\text{Ti}, \\ &\text{ошибка аппроксимации } 0,003 \text{ \%}; \end{aligned}$$

$$\text{HV} = 140,141 - 16,738\text{Mn} + 63,335\text{Cr} + 334,885\text{Ti},$$

ошибка аппроксимации 0,0015 %;

$$\text{HRC} = -3,69 - 4,734\text{Mn} + 9,40\text{Cr} + 64,70\text{Ti},$$

ошибка аппроксимации 0,0025 %.



Н.С. Поташникова, В.П. Смоленцев, д-р техн. наук, М.Г. Поташников, канд. техн. наук
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Аддитивная технология создания инструмента для электроабразивной обработки

Рассмотрены новые способы и инструмент для комбинированной электроабразивной чистовой обработки металлических деталей, показаны преимущества использования такого инструмента по сравнению с традиционными методами чистового формообразования поверхностей из трудно-обрабатываемых сплавов. Рассмотрены возможности послойного нанесения материалов по аддитивной технологии, пути снижения трудоемкости и себестоимости для комбинированной обработки инструмента со слоями абразива на периферии металлического корпуса, полученного из легкоплавкого сплава аддитивным методом. Показана возможность ускоренного получения по такой технологии инструмента, не требующего значительных затрат на правку и заточку под конкретные детали, что позволяет снизить сроки изготовления технологической оснастки при запуске новых поколений изделий, в первую очередь в авиакосмической отрасли машиностроения. Новый метод и конструкция инструмента защищены патентом России. Опытная эксплуатация кругов, изготовленных по аддитивным технологиям, показала, что применение такого инструмента в единичном и мелкосерийном гибкоструктурном производстве значительно снижает трудоемкость изготовления деталей на операциях чистовой обработки.

Ключевые слова: аддитивные технологии, инструмент, чистовая обработка, технология, электроабразивный метод.

The paper considers new methods and tools for combined electroabrasive finishing of metal parts, and shows the advantages of such a tool over traditional methods of finishing shaping the surfaces of labor-intensive products made of difficult-to-process alloys. The possibilities of layer-by-layer application of materials using additive technology to reduce labor intensity and cost for combined processing of tools with layers of abrasive on the periphery of a metal body obtained from a low-melting alloy by the additive method are considered. The possibility of accelerated production of tools using this technology, which does not require significant costs for editing and sharpening for specific parts, is shown, which reduces the production time of technological equipment when launching new generations of products, primarily in the aerospace industry of mechanical engineering. The new method and design of the tool are protected by a Russian patent. Experimental operation of wheels made using additive technologies has shown that the use of such a tool in single and small-scale flexible structure production significantly reduces the complexity of manufacturing parts for finishing operations.

Keywords: additive technologies, a multi-tool, finishing, technology, electroablation method.

Введение

Большинство операций по чистовой обработке металлических материалов выполняется абразивным инструментом, где удаление припуска и выравнивание микроповерхности осуществляется силовым воздействием твердого абразивного зерна на поверхность детали.

С увеличением количества вновь создаваемых инструментальных материалов требуются абразивные материалы с высокими механическими характеристиками типа природных и искусственных алмазов и алмазоподобных структур. При значительном износе режущих элементов расход таких дорогостоящих материалов нередко определяет целесообразность применения операции при

оценке производственной технологичности чистовых операций абразивной обработки. Одним из перспективных методов чистового формообразования труднообрабатываемых сплавов является комбинированный процесс, сочетающий анодное растворение припуска с механической зачисткой поверхности от продуктов обработки, где роль абразивных гранул инструмента в основном сводится к удалению и выносу из зоны обработки этих продуктов. Достоинства такого инструмента наиболее полно проявляются в гибкоструктурном и мелкосерийном производстве.

Комбинированные методы обработки

В мире проводится большое количество исследований по разработке новых абразивных материалов и инструмента для эффективной чистовой обработки создаваемых сплавов. Однако это во всех случаях требует дополнительных затрат и нередко разработки новых видов оборудования и технологической оснастки, что усложняет и затягивает освоение новых изделий, особенно в гибкоструктурных отраслях машиностроения, которые являются главными потребителями создаваемых материалов и инструментов для их обработки.

