ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15
2019
№ 8 (176)
август

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.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, 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.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.

Редакция:
О.С. ЛУКАШЕНКО
А.В. ОРЛОВА
Е.А. СЕРИКОВА

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.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Крюков С.А., Шумячер В.М., Байдакова Н.В. Улучшение функциональных свойств шлифовальных кругов путем их термообработки и импрегнирования 339

Щедрин А.В., Алешин В.Ф., Бугаев А.М., Минязева Л.Х., Кострюков А.А., Чихачёва Н.Ю. Технологические возможности метода комбинированного дорнования отверстий инструментами с винтовой геометрией воздействующих поверхностей 342

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Безъязычный В.Ф. Влияние технологических условий обработки на глубину наклепа в поверхностном слое детали при обработке лезвийным инструментом 348

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Кукареко В.А., Белоцерковский М.А., Григорчик А.Н., Астрашаб Е.В., Сосновский А.В. Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства псевдосплавов, напыленных из высокохромистых сталей и цветных металлов 355

Прибытков Г.А., Калита В.И., Комлев Д.И., Криницын М.Г., Коростелева Е.Н., Барановский А.В., Радюк А.А., Иванников А.Ю., Михайлова А.Б., Коржова В.В. Твердость и износостойкость плазменных покрытий, напыленных СВС-композиционными порошками TiC + Ti-связка 359

Шехтман С.Р., Сухова Н.А., Мигранов М.Ш. Многослойные вакуумные ионно-плазменные покрытия с субмелкозернистой структурой 365

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Скрыгин О.В., Смоленцев В.П., Щеднов А.В. Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов 369

Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л., Премент Г.Б. Технологическое наследование эксплуатационных параметров качества при восстановлении и упрочнении деталей двигателя внутреннего сгорания 375

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Мокрицкий Б.Я., Усова Т.И., Серебренникова А.Г. Повышение качества инструментального обеспечения 381

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2019

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 15
2019
№ 8 (176)
August

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. BEZYAZYCHNYI

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
Yu.R. KOPYLOV
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.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUKHOCHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
O.S. LUKASHENKO
A.V. ORLOVA
E.A. SERIKOVA

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

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Kryukov S.A., Shumyacher V.M., Baydakova N.V. Improvement of functional properties of grinding wheels by heat treatment and impregnation 339

Shchedrin A.V., Aleshin V.F., Bugaev A.M., Minyazeva L.Kh., Kostryukov A.A. Chikhacheva N.Yu. Technological capabilities of combined mandrelling method of holes by acting surfaces helical geometry tools 342

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Bezyazychny V.F. Effect of technological processing conditions on cold-work hardening depth in surface layer of part at machining by blade tool 348

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Kukareko V.A., Belotserkovsky M.A., Grigorchik A.N., Astrashab E.V., Sosnovsky A.V. Structural-phase condition and tribotechnical properties of pseudoalloys sprayed from high-chromium steel and non-ferrous metals 355

Pribytkov G.A., Kalita V.I., Komlev D.I., Krinitsyn M.G., Korosteleva E.N., Baranovsky A.V., Radyuk A.A., Ivannikov A.Yu., Mikhaylova A.B., Korzhova V.V. Hardness and wear resistance of plasma coatings sprayed by SHS-TiC + Ti-binder composite powders 359

Shekhtman S.R., Sukhova N.A., Migranov M.Sh. Multilayer vacuum ion-plasma coatings with subfine-grained structure 365

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Skrygin O.V., Smolentsev V.P., Shchednov A.V. Intensification of mass transfer by combined methods of materials processing 369

Kheyfets M.L., Gretsky N.L., Prement G.B. Technological heredity of quality performance parameters for restoration and hardening of internal combustion engine parts .. 375

QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING

Mokritsky B.Ya., Usova T.I., Serebrennikova A.G. Improving of tooling quality 381

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

© "Innovative mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2019

УДК 621.921

[1]С.А. Крюков, [1]В.М. Шумячер, [2]Н.В. Байдакова
([1]Волжский политехнический институт (филиал)
ФГБОУ ВПО "Волгоградский государственный технический университет",
[2] Филиал ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ", г. Волжский)
E-mail: sf-visteh@mail.ru

Улучшение функциональных свойств шлифовальных кругов путем их термообработки и импрегнирования

Представлены результаты исследования влияния внешней среды на свойства шлифовальных кругов. Разработан и описан новый способ повышения эксплуатационных свойств абразивных инструментов на основе совмещения термообработки и импрегнирования расплавом серы. Установлено значительное улучшение производительности и качества шлифования опытными кругами.

Ключевые слова: *шлифовальный круг, керамическая связка, структурно-механические и функциональные свойства, термообработка, импрегнирование.*

The study results of the effect of the environment on the properties of grinding wheels are presented. New method for improving of the performance properties of abrasive tools based on the combination of heat treatment and impregnation by sulfur melt is developed and described. Significant improvement in the performance and quality of grinding by experimental wheels is established.

Keywords: *grinding wheel, ceramic bond, structural, mechanical and functional properties, heat treatment, impregnation.*

Аналитический обзор существующих исследований по различным аспектам процесса шлифования показал, что преобладающее число работ было направлено в основном на изучение эксплуатационных показателей шлифовальных кругов, определения оптимальных режимов их работы, выбора и применения соответствующих смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), но при этом недостаточно уделялось внимания вопросам совершенствования технологии создания и производства абразивного инструмента с регламентируемыми функциональными свойствами, не подверженными изменениям при действии внешней среды при его хранении и использовании с водными СОЖ.

Опыт эксплуатации шлифовальных кругов на подшипниковых заводах, а также отдельные данные ряда исследователей показывают, что абразивный инструмент подвержен изменениям по твердости, режущей способности, стойкости и другим показателям как при его хранении в производственных условиях, так и при шлифовании с использованием водных СОЖ, что негативно сказывается на эффективности процесса шлифования, особенно в автоматизированных линиях по производству деталей подшипников. Это связано с тем, что абразивный инструмент до сих пор создается на основе эмпирического и технологического опыта в отсутствие информации о взаимосвязи его свойств с условиями и режимами его эксплуатации.

Существующие теоретические и экспериментальные оценки влияния внешних факторов на механическую прочность инструмента недостаточно учитывают физико-химические свойства внешней среды, условия и сроки хранения инструмента, параметры и режимы воздействий, таких как термообработку и импрегнирование инструмента.

В результате теоретических исследований на основе системного анализа влияния различных факторов на свойства шлифовальных кругов была

разработана классификация способов технологических воздействий для повышения и стабилизации его структурно-механических и эксплуатационных свойств, которая включает: механические, химические, физические и комбинированные воздействия, а также их сочетания. Наиболее эффективными являются комбинированные и совмещенные технологические воздействия, дополняющие и взаимно активизирующие друг друга, например совмещение термообработки и импрегнирования инструмента серой.

Исходя из представлений физико-химической механики композиционных материалов, была разработана феноменологическая модель прочности инструмента как композита с учетом трех основных групп факторов, характеризующих реальную дефектную структуру матрицы, физико-химическое взаимодействие зерна и связки со средой и внешние физико-механические воздействия на инструмент.

Экспериментальную проверку положений выводов разработанной модели проводили при испытании на прочность при статическом изгибе брусков, вырезанных из шлифкругов с характеристиками 25AL7V5 (25ACM2K) и зернистостями — F80, F60, F46 (16, 25, 40). Результаты испытаний подтвердили теоретическую обратно пропорциональную зависимость прочности от размера зерна, а также характер и степень изменения прочности инструмента в зависимости от вида среды и типа воздействий. Полученные результаты отражают физическую сущность разработанной модели прочности, что позволяет рекомендовать ее для прогнозирования и моделирования изменений механических свойств инструмента под влиянием различных сред и воздействий.

Следующим этапом комплексных исследований являлось установление количественных показателей и взаимосвязи между механической прочностью и твердостью абразивного инструмента. В этой связи авторами был предложен метод определения твердости инструмента маятниковым диспергометром [1], состоящим из индентора и маятника с грузом. За меру твердости принимали постоянную времени процесса диспергирования, определяемую по величине относительного затухания колебаний маятника. Теоретически и экспериментально доказано, что между твердостью по диспергометру и удельной объемной энергией разрушения поверхности инструмента существует тесная корреляционная связь, что свидетельствует о физическом смысле твердости, определяемой по диспергометру. Установлено, что образцы, выдержанные в воде, в зависимости от их зернистости имеют твердость на 18...35 % ниже, чем исходные. Керосин как инактивное вещество к зерну и связке не оказывает влияния на твердость при диспергировании. Образцы кругов, выдержанные в спирте и термообработанные, показали повышение твердости соответственно на 10... 18 % и 17...23 % по сравнению с исходными образцами. Твердость импрегнированных серой образцов увеличилась в 2,7...2,8 раза по сравнению с исходными образцами без пропитывания.

Следует отметить идентичность полученных зависимостей при испытании образцов на изгиб и при определении твердости по методу маятникового диспергометра, что свидетельствует о взаимосвязи механической прочности инструмента с его твердостью по диспергометру. Таким образом, полученные данные хорошо согласуются с основными положениями и выводами разработанной феноменологической модели прочности абразивного инструмента.

Исходя из того, что абразивное зерно является основным рабочим элементом структуры инструмента, исследовали влияние внешних факторов на макро- и микромеханическую прочность зерен. В качестве объекта исследований были выбраны зерна электрокорунда белого марки 25А зернистостью F46 (40).

Прочность зерен определяли на приборе ВНИИАШ путем их раздавливания с фиксацией разрушающей нагрузки, моментов скалывания и характера разрушения зерна. Результаты экспериментов обрабатывали методом математической статистики с использованием функции распределения Вейбулла, а дифференцированную оценку прочности зерен проводили по методике Н.И. Богомолова. Полученные результаты подтвердили взаимосвязь прочности зерен с их дефектностью, а также негативное влияние на эти показатели поверхностно-активных веществ (воды). Наоборот, термообработка зерен и их выдерживание в инактивных средах (керосин, спирт) повышает их прочность и уменьшает дефектность. Кроме того, термообработка абразивных зерен при t = = 450...500 °С способствует их охрупчиванию или повышению микрохрупкости, что положительно сказывается на процессе самозатачиваемости зерна при шлифовании. Таким образом, наиболее эффективным внешним физико-механическим воздействием является термообработка, реализующая потенциальные возможности, заложенные в электрокорундовом зерне.

Одновременно установлено, что зависимости изменения механических свойств зерна и керамической связки от условий и срока хранения этих

материалов указывают на необходимость сохранения приобретенных свойств после термообработки на длительный период путем импрегнирования инструмента гидрофобными веществами, в частности серой. Однако известные способы, методы и существующие заводские технологии пропитывания инструмента расплавом серы не обеспечивают высокого качества импрегнирования. В связи с этим была разработана структурная схема влияния внешних факторов на процессы смачивания и пропитывания инструмента, которая показала, что на эти процессы при заданных свойствах жидкости и твердого тела существенное влияние оказывают внешние физико-химические воздействия и свойства межфазного контакта жидкости с поверхностью тела и их химическое сходство. Кроме того, негативное влияние на эти процессы оказывают адсорбция среды и различные загрязнения органического и неорганического происхождения поровой поверхности инструмента.

Установлено, что термопрокалка инструмента перед его импрегнированием при 450...500 °С уменьшает краевой угол смачивания расплава серы в 3 раза, повышает адгезию в 5,1 раза и увеличивает скорость пропитывания в 6...7 раз по сравнению с исходным инструментом. На основе полученных результатов предложена новая технология [2] пропитывания расплавом серы электрокорундового инструмента на керамической связке, включающая следующие операции: нагрев инструмента со скоростью 5...8 °С/мин до 450...500 °С с выдержкой 20...30 мин (в зависимости от зернистости) с последующим охлаждением на воздухе до 150 °С, помещение инструмента в расплав серы (t = 140...145 °С) со скоростью 0,5...0,8 мм/с до полного его пропитывания, выгрузка и охлаждение его на воздухе.

Сравнительная оценка качества импрегнированных кругов показала, что у кругов, пропитанных по разработанной технологии, увеличиваются степень и коэффициент пропитывания в 1,4 раза, неуравновешенность круга снижается в 2,3 раза по сравнению с кругами, пропитанными по заводской технологии Волжского подшипникового завода ВПЗ-15.

Проведенные испытания шлифкругов с различными характеристиками и импрегнированных по заводской и предлагаемой технологиям по методу планирования экспериментов с использованием матрицы ЦКРФЭ показали, что прочность опытных кругов при верхнем уровне факторов больше в 1,49 раза и при нижнем уровне в 1,6 раза, чем прочность кругов, импрегнированных по заводской технологии. Это объясняется тем, что разработанная технология обеспечивает более качественное пропитывание кругов, увеличивает адгезию серы к черепку круга, за счет чего повышается прочность шлифкругов.

Экспериментальные исследования зависимостей процесса шлифования и эксплуатационных показателей шлифкругов, импрегнированных по разработанной технологии, показали следующие результаты. При шлифовании стали ШХ15 без охлаждения на режимах: скорость круга — 35 м/с, скорость стола плоскошлифовального станка — 12 м/мин, подача — 0,01 мм/дв. ход, кругами ПП250Х25Х75 25AF80LV5 (25А16СМ2К5), импрегнированными по разработанной технологии, период их приработки в 2 раза меньше, а составляющие силы резания уменьшаются в 1,3...1,6 раза по сравнению с исходными кругами. Опытные круги обеспечивают также повышение эффективности процесса шлифования.

Экспериментально установлено, что круги, импрегнированные по разработанной технологии, обеспечивают улучшение эксплуатационных показателей: режущая способность увеличивается в 1,3 раза, изнашивание кругов снижается в 1,2 раза, коэффициент шлифования повышается в 1,5 раза, параметр шероховатости *Ra* уменьшается в 1,3 раза по сравнению с кругами, импрегнированными по заводской технологии. Стойкость опытных кругов повышается на 30...40 % при их испытании в производственных условиях ВПЗ-15 [3].

Таким образом, устраняя негативное влияние внешней среды на шлифкруги при их хранении и эксплуатации за счет термопрокалки и импрегнирования серой, можно значительно улучшить их функциональные свойства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Крюков С.А., Байдакова Н.В.** Диспергометр для определения поверхностной твердости абразивных инструментов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 11. С. 62—65.

2. **Патент** на изобретение № 2164857. Способ повышения эксплуатационных свойств абразивного инструмента / В.М. Шумячер, В.И. Анохин, С.А. Крюков. Опубл. 10.04.2001, Бюл. № 10.

3. **Крюков С.А., Байдакова Н.В., Мироседи А.И.** Использование наполнителей и смесей из абразивов разных зернистостей и формы для совершенствования шлифовальных инструментов / под общ. ред. В.М. Шумячера. М.: РУСАЙНС, 2017. 160 с.

УДК 621.787

[1]А.В. Щедрин, [1]В.Ф. Алешин, [1]А.М. Бугаев, [1]Л.Х. Минязева, [1, 2]А.А. Кострюков, [3]Н.Ю. Чихачёва

([1]Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, [2]ОАО "Демиховский машиностроительный завод", Московская область, [3]МОО "Академия проблем качества", МБОУ СОШ № 1, г. Покров)

E-mail: miluiza@yandex.ru

Технологические возможности метода комбинированного дорнования отверстий инструментами с винтовой геометрией воздействующих поверхностей

Экспериментально исследованы технологические возможности и характеристики деформирующих элементов комбинированного дорнующего инструмента с различной однозаходной винтовой макрогеометрией, иррегулярной и регулярной микрогеометрией воздействующих поверхностей, включая условия применения инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского".

Ключевые слова: *комбинированное дорнование, винтовая макрогеометрия, геометрическая точность, очаг деформации, эффект безызносности.*

The technological capabilities and characteristics of the deforming elements of combined mandrelling tool with different single-threaded helical macrogeometry, irregular and regular microgeometry of the acting surfaces, including the conditions for the use of innovative metal-cladding lubricants that implement the fundamental scientific discovery "Garkunov—Kragelsky friction effect" experimentally studied.

Keywords: *combined mandrelling, helical macrogeometry, geometric accuracy, deformation zone, wearlessness effect.*

Комбинированное деформирующе-режущее дорнование отверстий, которое может осуществляться по схемам протягивания и прошивания — эффективный технологический метод формообразующей и отделочно-упрочняющей обработки заготовок сложной формы из различных материалов [1—5].

В работах [6—8] проведены исследования влияния перспективной однозаходной винтовой макрогеометрии воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания отверстий. При этом было установлено, что несимметричность очага деформации (ОД) вследствие винтовой формы воздействующих поверхностей деформирующего элемента приводит к появлению обширных зон упругого контакта с заготовкой, в которых из-за недостаточной "маслоемкости" поверхности интенсифицируется адгезия обрабатываемого материала [6]. Образование значительных адгезионных наростов (рис. 1) резко ухудшает качество обработки деформирующими элементами с однозаходной винтовой макрогеометрией, обладающими плавной силовой динамикой [6] и другими инновационными характеристиками (а. с. СССР № 1655760, патент РФ № 2303507), например, интенсивным текстурированием поверхностного слоя отверстия под последующее режущее воздействие [7, 9].

Как показали комплексные исследования [10—12], негативные адгезионные явления (см. рис. 1) могут быть полностью нейтрализованы

Рис. 1. Адгезионное наростообразование на воздействующих поверхностях деформирующих элементов с однозаходной винтовой макрогеометрией при дорновании отверстий в заготовках из стали 12ХН3А [6]

регуляризацией микрогеометрии воздействующих поверхностей деформирующих элементов и применением инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского (патент РФ № 2277579, диплом № 41 Гос. реестра научных открытий СССР) [13]. В частности, регулярный микрорельеф в первом приближении может быть выполнен аналогично в виде однозаходных винтовых канавок [5, 12—14].

Для оценки технологических возможностей регуляризации микрогеометрии воздействующих поверхностей деформирующих элементов с различной однозаходной винтовой макрогеометрией в условиях применения металлоплакирующей смазки были проведены дополнительные исследования.

В качестве экспериментального инструмента использовали одноэлементные деформирующие дорны-прошивки, конструкции которых представлены на рис. 2 и 3. Деформирующие элементы экспериментальных инструментов (см. рис. 2, *а*, *б*) имели однозаходную винтовую макрогеометрию воздействующих поверхностей с углом наклона соответственно 16 и 8°. Инструмент на рис. 2, *в* имеет деформирующий элемент традиционной формы с нулевым углом наклона воздействующих поверхностей (рабочий и обратный конусы, калибрующая ленточка). Материал деформирующих элементов — инструментальные стали марок ШХ15 (см. рис. 2, *а*) и Р6М5 (см. рис. 2, *б*, *в*). Диаметр всех деформирующих элементов на калибрующей ленточке 22 мм. В соответствии с рекомендациями работ [5, 10—14] на воздействующие поверхности деформирующих элементов алмазным выглаживанием был нанесен регулярный микрорельеф (РМР) в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм, с шагом 0,5 и 0,6 мм и глубиной на участке калибрующей ленточки 7...9 мкм (см. рис. 3).

На рис. 4 представлена продольная профилограмма калибрующей ленточки деформирующего

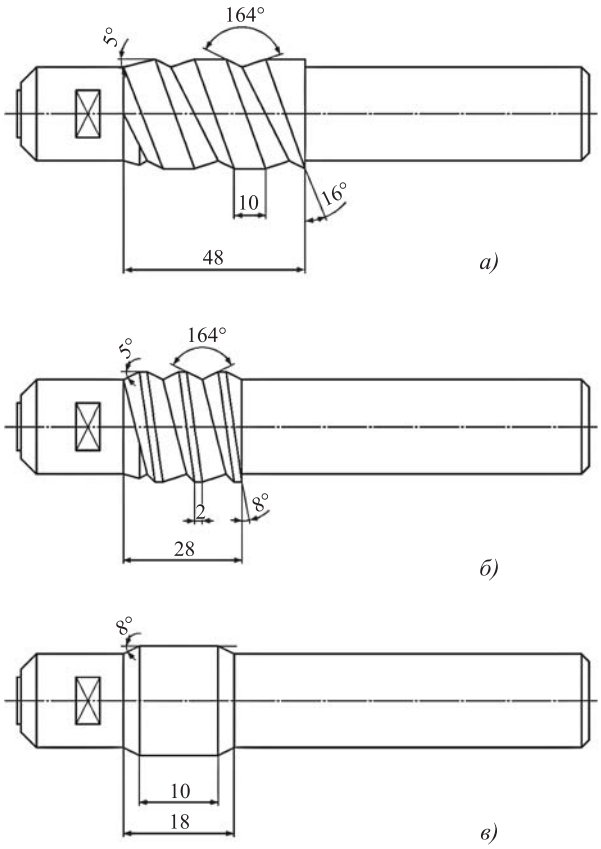


Рис. 2. Экспериментальные инструменты прошивки с различным углом наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента:
а — 16°; *б* — 8°; *в* — 0°

Рис. 3. Экспериментальные инструменты

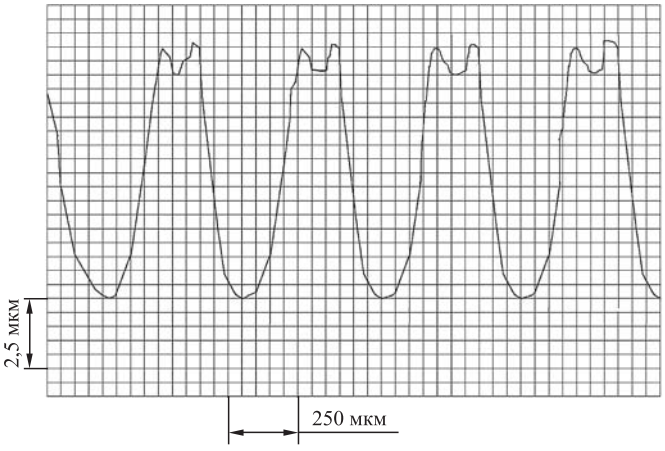


Рис. 4. Продольная профилограмма калибрующей ленточки деформирующего элемента с углом воздействующих поверхностей 16°

элемента, изображенного на рис. 2, *а*. В качестве экспериментальных образцов-заготовок использовали цилиндрические образцы с наружным диаметром 39 мм и высотой 40 мм из латуни марки ЛС59-1 (100 НВ) и дюралюминия марки Д1Т (143 НВ). Перед дорнованием отверстия образцов-заготовок растачивали со средним параметром шероховатости поверхности Ra_3 = 0,392...7,75 мкм. Номинальная абсолютная деформация отверстия образцов на диаметр $i_н$ варьировалась в пределах до 0,35 мм через 0,05 мм. Прошивание осуществляли на испытательной машине модели Р-5 при скорости 0,05 м/мин. В качестве технологической смазки использовали смесь минерального масла марки И-40 с добавкой 50 % об. металлоплакирующей медьсодержащей присадки "Валена" (патент РФ № 2277579), реализующей эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского [13].