В последние годы отечественные технологи усиленно занимаются поиском новых способов и инструментов для чистовых операций изготовления деталей из труднообрабатываемых металлических материалов. Одним из перспективных вариантов чистового формообразования стал комбинированный метод электроабразивной обработки, обладающий несомненными достоинствами, основными из которых являются:

- возможность избирательного удаления припуска с многокомпонентных материалов, в том числе содержащих нетокопроводящие составляющие. Примерами таких материалов могут служить комбинированные жаростойкие покрытия из диэлектрических гранул с металлической связкой, послойно наносимые аддитивным методом с удалением за счет анодного растворения металлической связки до выравнивания микроповерхности. При этом абразивные гранулы инструмента выполняют в основном очистку участка от продуктов обработки с минимальным механическим удалением хрупкого материала гранул с покрытия детали, что исключает их трещинообразование, утрату теплозащитных и адгезионных свойств;
- целесообразность замены алмазоподобных материалов на более дешевые и доступные (например, на электрокорунд вместо эльбора), так

как их новые функции в комбинированном процессе сводятся, в основном, к удалению коллоидных продуктов анодного растворения. Поэтому появляется возможность использовать более дешевые абразивы с твердостью ниже, чем у обрабатываемой детали;

- повышение износостойкости инструмента за счет сохранения свойств абразива при ограниченном удалении припуска резанием. Это заметно снижает необходимость в периодической правке инструмента, повышает долю машинного времени в технологическом процессе и производительность операции. Но главным преимуществом комбинированного способа является возможность избирательного удаления припуска при минимальных силовых воздействиях. Они не вызывают деформаций нежестких деталей, приводящих к появлению у них погрешностей, что определяет преимущества выбранного способа при чистовой обработке;
- снижение температуры в зоне резания из-за уменьшения силовых воздействий абразива на деталь при комбинированной обработке и активного тепловыноса жидкой рабочей средой. Это позволяет устранить трещинообразование из-за перегрева, особенно хрупких материалов. В результате достигается повышение качества поверхностного слоя, что требуется для чистовой обработки деталей. Кроме того, снижение температуры инструмента позволяет использовать для его изготовления аддитивным методом легкоплавкие сплавы, что значительно повышает производительность процесса и делает его конкурентоспособным среди вариантов изготовления инструмента для чистовой обработки.

Место анодного процесса при чистовой обработке

При освоении электроабразивной чистовой обработки резко повысились требования к жидкой рабочей среде, которая используется при комбинированном процессе формообразования. Она создается на базе водных растворов солей и дозированно подается в зону удаления припуска. Исследования технологов в области аддитивных процессов привели к созданию пористых абразивных инструментов, где смазывающе-охлаждающая жидкость подавалась через корпус круга, но в процессе обработки поры заполнялись продуктами резания и процесс удаления припуска нарушался. Кроме того, пористая структура резко снижала механическую прочность кругов и ограничивала возможности производительной обработки шлифованием за счет увеличения скорости

вращения круга. Эти инструменты имели достаточно высокую стоимость и не нашли широкого применения в машиностроении.

Известны попытки применять пористые круги при электроабразивном шлифовании зубчатых колес. Для этого были созданы новые способы и устройства [1–3] для адресной передачи к пористому металлоабразивному кругу жидкой рабочей среды. Однако из-за случайного соединения в них пор не удалось обеспечить требуемое регулирование подачи жидкости в зону обработки. А заполнение продуктами обработки каналов для течения среды в круге полностью нарушало расчетный режим комбинированного шлифования и такие инструменты не получили широкого распространения, хотя положительные свойства новых конструкций круга имели полное подтверждение.

В частности, в работах [1, 2] приведены электроабразивные круги на базе меди и алюминия, которые были выполнены по аддитивной технологии с наполнением основы гранулами из электрокорунда. Они имели стоимость, соизмеримую со стоимостью стандартных кругов того же типоразмера, а стойкость на 2–3 порядка выше по сравнению с традиционным абразивным инструментом. Однако в созданном инструменте не удалось получить достаточно прочную, пригодную для высокой окружной скорости конструкцию и предложить технологию изготовления каналов с регулируемой подачей в зону обработки жидкой и газожидкостной рабочей среды. Кроме того, даже применение ультразвуковых колебаний [4] в период затвердевания металлической основы круга с абразивными гранулами не давало стабильного их распределения по радиусу, а получение пор, создающих радиальные каналы для подачи рабочей среды, оказалось неосуществимым. Поэтому использовали наружный полив жидкости, вызывающий неконтролируемое анодное растворение участков обрабатываемых металлических деталей и снижение их точности, что ограничивало расширение области успешного применения комбинированного инструмента.

Исследования последних лет в области аддитивных технологий [5] дали возможность создать доступные инструменты для чистовой обработки наукоемких изделий, например, турбинных, компрессионных, сопловых лопаток авиационных двигателей, пазов с эвольвентным профилем у зубчатых колес, охлаждающих каналов ракетных двигателей, деталей изделий нефтехимии, эффективных методов удаления заусенцев. При изготовлении инструмента для чистовой обработки таких деталей нашло место использование послойного нанесения мате-

риала, позволившее получать готовый профильный электроабразивный инструмент для чистовой обработки под конкретные детали на стадии отработки технологичности новых изделий.

Создание инструмента по комбинированной аддитивной технологии

Исследования в области комбинированной чистовой обработки инструментом для электроабразивного шлифования показали, что послойное нанесение компонентов, свойственное аддитивным технологиям, позволяет разработать новые способы чистового формообразования и реализовать их в виде индивидуального инструмента. Применительно к электроабразивной обработке этим методом удалось создать эффективные способы управления подачей жидкой среды по каналам через корпус круга непосредственно в зону удаления припуска. Это значительно снизило расход жидкости, рассеяние тока и дало возможность повысить точность деталей. Кроме того, смещение интенсивности съема материала заготовки детали на анодный процесс резко снизило износ инструмента и позволило выполнять его рабочую часть с малым слоем абразивных гранул из дешевого материала.

Устранение существенного нагрева в зоне обработки открывает возможность использования для изготовления корпусов инструмента пластичных сплавов со сложной геометрией сопрягаемых каналов и нанесения абразивных гранул методом вдавливания с регулированием количества слоев и выступания их над поверхностью корпуса. Такая технология ускоряет аддитивное изготовление инструмента с регулируемой подачей рабочей среды, особенно для современного гибкоструктурного производства и на стадии освоения новых изделий.

На рис. 1 приведена схема подачи жидкой среды инструментом, предназначенным для выравнивания микроповерхности, удаления заусенцев и местных дефектов в местах сопряжения охлаждающих каналов ракетных двигателей.

Подвод рабочей жидкой среды со скоростью $v_{ж}$ выполняется через корпус 2 инструмента, выполненного методом прототипирования по аддитивной технологии из легкоплавкого сплава (типа сплава ВУДА). В корпусе 2 установлен золотник 3, через который рабочая среда поступает внутрь корпуса по трассе 4 — 5 — 6 — 8. Ширина паза в корпусе детали 1 может составлять несколько миллиметров, поэтому он имеет в инструменте сложный профиль, сочетающий коническую часть 5 с конфузорным отрезком 6 трассы, плавно переходящей в щелевой участок в форме паза 8.