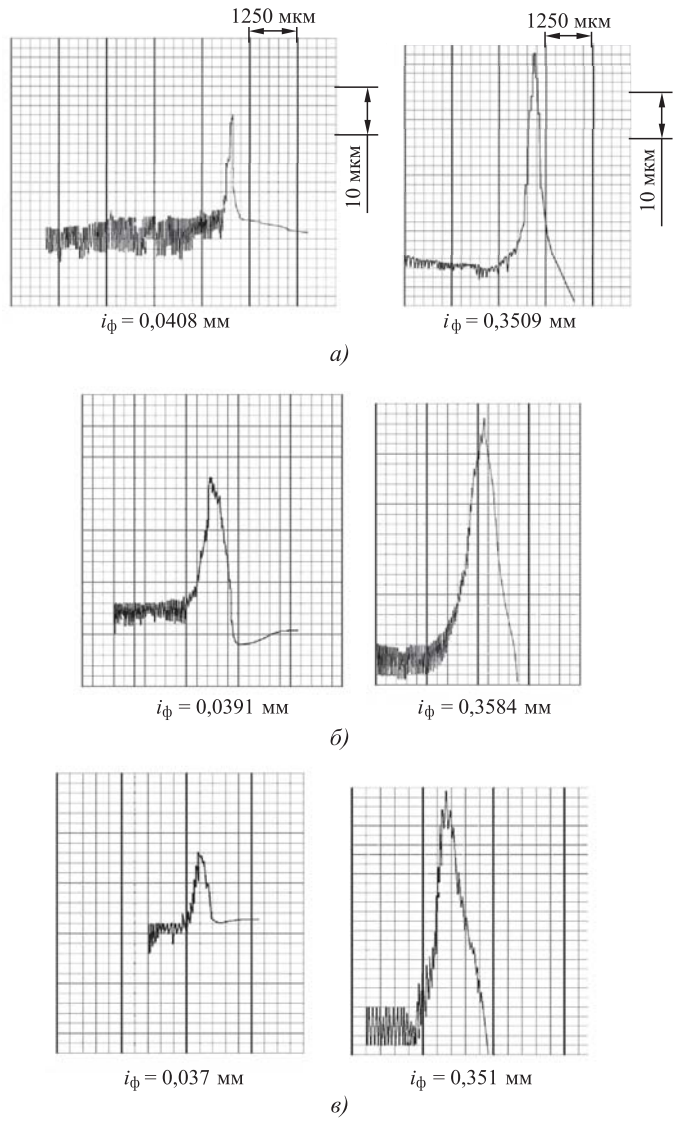


Рис. 5. Продольные профилограммы очагов деформации при дорновании отверстий в образцах-заготовках из латуни, деформирующий элемент с различным углом наклона воздействующих поверхностей:
а — 0°; *б* — 8°; *в* — 16°

На рис. 5 представлены продольные профилограммы ОД, возникающих на рабочих конусах деформирующих элементов при дорновании отверстий в образцах-заготовках из латуни, где $i_ф$ — абсолютная фактическая деформация отверстия образцов-заготовок. Их анализ показывает, что в общем случае в ОД положительная волна внеконтактной деформации, увеличивающая площадь контакта с обрабатываемой заготовкой, препятствующая поступлению в ОД технологической смазки и реализации более благоприятного режима трения [15]. С эксплуатационной точки зрения в положительной волне внеконтактной деформации из-за наличия растягивающих напряжений могут возникнуть сквозные трещины, переходящие в поверхностный слой и снижающие эксплуатационное качество получаемых деталей. Однако наличие винтовых макроканалов и особенно микроканалов в виде РМР обеспечивает надежное поступление в ОД на макро- и микроуровне металлоплакирующей смазки, обладающей высокими экранирующими свойствами.

Это в отличие от инструментов без РМР поверхности (см. рис. 1), где в качестве смазки используется сульфофрезол [6], полностью исключает образование адгезионных наростов при дорновании отверстий образцов-заготовок из дюралюминия (см. рис. 3), обладающего повышенной химической активностью. В результате сравнения формы, угловых и линейных размеров ОД (см. рис. 5) установлено, что геометрические параметры деформирующих элементов существенно влияют на протекание контактных процессов.

На рис. 6 представлены зависимости параметра шероховатости поверхности получаемых отверстий образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента. Анализ зависимостей показывает, что наилучшие показатели по шероховатости поверхности наблюдаются у деформирующего элемента с углом наклона 0°. Это объясняется различием контактных процессов в ОД при взаимодействии шероховатых поверхностей исходного отверстия и соответствующего деформирующего элемента. При $i_ф$ > 0,1 мм у обоих материалов наблюдается тенденция к увеличению получаемой шероховатости в результате передеформирования и процесса "шелушения" — полуотрыва частиц поверхностного слоя, полностью исчерпавшего свой ресурс пластичности. Причем

у образцов-заготовок из дюралюминия, как более исходно твердых, эта тенденция интенсивнее.

На рис. 7 представлены зависимости средней овальности отверстий образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента. Анализ этих зависимостей показывает, что наименьшая средняя овальность наблюдается у деформирующего элемента с углом наклона воздействующих поверхностей 0°, а наибольшая — у винтовых инструментов. Это связано с несимметричностью ОД из-за несимметричности винтовой поверхности профиля инструмента в поперечном сечении. Дополнительно, чем более пластичен обрабатываемый материал (латунь), тем больше получаемая средняя овальность отверстий. Аналогичный вывод исходя из несимметричности ОД и винтовой поверхности профиля инструмента в продольном сечении, а также из физико-механических характеристик обрабатываемого материала, можно сделать в отношении зависимостей среднего отклонения профиля продольного сечения отверстий образцов-деталей (рис. 8).

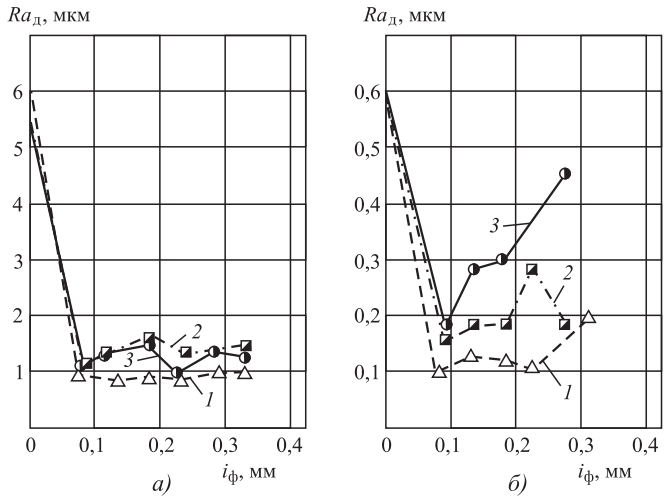


Рис. 6. Зависимости параметра шероховатости поверхности отверстий образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента для заготовок из:
а — латуни ЛС59-1; *б* — дюралюминия Д1Т;
1 — 0°; *2* — 8°; *3* — 16°

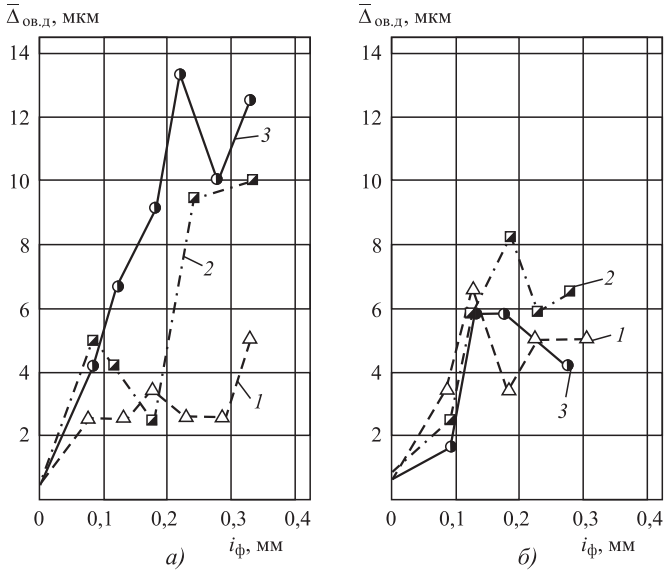


Рис. 7. Зависимости средней овальности отверстий образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента для заготовок из:
а — латуни ЛС59-1; *б* — дюралюминия Д1Т;
1 — 0°; *2* — 8°; *3* — 16°

Совместно анализируя зависимости рис. 7 и 8, можно сделать вывод о наибольшем влиянии на размерную точность получаемых отверстий [16] отклонения профиля продольного сечения (рис. 8—11), а не овальности (рис. 7, 12). Для анализа параметров геометрической точности каждое отверстие образцов-заготовок и образцов-деталей измеряли по диаметру в четырех радиальных и трех высотных сечениях. Разброс точек в сечениях I—III свидетельствует о величине овальности в каждом из них. Максимальный разброс наблюдается у винтовых дорнов, что еще раз подтверждает информацию на рис. 7, 12.

Полученные данные в совокупности с ранее проведенными в аналогичном факторном пространстве исследованиями [16] расширяют информационную базу алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" и фундаментального направления "трибология на

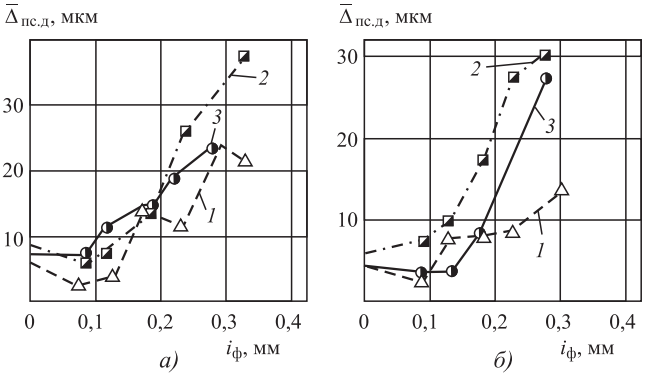


Рис. 8. Зависимости среднего отклонения профиля продольного сечения отверстий образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента для заготовок из:
а — латуни ЛС59-1; *б* — дюралюминия Д1Т;
1 — 0°; *2* — 8°; *3* — 16°

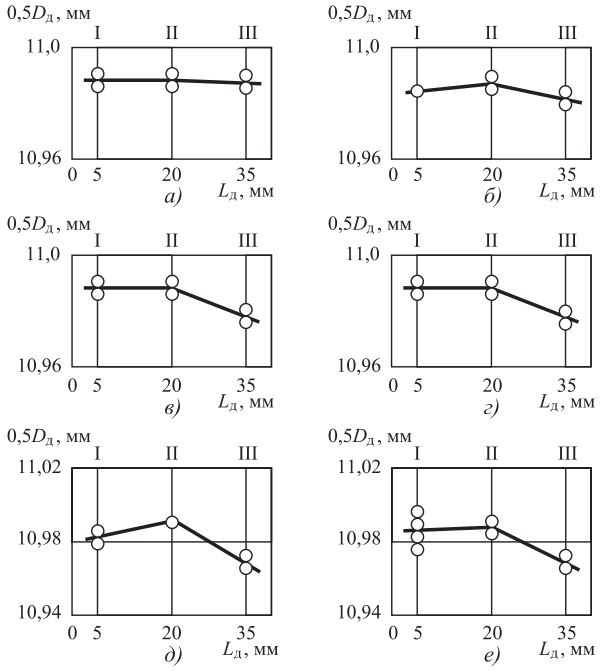


Рис. 9. Характерные усредненные профили продольного сечения отверстий образцов-деталей после дорнования деформирующим элементом с углом наклона воздействующих поверхностей 0° (латунь ЛС59-1), $i_ф$, мм:
а — 0,076; *б* — 0,13; *в* — 0,177; *г* — 0,236; *д* — 0,29; *е* — 0,33; $D_д$, $L_д$ — текущий диаметр отверстия и длина отверстия образца-детали

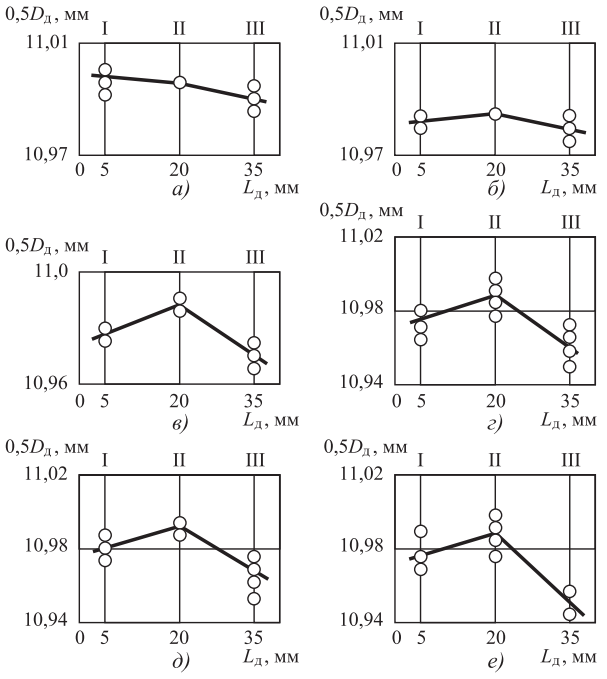


Рис. 10. Характерные усредненные профили продольного сечения отверстий образцов-деталей после дорнования деформирующим элементом с углом наклона воздействующих поверхностей 8° (латунь ЛС59-1), $i_ф$, мм:
а — 0,08; *б* — 0,118; *в* — 0,177; *г* — 0,24; *д* — 0,217; *е* — 0,33

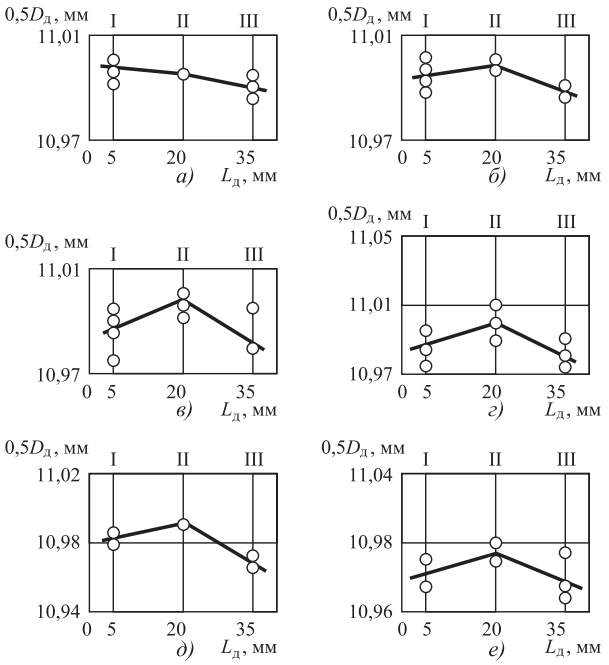


Рис. 11. Характерные усредненные профили продольного сечения отверстий образцов-деталей после дорнования деформирующим элементом с углом наклона воздействующих поверхностей 16° (латунь ЛС59-1), $i_ф$, мм:
а — 0,076; *б* — 0,13; *в* — 0,177; *г* — 0,236; *д* — 0,29; *е* — 0,33

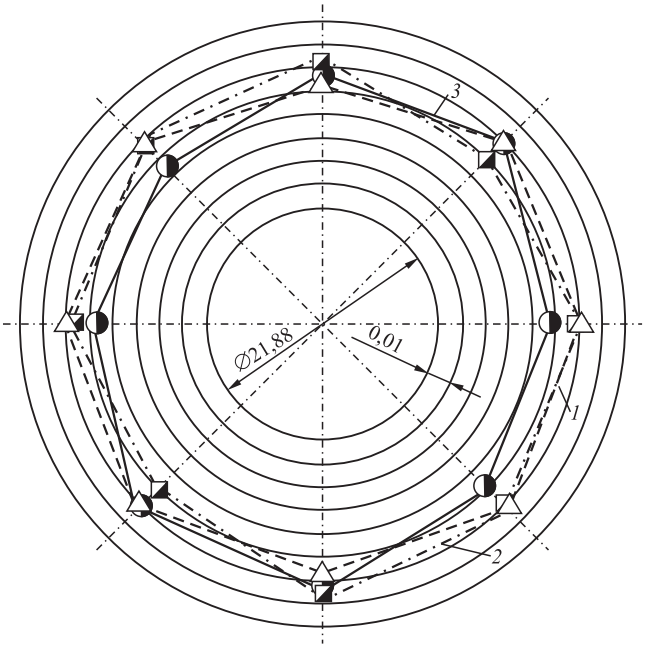


Рис. 12. Характерные усредненные круглограммы отверстий образцов-деталей после дорнования (латунь ЛС59-1, $i_ф$ = 0,327...0,33 мм), деформирующий элемент с различным углом наклона воздействующих поверхностей:
1 — 0°; *2* — 8°; *3* — 16°

основе самоорганизации" для структурно-параметрического синтеза конкурентоспособных методов обработки [12, 13, 17—21].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2065341 РФ, МКИ В23Д43/02.** Способ прошивания шкворневых отверстий поворотного кулака.
2. **Щедрин А.В., Агапов В.А., Морозова Н.В.** Прошивание прецизионных отверстий в неравножестких заготовках // СТИН. 1996. № 10. С. 28—30.
3. **Щедрин А.В.** Ресурсосберегающие технологии обработки гильзы пневмоцилиндра // СТИН. 1999. № 4. С. 42—44.
4. **Щедрин А.В. и др.** Ресурсосберегающая обработка отверстий // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 9. С. 46—67.
5. **Щедрин А.В., Таненгольц А.Б.** Совершенствование характеристик инструмента для деформирующе-выглаживающего прошивания отверстий // Машиностроитель. 2002. № 11. С. 20—23.
6. **Щедрин А.В.** Исследование обрабатываемости вязких сталей комбинированным прошиванием // СТИН. 1998. № 12. С. 27—30.
7. **Щедрин А.В., Таненгольц А.Б.** Оптимизация макрогеометрии деформирующего элемента для комбинированного прошивания отверстий // Техника машиностроения. 2001. № 1 (29). С. 94—99.
8. **Щедрин А.В. и др.** Оптимизация макрогеометрии деформирующих элементов для комбинированной обработки цилиндрических поверхностей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. № 12. С. 36—38.
9. **Ярославцев В.М.** Резание с опережающим пластическим деформированием: учебное пособие по курсу "Перспективные технологии реновации". М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 46 с.
10. **Щедрин А.В. и др.** Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 76—79.
11. **Щедрин А.В. и др.** Технологические возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 30—35.
12. **Щедрин А.В. и др.** Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15—20.
13. **Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Щедрин А.В. и др.** Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации // Научные труды Академии проблем качества. 2016. С. 348—356.
14. **Щедрин А.В. и др.** Повышение эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхности рабочих элементов инструмента // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 6. С. 14—19.
15. **Щедрин А.В. и др.** Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 4. С. 162—168.
16. **Щедрин А.В. и др.** Влияние угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3. С. 20—24.
17. **Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачева Н.Ю.** Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20—26.
18. **Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Бабель В.Г. и др.** Трибология на основе самоорганизации. Германия, LAMBERT. 245 с.
19. **Ярославцев В.М.** Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Машиностроение". 2007. № 2. С. 56—70.
20. **Щедрин А.В. и др.** Формулы для прогнозирования силы комбинированного дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях применения металлоплакирующих смазок // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Т. 18. № 11. С. 518—522.
21. **Щедрин А.В. и др.** Совершенствование комбинированных методов редуцирования и прошивания // Металлург. 2005. № 10. С. 66—69.

УДК 621.81.004.12

В.Ф. Безъязычный
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)
E-mail: technology@rsatu.ru

Влияние технологических условий обработки на глубину наклепа в поверхностном слое детали при обработке лезвийным инструментом

На основе установленных аналитических зависимостей глубины наклепа в поверхностном слое механически обработанной детали выполнен анализ влияния режима резания, геометрии инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов на глубину наклепа, что позволяет управлять процессом обработки в целях обеспечения требуемых значений глубины наклепа, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства деталей машин.

Ключевые слова: *поверхностный слой, наклеп, режим резания, геометрия инструмента.*

The analysis of the effect of the cutting mode, tool geometry and physical and mechanical properties of the processed and tool materials on the cold-work hardening depth is carried out based on the established analytical dependencies of the cold-work hardening depth in the surface layer of the machined part. It allows to control the machining process to ensure the required values of the cold-work hardening depth that provide the specified operational properties of machine parts.

Keywords: *surface layer, cold-work hardening, cutting mode, tool geometry.*

Введение

Наклеп поверхностного слоя материала детали, т.е. его упрочнение в процессе механической обработки, оказывает существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей: сопротивление усталости, износостойкость, контактную жесткость и др.

Наличие напряжений сжатия и увеличение поверхностной твердости полезны с точки зрения повышения износостойкости. В то же время для получения максимальной износостойкости необходимо обработку производить так, чтобы создавалось так называемое оптимальное упрочнение, обеспечивающее минимальный износ. Наклеп поверхностного слоя обработанной детали повышает сопротивление усталости при температуре окружающей среды. Однако если рассматривать влияние наклепа поверхностного слоя при повышенных температурах, то наклеп снижает длительную прочность. Так, например, исследованиями профессора А.М. Сулимы установлено, что для каждого материала существуют оптимальные значения степени и глубины наклепа поверхностного слоя материала детали, превышение которых снижает сопротивление усталости [1].

Существенное влияние параметров качества поверхностного слоя на эксплуатационные характеристики отмечено в работах профессора В.С. Мухина [2]. Им установлено, что сопротивление усталости сплава ХН77ТЮР при температуре 750 °С в значительной степени зависит от степени и глубины наклепа. При этой температуре остаточные напряжения начинают релаксироваться, и преимущественное влияние на сопротивление усталости оказывает наклеп. Увеличение глубины и степени наклепа приводит к снижению жаропрочности независимо от того, каким видом обработки он создан. Установлено, что при обработке на оптимальных режимах резания, т.е. режимах, обеспечивающих минимальный размерный износ режущего инструмента, жаропрочность и выносливость образцов выше, чем при обработке на режимах, отличных от оптимальных. Это является подтверж-

дением превалирующего влияния наклепа на эти характеристики при повышенной температуре, так как при оптимальных режимах резания наблюдается минимальная глубина наклепанного слоя.

В связи с изложенным следует вывод о необходимости технологического обеспечения параметров наклепа в поверхностном слое деталей, соответствующих заданным эксплуатационным свойствам, но это возможно на основе математических зависимостей параметров, характеризующих наклеп, от технологических условий обработки (режимов резания, геометрии инструмента и др.).

Вопросам определения глубины залегания наклепанного слоя при точении посвящено большое число работ. Так, Г.А. Арутюнян предлагает для аналитического определения глубины наклепа при несвободном резании $h_{\text{Н}}$, м, использовать формулу:

$$h_{\text{Н}} = \left\{ \begin{array}{l} \dfrac{\sin 45^\circ \sin\left(45^\circ + \beta_1\right)\left(a_1 - \rho_1 \sin^2 \dfrac{\beta_1}{2}\right)}{\sin \beta_1} - \\ -a_1 + \dfrac{2\rho_1 \sin 45^\circ \sin \dfrac{\beta_1}{2}}{\sin\left(90^\circ - \dfrac{\beta_1}{2}\right)} + \left(\dfrac{a_1 - 2\rho_1 \sin^2 \dfrac{\beta_1}{2}}{\sin \beta_1}\right) \times \\ \times \sin 45^\circ \left[1 - \sin\left(45^\circ + \beta_1\right)\right] + \delta \sin 45^\circ \end{array} \right\} \times$$

$$\times \frac{\cos \eta}{\cos(\varphi - \eta)},$$

где β_1 — угол поверхности сдвига, °;

a_1 — толщина сечения среза, м;

ρ_1 — радиус округления режущей кромки резца, м;

δ — ширина фаски износа по задней поверхности резца, м;

η — угол схода стружки;

φ — главный угол в плане.

Л.Ш. Шустер установил для определения глубины наклепанного слоя формулу:

$$h_{\text{Н}} = M_{\text{з}} \left(\frac{\tau_n}{\sigma_{\text{в}}}\right)^{m_{\text{з}}},$$

где $M_{\text{з}}$, $m_{\text{з}}$ — постоянные, зависящие от свойств материалов контактирующей пары и определяемые экспериментально;

τ_n — прочность адгезионных связей на срез, Па;

$\sigma_{\text{в}}$ — предел прочности обрабатываемого материала на разрыв.

Г.К. Маркарян провел экспериментальные исследования по определению глубины наклепа и получил зависимости в следующем виде:

$$h_{\text{Н}} = \frac{c_{\text{v}}}{\text{v}^{0,2}}; \; h_{\text{Н}} = A_1 S + B_1 t + C_1; \; h_{\text{Н}} = C_\gamma e^{k(90^\circ - \gamma)},$$

где c_{v}, A_1, B_1, C_1, C_γ, k — коэффициенты, определяемые экспериментально;

S, t и v — подача, глубина и скорость резания соответственно;

γ — передний угол резца.

В.С. Мухин установил следующую зависимость для определения глубины наклепа, м, при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе:

$$h_{\text{Н}} = 12,28 \cdot 10^3 \theta_{\text{о}}^{-1,401} S^{0,141} t^{0,111} r^{0,094},$$

где $\theta_{\text{о}}$ — оптимальная температура в зоне резания, обеспечивающая минимум износа режущего инструмента, °С;

r — радиус при вершине резца в плане, м.

Г.П. Григорян предлагает определять глубину наклепа при несвободном резании по аналитической формуле

$$h_{\text{Н}} = \frac{t}{2}\left(\cos \varphi \operatorname{tg} \psi - 1\right),$$

где ψ — угол между линией скольжения и направлением главной режущей кромки резца, °;

φ — главный угол резца в плане, °.

В.Я. Севастьянов получил следующие зависимости для определения глубины залегания наклепанного слоя.