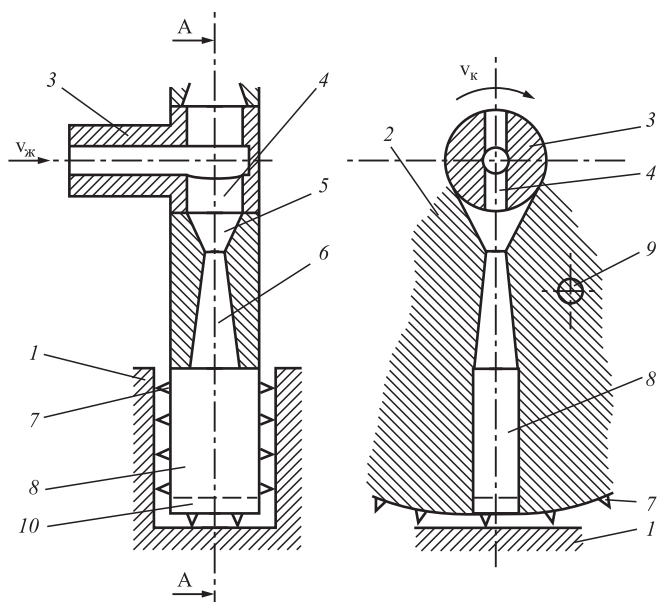


Рис. 1. Регулируемый подвод жидкой рабочей среды через корпус инструмента:

1 — обрабатываемая деталь; 2 — корпус инструмента; 3 — золотник; 4 — канал для подвода рабочей среды в золотник; 5 — входная часть канала в корпусе инструмента; 6 — диффузорная часть канала в инструменте; 7 — диэлектрические режущие элементы (гранулы) на рабочей части инструмента; 8 — паз в инструменте для подачи рабочей среды; 9 — отверстие для крепления корпуса инструмента на план-шайбу станка; 10 — периферийная часть паза в корпусе инструмента.

$v_{ж}$ — скорость жидкой рабочей среды; $v_{к}$ — скорость вращения корпуса инструмента

Выход из инструмента жидкости в зону обработки паза детали 1 возможен через отверстия или щели на периферии корпуса 2 инструмента. В зависимости от места удаления припуска по радиусу инструмента чистовая обработка выполняется на боковой или донной части паза детали 1. В последнем случае предусматриваются щели в периферийной части 10 паза 8. Абразивные зерна в форме гранул 7 закрепляются в рабочей зоне корпуса 2 инструмента методом вдавливания в несколько слоев, что возможно при использовании для корпуса 2 пластичного материала с невысокой температурой плавления, свойственной электроабразивной чистовой обработке с регулируемой подачей жидкости в рабочую зону. Это достигается изменением окружной скорости $v_{к}$, которая близка к рекомендуемой для электроабразивного шлифования (25...30 м/с) и может изменяться в широком диапазоне, так как инструмент имеет небольшую массу из-за удаления материала в месте изготовления каналов при аддитивном выполнении корпуса 2 инструмента.

Регулирование места подачи жидкости в зону обработки детали 1 производится поворотом золотника 3 на этапе настройки оборудования под конкретную обрабатываемую деталь. Скорость $v_{ж}$ подачи рабочей среды должна обеспечивать массовыйнос из межэлектродного зазора (деталь 1 — анод; корпус 2 инструмента — катод), что определяет технологические возможности инструмента. Эта скорость регулируется частотой вращения инструмента, избыточным давлением жидкости на входе в золотник, профилем канала в корпусе инструмента, свойствами среды и другими факторами. Геометрия канала с участками 5, 6, 8 имеет профиль сопла Лавалья, что ускоряет течение рабочей среды, обеспечивает повышение интенсивности съема и снижение износа инструмента.

На рис. 1 показан вариант крепления инструмента на планшайбу по отверстиям 9, которые легко выполнить между каналами в процессе аддитивного изготовления корпуса.

Данная схема реализована для способа [6], где чистовую обработку проводят при прямом ходе инструмента с регулируемой подачей в зону обработки жидкой рабочей среды через корпус инструмента с постоянным расходом на участках начала зоны обработки заготовки. После удаления припуска полярность тока переключают на обратную одновременно с подачей в эту зону воздушной струи в направлении течения жидкости в пространстве между инструментом и зоной обработки заготовки под давлением выше того, которое используется для рабочей среды на выходе из корпуса инструмента. Настройку выполняют до прекращения вытекания рабочей среды из зоны обработки.

В металлоабразивном инструменте, созданном по предлагаемому способу [6], корпус выполняют прототипированием по аддитивной технологии из легкоплавкого пластичного материала. Рабочая часть корпуса имеет геометрию, обратную форме детали, на которую нанесены абразивные гранулы, образующие профиль детали после чистовой обработки. В корпусе установлен золотник для регулирования подачи жидкой токопроводящей рабочей среды, которая поступает в зону обработки заготовки детали через равномерно расположенные сопряженные каналы с шагом на выходе из инструмента не более наименьшей длины участка формообразования заготовки детали, при этом на корпусе установлен насадок для подачи струи воздуха, выполненный с возможностью регулирования направления и давления подаваемой струи.

Технологические показатели от использования электроабразивного инструмента с регулируемой подачей жидкой рабочей среды

Комбинированный электроабразивный способ чистовой обработки наиболее эффективен при чистовой обработке с минимальным припуском [1, 2], так как позволяет многократно снизить износ инструмента, практически устранить заполнение продуктами обработки пространства между абразивными зернами, выступающими над рабочей поверхностью инструмента, что ускоряет массовый выход продуктов и интенсифицирует съем припуска.

Сведения, приведенные на рис. 2, относятся к деталям из нержавеющей стали. Для бронзы преимущества комбинированной обработки перед традиционным шлифованием становятся еще более значимыми. Исследования, приведенные в [1], показали, что наложение тока при шлифовании (см. рис. 2, 2) зубчатых колес привода авиационных двигателей после цементации кругами с зернистостью 35...40 позволяет устранить прижоги, вызывающие опасные внутренние напряжения в зубьях, что может снижать точность профиля из-за рассеяния тока через токопроводящую рабочую среду. Инструмент, полученный аддитивным методом, с регулируемой подачей рабочей среды через корпус инструмента (см. рис. 2, 3) нашел

Съем материала, мм³/мин

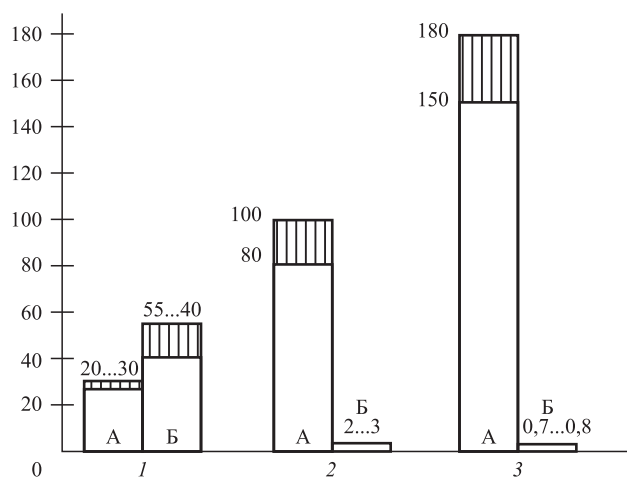


Рис. 2. Съем материала с детали (А) и износ инструмента (Б):

1 — шлифование кругом зернистостью 25...40; 2 — электроабразивное шлифование [1] кругом зернистостью 25...40; 3 — шлифование кругом с зернистостью 15...20 с регулируемой подачей жидкой рабочей среды через корпус круга. Материал детали 18ХНВА с цементацией

также применение при шлифовании закаленных зубчатых колес по методу копирования [6], где удалось после цементации и азотирования получить точные (допустимая погрешность профиля эвольвенты 0,004...0,006 мм) износостойкие передачи без прижогов поверхности.

При изготовлении систем охлаждения ракетных двигателей новых поколений на наружной поверхности камеры сгорания требуется изготовить большое количество пазов для прокачки топлива, снижающего возможность перегрева стенок (рис. 3), где наблюдаются местные выступы и заусенцы в местах сопряжения участков. Они вызывают местные сопротивления и ухудшают эффективность охлаждения изделия.