1. Максимально возможная глубина наклепанного слоя для свободного резания без учета радиуса округления режущей кромки резца и при отсутствии пластической деформации на задней грани резца определяется по формуле

$$h_{\text{Н}} = a_1 \frac{1 - \sin \beta_1}{\sin \beta_1}.$$

2. Для определения глубины наклепанного слоя при несвободном резании предложены следующие зависимости:

$$h_{\text{Н}} = S \sin \varphi \frac{1 - \sin \beta_1}{\sin \beta_1} \frac{\sin \eta}{\sin(\eta + \varphi)} \text{ при } 3,0 > \frac{S}{t} > 0,3;$$

$$h_{\text{Н}} = S \frac{1 - \sin \beta_1}{2 \sin \beta_1} \cdot 2 \sin 2\varphi \text{ при } \frac{S}{t} < 0,3;$$

$$h_{\text{Н}} = t \frac{1 - \sin \beta_1}{\sin \beta_1} \text{ при } \frac{S}{t} > 3,0.$$

Методика исследования

Глубина наклепа поверхностного слоя, как доказано рядом исследований, определяется глубиной залегания пластических деформаций в поверхностном слое. В соответствии с условием пластичности Губера—Мизеса пластические деформации в поверхностном слое материала детали возникают при создании напряжений, равных пределу текучести.

Применительно к условиям обработки лезвийным инструментом глубина упрочнения поверхностного слоя будет равна глубине проникновения пластических деформаций для цилиндрической детали в направлении действия радиальных напряжений, а для дисков — в направлении действия осевых напряжений. При этом необходимо исходить из положения, что возникновение пластических деформаций в поверхностном слое обусловлено одновременным воздействием температурного и силового факторов. Это приводит к выводу, что глубина залегания пластических деформаций в поверхностном слое при точении должна определяться из условия равенства пределу текучести алгебраической суммы напряжений в поверхностном слое, обусловленных силовым и температурным воздействиями.

Если исходить из условия, что глубина и степень наклепа обусловлены влиянием какого-либо одного из факторов, то могут возникнуть противоречивые сведения. Так, например, в работе [3] приведены данные об увеличении глубины наклепа с повышением скорости резания при точении сталей, не претерпевающих структурных изменений в процессе механической обработки. В работе [4] указывается, что для этой же группы обрабатываемых материалов характерно экстремальное изменение глубины наклепа с минимумом при оптимальной скорости резания. При меньшей и большей скоростях резания глубина наклепа больше, чем при оптимальной скорости. В работе [5] приводится пример, когда с увеличением скорости резания также наблюдается экстремальное увеличение глубины наклепа, однако в этом случае максимум глубины наклепа при скорости резания около 100 м/мин. При большей и меньшей скоростях резания глубина наклепа уменьшается. В соответствии с исследованиями Г.А. Арутюняна с увеличением главного угла в плане глубина наклепа обработанной поверхности возрастает. По данным Г.К. Маркаряна наблюдается экстремальное значение глубины и степени наклепа при изменении главного угла в плане с минимумом при $\varphi = 45°$. Такие противоречивые сведения можно объяснить только тем, что при различных условиях резания, а также в зависимости от свойств обрабатываемого материала могут наблюдаться различные закономерности, которые могут быть объяснены при одновременном учете силового и температурного факторов.

В целях анализа раздельного влияния условий резания и температуры в зоне резания на глубину наклепа при точении были проанализированы закономерности влияния технологических условий обработки на глубину наклепа при условии его возникновения от действия температурного фактора и при условии силового воздействия на поверхностный слой раздельно, а также при условии одновременного действия обоих факторов без учета разупрочняющего действия температуры.

Глубина наклепа при точении, обусловленная температурными деформациями материала поверхностного слоя детали

Глубина залегания пластических деформаций в поверхностном слое детали при точении дисков $h_{\text{Н т}}$, обусловленная температурным воздействием на поверхностный слой, может быть определена по следующей зависимости, полученной автором:

$$h_{\text{Н т}} = a_1 \left\{ \left[\frac{\begin{array}{c}(1-\mu)\sigma_{\text{т}}(\sin\alpha)^{0,042x_4-0,05}\times \\ \times(\sin\gamma)^{0,021x_4}(1-\sin\gamma)^{0,073x_1}\end{array}}{\begin{array}{c}0,215C_\theta\beta_{\text{д}}E\theta_{\text{пл}}\times \\ \times\left[C\left(\frac{\text{v}}{a}\right)^{1+x}\left(\frac{\lambda_{\text{р}}}{\lambda_{\text{д}}}\beta\varepsilon\right)^{y}\left(\frac{1}{b_1}\right)^{z}\right]^{x}\times \\ \times a_1^{x_1(1+x-z)-x_3+d}\rho_1^{x_3-d}\end{array}} \right]^{\frac{1}{x_2}} - 1 \right\}, \quad (1)$$

где a_1 и b_1 — соответственно толщина и ширина сечения среза, м;

μ — коэффициент Пуассона обрабатываемого материала;

$\sigma_{\text{т}}$ — предел текучести обрабатываемого материала, Па;

α и γ — соответственно задний и передний углы резца, °;

C_θ, C, x, y, z, x_1, x_2, x_3, x_4, d — величины, зависящие от физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов, режима резания и геометрии инструмента [6];

$\beta_{\text{д}}$ — коэффициент температурного линейного расширения материала обрабатываемой детали, 1/°С;

E — модуль упругости обрабатываемого материала, Па;

$\theta_{\text{пл}}$ — температура плавления материала обрабатываемой детали, °С;

v — скорость резания, м/с;

a — температуропроводность материала обрабатываемой детали, м^2/с;

$\lambda_{\text{д}}$ и $\lambda_{\text{р}}$ — коэффициенты теплопроводности материалов соответственно обрабатываемой детали и режущего инструмента, Вт/(м·К);

β и ε — соответственно угол заострения и угол при вершине резца в плане, °;

ρ_1 — радиус округления режущей кромки резца, м.

Таким образом, глубина наклепа определяется как функция практически всех основных параметров процесса резания: режима резания, геометрии инструмента, физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Теоретический анализ влияния отдельных элементов режима резания и геометрических параметров резца на глубину наклепа, вызванного пластическими деформациями от температурного воздействия, показал следующее. С увеличением подачи глубина наклепа возрастает, а с увеличением скорости резания — уменьшается. Это согласуется с результатами экспериментальных исследований ряда исследователей. С увеличением глубины резания глубина наклепа незначительно возрастает, что связано с хотя и незначительным, но увеличением температуры резания. При увеличении радиуса при вершине резца в плане глубина наклепа уменьшается, что объясняется снижением температуры в зоне резания.

Глубина наклепа возрастает с увеличением главного угла в плане до 60°, а затем стабилизируется. Объясняется это тем, что с увеличением угла φ возрастает температура резания, причем наибольший темп возрастания наблюдается при изменении главного угла в плане до 60°, при дальнейшем его увеличении рост температуры замедляется. С увеличением радиуса округления режущей кромки резца ρ_1 глубина наклепа возрастает, а с увеличением переднего γ и заднего α углов резца — уменьшается. Это объясняется тем, что при возрастании ρ_1 температура в зоне резания, а следовательно, и пластические деформации возрастают, а при увеличении γ и α — уменьшаются.

Глубина наклепа, обусловленная воздействием на поверхностный слой материала детали сил резания

В этом случае глубину наклепа следует определять из условия равенства напряжений в поверхностном слое пределу текучести, а именно [6]:

$$\sigma_y = -\sigma_т,$$

где σ_y — напряжения, действующие перпендикулярно к обрабатываемой поверхности.

Напряжения σ_y определяются как алгебраическая сумма напряжений, обусловленных воздействием на поверхностный слой сил резания, действующих со стороны передней поверхности, и сил резания, действующих со стороны задней поверхности:

$$\sigma_y = -\frac{\tau_p}{2\pi}\left\{\frac{1+B+B\operatorname{tg}(\operatorname{arctg}B-\gamma)}{\left[B\cos\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B\right)+\sin\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B\right)\right]\cos\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B\right)}\times\right.$$
$$\left.\times\left[2\arccos\frac{B+B\frac{y}{a_1}}{\sqrt{1+\left(B+B\frac{y}{a_1}\right)^2}}-\sin 2\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B\right)+\frac{\begin{array}{r}2\left(B+B\frac{y}{a_1}\right)\left[2\sin^2\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B\right)-1\right]+\\+\sin 2\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B\right)\left[\left(B+B\frac{y}{a_1}\right)^2-1\right]\end{array}}{1+\left(B+B\frac{y}{a_1}\right)^2}\right]\right\}\frac{1}{1-\mu^2}-$$
$$-\frac{\tau_p b}{2\pi b_1\cos\alpha}\left[\begin{array}{l}\frac{2}{\sin 2\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B+\gamma\right)}\arccos\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{(\Delta/\Delta_1)B}{y/a_1}\right)^2}}+\\+1-\frac{\pi}{2}\frac{2-\frac{\pi}{2}\sqrt{1+\left(\frac{(\Delta/\Delta_1)B}{y/a_1}\right)^2}}{\sqrt{1+\left(\frac{(\Delta/\Delta_1)B}{y/a_1}\right)^2}}+\frac{2}{\operatorname{tg}2\left(\frac{\pi}{2}-2\operatorname{arctg}B+\gamma\right)}\frac{\frac{\pi}{2}\sqrt{1+\left(\frac{(\Delta/\Delta_1)B}{y/a_1}\right)^2}-1}{1+1+\left(\frac{(\Delta/\Delta_1)B}{y/a_1}\right)^2}\end{array}\right]\frac{1}{1-\mu^2},\qquad(2)$$

где y — глубина залегания пластических деформаций;

Δ — длина участка пластических деформаций в поверхностном слое детали вследствие трения с задней поверхностью инструмента [6];

Δ_1 — длина участка опережающих пластических деформаций в поверхностном слое материала обрабатываемой детали, обусловленных процессом резания [6];

$B = \mathrm{tg}\beta_1$ — безразмерный комплекс процесса резания, характеризующий тепловую активность стружки по отношению ко всей выделившейся в зоне резания теплоте [6].

Анализ зависимостей для расчетного определения глубины наклепа при точении из условия силового воздействия на поверхностный слой позволил выявить влияние на глубину наклепа отдельных технологических факторов. Так, например, с возрастанием скорости резания и подачи глубина наклепа увеличивается, что объясняется повышением сил резания с увеличением подачи, а также возрастанием скорости деформации с повышением скорости резания. С увеличением глубины резания глубина наклепа, обусловленная силовым воздействием на материал поверхностного слоя детали, уменьшается, что объясняется снижением удельной нагрузки, приходящейся на единицу площади, подверженной пластическому деформированию от действия распределенной силы резания. Действительно, удельная нагрузка

$$p = \frac{P_y}{b_2\Delta},$$

где P_y — горизонтальная составляющая сила резания, Н;

b_2 — длина контакта режущей части инструмента в зоне резания с обрабатываемым материалом, м.

С увеличением глубины резания от t_1 до t_2 значение b_2 возрастает от b_{21} до b_{22}. Поскольку с повышением b_2 значение p уменьшается, то уменьшается и глубина наклепа $h_{\text{Н с}}$, обусловленная силовым воздействием.

С возрастанием главного угла в плане режущей части резца глубина наклепа возрастает, а с увеличением радиуса при вершине резца в плане — уменьшается. Объясняется этот факт тем, что увеличивается удельная нагрузка сил резания на поверхность за счет уменьшения b_2 при увеличении главного угла в плане. При увеличении радиуса при вершине резца в плане площадь $b_2\Delta$ возрастает, уменьшается удельное давление и, несмотря на повышение сил резания, глубина наклепа уменьшается. Увеличение радиуса округления режущей кромки резца вызывает увеличение силы резания и глубины наклепа. Влияние заднего угла резца проявляется двойственно. С увеличением α уменьшаются сила резания и глубина наклепа. Однако, начиная с некоторого момента (соотношения геометрических параметров резца и режимов резания), с увеличением заднего угла возрастает удельная нагрузка на обработанную поверхность, что может привести к повышению глубины наклепа.

Глубина наклепа в поверхностном слое обрабатываемой детали, определяемая из условия совместного действия температурного и силового факторов

Как показал анализ, влияние отдельных технологических параметров на глубину наклепа, определенную из условия температурного и силового воздействия, закономерность ее изменения с изменением температуры и силы резания может быть различной как по величине, так и по характеру. Численное значение глубины наклепа должно определяться с учетом одновременного воздействия температуры и силы резания, т.е. из условия:

$$\sigma_{\text{у}} + \sigma_{\text{н}} = -\sigma_{\text{т}},$$

где $\sigma_{\text{у}}$ — напряжение в поверхностном слое материала детали при резании, обусловленное силовым воздействием и определяемое по формуле (2);

$\sigma_{\text{н}}$ — напряжение в поверхностном слое детали при резании, обусловленное температурным фактором и определяемое по формуле

$$\sigma_{\text{н}} = -\frac{\beta_{\text{д}} A_1 E_{\text{д}}}{1-\mu} \times \left\{ 1 + \frac{\frac{1}{1+x_2}\left[a_1 - (H+a_1)\left(\frac{H+a_1}{a_1}\right)^{1+x_2}\right]}{H} \right\}, \quad (3)$$

где H — толщина детали, м; значение A_1 определяется по формуле

$$A_1 = C_0\theta_A(\text{БВ})^{x_1}\left(\frac{\rho_1}{a_1}\right)^{x_3-d} \times (\sin\alpha)^{0,05-0,042x_4}(\sin\gamma)^{-0,021x_4},$$

где θ_A — температура на условной вершине резца, °С;

$\text{Б} = \frac{\text{v}a_1}{a}$ — безразмерный комплекс процесса резания;

a — температуропроводность обрабатываемого материала, м^2/с.

Расчеты, выполненные на ЭВМ, позволили теоретически определить влияние на глубину наклепа $h_Н$ различных технологических факторов. С увеличением скорости резания глубина наклепа уменьшается, а с увеличением подачи — возрастает (рис. 1). С увеличением глубины резания при малых подачах, когда превалирует тепловой фактор, наблюдается возрастание глубины наклепа. С увеличением подачи усиливается влияние силового воздействия на поверхностный слой, и глубина наклепа уменьшается при увеличении глубины резания (рис. 2, *а*). При возрастании радиуса при вершине резца в плане глубина наклепа уменьшается, что свидетельствует о превалирующем влиянии силового фактора при принятых условиях обработки (рис. 2, *б*). С увеличением радиуса округления режущей кромки резца ρ_1, так же как и износа резца по задней поверхности δ, глубина наклепа возрастает (рис. 3). Характер изменения глубины наклепа при точении в зависимости от главного угла в плане, переднего и заднего углов резца приведен на рис. 4 и 5.

Математическая обработка результатов расчетного определения глубины наклепа позволила получить зависимость для определения глубины наклепа, м, при точении жаропрочных сталей и сплавов ХН73МБТЮ, ХН77ТЮР и 13Х12НВМА:

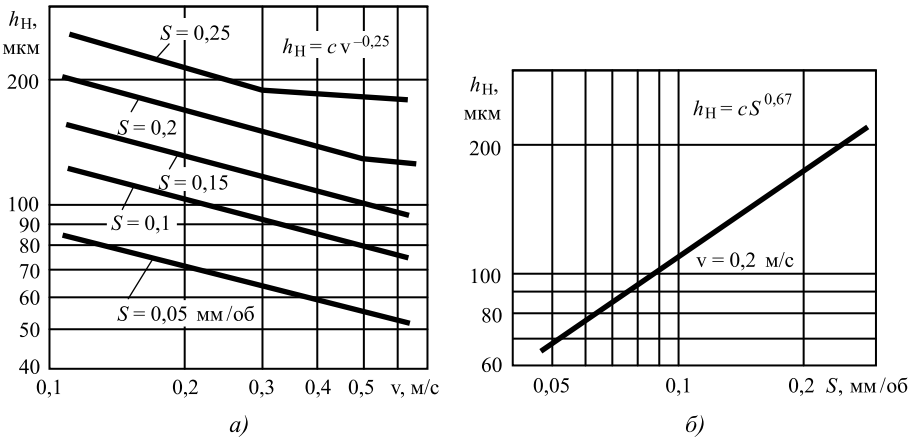


Рис. 1. Влияние скорости резания (*а*) и подачи (*б*) на глубину наклепа при обработке точением образца из сплава ХН77ТЮР резцом из ВК8:
t = 1 мм; r = 1 мм; ρ_1 = 30 мкм; α = 12°; γ = 10°; φ = 45°; φ_1 = 15°

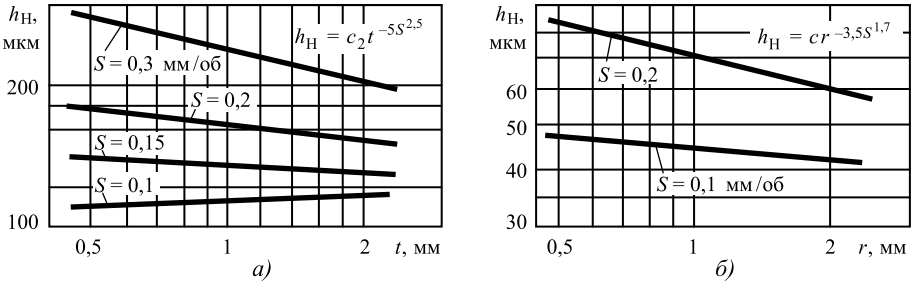


Рис. 2. Влияние глубины резания (*а*) и радиуса при вершине резца в плане (*б*) на глубину наклепа при обработке точением:
ρ_1 = 30 мкм; α = 12°; γ = 10°; φ = 45°; φ_1 = 15°; *а* — образец из сплава ХН73МБТЮ—ВК8, r = 1 мм, v = 0,3 м/с; *б* — образец из сплава 13Х12НВМА—Т15К6, t = 1 мм, v = 1,5 м/с

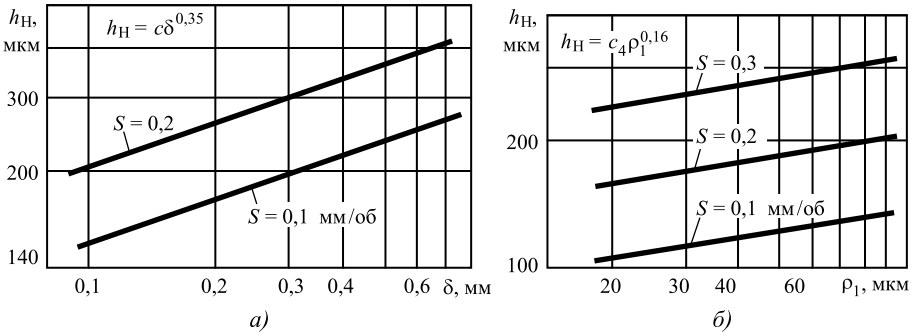


Рис. 3. Влияние износа резца (*а*) и радиуса округления режущей кромки (*б*) на глубину наклепа при обработке точением образца из сплава ХН73МБТЮ резцом из ВК8:
v = 0,3 м/с; t = 1 мм; r = 1 мм; ρ_1 = 30 мкм; α = 12°; γ = 10°; φ = 45°; φ_1 = 15°

$$h_Н = \frac{0,76\cdot 10^{-6}\tau_р^{0,75}S^{0,6}t^{0,06}\rho_1^{0,17}\varphi^{0,35}\delta^{0,36}}{v^{0,28}r^{3,5S^{1,7}}\alpha^{0,09}\gamma^{0,33}}.$$

Данная формула справедлива для следующих условий обработки: t = 0,5...2,0 мм; S = 0,05...0,4 мм/об; v = 0,1...0,8 м/с (для ХН73МБТЮ и ХН77ТЮР); v = 0,5...4,0 м/с (для 13Х12НВМА); r = 0,5...2,0 мм; ρ_1 = 20...100 мкм; φ = 15...90°; φ_1 = 15°; α = 5...20°; γ = 5...20°. Фаска износа резца δ = 0,1...1 мм.

В целях сопоставления расчетных и экспериментальных значений глубины наклепа при точении были проведены эксперименты по определению глубины залегания наклепанного слоя рентгеноструктурным методом. Результаты экс-

Таблица 1

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений глубины наклепа при точении

Обрабатываемый и инструментальный материалы	S, мм	v, м/с	r, мм	α, °	Глубина наклепа $h_Н$, мкм		Расхождение, %
					Расчет	Эксперимент	
ХН73МБТЮ — ВК8	0,1	0,5	1	10	92	80	+15
	0,2	0,5	1	10	150	120	+25
	0,15	0,5	0,5	10	134	120	+11,7
	0,15	0,5	2	10	116	100	+16
	0,2	0,37	1	15	150	120	+25
13Х12НВМА — Т15К6	0,2	1,57		12	70	75	−6,7
	0,1	1,26			60	48	+25
	0,3	1,57			85	100	−15
	0,1	1,57			55	45	+22
	0,1	1,98			52	43	+21
	0,1	0,79			52	49	+6
Примечание: t = 1 мм; γ = 10°; φ = 45°; $φ_1$ = 15°; $ρ_1$ = 30 мкм.							

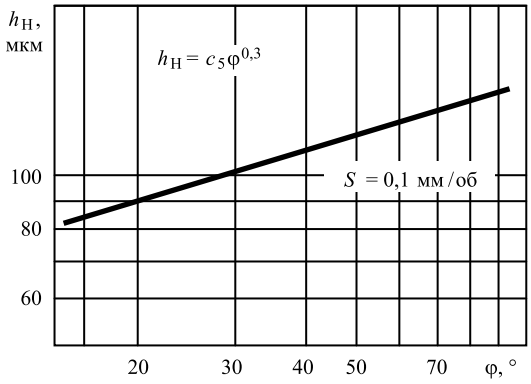


Рис. 4. Влияние главного угла в плане на глубину наклепа при обработке точением образца из сплава ХН73МБТЮ резцом из ВК8:
t = 1 мм; v = 0,3 м/с; r = 1 мм; $ρ_1$ = 30 мкм; α = 12°; γ = 10°; $φ_1$ = 15°

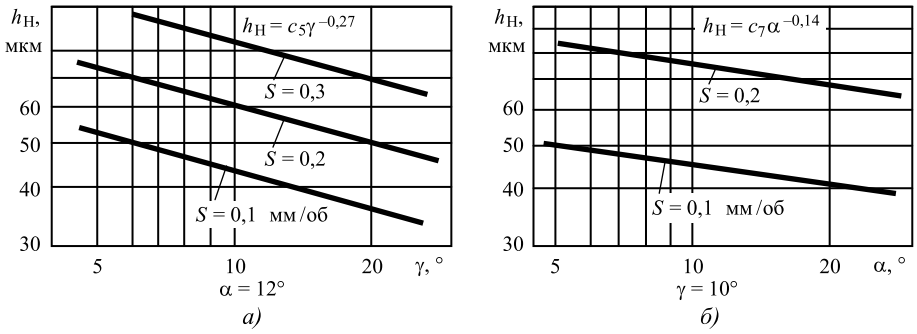


Рис. 5. Влияние переднего (*а*) и заднего (*б*) углов резца на глубину наклепа при обработке точением образца из стали 13Х12НВМА резцом из Т15К6:
t = 1 мм; v = 1,5 м/с; r = 1 мм; $ρ_1$ = 30 мкм; φ = 45°; $φ_1$ = 15°

периментального определения глубины наклепа в сопоставлении с результатами расчетов приведены в таблице.

Заключение

Полученная авторская зависимость глубины наклепа в поверхностном слое обработанной детали от технологических условий обработки позволяет управлять процессом обработки для обеспечения необходимой глубины наклепа и заданных эксплуатационных свойств детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д.** Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.

2. **Мухин В.С.** Поверхность: конструирование, технология, свойства, прочность // Вестник УГАТУ. 2000. № 1. С. 97—104.

3. **Маталин А.А.** Технология механической обработки. М.: Машиностроение, 1977. 462 с.

4. **Макаров А.Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машгиз, 1976. 276 с.

5. **Подураев В.Н.** Обработка резанием жаропрочных и нержавеющих материалов. М.: Высшая школа, 1965. 518 с.

6. **Безъязычный В.Ф.** Метод подобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.

УДК 621.793

В.А. Кукареко, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик, Е.В. Астрашаб, А.В. Сосновский
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск)
E-mail: v_kukareko@mail.ru

Структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства псевдосплавов, напыленных из высокохромистых сталей и цветных металлов

Исследованы структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства композиционных материалов из высокохромистых сталей и цветных металлов, напыленных методом высокоскоростной металлизации. Установлено, что напыление железоалюминиевого псевдосплава 95Х18 + АД1 приводит к формированию композиционного материала с пониженным содержанием оксидов. Показано, что псевдосплав 95Х18 + АД1 обладает относительно высокой износостойкостью по сравнению с композиционными материалами 40Х13 + Zn и 95Х18 + Л63, а также по сравнению с обычными газотермическими покрытиями из сталей 40Х13 и 95Х18.

Ключевые слова: *псевдосплавы, газотермическое напыление, фазовый состав, содержание оксидов, износостойкость.*

The structural-phase condition and tribological properties of composite materials from high-chromium steels and non-ferrous metals sprayed by high-speed metallization are studied. It is established that the deposition of the iron-aluminum pseudoalloy 95Kh18 + AD1 leads to the formation of composite material with low content of oxides. It is shown that the pseudoalloy 95Kh18 + AD1 has relatively high wear resistance compared with the composite materials 40Kh13 + Zn and 95Kh18 + L63, as well as in comparison with gas-thermal coatings from steels 40Kh13 and 95Kh18.

Keywords: *pseudoalloy, thermal spraying, phase composition, oxide content, wear resistance.*

Введение

Псевдосплавы позволяют получать изделия с уникальными физико-механическими свойствами, что обеспечило их широкое применение в различных областях промышленности [1]. При этом псевдосплавы зачастую уступают монолитным материалам по прочностным свойствам, однако комбинированные материалы обладают рядом других ценных характеристик, например, демпфирующей способностью, повышенной износостойкостью, способностью к самосмазыванию при трении, теплостойкостью, что объясняет повышенный интерес к таким материалам. Традиционно псевдосплавы получают методами жидкофазного и твердофазного спекания, а также пропиткой. Вместе с тем использование методов спекания и пропитки для производства комбинированных материалов — сложный и трудоемкий процесс. В связи с этим разработка и применение более экономичных методов изготовления псевдосплавов является актуальной задачей.

Одним из перспективных методов получения псевдосплавов является высокоскоростное газотермическое напыление проволочных материалов, в частности, метод высокоскоростной металлизации (ВМ), который позволяет напылять покрытия из различных токопроводящих материалов. Отличительные особенности высокоскоростного напыления: высокая скорость распыляемых частиц (свыше 400 м/с), низкая пористость получаемого покрытия (~2...5 %), высокий коэффициент использования напыляемого материала (0,85) [2]. Вместе с тем структура, фазовый состав и износостойкость псевдосплавов из высокохромистых сталей и различных цветных металлов, полученных методом высокоскоростной металлизации, ранее не исследовались.

Таблица 1

Химический состав псевдосплавов, полученных методом высокоскоростного напыления

Напыляемые проволочные материалы	Содержание элементов, % мас.									
	Al	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
40Х13 (2,0 мм) + Zn (2,0 мм)	—	0,281	0,187	0,033	8,702	0,273	55,104	0,194	0,091	35,135
95Х18 (1,6 мм) + АД1 (2,0 мм)	22,985	0,169	0,190	0,032	14,152	0,292	61,864	0,278	0,038	—
95Х18 (1,0 мм) + Л63 (2,2 мм)	—	0,049	0,122	—	6,489	0,089	25,801	0,219	43,380	23,851

Цель работы — исследование структурно-фазового состояния и триботехнических свойств комбинированных материалов, полученных высокоскоростной металлизацией проволок из высокохромистых сталей и цветных металлов.

Материалы и методика исследований

В качестве объектов исследований были выбраны псевдосплавы, напыленные методом высокоскоростной металлизации с использованием установки АДМ-10 [2]. Комбинированные сплавы из высокохромистых сталей и цветных металлов напыляли на пластины (100×50×6 мм), изготовленные из стали 45. Химический состав напыленных псевдосплавов представлен в табл. 1.

Для исследований структуры, фазового состава и трибомеханических свойств из предварительно механически отшлифованных пластин с напыленными псевдосплавами вырезали образцы размерами 8×6×5 мм.

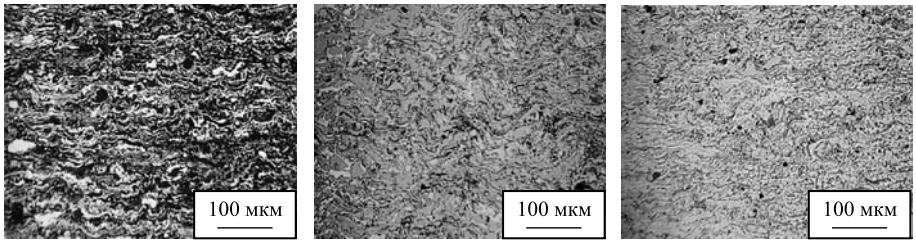
Металлографические исследования газотермических покрытий проводили на оптическом микроскопе АЛЬТАМИ МЕТ 1МТ, исследование фазового состояния газотермических покрытий — на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном кобальтовом K_α-излучении при напряжении 28 кВ и анодном токе 14 мА. Расшифровку рентгенограмм осуществляли при помощи программного обеспечения Crystallographica Search-Match с картотекой PDF-2.

Триботехнические испытания образцов напыленного сплава выполняли на трибометре АТВП по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел при средней скорости взаимного перемещения ~0,1 м/с в режиме трения в смазочном материале И-20А. Удельная нагрузка испытаний составляла p = 10 МПа. При испытаниях использовали контртело, изготовленное из закаленной стали У8 (800 HV10). Путь трения ~1200 м.

Твердость по Виккерсу измеряли на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор 98,1 Н (10 кгс).

Результаты исследований и их обсуждение

В результате газотермического напыления формируются псевдосплавы с перемежающимися прослойками-ламелями высокохромистой стали и цветных металлов. Кроме этого, на границах металлических прослоек-ламелей располагаются тонкие оксидные слои. Характерные микроструктуры напыленных псевдосплавов представлены на рис. 1, фазовый состав напыленных псевдосплавов — на рис. 2 и в табл. 2.



а) *б)* *в)*

Рис. 1. Характерные микроструктуры псевдосплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации:
а — 40Х13 + Zn; *б* — 95Х18 + АД1; *в* — 95Х18 + Л63

Таблица 2

Фазовый состав и твердость псевдосплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации

Материал псевдосплава	Фазовый состав	Твердость HV10
40Х13 + Zn	Zn, α-Fe, γ-Fe, Fe_3O_4, FeO, ZnO	110
95Х18 + АД1	α-Fe, Al, γ-Fe, Fe_3O_4, FeO, Al_2O_3	200
95Х18 + Л63	α-Fe, γ-Fe, $Cu_{0,64}Zn_{0,36}$, Cu, CuZn, Fe_3O_4	155

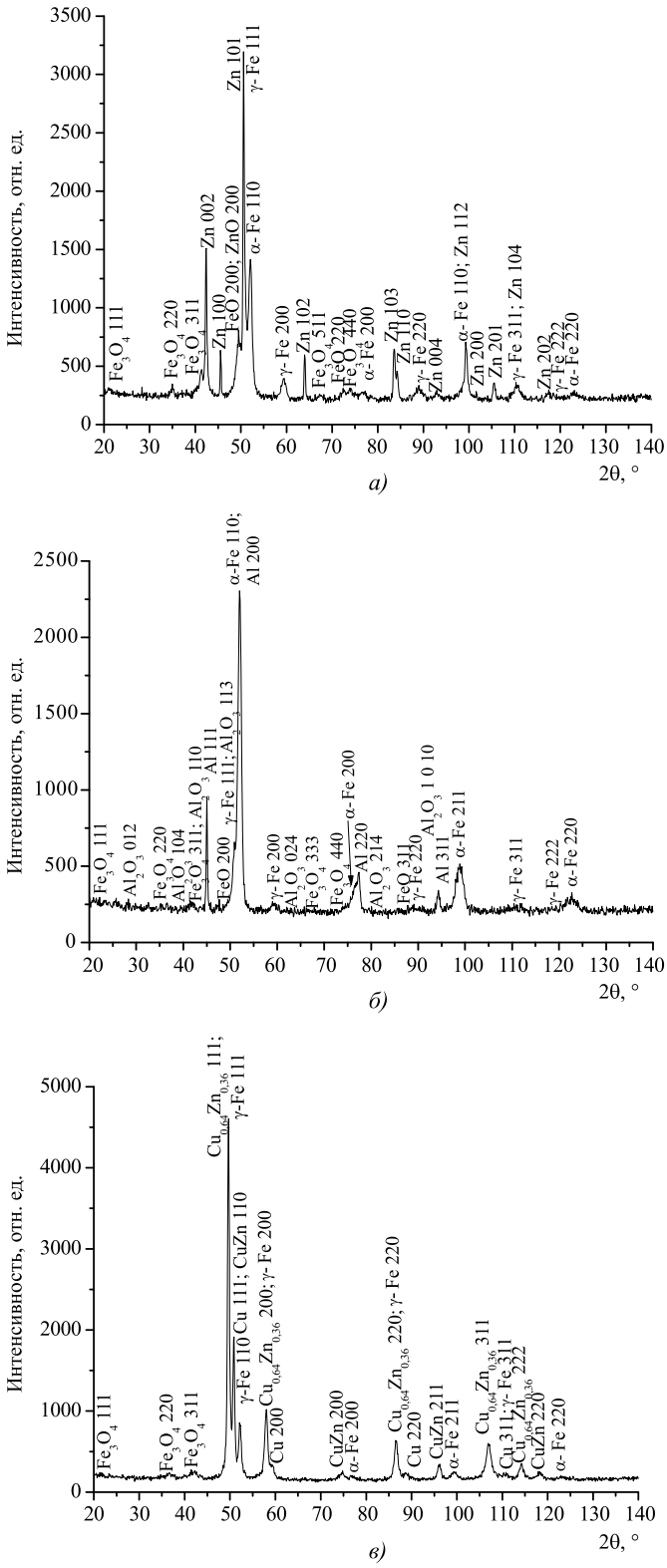


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев псевдосплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации:
а — 40Х13 + Zn; *б* — 95Х18 + АД1; *в* — 95Х18 + Л63

Анализ данных рентгеноструктурных исследований показал, что напыленные комбинированные материалы включают в себя различное количество α-Fe и γ-Fe, входящих в фазовый состав прослоек из высокохромистой стали, а также цветные металлы Zn, Al и Cu, оксиды железа Fe_3O_4, FeO и оксиды ZnO, Al_2O_3 (см. табл. 2). Кроме этого, в покрытии на базе 95Х18 + Л63 регистрируются интерметаллидные соединения $Cu_{0,64}Zn_{0,36}$ и CuZn (см. табл. 2). Наименьшее количество оксидов железа характерно для псевдосплава 95Х18 + АД1 (см. рис. 2). По мнению авторов, пониженное количество оксидов железа Fe_3O_4 и FeO в псевдосплаве, содержащем алюминиевый сплав, связано с пониженным окислением частиц железа за счет их обволакивания легкоплавким алюминием в процессе металлизации, а также с восстановлением оксидов железа алюминием. В результате этого горячие напыленные частицы стали 95Х18 при охлаждении в полете практически не контактируют с кислородом воздуха, и, как следствие, в покрытиях регистрируется пониженное количество оксидов железа. При этом образование оксида Al_2O_3 защищает от окисления алюминиевые частицы (см. табл. 2, рис. 2).

Известно, что в газотермическом покрытии из стали 95Х18 регистрируется аномально высокое количество метастабильного аустенита, составляющее ~70 % об. [3]. В то же время в композиционном покрытии 95Х18 + АД1 обнаруживается пониженное количество аустенитной фазы (см. рис. 2). В частности, определенное с учетом стандартного соотношения интенсивностей дифракционных линий алюминия I_{111} и I_{200} содержание γ-Fe в стальных прослойках псевдосплава 95Х18 + АД1 составляет ~20...25 % об. (см. рис. 2). Более полное γ → α-превращение при охлаждении стальных частиц в псевдосплавах, содержащих алюминий, связано с ускоренным охлаждением стальных частиц в покрытиях за счет быстрого отвода тепла в них из-за низкого содержания оксидных прослоек между смежными частицами, а также за счет ускоренного теплоотвода прослойками цветного металла. При этом в результате ускоренного охлаждения покрытий из псевдосплавов уменьшается время их выдержки в бейнитной области, что сопровождается снижением устойчивости аустенита [3, 4]. Можно ожидать, что в железомедных покрытиях на основе высокохромистой стали 95Х18 и медного сплава также будет регистрироваться пониженное содержание аустенитной фазы. В пользу этого свидетельствует то, что коэффициент теплопроводности Fe составляет 76,6 Вт/(м·К), алюминия — 237 Вт/(м·К) и меди — 404 Вт/(м·К).

Наиболее высокие значения твердости для случая напыленных композиционных материалов регистрируются у псевдосплава 95Х18 + АД1 и составляют 200 HV10 (см. табл. 2). Псевдосплав 95Х18 + Л63 имеет твердость 155 HV10, а псевдосплав 40Х13 + Zn — 110 HV10.

Для сравнения триботехнических свойств пседосплавов из различных материалов также проводили напыление обычных газотермических покрытий (ГТП) из сталей 95Х18 и 40Х13. Результаты триботехнических испытаний псевдосплавов различных составов и стандартных покрытий представлены на рис. 3 и в табл. 3. Данные триботехнических испытаний свидетельствуют о том, что максимальной износостойкостью из представленных псевдосплавов и газотермических покрытий обладает псевдосплав 95Х18 + АД1. При этом интенсивность линейного изнашивания псевдосплава, содержащего алюминий, составляет $1{,}95 \cdot 10^{-10}$, а коэффициент трения — 0,08 (см. табл. 3). В то же время интенсивность линейного изнашивания газотермического покрытия из стали 95Х18 составляет $2{,}15 \cdot 10^{-10}$, а коэффициент трения равен 0,1.

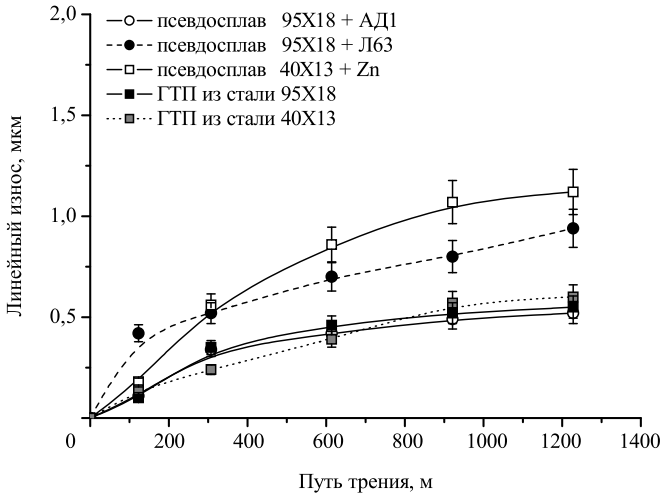


Рис. 3. Зависимости линейного износа от пути трения для газотермических покрытий и композиционных материалов различных составов, напыленных методом высокоскоростной металлизации

Таблица 3

Интенсивность линейного изнашивания в условиях граничного трения и коэффициент трения газотермических покрытий и псевдосплавов различных составов, напыленных методом высокоскоростной металлизации

Материал	Интенсивность линейного изнашивания I_h, 10^{-10}	Коэффициент трения f
40Х13	3,90	0,07
40Х13 + Zn	6,10	0,08
95Х18	2,15	0,10
95Х18 + АД1	1,95	0,08
95Х18 + Л63	4,55	0,07

Таким образом, псевдосплав 95Х18 + АД1 имеет износостойкость на 10 % выше, по сравнению с газотермическим покрытием из стали 95Х18. Повышенная износостойкость напыленного псевдосплава 95Х18 + АД1 связана, по-видимому, с реализацией принципа Шарпи [5] для рассматриваемого композиционного материала, а также обусловлена низким содержанием в нем оксидов железа (см. рис. 2). Композиционное покрытие 95Х18 + Л63 имеет пониженную износостойкость ($I_h = 4{,}55 \cdot 10^{-10}$), что связано с наличием большого количества в напыленном покрытии интерметаллидных соединений на основе Cu—Zn, обладающих низкой пластичностью. Покрытие, состоящее из стали 40Х13 и цинка, характеризуется пониженной износостойкостью по сравнению с газотермическим покрытием из стали 40Х13 (см. табл. 3), что связано с низкой твердостью псевдосплава. В частности, интенсивность линейного изнашивания композиционного покрытия 40Х13 + Zn составляет $6{,}10 \cdot 10^{-10}$, а газотермического покрытия из стали 40Х13 — $3{,}90 \cdot 10^{-10}$ (см. табл. 3).

Таким образом, можно сделать вывод, что композиционные покрытия из высокохромистых сталей и цветных металлов, полученные методом высокоскоростного напыления, являются перспективными материалами для изготовления пар трения, работающих в среде смазочного материала. В частности, алюминий и его сплавы позволяют существенно понизить количество оксидов и метастабильных фаз в композиционных покрытиях, а также повысить их износостойкость.

Заключение

Исследованы структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства композиционных покрытий на базе высокохромистых сталей 40Х13, 95Х18 и цветных металлов и сплавов, напыленных методом высокоскоростной металлизации. Установлено, что напыление псевдосплава, состоящего из стали 95Х18 и технического алюминия АД1, приводит к формированию композиционного покрытия с пониженным содержанием оксидов железа и повышенной износостойкостью в условиях граничного трения. В частности, интенсивность линейного изнашивания напыленного псевдосплава 95Х18 + АД1 на 10 % меньше, чем у газотермического покрытия из стали 95Х18.

В результате совместного напыления стали 95Х18 и латуни Л63 формируется композиционное покрытие, уступающее по износостойкости псевдосплаву, содержащему технический алюминий. Показано, что износостойкость композиционного материала 40Х13 + Zn ниже, чем у газотермического покрытия из стали 40Х13.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Фетисов Г.П. и др.** Материаловедение и технология металлов. М.: Высшая школа, 2001. 640 с.
2. **Витязь П.А., Белоцерковский М.А., Камко А.И., Прядко А.С.** Замена гальванического хромирования на технологию гиперзвуковой металлизации при ремонте деталей узлов трения скольжения // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. № 10. С. 2—5.
3. **Кукареко В.А., Григорчик А.Н., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В.** О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95Х18 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 7 (151). С. 318—322.
4. **Кукареко В.А., Григорчик А.Н., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В.** Закономерности формирования структурно-фазового состояния газотермического покрытия из стали мартенситного класса 95Х18 // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: материалы 12-й Международно-технической конференции. Минск, 2017. С. 54—62.
5. **Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д.** Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

УДК 621.793:620.22:620.178.16

[1]Г.А. Прибытков, [2]В.И. Калита, [2]Д.И. Комлев, [1, 3]М.Г. Криницын, [1, 3]Е.Н. Коростелева, [1, 3]А.В. Барановский, [2]А.А. Радюк, [2]А.Ю. Иванников, [2]А.Б. Михайлова, [1]В.В. Коржова

([1]Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск,
[2] Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва,
[3]Национальный исследовательский Томский политехнический университет)
E-mail: gapribyt@mail.ru

Твердость и износостойкость плазменных покрытий, напыленных СВС-композиционными порошками TiC + Ti-связка

Исследованы плазменные покрытия, напыленные порошком титана и композиционным порошком карбид титана — титановая связка, синтезированным из реакционных порошковых смесей титана и углерода (сажи). Установлено, что покрытия, имеющие в структуре несвязанный, структурно обособленный титан, содержат до 3,5 % мас. кислорода и до 5,4 % мас. азота. Повышенное содержание растворенных атмосферных газов обеспечивает высокую твердость и абразивную износостойкость покрытия, напыленного порошком титана. Покрытия, напыленные СВС-композиционным порошком TiC + Ti-связка имеют значительную пористость из-за недостаточного содержания титановой связки в напыляемом порошке, что нейтрализует положительное влияние дисперсных включений карбида титана в титановой связке на твердость и износостойкость покрытий.

Ключевые слова: *металломатричный композит, титан, карбид титана, плазменное напыление, поглощение азота и кислорода, твердость, абразивная износостойкость.*

Coatings plasma sprayed by Ti and TiC + Ti-binder composite powder are studied. The composite powder is obtained by self-propagating high temperature synthesis (SHS) from powder mixtures of titanium and carbon (carbon black). Synthesis products are crashed and sieved to get composite powder for plasma spraying. The sprayed powders and deposited coatings are analyzed for carbon, oxygen and nitrogen content. Up to 3.5 % wt. oxygen and up to 5.4 % wt. nitrogen is found in the sprayed coatings. According to metallography investigation the coating plasma sprayed with the SHS-composite powder have high porosity because of oxygen and nitrogen absorption in the course of plasma spraying. As result useful impact of disperse carbide particles in the composite coating on the wear resistance goes down.

Keywords: *metal-matrix composite, titanium, titanium carbide, plasma spraying, absorption of nitrogen and oxygen, hardness, abrasive wear resistance.*

Введение

Хорошо известно, что композиционные материалы и покрытия со структурой из дисперсных твердых частиц, заключенных в металлическую матрицу (связку), обладают уникальным сочетанием твердости, прочности, пластичности и износостойкости при абразивном износе и в трибосо-

пряжениях. Характерным примером таких материалов являются инструментальные твердые сплавы, получаемые спеканием порошковых смесей из дисперсных карбидов и металлической связки. Известно также, что физико-механические и триботехнические свойства металломатричных композитов, кроме свойств дисперсных включений и металлической связки, во многом определяются структурой (объемной долей, дисперсностью и морфологией упрочняющей фазы).

Материалы со структурой металломатричных композитов широко применяются также в качестве износостойких покрытий, наносимых на детали, подвергающиеся интенсивному износу. Такие покрытия наносят наплавкой или напылением смесей порошков дисперсной твердой фазы и металлической связки. Для предотвращения сегрегации разнородных порошков в смесях целесообразна замена порошковых смесей композиционными порошками в виде гранул, каждая из которых содержит дисперсные твердые включения, однородно распределенные в металлической матрице. Наиболее производительный и экономичный метод получения металломатричных композиционных порошков с карбидом титана в качестве упрочняющей фазы — самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) в реакционных порошковых смесях титана, углерода и металла или сплава, образующего металлическую связку в продуктах синтеза.

Методом СВС получены композиционные порошки на основе карбида титана со связками из высокохромистого чугуна [1], титана [2], быстрорежущей стали [3], легированного нихрома [4]. Синтезированные порошки использованы для электронно-лучевой наплавки покрытий. Исследования структуры наплавленных покрытий [5—7] показали, что при наплавке происходит перекристаллизация карбидной фазы в расплаве наплавочной ванны, что приводит к неконтролируемому огрублению структуры покрытий. Тем не менее износостойкость покрытий, наплавленных СВС композиционными порошками, многократно увеличивается [8, 9] по сравнению с износостойкостью покрытий, наплавленных порошками металлических связок.

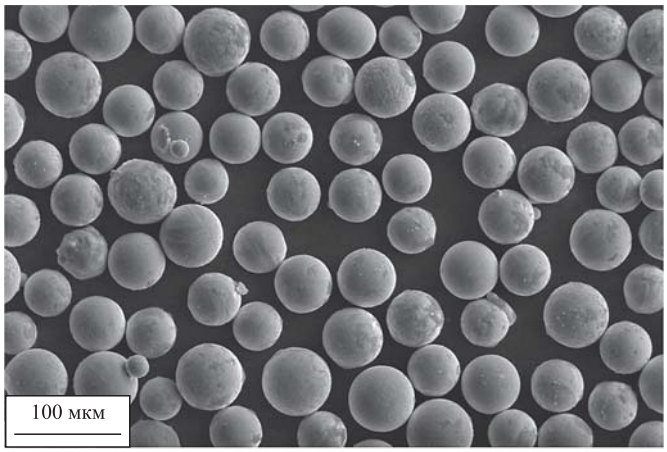
Использование композиционных порошков для плазменного напыления покрытий также дало положительный результат. Присутствие в структуре покрытия дисперсных частиц карбида титана увеличивает износостойкость напыленных покрытий в 7,6 раза для покрытия со связкой из быстрорежущей стали [10] и в 3,5 раза для покрытия со связкой из высокохромистого чугуна [11]. При напылении композиционных порошков карбидная фаза сохраняется в неизменном виде, так как из-за кратковременности высокотемпературной стадии процесса напыления заметного взаимодействия твердых карбидных частиц с металлическим расплавом не происходит. Таким образом, имеется возможность формировать оптимальную структуру в напыленном покрытии, используя композиционные порошки заранее заданной структуры. Особенностью всех покрытий, полученных порошковым напылением, является изменение содержания углерода и атмосферных газов за счет взаимодействия полужидких капель с примесями воздуха в плазме [12—15].

Особый практический интерес представляет нанесение износостойких покрытий на титан и его сплавы, широко используемые в аэрокосмической промышленности. Известно, что титан и его сплавы обладают низкой износостойкостью из-за склонности к схватыванию в контактных парах практически со всеми металлическими материалами [16]. В настоящей работе представлены результаты испытаний на абразивный износ покрытий, напыленных композиционными СВС-порошками карбид титана — титановая связка.