Использование кругов с регулированием расхода рабочей среды, по патенту [6], для чистовой обработки узких пазов в элементах охлаждения дало возможность ускорить вынос продуктов обработки при снижении расхода жидкой и газожидкостной рабочей среды, повысить стойкость



Рис. 3. Фрагмент камеры сгорания с пазами для прокачки охлаждающей жидкости



Рис. 4. Сечение камеры сгорания с каналами для охлаждения топливом

инструмента до 10...12 раз и сделать операцию экономически обоснованной относительно традиционного шлифования (рис. 2, 1).

На рис. 4 показан образец из бронзы камеры сгорания ракетного двигателя с пазами для протекания охлаждающей жидкости. Повышенное местное сопротивление хотя бы в одном пазу может вызвать перекрытие этого паза газожидкостной средой и перегрев изделия. До сборки с наружной обечайкой в пазах электроабразивным методом с регулируемой подачей рабочей среды удален припуск 0,08...0,1 мм на донной и боковых поверхностях пазов, что позволило уменьшить при эксплуатации сопротивление течению охлаждающей жидкости, за счет чего снизить теплонапряженность изделия и улучшить его эксплуатационные характеристики.

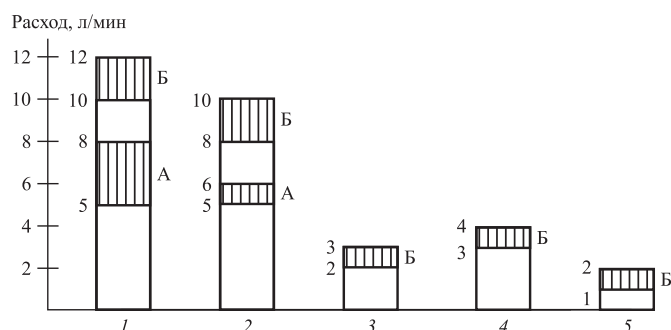


Рис. 5. Расход жидкой рабочей среды:

1 — при шлифовании зубчатых колес [1]; 2 — при электроабразивном шлифовании плоских поверхностей [1—3]; 3 — удаление заусенцев; 4 — шлифование пазов, зубчатых колес; 5 — фланкирование зубьев, шлифование, скругление кромок; 1, 2 — подача жидкой рабочей среды поливом; 3, 4, 5 — с подачей рабочей среды через круг по профильным каналам; А — расчетные показатели по [1]; Б — экспериментальные результаты. Режимы обработки [1—3]: напряжение 10...15 В; плотность тока 15...20 А/см²; радиальная сила резания [3] 0,7...0,8 Н/мм²; подача круга [2, 3] 1,5...2 м/мин

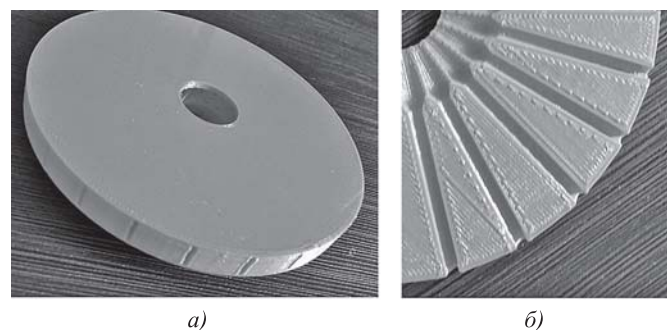


Рис. 6. Корпус электроабразивного круга после аддитивного изготовления (а) и фрагмент тракта (б) для течения жидкой среды

Для регулирования расхода рабочей среды при комбинированной обработке были рассмотрены типовые схемы ее подачи, приведенные на рис. 5. По расходу жидкости можно регулировать скорость ее прокачки и снизить погрешности после чистой обработки. Для некоторых материалов сокращение времени воздействия токопроводящей среды при анодном растворении припуска позволяет устранить микрорастворивания и, например, для цементованных сталей снизить параметр шероховатости *Ra* от 3,2...5,0 до 1,25...2,5 мкм.