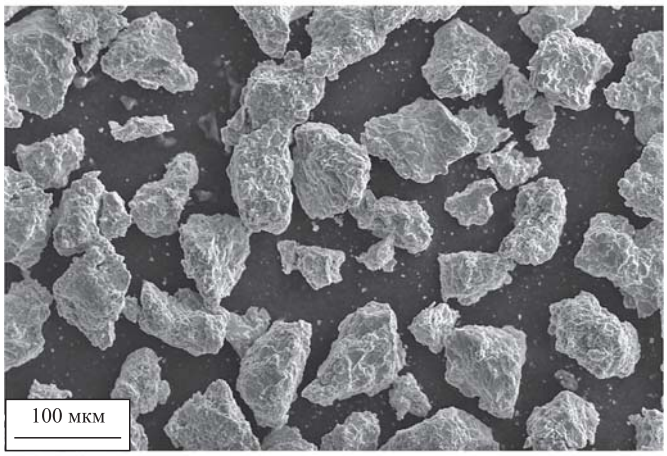
Материалы и методы исследования

Для плазменного напыления был использован композиционный порошок TiC + 25 % об. Ti, полученный дроблением и последующим рассевом пористых СВС-спеков. Спеки были синтезированы из порошковых смесей титана и углерода (сажи). Гранулы композиционного порошка имеют комковато-осколочную форму (рис. 1, *б*) и микроструктуру из светлых карбидных частиц на фоне протравленной титановой связки (рис. 1, *в*). Более детальное описание получения композиционных порошков синтезом из порошковых смесей приведено в работах [2—4], а используемое оборудование и технологические особенности плазменного напыления покрытий описаны в работе [14]. Для сравнения свойств покрытий для напыления использовали также порошок титана со сферическими гранулами (рис. 1, *а*). Все частицы напыляемых порошков имели размер 25...56 мкм. Содержание углерода в порошках и покрытиях определяли на приборе LECO CS600 методом окислительного плавления, а кислорода и азота — на приборе LECO TS600 методом восстановительного плавления. Результаты определения содержания углерода и атмосферных газов приведены в табл. 1.

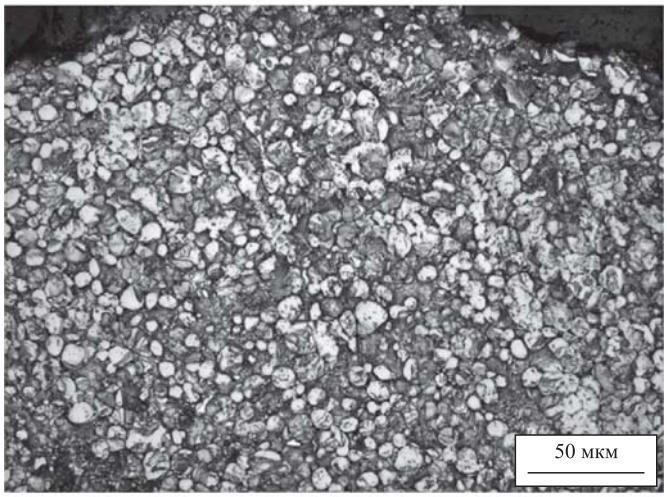
Морфологию и структуру напыляемых порошков и напыленных покрытий исследовали



а)



б)



в)

Рис. 1. Морфология напыляемых порошков (*а* — титан; *б* — СВС TiC + Ti) и микроструктура гранул композиционного СВС-порошка (*в*)

методами оптической (AXIOVERT-200MAT, Zeiss, Germany) и растровой электронной микроскопии (EVO 50, Zeiss, Germany) на оборудовании Центра коллективного пользования "Нанотех" Института физики прочности и материаловедения СО РАН. Испытания на абразивный износ проводили по ГОСТ 23.208—79 "Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы". В качестве абразива при испытаниях использовали электрокорунд № 16-П зернистостью 160...200 мкм. Микротвердость покрытий измеряли на приборе ПМТ-3 при различных нагрузках на индентор.

Таблица 1

Содержание углерода и атмосферных газов в напыляемых порошках и напыленных покрытиях на основе титана

Объект	Содержание примесей, % мас.					
	C	O	N	C	O	N
	Титан			TiC + Ti		
Порошок	0,25	0,79	0,045	11,10	1,23	0,077
Покрытие	0,194	2,92	5,39	9,23	3,45	2,73
Покрытие/порошок	0,78	3,69	119,8	0,83	2,80	35,45

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 2 приведены результаты испытаний на абразивный износ и измерения микротвердости напыленных покрытий. Для сравнения приведены также полученные ранее [10, 11] данные для покрытий, напыленных порошками высокохромистого чугуна, быстрорежущей стали и СВС-порошками на основе карбида титана с чугунной и стальной связками.

Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что карбид титана мало влияет на твердость и износостойкость покрытий, напыленных порошком титана. Твердость покрытий, напыленных композиционным СВС-порошком TiC + Ti, больше твердости покрытия, напыленного порошком титана всего на 10 %, а абразивная износостойкость даже ниже на 10 %. Эти результаты сильно отличаются от результатов, полученных ранее на композиционных порошках со стальной и чугунной связками (см. табл. 2). Введение дисперсных частиц карбида титана в стальную связку увеличивает твердость покрытия вдвое, а абразивную износостойкость — в 5,1 раза [10]. При введении карбида титана в покрытие с чугунной связкой твердость повышается в 1,7 раза, а износостойкость — в 8,8 раза [11]. При этом твердость и абразивная износостойкость покрытия, напыленного порошком титана, выше,

Таблица 2

Скорость износа и микротвердость напыленных покрытий

Материал связки	Напыляемый порошок	Скорость износа v, мг/ч	$v_{Me}/v_{TiC + Me}$	H_{μ} 0,2, ГПа	$H_{\mu\ TiC + Me}/H_{\mu\ Me}$
Титан	Титан	24,6±1,9	0,9	9,5±1,7	1,1
	СВС TiC + Ti	27,37±1,2		10,6±1,0	
Чугун	ПГ-С27	71,37 ±2,9	8,8	6,6±0,7	1,7
	СВС TiC + ПГ-С27	8,14±0,5		11,0±0,9	
Сталь	Р6М5	91,0±4,0	5,1	4,3±0,4	2,0
	СВС TiC + Р6М5	17,82		8,6±1,5	

чем у покрытий, напыленных порошками чугуна и быстрорежущей стали (см. табл. 2). Причиной этого, по мнению авторов, является высокое содержание в покрытии, напыленном порошком титана, кислорода и азота (см. табл. 1).

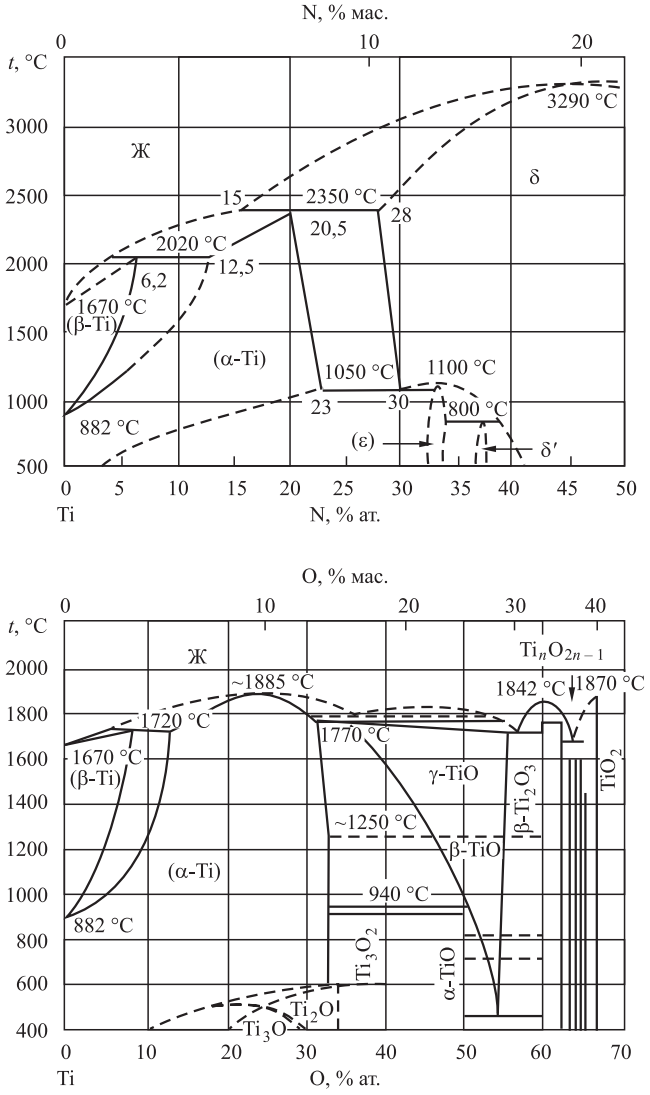


Рис. 2. Равновесные диаграммы Ti—N и Ti—O [17]

При напылении титан активно поглощает атмосферные газы, так как их равновесная растворимость в твердых растворах на основе α-Ti превышает 20 % ат. (рис. 2).

Растворение кислорода и азота в титане приводит к повышению твердости и одновременно к увеличению температуры плавления твердых растворов. Согласно работе [18] твердость титана, содержащего всего 2,5 % ат. (0,8 % мас.) кислорода или азота, увеличивается в 4...5 раз при комнатной температуре. Повышение температуры плавления титана особенно велико для твердых растворов азота. При содержании в покрытии, напыленном порошком титана, 5,4 % мас. (15,4 % ат.) азота температура ликвидус повышается примерно на 600 °С. Повышение температуры плавления напыляемых порошков приводит к уменьшению содержания жидкой фазы в твердожидких каплях, падающих на поверхность подложки, а быстрая кристаллизация и повышенная твердость препятствуют образованию слоистой малопористой структуры. Такая слоистая структура наблюдалась ранее на покрытиях, напыленных порошками чугуна ПГ-С27, стали Р6М5 и композиционными СВС-порошками со стальной и чугунной связками [10, 11].

Содержание примесей кислорода и азота в покрытиях, напыленных порошками чугуна, стали и композиционными порошками с чугунной и стальной связками, значительно меньше (табл. 3), чем в покрытиях, содержащих несвязанный, структурно обособленный титан в виде титановой связки в композиционном покрытии или в покрытии, напыленном титановым порошком (см. табл. 1). При этом для всех использованных композиционных СВС-порошков поглощение азота при напылении происходит более интенсивно, чем поглощение кислорода (см. табл. 1 и 3). Фазой, поглощающей азот и кислород при напылении, является преимущественно карбид титана, а не чугунная или стальная связка, так как именно в карбиде ти-

Таблица 3

Содержание углерода и атмосферных газов в напыляемых порошках и напыленных покрытиях на основе чугуна и стали [12, 13]

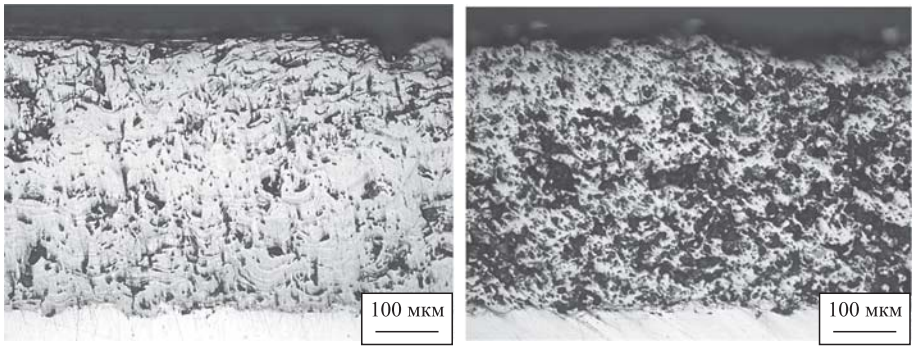
Объект	Содержание примесей, % мас.											
	C	O	N	C	O	N	C	O	N	C	O	N
	ПГ-С27			TiC + ПГ-С27			Р6М5			TiC + Р6М5		
Порошок	4,26	0,32	0,04	10,4	0,56	0,07	1,0	0,08	0,05	7,83	0,80	0,05
Покрытие	3,47	0,98	0,15	9,64	1,96	0,64	0,61	2,33	0,17	6,74	2,81	0,89
Покрытие/порошок	0,79	3,1	3,9	0,92	3,5	9,4	0,61	29,1	3,5	0,86	3,5	16,8

тана возможно неограниченное растворение атмосферных газов с образованием оксикарбидов и карбонитридов титана [19].

Для выяснения причин отсутствия положительного влияния карбида титана на твердость и износостойкость покрытия на основе титана была исследована микроструктура покрытий (рис. 3). На нетравленном шлифе поперечного сечения покрытия, напыленного композиционным порошком (см. рис. 3, *б*) видна значительная пористость. Причиной большой пористости этого покрытия является недостаточное (25 % об.) содержание титановой связки. Еще одной причиной может быть большое содержание кислорода и азота (см. табл. 1).

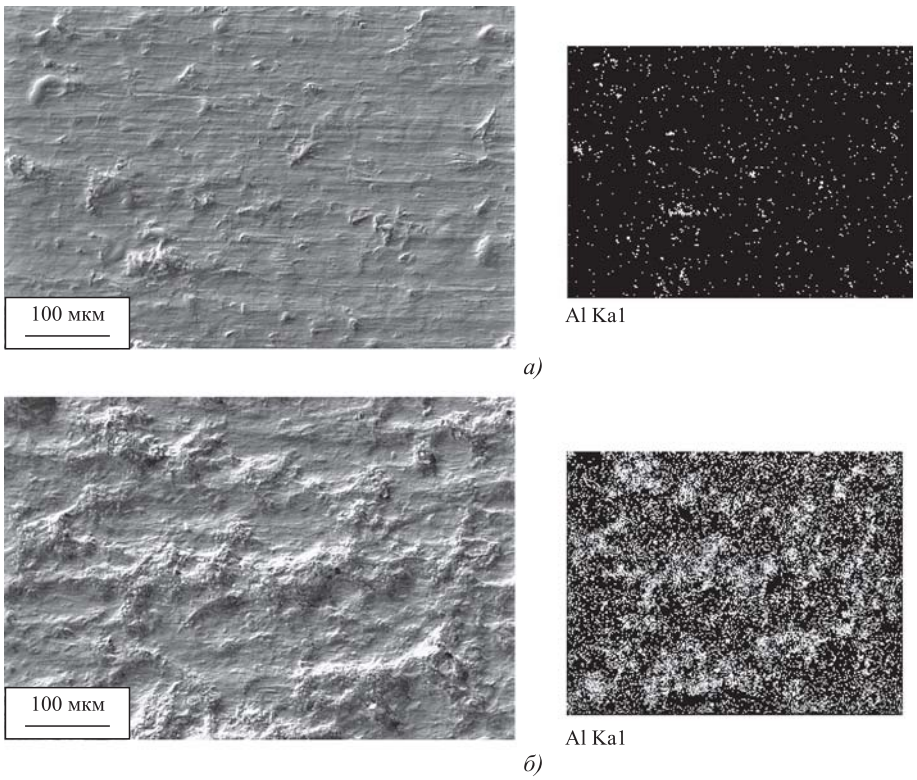
Вид изношенных поверхностей покрытий, напыленных порошком титана и композиционным СВС-порошком TiC + Ti, приведен на рис. 4.

Поверхность покрытия, напыленного порошком титана (рис. 4, *а*), более гладкая и покрыта тонкими параллельными царапинами — следами частиц абразива. Поверхность покрытия, напыленного композиционным порошком (рис. 4, *б*), имеет сильно выраженный рельеф в виде бугров и впадин с более гладкой поверхностью. На поверхности некоторых впадин просматриваются следы износа,



а) *б)*

Рис. 3. Микроструктура покрытий, напыленных порошком титана (*а*) и композиционным СВС-порошком TiC + Ti (*б*)



а)

б)

Рис. 4. Изношенная поверхность покрытия, напыленного порошком титана (*а*) и композиционным порошком TiC + Ti (*б*)

откуда можно заключить, что впадины представляют собой области титановой связки.

Съемка в излучении алюминия показала, что на изношенной поверхности обоих покрытий имеются внедренные частицы абразива (корунд Al_2O_3). Бóльшая плотность светлых областей на поверхности композиционного покрытия TiC + Ti- (см. рис. 4, *б*, изображение поверхности в излучении алюминия) объясняется бóльшей пористостью этого покрытия. По-видимому, большинство пор, выходящих на поверхность, заполнено зернами абразива.

Выводы

1. При плазменном напылении порошков титана и композиционного СВС-порошка TiC + Ti связка формируются покрытия с высокой пористостью вследствие недостаточного содержания титановой связки в напыляемом порошке и насыщения несвязанного, структурно обособленного титана кислородом и азотом.

2. Из-за высокой пористости покрытий не реализуется положительное влияние дисперсных включений карбида титана в титановой связке на твердость и износостойкость покрытий.

Авторы благодарят В.П. Кривопалова за помощь при синтезе порошков и проведении износных испытаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Коростелева Е.Н., Прибытков Г.А., Каламбаева С.С. и др.** СВС композиционные порошки "TiC — чугунная связка" для наплавки и напыления, синтезированные на воздухе // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 6/2. С. 152—157.

2. **Прибытков Г.А., Криницын М.Г., Коржова В.В.** Исследование продуктов СВ-синтеза в порошковых смесях титана и углерода, содержащих избыток титана // Перспективные материалы. 2016. № 5. С. 59—68.

3. **Прибытков Г.А., Коржова В.В., Барановский А.В., Криницын М.Г.** Фазовый состав и структура композиционных порошков карбида титана со связкой из стали Р6М5, полученных методом СВС // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2017. № 2. С. 64—71.

4. **Прибытков Г.А., Фирсина И.А., Коржова В.В. и др.** Синтез композиционных порошков "TiC — связка из NiCrBSi сплава" для наплавки и напыления износостойких покрытий // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2018. № 2. С. 43—53.

5. **Прибытков Г.А., Барановский А.В., Фирсина И.А. и др.** Формирование структуры покрытий при электронно-лучевой наплавке СВС композиционными порошками "TiC + сталь Р6М5" // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 5. С. 36—43.

6. **Прибытков Г.А., Криницын М.Г., Коржова В.В., Фирсина И.А. и др.** Формирование структуры при электронно-лучевой наплавке покрытий композиционными порошками "карбид титана — титановая связка" // Физика и химия обработки материалов. 2018. № 1. С. 11—19.

7. **Krinitcyn M., Pribytkov G., Korzhova V., Firsina I.** Structure and properties of composite coatings prepared by electron beam melting with “titanium carbide — titanium binder” // Surface and coatings technology. 2019. Vol. 358. P. 706—714.

8. **Прибытков Г.А., Барановский А.В., Фирсина И.А. и др.** Твердость и абразивная износостойкость электронно-лучевых покрытий, наплавленных СВС композиционными порошками "TiC + сталь Р6М5" // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 10. С. 446—452.

9. **Прибытков Г.А., Криницын М.Г., Фирсина И.А., Дураков В.Г.** Твердость и абразивная износостойкость электронно-лучевых покрытий "карбид титана — титановая связка", наплавленных синтезированными композиционными порошками // Вопросы материаловедения. 2017. № 4. С. 52—61.

10. **Прибытков Г.А., Калита В.И., Комлев Д.И. и др.** Структура и износостойкость плазменных покрытий, напыленных композиционным порошком "TiC + Р6М5" // Физика и химия обработки материалов. 2017. № 3. С. 45—55.

11. **Прибытков Г.А., Калита В.И., Комлев Д.И. и др.** Структура и износостойкость плазменных покрытий, напыленных СВС композиционным порошком TiC—высокохромистый чугун // Физика и химия обработки материалов. 2019. № 1. С. 19—26.

12. **Калита В.И., Комлев Д.И., Прибытков Г.А. и др.** Изменение содержания углерода, азота и кислорода при формировании плазменных керметных покрытий со стальной матрицей, упрочненной карбидом титана // Перспективные материалы. 2017. № 8. С. 31—39.

13. **Калита В.И., Комлев Д.И., Прибытков Г.А. и др.** Керметные плазменные покрытия с карбидом титана // Физика и химия обработки материалов. 2018. № 3. С. 12—20.

14. **Калита В.И., Комлев Д.И., Прибытков Г.А. и др.** Структура, фазовый состав и микротвердость плазменного керметного покрытия TiC—Ti // Физика и химия обработки материалов. 2018. № 4. С. 16—27.

15. **Dudina D.V., Pribytkov G.A., Krinitcyn M.G. et al.** Detonation spraying behavior of TiC_x—Ti powders and the role of reactive processes in the coating formation // Ceramics International. 2016. Vol. 42. P. 690—696.

16. **Zwicker U.** Titan und Titanlegirungen. Springer-Verlag, 1974. 717 p.

17. **Диаграммы** состояния двойных металлических систем. В 3 т. / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение. 2001. Т. 3. Кн. 2. 872 с.

18. **Фромм Е., Гебхардт Е.** Газы и углерод в металлах. М.: Металлургия. 1980. 712 с.

19. **Алямовский С.И., Зайнулин Ю.Г., Швейкин Г.П.** Оксикарбиды и оксинитриды металлов IVA и VA групп. М.: Наука, 1981. 144 с.

УДК 621.793

С.Р. Шехтман, Н.А. Сухова, М.Ш. Мигранов
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: migmars@mail.ru

Многослойные вакуумные ионно-плазменные покрытия с субмелкозернистой структурой

Рассмотрен синтез многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий системы Ti—TiN с субмелкозернистой структурой, полученной в условиях ионного модифицирования поверхности, реализуемый с использованием плазменного источника с накальным катодом. Показано влияние дополнительной ионной бомбардировки на подготовку поверхности перед осаждением и на процесс модифицирования. Предложен технологический процесс получения многослойных вакуумных ионно-плазменных покрытий.

Ключевые слова: *наноструктурированные покрытия, плазменное ассистирование, нанесение, технология, защита поверхности.*

The synthesis of multilayer vacuum ion-plasma coatings of the Ti—TiN system with subfine-grained structure obtained under conditions of ionic surface modification, implemented using plasma source with filament cathode is considered. The effect of additional ion bombardment on surface preparation before deposition and on the modification process is shown. Technological process for obtaining of multilayer vacuum ion-plasma coatings is offered.

Keywords: *nanostructured coatings, plasma assisting, application, technology, surface protection.*

Разработка новых материалов защитных покрытий, способов и процессов их нанесения для создания многослойных композиций (обладающих более высокими эксплуатационными свойствами по сравнению с монослойными), отвечающих современным требованиям по защите поверхностей лопаток компрессора ГТД, работающих в условиях повышенных температур, знакопеременных нагрузок, усталостных и термоусталостных нагрузок, — важная задача авиадвигателестроения. Особенно остро стоит вопрос о защите поверхности при работе в условиях знакопеременных температур. Для решения этой проблемы, наряду с совершенствованием составов сталей и титановых сплавов, разработаны технологии защиты поверхности лопаток ГТД от агрессивного воздействия [1, 3—5].

Перспективное направление в создании материалов для защиты лопаток компрессора ГТД — много- или мультислойные покрытия, состоящие из периодически расположенных нескольких десятков слоев различных материалов нанометровой толщины, обладающих высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Благодаря особенностям строения, большому числу слоев и их толщине в нанометровом диапазоне, покрытия с субмикрокристаллической (СМК) структурой и наноструктурированные покрытия сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанообъектов. Специфика получаемой структуры обусловлена процессами, происходящими во время образования покрытия [2, 4—6].

Цель работы — создание новых материалов и технологий синтеза вакуумных ионно-плазменных (ВИП) покрытий с СМК-структурой для защиты поверхности конструкционных материалов.

Синтез мультислойных покрытий системы Ti—TiN осуществляли на модернизированной промышленной установке ННВ 6.6-И1 с двумя электродуговыми испарителями с титановыми катодами в условиях плазменного ассистирования с использованием несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, генерируемого плазменным источником "ПИНК" в среде инертного газа Ar.

Одновременная генерация частиц распыляемого материала за счет тока дуги с катодным пятном и генерация ионов инертного газа плазменного источника "ПИНК" позволяют повысить концентрацию заряженных частиц, что приводит к ускорению протекания процессов адсорбции, хемосорбции и ионного перемешивания.

Осаждение многослойных покрытий с СМК-структурой происходит в процессе последовательного осаждения TiN и Ti_2N из плазмы, создаваемой электронно-дуговыми испарителями, расположенными под углом 120° друг к другу на боковой поверхности вакуумной камеры. В качестве катодов использовали технически чистый титан марки ВТ1-0.

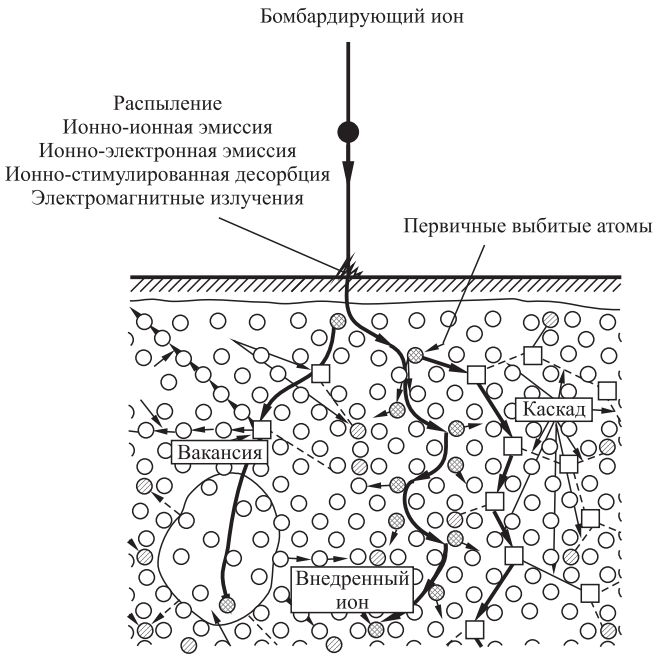


Рис. 1. Воздействие дополнительной ионной бомбардировкой

Проведение процесса в условиях ионной бомбардировки интенсифицирует процессы, наблюдаемые при осаждении многослойных покрытий, способствует формированию мелкозернистой структуры, наноразмерных зерен и слоев, а также образованию сложных соединений за счет (рис. 1):

— энергии, поставляемой в конденсируемое покрытие, и превращения кинетической энергии бомбардирующих ионов в тепловую для локальных объемов;

— увеличения числа и плотности центров зародышеобразования;

— активирования плазмохимических реакций синтеза сложных соединений за счет подвода тепловой энергии непосредственно в зону образования и роста подвижности атомов;

— повышения степени ионизации конденсируемого потока для снижения температуры синтеза покрытия и сдерживания роста размеров зерен (наблюдаются поверхностные эффекты, которые заключаются, например, в аморфизации растущей пленки);

— возможность очистки подложки и растущей пленки до и в процессе осаждения покрытия;

— стимулирования диффузионных процессов на границе раздела покрытие—подложка, повышающих адгезионную прочность.

Основное влияние модифицирования поверхности в условиях дополнительной ионной бомбардировки на свойства покрытий происходит на стадии их зарождения вследствие возникновения релаксации напряжений в области ионного воздействия и перестройки кристаллической структуры. При облучении ионным потоком на поверхности образуются точечные дефекты, которые становятся активными центрами адсорбции.

Для образования мелкозернистой структуры наиболее существенен эффект дополнительной ионной бомбардировки, вводимой в процесс конденсации на самой ранней стадии роста пленок — стадии образования зародышей.

На основании проведенных исследований была разработана технология осаждения многослойного покрытия системы Ti—TiN, реализованная на модернизированной установке ННВ 6.6-И1.

Данная технология, позволяющая создавать мультислойные ионно-плазменные покрытия системы Ti—TiN в условиях плазменного ассистирования, включает в себя:

— бомбардировку поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом с помощью плазменного источника "ПИНК" в среде аргона, в результате чего происходит модификация поверхности и ее предварительная очистка;

— дополнительную бомбардировку поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом;

— испарение материала покрытия в вакууме;

— осаждение ионов на поверхности с формированием слоя покрытия.

Бомбардировку ионами аргона проводят для подготовки поверхности обрабатываемой детали перед нанесением многослойных ионно-плазменных покрытий. Она заключается в термической активации поверхности, ее модификации и образовании центров зародышеобразования, что обеспечивает высокую адгезионную прочность покрытий.

Процесс предусматривает проведение всех операций в одном технологическом цикле, что определяет высокую эффективность ионно-плазменной технологии.

В качестве источника плотной однородной плазмы, генерируемой несамостоятельным дуговым разрядом низкого давления с накаленным катодом, используют плазмогенератор "ПИНК", который позволяет:

— обеспечить высокую энергетическую эффективность процесса генерации низкотемпературной объемной плазмы;

— уменьшить долю микрокапельной фракции в потоке плазмы вакуумных электродуговых испарителей;

— проводить плазменную очистку, травление и активацию поверхности без подпыления ее парами материала катода;

— выполнять комплексную обработку изделий в едином вакуумном цикле, включая процессы финишной очистки, активации, электронно-ионно-плазменного азотирования поверхности и плазменно-ассистированного напыления функциональных покрытий;

— обеспечивать формирование микро- и наноструктурированных покрытий, обладающих высокой твердостью, повышенной износостойкостью, улучшенной коррозионной стойкостью.

Для модификации поверхности в условиях дополнительной ионной бомбардировки может быть также использован разряд на основе эффекта полого катода (рис. 2) [1, 2].

Между обрабатываемой поверхностью и специальным экраном в виде сетки формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц. Обрабатываемая поверхность детали становится поверхностью полого катода, что приводит к образованию вблизи нее структуры из плазмы и слоя пространственного заряда. В полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, и скорость ее распыления. Прикатодные области объемного разряда перекрывают расстояние между ячейками и отражают быстрые осциллирующие электроны, что увеличивает концентрацию заряженных частиц.

Экран подбирают таким образом, чтобы исключить "уход" электронов из полости, вследствие чего происходит интенсивная бомбардировка ионами инертного газа распыляемой поверхности. Экран должен обладать максимальной прозрачностью для минимального экранирования металлической плазмы и распыления сетки.

Основные этапы технологического процесса осаждения многослойного покрытия с СМК-структурой приведены на рис. 3.

Технологический процесс синтеза ВИП-покрытий системы Ti—TiN с СМК-структурой предполагает в едином операционном пространстве и цикле совмещение разрядов, горящих в парах Ti катода, и разряда на основе эффекта полого катода, выполняющего функцию дополнительной ионной бомбардировки.

Предлагаемая технология, создающая ВИП-покрытия системы Ti—TiN с СМК-структурой в условиях ионной бомбардировки, реализуемой разрядом на основе эффекта полого катода, основана на следующих процессах:

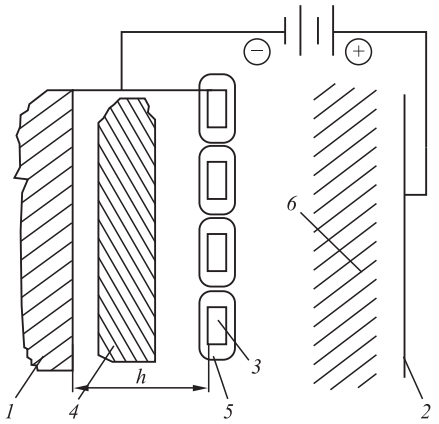


Рис. 2. Схема реализации тлеющего разряда на основе эффекта полого катода:
1 — обрабатываемая деталь; *2* — анод; *3* — экран (сетка); *4* — плазма полого катода; *5* — прикатодные области объемного заряда; *6* — плазма тлеющего разряда

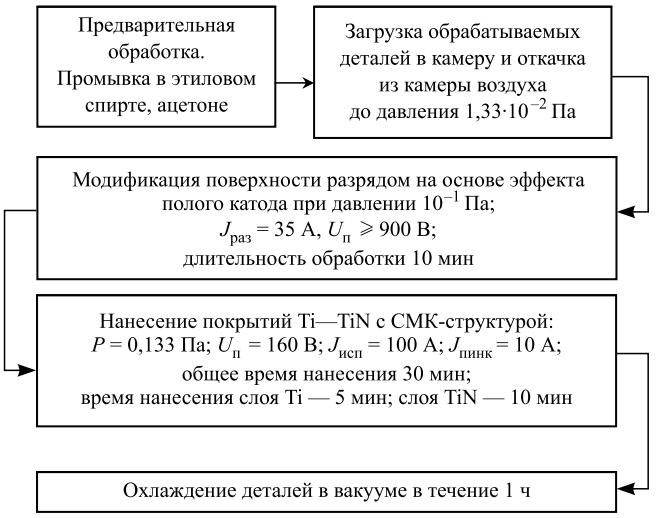


Рис. 3. Схема технологического процесса нанесения покрытия Ti—TiN с СМК-структурой с одновременной дополнительной ионной бомбардировкой

— бомбардировке поверхности разрядом на основе эффекта полого катода для модификации поверхности;

— дополнительной бомбардировке поверхности разрядом на основе эффекта полого катода в среде рабочего газа аргона;

— испарении материала катода;

— конденсации ионов на подложку с образованием слоя в среде азота при дополнительной ионной бомбардировке.

Технология предусматривает проведение в одном технологическом цикле модификацию поверхности разрядом на основе эффекта полого катода или обработки с использованием плазмогенератора "ПИНК" в атмосфере инертного газа

(аргона), нагрев деталей ионами металла, нанесение покрытий в среде реакционного газа.

Перед осаждением многослойных ВИП-покрытий осуществляют бомбардировку поверхности ионами Ar для подготовки поверхности обрабатываемой детали. Кроме того, при проведении обработки происходит термическая активация поверхности и возникают центры зародышеобразования для обеспечения высокой адгезионной прочности.

Разработанная технология нанесения покрытий с СМК-структурой композиции Ti—TiN включает в себя:

— предварительную подготовку обрабатываемых деталей;

— загрузку обрабатываемых деталей в камеру и откачку воздуха из камеры;

— модификацию поверхности разрядом на основе эффекта полого катода в среде инертного газа аргона или проведения процесса с использованием плазмогенератора "ПИНК";

— подачу рабочего газа азота в вакуумную камеру;

— нанесение многослойного защитного покрытия на основе композиции Ti—TiN при одновременной дополнительной ионной бомбардирове поверхности разрядом на основе эффекта полого катода или с использованием плазмогенератора;

— охлаждение обработанных деталей в вакууме.

Модификация поверхности и активирование на ней центров адсорбции и адгезии разрядом на основе эффекта полого катода в среде аргона при давлении 10^{-1} Па и очистка поверхности приводят к высокой концентрации участков зародышеобразования на поверхностном слое.

Плазменно-ассистированное нанесение многослойных покрытий композиции Ti—TiN с СМК-структурой проводили при давлении в камере 0,133 Па (потенциал на подложке 160 В, ток дуги электродугового испарителя 100 А). Осаждали покрытия одновременно с дополнительной бомбардировкой разрядом на основе эффекта полого катода или с использованием плазмогенератора "ПИНК". В качестве переходного слоя использовали слой титана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Будилов В.В., Мухин В.С., Шехтман С.Р.** Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов. Физические основы и технические решения. М.: Наука, 2008. 194 с.
2. **Белоус В.А.** Разработки ННЦ ХФТИ в области ионно-плазменных обработок конструкционных материалов // Харьковская научная ассамблея. 2006. С. 60—73.
3. **Пул Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005. 336 с.
4. **Schipachev A.** Optimum Conditions of Turning and Surface Plastic Deformation Determination Taking into Account Technological Heredity // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1118.
5. **Composite** nanostructured wear-resistant coatings for high-speed cutting processing / Migranov M.Sh., Shekhtman S.R., Suhova N.A., Migranov A.M. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 25. "25th International Conference on Vacuum Technique and Technology". 2018. P. 012053.
6. **Афанасьева Ю.Д., Шехтман С.Р.** Технология нанесения покрытия Ti—TiN на режущий инструмент // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2018. Т. 22. № 3 (81). С. 3—9.

УДК 621.9.047

[1, 2]О.В. Скрыгин, [2]В.П. Смоленцев, [1, 2]А.В. Щеднов
([1]Воронежский механический завод,
[2]Воронежский государственный технический университет)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Интенсификация массовыноса при комбинированных методах обработки материалов

Рассмотрены вопросы массовыноса продуктов обработки при комбинированных методах формообразования с наложением электрического поля. Показано влияние составляющих процесса на прочностные характеристики деталей, а также влияние качества подготовки исходной поверхности заготовки на скорость удаления припуска. Рассмотрены существующие и вновь созданные способы интенсификации массовыноса с использованием оригинальной кинематики перемещения, совершенствования геометрической формы, расположения электродов-инструментов, применения различных вариантов течения жидких рабочих сред, включая кавитационный режим, детальное рассмотрение которого приведено впервые. Раскрыт механизм импульсного воздействия на продукты обработки, выносимые из межэлектродного зазора жидкой рабочей средой. Это положено в основу создания новых способов и устройств для комбинированных методов обработки, расширяющих их технологические возможности. Рассмотрены вопросы гидродинамической неустойчивости течения жидких рабочих сред, влияющие на интенсивность массовыноса, при ограничениях, вызванных влиянием боковых поверхностей отверстий и каналов при обработке профильным и непрофилированным проволочным электродом-инструментом. Показано воздействие концентрированного ультразвукового луча на массовынос продуктов обработки, формирующихся на большом удалении от электрода. Рассмотрены возможности интенсификации массовыноса при использовании кавитационного режима течения жидкой рабочей среды при разделении заготовок большой толщины проволочным электродом-инструментом.

Ключевые слова: *массовынос, упрочнение, интенсификация, комбинированные методы обработки, новые способы, импульсное воздействие.*

The issues of mass transfer of processing products at combined methods of forming with the imposition of electric field are considered. The effect of the process components on the strength characteristics of the parts and effect of the preparation quality of the initial surface of the workpiece on allowance removal rate are shown. The existing and newly created methods of intensification of mass transfer using the original kinematics of movement, improving of the geometric shape, the location of the electrodes-tools, the use of various options for the working liquid flow, including cavitation mode, detailed consideration of which is given for the first time, are considered. The mechanism of impulse function on the products of processing taken out of the interelectrode gap by the working liquid flow is revealed. It is the basis for the creation of new methods and devices for combined methods processing, enhancing their technological capabilities. The problems of hydrodynamic instability of the working liquid flow affecting on the intensity of mass transfer, with restrictions caused by the effect of the side surfaces of the holes and channels in the processing by profiled and non-profiled wire electrode-tool are considered. The effect of concentrated ultrasonic beam on the mass transfer of processing products formed at great distance from the electrode is shown. The possibilities of intensification of masstransfer using the cavitation regime of the working liquid flow in the separation of the large thickness billets by the wire electrode-tool are considered.

Keywords: *mass transfer, hardening, intensification, combined processing methods, new ways, impulse function.*

Введение

Накопление в межэлектродном промежутке продуктов обработки ограничивает скорость съема материала с заготовки, что может достаточно быстро привести к полному прекращению процесса удаления припуска с заготовки. Это явление нередко наблюдается при электрических

методах обработки, особенно при сочетаниях тепловых, химических, механических воздействий, используемых при электроэрозионной, электрохимической размерной, ультразвуковой обработке [1, 2]. В литературе [3—6] приводится множество технологических приемов, ускоряющих массовынос при рассматриваемых методах обработки, что в большинстве случаев интенсифицирует процесс, но резко усложняет управление им и приводит к необоснованному удорожанию операции. Поэтому объективно существует необходимость в рациональном использовании имеющихся и в поиске новых видов интенсификации массовыноса продуктов обработки, особенно при изготовлении деталей создаваемой техники, где широко используются труднообрабатываемые материалы, для которых применение электрических методов обработки наиболее перспективно.

Особенности течения рабочей среды через межэлектродный зазор

Интенсивность выноса продуктов обработки зависит от геометрии профиля межэлектродного зазора. На рис. 1 приведены наиболее часто применяемые схемы перемещения через зону обработки жидких рабочих сред, при проектировании которых основным критерием эффективности является обеспечение требуемого массовыноса продуктов обработки.

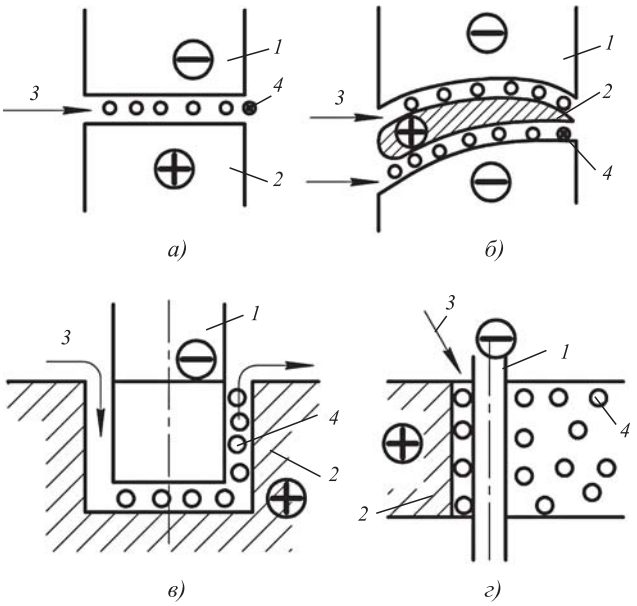


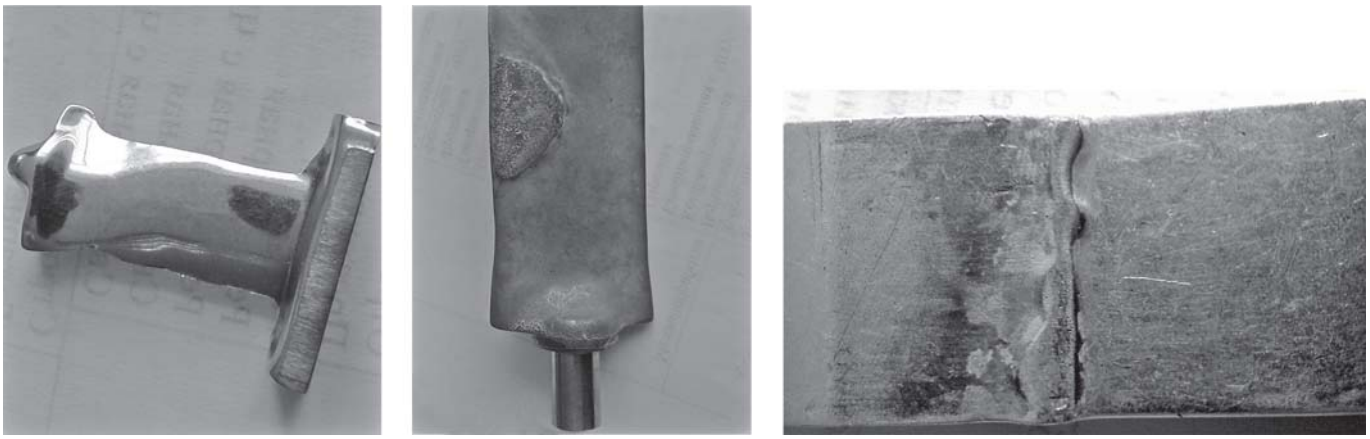
Рис. 1. Схемы течения жидкой рабочей среды через межэлектродный зазор между:
а — плоскими поверхностями; *б* — криволинейными участками; *в* — стенками канала и профильным электродом с поворотом потока; *г* — стенками паза и непрофилированным электродом-проволокой с выводом продуктов обработки в паз, полученный после разделения заготовки; *1* — электрод-инструмент; *2* — заготовка; *3* — направление течения рабочей среды; *4* — продукты обработки

При течении рабочей среды вдоль плоской поверхности (см. рис. 1, *а*) сопротивление движению жидкости минимально, что создает условия появления ламинарного потока со стабильными параметрами и равномерным массовыносом продуктов обработки. Однако плоские участки обрабатываемых заготовок составляют лишь малую часть большинства деталей современных изделий, и применение здесь электрических методов обработки незначительно.

С усложнением формы обрабатываемой поверхности, например, при изготовлении пера турбинных и компрессорных лопаток в авиационном, ракетном, энергетическом машиностроении (см. рис. 1, *б*), электрические методы обработки находят наибольшее применение, особенно в случае аэродинамичной геометрии рабочего тракта. Здесь требуемый массовынос продуктов обработки *4* из межэлектродного зазора (электрод-инструмент *1* — заготовка *2*) обеспечивается при невысоких скоростях течения рабочей среды и невысоких давлениях на входе жидкости в зазор. Основным ограничением применения электрических методов обработки является удлинение трассы до появления струйности, при которой возникают застойные зоны с пониженным массовыносом, нарушаются точность и качество поверхностного слоя детали. В ряде случаев это вызывает брак дорогостоящих деталей. На рис. 2 приведены фрагменты лопаток из различных материалов с нарушением профиля из-за появления застойных зон и снижения за счет этого массовыноса продуктов обработки.

Неровности, показанные на рис. 2, значительно превышают границы изменения толщины пера лопатки. На рис. 2, *а* наблюдаются как выступы в нижней части пера (этот дефект может быть устранен местной обработкой), так и углублениями на профиле (темные участки), удаление которых невозможно. Деталь была забракована. На титановой детали (см. рис. 2, *б*) выступ превышает 0,3 мм при допуске на толщину профиля 0,1 мм. Удаление выступа оказалось нецелесообразным, так как вокруг выступа сформировалось (видимо, за счет ускоренного потока, обтекающего выступ) углубление до 0,5 мм, что также привело к браку детали.

Особенно характерно показано нарушение массовыноса на участке алюминиевой детали на рис. 2, *в* в месте закрепления ее в приспособлении, где четко проявляются крупные дефекты и нарушения микроповерхности в форме волнистости профиля.



а) *б)* *в)*

Рис. 2. Фрагменты лопаток с нарушением профиля из-за появления застойных зон:
а — из коррозионно-стойкого сплава; *б* — из титанового сплава; *в* — образец пера лопатки из алюминиевого сплава

В процессе отработки производственной технологичности дефекты, подобные приведенным на рис. 2, для лопаток с шириной пера до 50 мм были полностью устранены путем совершенствования геометрии входных участков каналов и регулирования давления рабочей среды. Но проблема массовыноса существует, если деталь имеет повышенную длину зоны обработки и сложные переходные участки, затрудняющие массовынос. Пример такого течения рабочей жидкости показан на рис. 1, *в*, где цельным профильным электродом *1* в заготовке *2* выполняется глухое или сквозное глубокое отверстие любого сечения. В любом случае направление *3* потока резко изменяется в донной части, где возникают застойные зоны и струйные течения, нарушающие качество детали и снижающие на порядок и более производительность прошивки. Частично восстановить массовынос при такой операции удается за счет повышения до 10 раз давления подводимой рабочей среды, но достигнутые результаты обеспечивают прошивку отверстий в сталях до глубин менее 10...15 диаметров отверстий.

Особую сложность представляет организация массовыноса продуктов многоэлектродной обработки отверстий, например в фильтрах, когда требуется одновременно прошить до 500 глубоких отверстий с минимальной перемычкой. Здесь имеющиеся способы интенсификации массовыноса не обеспечивают скорости прошивки, достигнутой для единичного профильного электрода. Часть новых технических решений по интенсификации массовыноса приведены в настоящей статье.

Ограничения по массовыносу при использовании процессов разделения материалов на наиболее распространенных в промышленности станках с непрофилированным проволочным электродом (см. рис. 1, *г*) ограничивают предельную толщину разрезаемых заготовок. Струйная подача жидкости в зону обработки позволила увеличить глубину обработки, но здесь требуется создание новых способов обработки [7—9], обеспечивающих массовынос при повышенных толщинах заготовок.

Методы интенсификации массовыноса

В литературе [5, 9—11] рассмотрены различные способы удаления продуктов обработки из зоны протекания процесса. Оценка эффективности каждого способа выполняется по эффективности массовыноса, которая зависит от многих факторов. Как видно из рис. 1, наибольшие сложности вызывает организация течения при прошивке глубоких отверстий малого сечения. Для интенсификации массовыноса в работе [5] даны полезные рекомендации по ускорению перемещения в межэлектродном зазоре частиц за счет механического воздействия на них со стороны электрода-инструмента (рис. 3).

На рис. 3, *а* показан широко применяемый в промышленности при электрических методах обработки [1, 3] способ ускорения массовыноса за счет насосного эффекта от продольной вибрации *6* электрода-инструмента с амплитудой 0,05...0,20 мм и частотой 100...120 Гц [3]. При достаточной скорости продольного перемещения электрода-инструмента насосный эффект и перемещения в зазоре продуктов обработки *4* создают кавитационное течение рабочей среды, резко увеличивающее массовынос, производительность обработки и качество поверхностного слоя. Насосный эффект снижается по мере углубления отверстия в заготовке *1* и снижении диаметра электрода-инструмента *2*. Согласно работе [3] предельное соотношение глубины отверстия к его диаметру при прошивке не может превышать 10...15, что не всегда удовлетво-

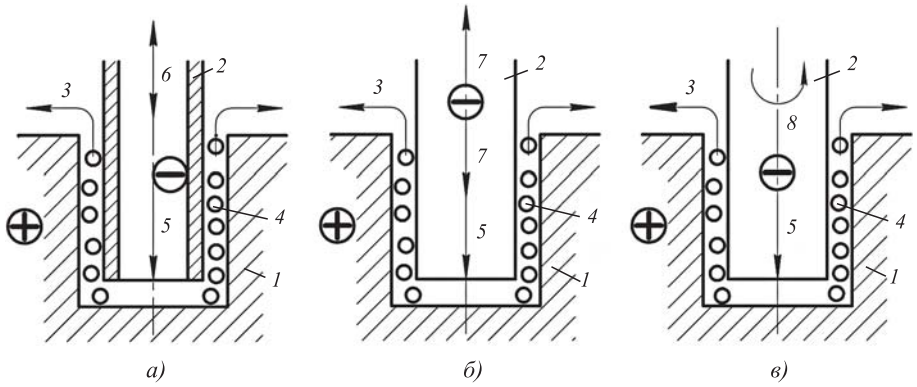


Рис. 3. Способы интенсификации массовыноса при прошивке отверстий:
а — созданием насосного эффекта; *б* — периодическим выводом из отверстия профильного электрода-инструмента; *в* — вращением профильного электрода-инструмента; *1* — заготовка; *2* — электрод-инструмент; *3* — жидкая рабочая среда; *4* — продукты обработки; *5* — направление подачи электрода-инструмента; *6* — направления вибрационных перемещений электрода-инструмента; *7* — направления ввода-вывода из прошитой части отверстий профильного электрода-инструмента; *8* — направление вращательного движения электрода-инструмента

ряет потребности промышленности. К сожалению, пока не удается стабильно получать кавитационный режим, хотя подобные течения систематически наблюдаются и они перспективны не только при прошивке отверстий.

Более глубокие отверстия получают путем периодического вывода *7* из отверстия электрода-инструмента *2* (см. рис. 3, *б*) (в ряде случаев с использованием вибрации по схеме на рис. 3, *а*), где усиливается насосный эффект и не требуется время на очистку от продуктов обработки *4* уже прошитой части отверстия. Это позволяет повысить предельную глубину прошивки до 20...25 при значительном (до 1,5...2 раз) снижении производительности процесса. Длина трассы для вывода продуктов обработки постоянно возрастает до предельной глубины отверстия и для поддержания наибольшей подачи *5* требуется использование сложной и дорогостоящей системы управления процессом, что ограничивает эффективность способа, показанного на рис. 3, *б*, прошивкой отверстий только малого сечения.

На рис. 3, *в* ускорение массовыноса достигается (иногда совместно с применением способов, приведенных на рис. 3, *а*, *б*) за счет формирования винтового течения рабочей среды при вращении *8* электрода-инструмента *2*. Это стабилизирует процесс массовыноса, но удлиняет трассу перемещения в межэлектродном зазоре струи с продуктами обработки, что может вызвать появление конусности отверстия, особенно при малом сечении электрода-инструмента и большой глубине обработки. Кроме того, вращение не удается применять при многоэлектродной обработке некруглых отверстий, особенно малого сечения.

Большое влияние на массовынос оказывает состав продуктов обработки, в который обязательно входит газовая составляющая от тепловых и химических процессов, происходящих при обработке электрическими методами. В работе [10] показано, что при обработке длинномерных заготовок с анодным растворением припуска накопление газообразных продуктов обработки может вызывать перекрытие межэлектродного зазора и все приведенные на рис. 3 способы становятся малоэффективными. При этом снижается не только производительность, но и качество поверхностного слоя детали, точность ее профиля. Для устранения ограничений по интенсивности массовыноса предложено применять циклическое удаление припуска. В момент наибольшего заполнения межэлектродного зазора продуктами обработки предложено прекращать подачу тока. При этом не образуются новые частицы, а протекающий поток выносит уже имеющиеся продукты обработки, после чего анодный процесс возобновляется. Метод нашел применение при электрохимической и комбинированной обработке крупногабаритных лопаток авиационных двигателей, хотя система регулирования процесса сложна.

На рис. 4 приведена циклограмма для настройки системы управления системой применительно

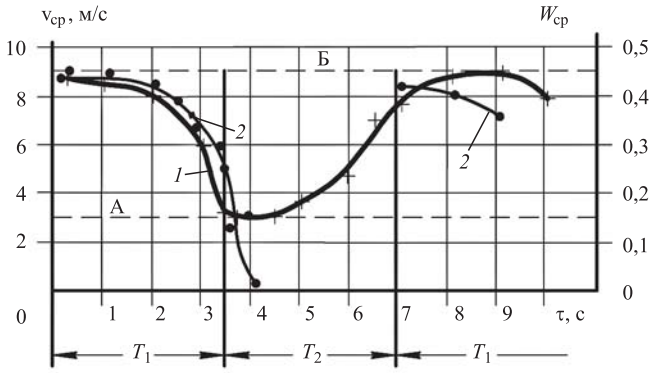


Рис. 4. Изменение средней скорости течения рабочей среды ($v_{ср}$) и съема припуска ($W_{ср}$) при циклической подаче технологического тока по времени (τ):
T_1 — период анодного растворения припуска технологическим током; T_2 — период удаления из межэлектродного зазора продуктов обработки при отсутствии анодного растворения припуска; *1* — средняя за период скорость течения рабочей среды, м/с; *2* — средняя за период $T_1 + T_2$ скорость съема припуска, мм/мин; А, Б — границы изменения параметров

к титановым лопаткам с шириной пера 180 мм. Среднюю скорость растворения припуска оценивали по результатам осциллографирования технологического тока, что позволяет при средних значениях параметров процесса анодного растворения рассчитать динамику формообразования и построить кривую *2*. Среднюю скорость течения рабочей среды (кривая *1* на рис. 4) измеряли путем скоростной съемки продуктов обработки на выходе потока из межэлектродного зазора. Синхронизация результатов достигалась по единому времени получения данных.

Приведенный на рис. 4 способ циклической обработки позволяет стабилизировать массовынос и во многом снимает ограничения по обработке заготовок с большой длиной тракта течения рабочей среды, что свойственно крупногабаритным деталям. Циклический режим подачи тока с периодами T_2 заметно снижает производительность обработки, а постоянное изменение условий течения через межэлектродный зазор рабочей среды требует применения сложной и дорогостоящей системы адаптации применяемых циклов к условиям обработки. Это ограничивает область использования циклических методов массовыноса.

Перспективные методы интенсификации массовыноса при электрических методах обработки

В работах [11—14] приведены новые (как правило, на уровне изобретений) способы и устройства для интенсификации массовыноса при различных видах электрических методов обработки, в том числе с импульсным воздействием ультразвукового поля [6].

На рис. 5 приведена схема нового метода [13] комбинированной обработки каналов в сопле путем удаления из минералокерамической втулки *6*, заложенной в нее перед прессованием металлической вставки *7*, профиль которой заложен заказчиком и конструктором изделия. Форма сечений каналов и направлений их осей может быть любой, а оси отверстий могут быть прямыми или криволинейными.

Канал сопла в минералокерамической втулке *6* получают удалением вставки *7* путем анодного растворения после спекания втулки *6*. Без воздействия ультразвукового поля процесс съема металла вставки *7* прекратится в первые секунды обработки из-за отсутствия массовыноса из отверстия. Поэтому туда подается концентрированный луч от ультразвукового генератора *1*, который проходит через отверстие *5* в катоде *4*. Катод представляет собой диск, который вращается и пропускает через отверстие луч только в момент совмещения осей отверстия *5* и втулки *6*. Катод выполнен из вязкого металла (например, меди) и не разрушается под действием луча. Одновременно наличие отверстия *5* предохраняет от поломки кромки канала втулки *6*. Таким образом, обеспечение массовыноса ультразвуковым лучом обеспечивает без участия профильного электрода прошивку глубоких отверстий, общая длина L которых значительно больше, чем при прошивке профильным инструментом.

Метод эффективен при изготовлении точных каналов в местах деталей, труднодоступных для подвода инструмента. Минимальный диаметр отверстий менее 0,1 мм, глубина до 100 диаметров. Развитие этого способа за счет ускорения массовыноса приведено в работе [14].

На рис. 6 показана схема интенсификации массовыноса путем организации кавитационного течения рабочей среды при разделении материалов проволочным электродом-инструментом на станках, оснащенных форсунками для подачи жидкости в зону обработки.

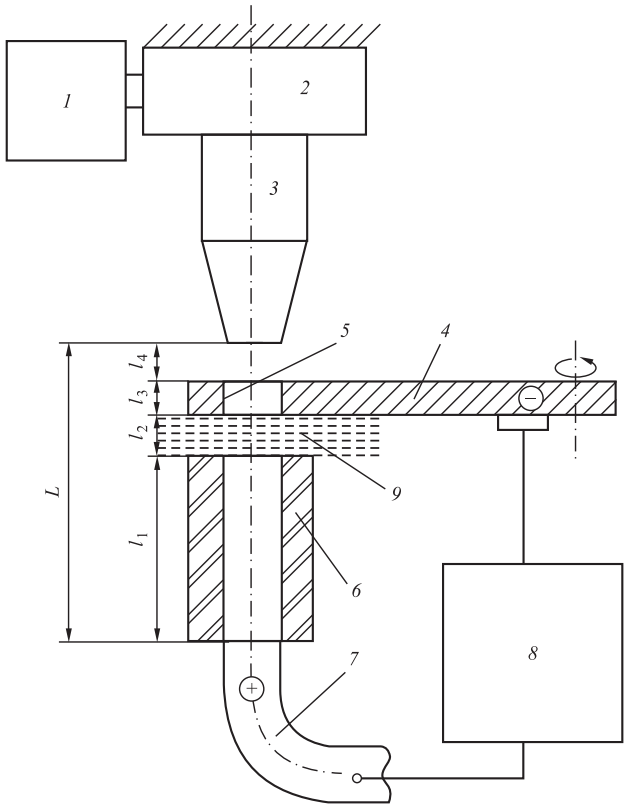


Рис. 5. Схема комбинированной обработки каналов в минералокерамической заготовке:
1 — ультразвуковой генератор; *2* — преобразователь; *3* — излучатель; *4* — катод; *5* — отверстие для прохождения ультразвукового луча; *6* — минералокерамическая втулка; *7* — металлическая вставка; *8* — генератор тока для электрохимической обработки; *9* — электролит; l_1 — l_4 — участки системы, определяющие межэлектродный зазор; L — наибольшая длина межэлектродного зазора

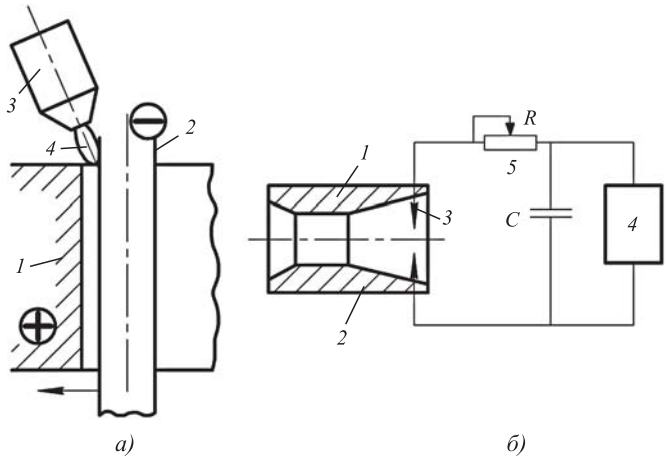


Рис. 6. Интенсификация массовыноса при разрезке заготовок проволочным электродом:
а — схема подачи в зону обработки рабочей среды: *1* — заготовка; *2* — проволочный электрод-инструмент; *3* — форсунка; *4* — рабочая среда; *б* — схема создания кавитационного режима массовыноса продуктов обработки из паза: *1* — сопло форсунки; *2* — профиль проточной части сопла; *3* — разрядник; *4* — генератор импульсов; *5* — контур разрядника

Применение форсунки *3* (рис. 6, *а*) позволяет повысить давление и скорость струи рабочей среды *4* на входе жидкости в зону разделения заготовки *1* проволочным электродом-инструментом *2*. Это ускоряет массовынос продуктов обработки в паз и наружу, расширяет возможности обработки заготовок повышенной толщины. Применение при комбинированной обработке струйных форсунок с цилиндрическим соплом расширяет возможности стабильной разрезки заготовок (в зависимости от диаметра проволоки) до толщины 350...400 мм.

На рис. 6, *б* приведен способ ускорения потока путем формирования проточной части сопла *1* в виде сопла Лаваля *2*, на выходе из которого рабочей жидкости установлен разрядник *3*, подключенный к выходу импульсного генератора *4* станка. Он имеет собственный высоковольтный контур *5* (например, RC-схемы), отрегулированный на получение мощных импульсных разрядов. За счет геометрии *2* проточной части сопла *1* на участке входа в него жидкости происходит торможение потока, вызывающего повышение давления в струе. Это предохраняет поток от обратного движения в момент разряда и усиливает движение до появления кавитационного режима на входе в паз, резко увеличивающего массовынос по всей толщине заготовки. Это явление наблюдается визуально в виде вскипания жидкости на границе зоны обработки. Применение кавитационного режима позволяет увеличить предельную толщину разделяемых заготовок до 2—3 раз, что ранее считалось недостижимым.

Заключение

Приведенные в статье материалы позволяют наметить пути совершенствования и расширения области использования электрических методов обработки на базе известных и вновь разработанных способов интенсификации массовыноса продуктов процесса. Это обеспечивает стабильность получения требуемых эксплуатационных характеристик деталей и открывает возможности широкого применения комбинированных способов обработки в наукоемких отраслях машиностроения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Электрофизические** и электрохимические методы обработки материалов / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. Т. 1. 247 с.
2. **Справочник** технолога-машиностроителя / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. М.: Инновационное машиностроение, 2018. Т. 2. 818 с.
3. **Бойко А.Ф.** Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных отверстий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
4. **Болдырев А.И.** Электрохимикомеханическая обработка. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2012. 243 с.
5. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
6. **Приходько В.М.** Ультрозвуковая технология в машиностроении // Наукоемкие технологии в машиностроении / под ред А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.
7. **Пат. 2680327 РФ.** Способ изготовления многоэлектродного инструмента и устройство для его осуществления / В.П. Смоленцев и др. Опубл. 19.02.2019, Бюл. № 5.
8. **Пат. 2621325 РФ.** Способ подготовки прокачиваемой через зону обработки при электрохимической размерной обработке рабочей среды и устройство для его осуществления / В.П. Смоленцев и др. Опубл. 02.06.2017, Бюл. № 16.
9. **Смоленцев В.П.** Технология электрохимической обработки внутренних поверхностей. М.: Машиностроение, 1978. 176 с.
10. **Газизуллин К.М.** Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей в пульсирующих рабочих средах. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2002. 243 с.
11. **Кириллов О.Н.** Технология комбинированной обработки непрофилированным электродом. Воронеж: ГОУ ВПО ВГТУ, 2010. 254 с.
12. **Смоленцев В.П., Грицюк В.Г., Сафонов С.В.** Эксплуатационные свойства изделий после электроискрового легирования и нанесения покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 12. С. 31—37.
13. **А. с. 944850 СССР.** Способ электрохимической обработки импульсами технологического тока / В.П. Смоленцев и др. 1982. Бюл. № 27.
14. **Пат. 2537410 РФ.** Электрод-инструмент для прошивки отверстий / В.П. Смоленцев и др. Опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1.

УДК 658.512:621.7:621.9 + 388.94

М.Л. Хейфец *(Президиум НАН Беларуси, г. Минск),*
Н.Л. Грецкий *(ОАО "НПО Центр" НАН Беларуси, г. Минск),*
Г.Б. Премент *(ООО "Фелокт-сервис", г. Минск)*
E-mail: mlk-z@mail.ru

Технологическое наследование эксплуатационных параметров качества при восстановлении и упрочнении деталей двигателя внутреннего сгорания

Анализ технологического наследования при восстановлении и упрочнении рабочих поверхностей коленчатых и распределительных валов двигателей позволил пересмотреть последовательность переходов и регламентировать технологические воздействия. Рекомендовано в технологическом процессе ремонтного производства сочетать операции электромагнитного упрочнения легированными порошками и наплавки проволоки в защитной среде.

Ключевые слова: *технологическое наследование, параметры качества, восстановление, механическая обработка, двигатель внутреннего сгорания, коленчатый вал, распределительный вал.*

The analysis of technological heredity in restoring and hardening the working surfaces of crankshafts and camshafts of engines allowed us to review the sequence of transitions and to regulate technological impacts. It is recommended in the technological process of repair production to combine the operations of electromagnetic hardening by alloyed powders and shielding surfacing of the wire.

Keywords: *technological heredity, quality parameters, restoration, mechanical treatment, internal combustion engine, crankshaft, camshaft.*

Введение

Обеспечение высокого качества продукции на этапе создания и освоения изделий заключается в организации такой технологической подготовки и осуществлении такого производства, при которых продукция соответствовала бы требованиям конструкторской документации и не имела бы вредных последствий от технологических методов обработки [1]. Поэтому все операции и их технологические переходы следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики формируются всем комплексом технологических воздействий и изменяются при эксплуатации машины, ее техническом обслуживании и ремонте [2].

Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин [3, 4]. Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их показателей [4, 5].

В цепочке технологических операций и при эксплуатации существуют своего рода "барьеры". Некоторые технологические факторы преодолеть эти "барьеры" не могут, и в таком случае их влияние на дальнейшие свойства объекта отсутствует. Другие факторы такие "барьеры" проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо [2, 3]. Следовательно, процессом технологического и эксплуатационного наследования можно управлять с тем, чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всей обработки и эксплуатации, а свойства, влияющие отрицательно, — ликвидировать в начале их зарождения [4, 5].

Самым существенным "барьером" являются термические воздействия, а также воздействия, сопровождающиеся поверхностным деформированием и упрочнением, так как они изменяют микроструктуру обрабатываемого материала, микрогеометрию поверхности, приводят к короблению детали и искажению ее формы. В этой связи особенно эффективно управление процессами технологического наследования на операциях восстановления и упрочнения после эксплуатации для изношенных деталей в ремонтном производстве машин [6].

Цель работы — изучение при комбинированных термомеханических воздействиях технологического наследования эксплуатационных параметров качества наиболее часто восстанавливаемых

и упрочняемых, предельно изношенных деталей, отвечающих за ресурс ремонтируемых двигателей внутреннего сгорания — коленчатых и распределительных валов [7].

Анализ технологического наследования эксплуатационных свойств при восстановлении и упрочнении деталей

Обеспечить высокое качество отремонтированных двигателей внутреннего сгорания в процессе освоения технологий и организации ремонта можно за счет внедрения новых методов восстановления, упрочнения и обработки деталей, отвечающих за ресурс машин [8]. Новые и традиционные методы восстановления, упрочнения и обработки деталей машин имеют свои рациональные области применения и не всегда решают комплексные задачи повышения долговечности изделий в конкретных условиях эксплуатации [9]. Так, например, при высоких параметрах качества упрочнения не обеспечивается экономное восстановление до заданного размера предельно изношенной поверхности детали. Поэтому рациональным представляется сочетание в технологическом процессе ремонтного производства различных методов упрочнения, восстановления и обработки, а в рамках самих методов — комбинации разнообразных технологических воздействий [10].

Основные причины потери работоспособности двигателя внутреннего сгорания — изнашивание рабочих поверхностей и усталостные поломки его коленчатых и распределительных валов. Для восстановления изношенных цилиндрических поверхностей пар трения используют различные способы нанесения покрытий, позволяющие получать поверхность с требуемым химическим составом, высокой твердостью и износостойкостью. Наиболее перспективны электрофизические методы, основанные на использовании концентрированных потоков энергии [9, 12].

Для снижения затрат на восстановление физико-механических и геометрических характеристик изношенных поверхностей деталей двигателя внутреннего сгорания целесообразно применять комбинации этих методов. Одной из таких комбинаций является послойное восстановление изношенных поверхностей легированными ферромагнитными порошками и углеродистыми проволоками. В рассматриваемом методе физико-механические характеристики повышает в основном электромагнитная наплавка порошком ферробора, а геометрические характеристики восстанавливает наплавка углеродистой проволоки (рис. 1).

Для улучшения комплекса параметров качества восстановления предельно изношенных поверхностей деталей с минимальными затратами предложено упрочнение проводить в процессе электромагнитной наплавки легированных ферропорошков, совмещенном с поверхностным пластическим деформированием [12], а восстановление и обработку — в процессе наплавки проволоки, совмещенном с упрочняюще-размерным ротационным резанием [13].

Для анализа технологического наследования эксплуатационных свойств коленчатых и распределительных валов в процессе восстановления рассматривали совокупность физико-механических и геометрических свойств: твердости, отклонений формы, точности размеров и рельефа поверхности. Измерения твердости HRC, отклонений формы ρ, точности размеров IT и рельефа поверхности *Ra* проводили на партии из 50 деталей. При этом партию разбивали по величине износа на 10 групп, в качестве расчетного значения принимали среднеарифметическое в группе.

В качестве определяющего свойства рабочих поверхностей деталей принимали физико-механическую характеристику — твердость по Роквеллу (HRC), так как твердость является одним из наиболее распространенных и общедоступных интегральных критериев оценки свойств материалов,

Этапы восстановления	Восстанавливаемые детали двигателя	
	Коленчатый вал	Распределительный вал
Подготовка восстанавливаемых поверхностей		
Нанесение ферромагнитного порошка		
Наплавка углеродистой проволокой	Под слоем флюса	В среде углекислого газа

Рис. 1. Технологии комбинированного восстановления и упрочнения деталей

позволяющим судить о прочностных и триботехнических характеристиках материала. В качестве зависимых от твердости параметров последовательно рассматривали: отклонения формы поверхностей — биения ρ; точность размеров — квалитет IT; шероховатость поверхности — среднеарифметическое отклонение профиля *Ra* [10].

Упрочнение деталей электромагнитной наплавкой с поверхностным деформированием

Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием обеспечивает не только упрочнение поверхностного слоя, но и повышение его физико-химических характеристик. В процессе электромагнитной наплавки в зазор между вращающейся деталью и полюсным наконечником электромагнита из дозирующего устройства непрерывно подается ферропорошок (рис. 2).

Ориентируясь в зазоре вдоль силовых линий магнитного поля, частицы ферропорошка образуют множество токопроводящих цепочек, замыкающих электрическую цепь между полюсным наконечником и деталью. Частицы у поверхности детали в зоне максимального электросопротивления под воздействием электрического тока расплавляются. Капли расплава распределяются по поверхности детали и подвергаются пластическому деформированию шариковым накатником [12]. Для повышения стабильности процесса его ведут в потоке охлаждающей жидкости, однако при этом происходит снижение переноса материала ферропорошка на поверхность детали и ухудшаются физико-механические свойства упрочняемого слоя.

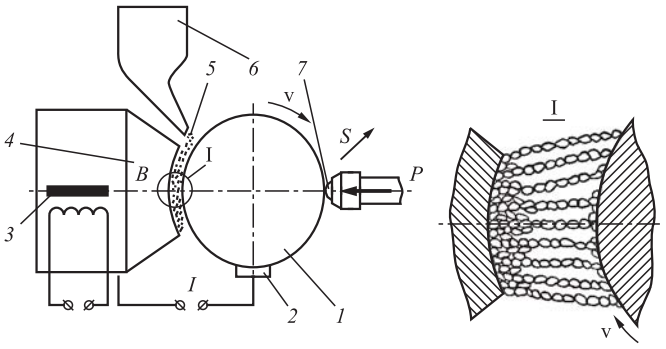


Рис. 2. Электромагнитная наплавка с поверхностным пластическим деформированием:
1 — обрабатываемая деталь; *2* — скользящий контакт; *3* — электромагнит; *4* — полюсный наконечник; *5* — ферромагнитный порошок; *6* — дозирующее устройство; *7* — шариковый обкатник; v — скорость главного движения; *S* — подача; *P* — сила деформирования; *B* — магнитная индукция; *I* — сила тока электродуговых разрядов

Для стабилизации процесса электромагнитную наплавку ведут в пульсирующем магнитном поле. В такой установке в качестве источника технологического тока используют специально разработанный тиристорный генератор импульсов. Конструкция электромагнитной системы установки обеспечивает совпадение моментов времени существования максимального магнитного потока в рабочих зазорах и предельного сближения полюсных наконечников с упрочняемой поверхностью. Благодаря наличию вибрации сердечников процесс стабилизируется в широком диапазоне варьирования технологических факторов.

Высокое качество формирования покрытий ферромагнитными порошками в электромагнитном поле достигается установками, позволяющими реализовать импульсное механическое воздействие полюсного наконечника на формируемый участок покрытия (см. рис. 2). Устройство кроме возвратно-поступательного движения полюсного наконечника обеспечивает его вращение. Дополнительное вращение полюсного наконечника способствует лучшей очистке рабочего зазора от частиц ферропорошка, не участвовавших в предыдущих разрядах, и от продуктов эрозии в твердой фазе, что повышает стабильность образования токопроводящих цепочек, увеличение переноса капель расплава порошка на поверхность детали, повышение стойкости полюсного наконечника. Рабочая поверхность полюсного наконечника для снижения энергопотребления может выполняться с продольными или поперечными пазами [14].

Для обеспечения высокой стабильности процесса и переноса капель расплава ферропорошка на формируемый участок покрытия необходимо, чтобы после завершения электрических разрядов за один импульс напряжения в цепи технологического тока магнитная индукция в рабочем зазоре принимала минимально возможное значение. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для очистки зазора под действием вибрации полюсного наконечника от продуктов эрозии в твердой фазе и от части зерен ферропорошка, не участвовавших в разрядах. Одновременно повысить производительность и качество покрытия при высокой стабильности процесса можно в случае, если магнитная индукция будет уменьшаться от момента начала к моменту завершения электрических разрядов за один импульс напряжения в цепи технологического тока. Электрические разряды должны завершаться к моменту импульсного механического воздействия полюсного наконечника на формируемый участок поверхностного слоя детали. Максимальная магнитная индукция должна быть близка

к значению, при котором наблюдается наибольший перенос материала ферропорошка на поверхность детали [15].

Таким образом, частота и фаза следования импульсов напряжения U_k, питающего электромагнитную катушку для создания вибрации полюсного наконечника и переменного магнитного потока, и напряжения U_t, питающего сварочный трансформатор, должны совпадать. При этом происходит незначительный нагрев детали и полюсного наконечника. Перенос расплава порошка осуществляется крупными плотными каплями [14, 15].

Опыт эксплуатации установки показал, что производительность электромагнитной наплавки достигает 50 см^2/мин при удельном привесе детали 12...16 мг/см^2 и переносе материала ферропорошка в объеме 13 %, а упрочненный поверхностный слой имеет более высокую сплошность вследствие влияния механических воздействий на поверхностный слой в процессе его формирования.

Восстановление деталей наплавкой проволоки с упрочняющим ротационным резанием

После нанесения ферромагнитного порошка осуществляют наплавку углеродистой проволоки. Наплавку ведут короткой дугой на постоянном токе обратной полярности с использованием источника питания с жесткой внешней характеристикой. Для восстановления сильно изношенных поверхностей деталей наибольшее распространение получила наплавка проволоки в защитной среде (рис. 3). При такой наплавке хорошо формируется шов большой толщины, а наплавленный металл получается плотным [8, 13].

Применяют наплавочный автомат А-580М, который устанавливают на токарный станок 1624М, в качестве источника тока используют выпрямитель ВС-300. Автоматическую наплавку деталей, имеющих высокую твердость рабочих поверхностей, ведут проволокой Нп-30 диаметром 1,6...1,8 мм с нагревом токами высокой частоты и последующей закалкой. Режимы наплавки: напряжение дуги $U = 20$ В; сварочный ток $I = 150$ А; скорость наплавки v = 0,01 м/с; подача (шаг наплавки) $S = 4$ мм/об; вылет электрода $h_{эл} = 15$ мм; скорость подачи электродной проволоки $v_{эл} = 0{,}035$ м/с; расход углекислого газа $G_г = 0{,}6$ м^3/ч.

Совмещение наплавки в среде углекислого газа с термомеханической обработкой в момент кристаллизации наплавленного слоя (см. рис. 3) благоприятно сказывается на уменьшении пор и трещин и на увеличении сопротивления усталости деталей.

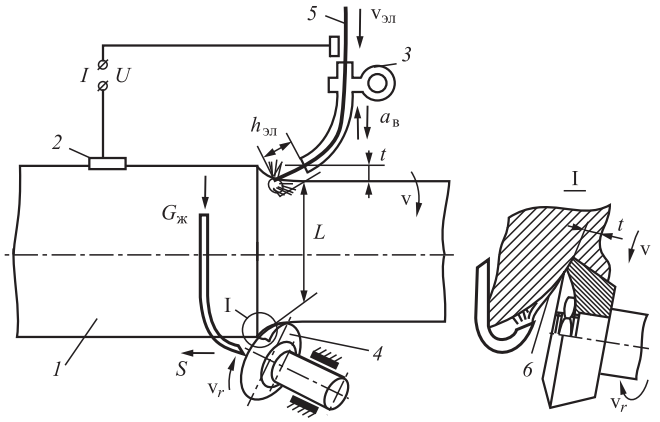


Рис. 3. Наплавка проволоки с упрочняющим ротационным резанием:
1 — обрабатываемая деталь; *2* — скользящий контакт; *3* — мундштук наплавочной головки; *4* — ротационный резец; *5* — наплавочная проволока; *6* — охлаждающая жидкость; v — скорость главного движения; v_r — скорость дополнительного движения резца; S — подача; $v_{эл}$ — скорость подачи электродной проволоки; $h_{эл}$ — вылет электрода; $G_ж$ — расход жидкости; I — сила тока; U — напряжение дуги; t — глубина резания; L — расстояние от электрода до резца; $a_в$ — амплитуда вибрации

Использование ротационного самовращающегося резца в качестве деформирующего инструмента позволяет не только улучшить физико-механические характеристики наплавленного слоя, но и обеспечить путем завальцовывания впадин между сварочными швами, залечивания пор и трещин геометрические параметры качества, резко сокращающие последующую механическую обработку [13].

Ввиду того, что режимы наплавки определяются заранее и для ротационного упрочняющего резания выбираются резцы известных конструкций, а глубина резания назначается в соответствии с необходимостью обеспечить заданную толщину наносимого покрытия, для совмещенного процесса в качестве регулируемого фактора принимают расстояние от наплавочной проволоки до режущей кромки инструмента.

Окончательное формирование восстановленной поверхности детали осуществляется снятием ротационным инструментом слоя комбинированного покрытия на глубину до 1,5 мм (определяемой максимальной твердостью, достигаемой за счет обратной диффузии ферробора).

Технологическое наследование параметров качества коленчатого вала двигателя

Изучение экспериментальных данных позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и

геометрических параметров качества рабочих поверхностей коленчатого вала двигателя в процессе его восстановления. Технологический процесс восстановления коренным образом отличается от рационального технологического процесса механической обработки.

При восстановлении коренных и шатунных шеек коленчатого вала в процессе ремонта как геометрические, так и физико-механические параметры сначала ухудшаются, а затем при механической обработке улучшаются. В результате по всему технологическому процессу физико-механические характеристики восстанавливаются, а геометрические (особенно связанные с микрорельефом поверхности) даже улучшаются.

Твердость материала существенно влияет на геометрические параметры, особенно на отклонения формы на заключительных операциях. В остальных случаях оно стабильно по всем операциям.

Геометрические параметры поверхностей коренных и шатунных шеек наследуются слабо, особенно это заметно на начальных операциях. Причем для микрорельефа поверхности (шероховатости) чистовые операции восстановления являются технологическими "барьерами". Влияние предыдущих геометрических параметров на последующие невелико. Наиболее оно заметно для погрешности форм и точности обработки от черновых к чистовым операциям.

Анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование параметров качества в процессе восстановления дал возможность выявить определяющие процессы передачи свойств при механической обработке поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатого вала двигателя.

При окончательном шлифовании на твердость и шероховатость поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей при шлифовании, а также скоростями вращения круга и заготовки. Поэтому для управления качеством обработки при равномерном припуске особое внимание следует уделять глубине резания и подаче шлифовального круга.

По результатам исследований разработаны регламенты операций технологического процесса, позволяющие обеспечить в процессе упрочнения стабильную твердость и однородность материала, а также равномерную толщину покрытия.

Технологическое наследование параметров качества распределительного вала двигателя

Изучение экспериментальных данных позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и геометрических параметров качества распределительного вала двигателя в процессе его восстановления.

При восстановлении в процессе ремонта геометрические и физико-механические параметры сначала ухудшаются, затем улучшаются. В целом по технологическому процессу физико-механические характеристики восстанавливаются, а геометрические (особенно связанные с микрорельефом поверхности) даже улучшаются.

Твердость материала, так же как и в процессах изготовления детали, существенно влияет на геометрические параметры. Особенно сильно это влияние на начальных операциях для отклонений формы. В остальных случаях оно стабильно по всем технологическим переходам.

Геометрические параметры цилиндрических поверхностей опорных шеек наследуются слабо, особенно это видно на начальных операциях. Для микрорельефа поверхности операции восстановления являются технологическими "барьерами". Дальнейшее влияние предыдущих геометрических параметров на последующие также невелико и сказывается только на точности обработки.

Изменение твердости опорных шеек и кулачков распределительных валов двигателя показывает, что технологическими "барьерами" при восстановлении рабочих поверхностей являются операции наплавки, а окончательные геометрические параметры качества поверхностей формируются при шлифовании.

В результате анализа технологических операций установлено, что в процессе электродуговой наплавки проволоки Нп-30 в среде CO_2 твердость поверхности стабилизируется (колебания в пределах 3...5 HRC), в то время как исходные детали имели существенный разброс (до 20 HRC). После наплавки проволоки заданная в технической документации твердость обеспечивается последующей термической обработкой.

Геометрические параметры поверхности (точность размеров IT, параметр шероховатости поверхности *Ra* и радиальное биение ρ) после черновой обработки наследуются на чистовых операциях шлифования шеек и кулачков распределительного вала. Геометрические отклонения поверхностей после правки сохраняются на последующих операциях обработки и сборки.

Анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование параметров качества в процессе ремонта дал возможность выявить определяющие процессы передачи свойств при восстановлении, упрочнении и обработке изношенных поверхностей опорных шеек и кулачков распреде-

лительного вала двигателя. В результате анализа установлено, что в процессе электродуговой наплавки проволоки Нп-30 в среде CO_2 на твердость поверхности оказывают влияние сила тока электрической дуги, диаметр наплавочной проволоки, а также скорость подачи главного движения обработки. Определяющим параметром для управления качеством наплавки является сила тока.

При окончательном шлифовании на твердость и параметр шероховатости *Ra* поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей при шлифовании, а также скоростями вращения круга и заготовки. Поэтому для управления качеством обработки главное внимание следует уделять глубине резания и подаче шлифовального круга.

По результатам исследований разработаны регламенты для операций технологического процесса, позволяющие обеспечить в процессе наплавки стабильную твердость и однородность материала покрытия, а в процессе закалки — высокую твердость поверхности (54...56 HRC). Устранены операции правки из технологического процесса восстановления распределительного вала для снижения взаимного радиального биения поверхностей до 0,02 мм и обеспечения требуемой точности рабочих поверхностей.

Заключение

Анализ технологического и эксплуатационного наследования при восстановлении рабочих поверхностей коленчатого вала и распределительного вала двигателя позволил пересмотреть последовательность технологических переходов (устранить операцию правки), регламентировать технологические воздействия (на операциях наплавки, закалки и шлифования) и обеспечить качество восстановления (стабильную твердость и точность рабочих поверхностей).

Сочетание в одном технологическом процессе операций комбинированного упрочнения, восстановления и обработки поверхностей деталей дает возможность не только обеспечить нужные геометрические характеристики поверхности при восстановлении, но и повысить физико-механические свойства материала поверхностного слоя при упрочнении.

Результаты испытаний двигателя внутреннего сгорания показали, что комбинированная технология, состоящая из нанесения легированных ферромагнитных порошков и последующей наплавки углеродистой проволоки с обработкой ротационным инструментом, позволяет увеличить ресурс работы и снизить себестоимость восстановления предельно изношенных деталей двигателя по сравнению с традиционными способами восстановления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теоретические** основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий, П.А. Витязь, М.Л. Хейфец и др. / под общ. ред. А.М. Русецкого. Минск: Беларус. наука, 2012. 239 с.
2. **Технологические** основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко и др. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.
3. **Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И.** Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1977. 256 с.
4. **Ящерицын П.И., Скоринин Ю.В.** Работоспособность узлов трения машин. Минск: Наука и техника, 1984. 288 с.
5. **Дальский А.М.** Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.
6. **Васильев А.С., Кондаков А.И., Клименко С.А. и др.** Технологическое управление наследованием эксплуатационных показателей качества упрочненных поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 1. С. 32—38.
7. **Кусакин Н.А., Точило В.С., Хейфец М.Л.** Менеджмент качества автотракторного ремонтного предприятия. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2009. 180 с.
8. **Воловик Е.Л.** Справочник по восстановлению деталей. М.: Колос, 1981. 351 с.
9. **Хейфец М.Л., Акулович Л.М., Мрочек Ж.А., Зевелева Е.З.** Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Новополоцк: Полоцк. гос. ун-т, 2012. 292 с.
10. **Хейфец М.Л.** Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.
11. **Технологические** и эксплуатационные методы обеспечения качества машин / В.Б. Альгин, В.Ю. Блюменштейн, А.С. Васильев и др. / под общ. ред. П.А. Витязя. Минск: Беларус. наука, 2010. 109 с.
12. **Кожуро Л.М., Чемисов Б.П.** Обработка деталей машин в магнитном поле. Минск: Наука и техника, 1995. 232 с.
13. **Обработка** износостойких покрытий / Л.М. Кожуро, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец и др.; под ред. Ж.А. Мрочека. Минск: Дизайн ПРО, 1997. 208 с.
14. **Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л., Кожуро Л.М.** Теплофизика процессов наплавки покрытий ферромагнитными порошками в электромагнитном поле // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 5. С. 3—8.
15. **Хейфец М.Л., Грецкий Н.Л., Кожуро Л.М.** Электромеханика импульсных процессов наплавки покрытий ферромагнитными порошками // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 3. С. 51—56.

УДК 621.9; 658.562.42

Б.Я. Мокрицкий, Т.И. Усова, А.Г. Серебренникова
(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)
E-mail: boris@knastu.ru

Повышение качества инструментального обеспечения

В результате ужесточения требований современного оборудования с ЧПУ к металлорежущему инструменту, технологу промышленного предприятия сложно выбрать рациональный металлорежущий инструмент и верно определить объем его потребления. В связи с тем, что не всегда удается закупать нужный товар у нужного производителя, необходимо проверять инструмент перед использованием. Предложена методика проведения размерного контроля закупленных твердосплавных пластин.

Ключевые слова: *входной контроль, металлорежущий инструмент, потребность в инструменте, твердосплавные пластины.*

As result of the requirements toughening of modern CNC equipment for metal-cutting tool, it is difficult for technologist of industrial enterprise to choose rational metal-cutting tool and correctly determine the volume of its consumption. Due to the fact that it is not always possible to buy the right product from the right manufacturer it is necessary to check the tool before use. Method for dimensional control of the purchased cemented-carbide plates is proposed.

Keyword: *input control, metal-cutting tool, tool need, cemented-carbide plates.*

Введение

В производственных условиях перед тем, как использовать закупленную партию инструментального оснащения, ее подвергают контрольным измерениям. Контроль заключается в сопоставлении действительных значений геометрических параметров со значениями, определяемыми техническими требованиями к изделию. Он осуществляется методом измерений, т.е. с выражением параметра в числовой форме, либо сравнением его с мерой или измерительными поверхностями приборов, настроенных на мере.

Так как требования к современному металлорежущему инструменту в настоящее время повышаются, технологу промышленного предприятия все сложнее выбрать рациональный металлорежущий инструмент и верно определить объем его потребления.

Контролируемые параметры:

- линейные размеры — длины, высоты, глубины, зазоры, расстояния, диаметры и т.п.;
- угловые размеры — углы между плоскостями, осями, плоскостями и горизонтальной плоскостью, конусов и т.д.;
- геометрические параметры сложных поверхностей — расположение точек или участков относительно заданных баз и друг друга;
- отклонение формы и расположения поверхностей — от цилиндричности, плоскостности, параллельности, перпендикулярности и т.п.

Существуют следующие методы контроля геометрических параметров:

- непосредственной оценки — значение параметра определяется непосредственно по отсчетному устройству прибора;
- сравнения — значение размера определяется сравнением с величиной, воспроизводимой мерой;
- контактный — проведение замеров концевыми и штриховыми мерами, калибрами, шаблонами, измерительными приборами с твердыми измерительными поверхностями;
- бесконтактный — проведение контроля оптическими (фотометрией, дифракцией, интер-

ферометрией, проекцией и т.п.), лазерными, голографическими, радиоволновыми, акустическими методами.

Значения геометрических параметров изделий задают при их проектировании, как правило, в числовой форме и проставляют на чертежах или хранят в кодированном виде в памяти ЭВМ.

В процессе изготовления изделий необходимо контролировать соответствие действительного значения этих параметров значениям, установленным в технической документации. Большинство геометрических параметров представляет собой числовые значения линейных и угловых величин или оценивается через них.

Даже при выбранном типоразмере пластины трудно отдать предпочтение инструменту того или иного производителя. Тем более, если это инструмент с покрытием. Технолог решает стоящую перед ним задачу исходя из требуемого качества и производительности инструмента с учетом его работоспособности, но решение о закупке инструмента принимает не он. Например, маркетинговая служба предприятия чаще всего производит закупку инструмента не у того производителя, которого указал технолог, а у того, кто взялся за поставку такого инструмента за наименьшую цену. В результате может быть закуплен инструмент иного качества.

И даже если закуплен нужный инструмент у нужного производителя, то нет гарантии, что вся партия будет одинакова по физико-механическим характеристикам и эксплуатационным свойствам. А если размер закупленной партии мал, в пределе это может быть 1 штука, то нет никакой гарантии, что закуплено то, что заказано и этого количества инструмента хватит на предполагаемый объем работ. Если же в закупленной партии оказалось хоть несколько бракованных или низкосортных инструментов, то существует угроза срыва плана производства на предприятии. В работе показаны возможные пути решения этого вопроса.

Цель работы — провести статистические исследования качества выпускаемых отечественных твердосплавных пластин с позиций проверки их соответствия действующим ГОСТам, чтобы по результатам исследования сделать вывод о доверии поставщику инструмента или о необходимости проведения входного контроля поставленного инструмента.

Методика исследования

Осуществляли выборку изделий (твердосплавных сменных пластин, в том числе с покрытиями), изготовленных одним из отечественных предприятий, специализирующимся на серийном производстве таких изделий. Методом случайной выборки брали пластины, изготовленные ранее (20...25 лет назад) и недавно. Размер выборки не нормировали и не рассчитывали, т.е. создавали ситуацию, схожую с той, которую обычно имеет заказчик в момент покупки изделий.

Форму и типоразмер пластин выбирали применительно к практике типового машиностроительного предприятия РФ.

Все без исключения пластины промывали в ультразвуковой ванне с применением моющих средств для того, чтобы удалить консервационные материалы и случайные продукты на поверхности пластин.

Измеряли следующие параметры:

1) массу пластины, г;

2) длину каждой пластины и среднее значение длины пластин в серии, мм;

3) ширину каждой пластины и среднее значение ширины пластин в серии, мм;

4) толщину каждой пластины и среднее значение толщины пластин в серии, мм.

Каждую из пластин нумеровали, взвешивали, измеряли габаритные размеры. Результаты контроля сравнивали с теми параметрами, которые предписаны ГОСТом и ТУ предприятия-изготовителя. По выявленным величинам отклонений измеренных параметров пластины разделяли на условные сорта качества: 1-й сорт — высший, 2-й сорт — приемлемый, 3-й сорт — брак.

По результатам сортировки делали вывод о возможности выполнения этим инструментом плана производства типового машиностроительного предприятия либо о необходимости дозакупки некоторого дополнительного числа тех или иных пластин.

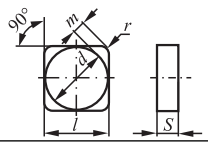
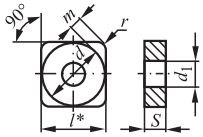
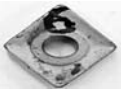
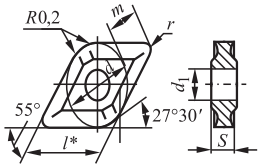
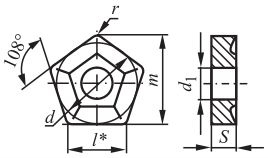
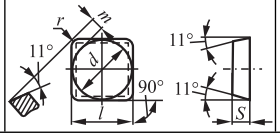
Результаты исследования и их обсуждение

Вопрос о необходимости научно обоснованного подхода к метрологическому и инструментальному обеспечению современного высокоточного металлорежущего оборудования стоит остро [1, 2].

Действующие в Российской Федерации ГОСТы [3] на металлорежущий инструмент разработаны давно и не адаптированы под современные условия и современный металлорежущий инструмент современных станков с ЧПУ и не только, так как на большинстве предприятий еще остается парк станков советского и постсоветского периодов, в которых не допускается заметное биение быстровращающихся шпинделей либо применяется

Таблица 1

Отдельные сведения о твердосплавных сменных пластинах из номенклатуры (пять из 15 разных серий) исследованных пластин

Номер серии	Цифровое обозначение	Буквенное обозначение	Код серийного порядкового номера ОКП	Наименование пластин	Фото пластин	Эскиз	Рекомендуемые назначения использования	ГОСТ
1	03111 03131	SNUN SNUN	0363 0364	Пластина квадратной формы			Токарные проходные и расточные резцы, торцовые фрезы	ГОСТ 19049—80
2	03113 03123 03133	SNUA SNMA SNGA	0367 0368 0369	Пластина квадратной формы с отверстием				ГОСТ 19051—80
6	13125	DNMG	0445	Пластина ромбической формы с углом 55°, отверстием и стружколомающими канавками на двух сторонах			Токарные резцы, работающие по копиру	ГОСТ 24257—80
13	10114 10124	PNUM PNMM	0391 0392	Пластина пятигранной формы с отверстием и стружколомающими канавками			—	ГОСТ 19065—80
15	03311 03331	SPUN SPGN	0365 0366	Пластина квадратной формы с задним углом 11°			—	ГОСТ 19050—80

металлорежущий инструмент с компенсаторами дисбаланса и т.д.

В этой ситуации более значимой становится роль входного контроля качества металлорежущего инструмента, того, что только что был закуплен, и того, который по разным причинам скопился в инструментальных кладовых и на центральном инструментальном складе типового современного машиностроительного предприятия.

Исследования выполнены для более чем 400 штук пластин, проведено более 2000 измерений (масса, длина, ширина, высота). Исследовано 15 разных типоразмеров пластин. В данной статье приведены только результаты анализа измерений массы.

В табл. 1 приведены общие сведения о части из номенклатуры исследованных пластин, а в табл. 2 — результаты контроля пластин по параметру "масса" и результаты разделения пластин по сортам. Условно принято три сорта. Третий сорт принят как брак для тех пластин, масса которых имеет недопустимое отклонение от нормы.

Выводы

1. Статистика свидетельствует о том, что пластины каждой серии существенно отличаются по качеству, т.е. есть основания предполагать, что доля бракованных по массе пластин в каждой серии различна. Соответственно, для обеспечения действующего производства необходимый запас пластин в каждой серии должен быть различным. Нельзя использовать усредненный подход.

Таблица 2

Количество пластин, попавших в первый сорт, второй и третий (брак) сорт

Номер серии	Первый сорт	Второй сорт	Третий сорт (условно принят браком)
1	1	3	1
2	2	1	5
3	1	5	0
4	3	5	0
5	0	7	7
6	9	5	1
7	2	15	0
8	0	7	9
9	0	18	7
10	1	16	7
11	0	7	12
12	0	5	18
13	0	4	19
14	0	7	12
15	20	34	0

Пусть для обеспечения производства требуется 25 штук пластин серии 9 и 54 пластины серии 15. Условимся считать, что пластины третьего сорта не пригодны, т.е. это брак. Тогда для обеспечения машиностроительного предприятия пластины серии 15 дополнительно закупать не нужно. Но в серии 9 имеется 7 штук бракованных пластин, они не пригодны, вместо них нужно закупать новые.

2. Браком следует считать:

в серии 1 только одну пластину; в серии 2 пять пластин; в серии 3 нет брака; в серии 4 нет брака; в серии 5 семь пластин; в серии 6 одну пластину; в серии 7 нет брака; в серии 8 девять пластин; в серии 9 семь пластин; в серии 10 семь пластин; в серии 11 двенадцать пластин; в серии 12 восемнадцать пластин; в серии 13 девятнадцать пластин; в серии 14 двенадцать пластин; в серии 15 нет брака.

3. Сортировать режущие пластины только по массе нельзя. Необходимо сортировать еще и по их размерам. Это выполнено, но в данной статье не приведено.

Работа выполнена с участием У.А. Назарова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чирков А.П.** Инновационно-ориентированное развитие метрологической инфраструктуры в условиях нового технологического уклада: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2018. 271 с.

2. **Иванов А.А.** Разработка моделей и алгоритмов проектных процедур управления производством в системе планирования технологических процессов механообработки: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2016. 222 с.

3. **ГОСТ 19086—80.** Пластины сменные многогранные твердосплавные. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 1980. 12 с.

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 04.06.2019 г. Подписано в печать 27.07.2019 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 "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1
Сайт: **www.aov.ru**