На рис. 6 показан инструмент для электроабразивного шлифования донной части узких пазов детали, приведенной на рис. 3. Аналогичный инструмент, имеющий отверстия на боковой периферийной поверхности круга (а иногда на наружном и боковых участках инструмента) позволяет удалять заусенцы, скруглять острые кромки в пазах и снизить высоту микронеровностей, за счет чего удастся повысить интенсивность теплообмена и ресурс горячей зоны ракетных двигателей новых поколений.

Область использования инструмента для электроабразивной обработки

Комбинированная обработка токопроводящих материалов показала, что применение такого инструмента эффективно в машиностроении:

- при чистовых операциях выравнивания микроповерхности вязких сплавов, склонных к "засаливанию" абразива материалом заготовки, что снижает режущие свойства инструмента и вызывает прижоги, нарушающие прочностные характеристики детали;
- при обработке химикотермически упрочненных материалов и металлокерамических твердых сплавов, где при шлифовании наблюдается большой износ инструмента и требуется его частая правка с удалением достаточно дорогих гранул абразива типа карбида кремния зеленого и алмазных зерен. Применение комбинированного инструмента позволяет заменить материал режущих зерен на более дешевый и доступный, типа электрокорунда;
- в случае чистовой обработки теплозащитных покрытий с металлической связкой и минералокерамическими гранулами, где за счет анодного растворения связки удастся интенсивно выравнивать микроповерхность обрабатываемого участка и не допускать микрорастрескивания хрупких гранул, обеспечивающих получение требуемых теплозащитных и других эксплуатационных характеристик поверхностного слоя;

- для снижения сил резания, что позволяет ограничить требования к жесткости системы деталь—оборудование и выполнять инструмент из легкоплавкого материала, наносимого аддитивным методом. Это дает возможность проектировать экономически обоснованный инструмент с регулированием подачи через корпус жидкой рабочей среды в зону обработки.

Указанные свойства позволяют на порядок и более снизить потребность в переточках инструмента, ограничить толщину абразивного слоя на корпусе и выполнять операцию аддитивным методом с получением готовой формы корпуса из легкоплавкого сплава, в который снаружи удобно вдавливать абразивные гранулы по копиру. В процессе аддитивного изготовления корпуса удастся создать систему внутренних каналов для адресного подвода рабочей жидкости в зону обработки и за счет этого минимизировать рассеяние тока на другие поверхности, что повышает точность детали и не требует правки инструмента в течение длительного цикла работы.

Заключение

Показаны технологические преимущества и раскрыта область эффективного применения способа и инструмента для чистовой комбинированной электроабразивной обработки деталей. Предложена регулируемая подача жидкой рабочей среды через корпус, выполненный методом аддитивного изготовления из легкоплавкого мягкого металла (типа сплава Вуда). Это позволило ускорить изготовление корпуса и наносить слой из гранул абразива последовательно с последую-

щей фиксацией их положения в поверхностном слое корпуса путем вдавливания по шаблонам, отражающим профиль обрабатываемого участка детали.

Приведены примеры использования созданного инструмента в гибкоструктурном производстве для комбинированной чистовой обработки длинномерных пазов, обеспечивающих охлаждение камер сгорания ракетных двигателей, чистовую бездефектную доводку рабочей поверхности зубьев зубчатых передач после предшествующих химикотермических операций, а также других типовых деталей машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бердник В.В. Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического поля. Киев: "Вища школа", 1984. 124 с.
2. Гостев В.В. Алмазно-электрохимическое шлифование твердых сплавов. Харьков: "Вища школа", 1974. 127 с.
3. Янушкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение, 2004. 230 с.
4. Приходько В.М. Ультразвуковая технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
5. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Особенности расчета комбинированного электрода-инструмента для электрических методов обработки, изготавливаемого на основе аддитивных технологий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 158—162.
6. Патент 2740682 РФ, В23Н. Способ электроабразивной обработки и металлоабразивный инструмент для осуществления способа / В.П. Смоленцев, Н.С. Поташникова, Е.В. Паничев, С.С. Юхневич. Бюл. № 2, 2021.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru

Web-site: www.mashin.ru

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.

Технический редактор Конова Е.В. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 00.00.2020 г. Подписано в печать 10.03.2021 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru