ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15
2019
№ 4 (172)
апрель

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.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
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

Гусаров А.В., Седлецкая С.Э., Семенов Э.И. Совершенствование измерителя толщины газоплазменных упрочняющих покрытий на деталях машин 147

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Безъязычный В.Ф., Румянцева Н.В. Анализ технологий ремонта лопаток компрессора газотурбинных двигателей с использованием поверхностного пластического деформирования их рабочих поверхностей 152

Бойко Н.И., Санамян Г.В., Коробейников В.В., Юрасов Н.И. Влияние накатки роликом горячего наплавленного металла на его трение и изнашивание 155

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Балдаев Л.Х., Телегин А.Ф., Мерчев С.П., Фролов Д.Н., Мацаев А.А. Опыт ремонта турбинных рабочих лопаток газоперекачивающих агрегатов методом прямого лазерного синтеза 161

Биргер Е.М., Архипов В.Е., Поляков А.Н. Триботехнические и коррозионностойкие покрытия на основе меди и цинка: современное состояние технологии газодинамического напыления и основные свойства покрытий 166

Кокорин В.Н., Табаков В.П., Крупенников О.Г., Алёшин А.С., Подмарев Д.Р., Шанченко Н.И. Исследование процесса контурной лазерной резки с использованием механической активации листового металлопроката 173

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Балакай В.И., Шпанова К.А., Ковалева А.О., Гривенко А.В. Электроосаждение сплава золото—медь—бор 181

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ НАНОСТРУКТУР

Новиков В.В., Зоренко Д.А., Болотов А.Н. Получение антифрикционных композиционных керамических покрытий и их триботехнические свойства 185

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: 05.02.00 — Машиностроение и машиноведение; 05.05.00 — Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.16.00 — Металлургия и материаловедение, 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
№ 4 (172)
April

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
V.A. ZEMSKOV
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

Gusarov A.V., Sedletskaya S.E., Semenov E.I. Improvement of gas-plasma strengthening coatings meter on machine parts 147

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Bez'yazychny V.F., Rumyantseva N.V. Analysis of technologies for repair of compressor blades of gas turbine engines using surface plastic deformation of their working surfaces 152

Boyko N.I., Sanamyan G.V., Korobeynikov V.V., Yurasov N.I. Effect of rolling roller of hot surfaced metal on its friction and wear 155

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Baldaev L.Kh., Telegin A.F., Merchev S.P., Frolov D.N., Matsaev A.A. Experience in repair of turbine blades of gas pumping units by direct laser synthesis 161

Birger E.M., Arkhipov V.E., Polyakov A.N. Tribotechnical and corrosion-resistant coatings based on copper and zinc: current state of gas-dynamic deposition technology and basis properties of coatings 166

Kokorin V.N., Tabakov V.P., Krupennikov O.G., Aleshin A.S., Podmarev D.R., Shanchenko N.I. Study of contour laser cutting process using mechanical activation of sheet metal 173

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Balakay V.I., Shpanova K.A., Kovaleva A.O., Grivenko A.V. Electrodeposition of gold—copper—bor alloy 181

MATERIAL SCIENCE OF NANOSTRUCTURES

Novikov V.V., Zorenko D.A., Bolotov A.N. Obtaining of antifriction composite ceramic coatings and their tribological properties 185

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: 05.02.00 — Mechanical engineering and machinery science; 05.05.00 — Transport, mining and building mechanical engineering; 05.16.00 — Metallurgy and materials science, Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

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

УДК 621.316.7

А.В. Гусаров, С.Э. Седлецкая, Э.И. Семенов
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)
E-mail: vs@rsatu.ru

Совершенствование измерителя толщины газоплазменных упрочняющих покрытий на деталях машин

Описан усовершенствованный измеритель толщины покрытий семейства "Слой", предназначенный для контроля толщины газоплазменных упрочняющих покрытий из порошковых материалов. В качестве датчика толщины использован датчик на основе камертонного преобразователя. Датчик оснащен системами стабилизации амплитуды колебаний камертонного осциллятора и температуры контрольного образца.

Ключевые слова: *газоплазменные упрочняющие покрытия, порошковые материалы, толщина покрытия, камертонный измеритель толщины покрытий, системы стабилизации амплитуды колебаний и температуры.*

Improved thickness control gas-plasma coatings device (“Sloy”) used at powder materials gas-plasma coatings methods is described. Tuning-fork meter as gas-plasma sensor is used. The sensor is equipped with tuning-fork vibration and temperature control sample stabilization systems.

Keywords: *gas-plasma strengthening coatings, powder materials, thickness of coatings, tuning-fork coatings meter, vibration and temperature stabilization systems.*

Введение

Технологический процесс нанесения газоплазменных упрочняющих покрытий из порошковых материалов на детали машин является многофакторным, вследствие чего параметры качества покрытий чувствительны к отклонениям в режимах нанесения. Кроме того, размер частиц используемого порошка имеет большой разброс (от 5 до 160 мкм) [1] и зависит как от марки порошка, так и от номера партии.

Одним из параметров качества покрытия является отклонение толщины покрытия от заданного значения. Существующие методы контроля толщины газоплазменных покрытий предназначены для измерения толщины после напыления и обеспечивают среднюю погрешность в пределах ±10 % [2]. Допустимая максимальная разнотолщинность покрытия должна быть в пределах 10...150 мкм. Для непрерывного контроля толщины было предложено использовать измеритель "Слой-6" с камертонным датчиком толщины покрытий (КДТП) [3, 4]. Это позволило обеспечить непрерывный контроль толщины покрытий с точностью не более ±10 % при толщине покрытия до 1,5 мм. Однако эксплуатация измерителя выявила у него ряд недостатков.

Применяемый в измерителе "Слой-6" КДТП [5] предназначен для измерения малых приращений толщин покрытий в течение продолжительного (сотни секунд) времени нанесения. Один из недостатков такого датчика — необходимость частой смены контрольного образца-свидетеля, так как критическое значение его массы, делающее невозможным возбуждение колебаний камертонного осциллятора при помощи электромагнита (ЭМ), при газоплазменном нанесении покрытий наступает гораздо быстрее, чем при электронно-лучевом нанесении покрытий. Поэтому возникла необходимость в доработке конструкции датчика.

Еще один недостаток, который никак не проявлялся при электронно-лучевом нанесении покрытий, — это влияние электромагнитного поля струи плазмы на выходной сигнал КДТП, кото-

рый представляет собой слаботочный сигнал с обратно включенного фотодиода (ФД), что приводит к грубым ошибкам при измерениях. Такое сильное влияние струи плазмы на выходной сигнал с ФД связано с тем, что струя плазмы не только проходит по изделию, на которое наносится покрытие, но и периодически направляется непосредственно на КДТП, чтобы получить покрытие на контрольных образцах-свидетелях.

В данной работе предложены способы увеличения ресурса камертонного датчика толщины газоплазменных покрытий и повышения его стабильности и точности.

Описание существующего измерителя

Структурная схема существующего измерителя газоплазменных покрытий "Слой-6" приведена на рис. 1 [3, 4].

Основными частями измерителя являются персональный компьютер (ПК), устройство сопряжения с ПК (УС) и КДТП, расположенный в рабочей камере установки для газоплазменного нанесения покрытий [1].

Для контроля покрытий используется косвенный метод измерения толщины покрытия. Он основан на зависимости периода колебаний электромеханической колебательной системы, в состав которой входят контрольные образцы-свидетели КДТП, от массы материала, нанесенного на эти образцы-свидетели. По активной площади образцов-свидетелей, удельной плотности напыляемого материала, начальному и текущему периоду колебаний вычисляется значение толщины нанесенного покрытия [3—5].

УС выполнено на основе распределенной системы ввода-вывода серии I-7000 фирмы ICP DAS, обладающей полным набором функций ввода-вывода. Модули объединены при помощи интерфейса RS-485. Преобразователь RS-232 в RS-485 осуществляет гальваническую развязку УС от ПК и обеспечивает совместимость однофазных сигналов RS-232 и многоточечных дифференциальных сигналов RS-485.

Обработка данных, поступающих с модулей серии I-7000, осуществляется ПК со специализированным программным обеспечением, которое предоставляет информацию о ходе технологического процесса пользователю в удобной для него форме и управляет формированием протокола нанесения покрытий.

Для защиты КДТП от воздействия теплового излучения и стабилизации периода колебаний измерительный преобразователь КДТП помещен в массивный металлический водоохлаждаемый корпус [3, 4]. Конструкцией датчика предусмотрено быстрое извлечение его из корпуса для замены, очистки или ремонта. Предусмотрена также быстрая замена контрольных образцов [3].

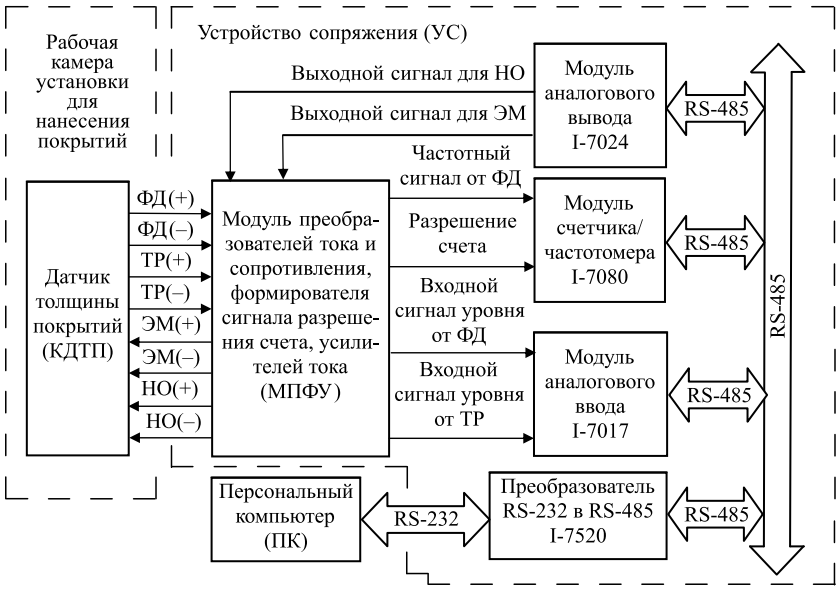


Рис. 1. Структурная схема существующего измерителя "Слой-6": ФД — фотодиод; ТР — терморезистор; ЭМ — электромагнит; НО — нагреватель контрольного образца-свидетеля; RS-232 — последовательный интерфейс для обмена данными с одним устройством; RS-485 — последовательный интерфейс для обмена данными с несколькими устройствами

Формулировка проблемы

В процессе нанесения покрытий масса контрольных образцов-свидетелей КДТП изменяется в несколько раз, поэтому система стабилизации амплитуды колебаний ветвей камертона содержит нестационарный объект управления в виде контрольного образца-свидетеля. При нанесении покрытий толщиной в несколько микрометров нестационарностью объекта, как показывает практика, можно пренебречь. При нанесении газоплазменных покрытий толщиной десятки и сотни микрометров нестационарностью объекта пренебречь уже нельзя. Кроме того, система стабилизации амплитуды колебаний контрольного образца-свидетеля, применяемая в работах [3, 4], имеет ограниченный запас по мощности. Это приводит к тому, что при больших массах нанесенного на образцы-свидетели по-

крытия наблюдается срыв или полное отсутствие колебаний камертонного осциллятора КДТП.

Фотодатчик на основе ФД, расположенный внутри корпуса датчика толщины, является генератором тока, который модулирует колебания заслонки, связанной с камертонным осциллятором. Амплитуда этого тока для большинства ФД не превышает нескольких сотен микроампер, что приводит к повышенной чувствительности выходного сигнала датчика к электромагнитным помехам даже при использовании экранированной витой пары в качестве передающей среды. Проблема усугубляется необходимостью иметь соединительные провода большой длины (до 5 м и более), чтобы разместить ПК вне рабочей камеры установки для газоплазменного нанесения покрытий.

Пути решения проблемы

Одним из путей решения проблемы увеличения запаса системы стабилизации по мощности является повышение выходной мощности, которая требуется для возбуждения колебаний камертонного осциллятора. Для этого потребовалось увеличить ток в катушке ЭМ и размеры самого ЭМ. Это, в свою очередь, привело к необходимости применения камертонного осциллятора большего размера и более мощных усилителей тока в катушке ЭМ, а также увеличения габаритных размеров корпуса датчика и площади поперечного сечения трубок системы водяного охлаждения.

Для повышения помехоустойчивости следует передавать с датчика не аналоговый (ток фотодиода), а цифровой сигнал. Для этого нужно разместить УС (см. рис. 1) непосредственно в корпусе КДТП и формировать цифровой сигнал элементами, размещенными внутри его корпуса.

Внесенные изменения привели к созданию модифицированного камертонного датчика толщины покрытий (МКДТП) с усовершенствованной конструкцией и электрической схемой, оптимизированной для решения конкретной задачи. Увеличение габаритных размеров корпуса МКДТП позволило использовать более мощную электромеханическую колебательную систему на основе камертонного осциллятора увеличенного размера, а также выделить внутри корпуса МКДТП дополнительный объем для размещения нескольких небольших печатных модулей и более мощного транзистора для управления ЭМ по сравнению с ранее используемым.

Современный уровень развития элементной базы позволил разместить все структурные элементы УС (см. рис. 1) внутри корпуса МКДТП и передавать в персональный компьютер информацию по сети Ethernet с применением помехоустойчивого кодирования информации. Это стало возможным, в первую очередь, вследствие замены распределенной системы ввода-вывода серии I-7000 фирмы ICP DAS из четырех функционально законченных модулей на один небольшой печатный модуль микроконтроллера (МК) на основе МК ATmega164. На модуле МК размещены два цифроаналоговых преобразователя (ЦАП), формирующих напряжения для питания ЭМ возбуждения камертонного осциллятора и нагревателя контрольных образцов-свидетелей. Нагрев образцов-свидетелей обеспечивает надежную адгезию наносимого на них покрытия, предотвращая его отслаивание и отрыв. Модуль преобразователей и модуль контроллера Ethernet также реализованы в виде отдельных печатных модулей и размещены внутри корпуса КДТП.

Основными частями усовершенствованного измерителя толщины газоплазменных покрытий являются ПК с установленным на нем обновленным специализированным программным обеспечением, размещенный вне рабочей камеры установки, и МКДТП с увеличенными габаритными размерами корпуса по сравнению с КДТП (рис. 2).

В качестве ПК используется ноутбук в полузащищенном исполнении типа GETAC S400 Standard Indoor A с защитой от попадания пыли и влаги и возможностью работы при сильном освещении.

МКДТП (рис. 3) включает в себя следующие составные части:

— КИПДТП, состоящий из камертонного осциллятора *8* с контрольными образцами-свидетелями *1* и электромагнитом *6* со входами "ЭМ+" и "ЭМ–", пары "осветитель (*3*) — фотодиод (*5*)", на выходе которой формируются сигналы "ФД+" и "ФД–", нагревателя контрольного образца-свидетеля (НО) *2* на каждой из двух ветвей камертона *7* и *12* со входами "НО+" и "НО–", а также терморезистора (ТР) *11* с выходами "ТР+" и "ТР–" для измерения его температуры. ТР питается не постоянным, а переменным током, что повышает стабильность его показаний;

— модуль преобразователей *19* для формирования входного сигнала температуры от ТР, входного частотного сигнала и сигнала уровня колебаний от ФД, а также выходных сигналов для ЭМ и НО;

— модуль МК *22*, в состав которого входят МК и два ЦАП;

— модуль контроллера локальной сети Ethernet ENC28J60 (модуль *20*).

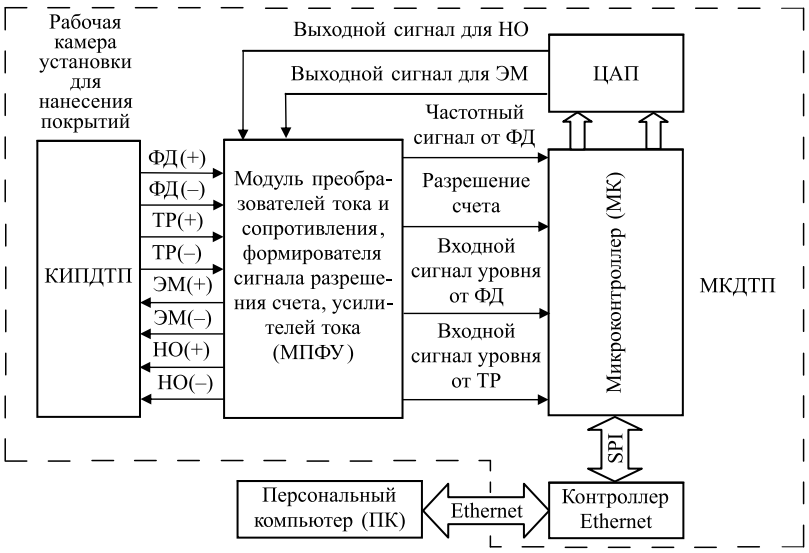


Рис. 2. Структурная схема усовершенствованного измерителя толщины газоплазменных покрытий (обозначения см. рис. 1):
МКДТП — модифицированный камертонный датчик толщины покрытий; КИПДТП — камертонный измерительный преобразователь датчика толщины покрытий; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; SPI — последовательный периферийный интерфейс; Ethernet — интерфейс пакетной передачи данных

Модули с электронными компонентами *19*, *20* и *22* расположены в отдельном пылезащищенном объеме *18* корпуса МКДТП, отделенном от объема *15*, в котором находятся элементы КИПДТП, перегородкой *16*. Связь между КИПДТП и модулями *19*, *20* и *22* осуществляется через герметичный разъем *17* в перегородке *16*. Связь с ПК осуществляется через Ethernet-разъем *21*.

МК ATmega164 взаимодействует с персональным компьютером по локальной сети Ethernet. Он получает собственный IP-адрес, поэтому может связываться с любым компьютером, подключенным к локальной сети или сети Интернет. Это повышает гибкость процесса контроля нанесения газоплазменных покрытий. Из сети МК получает и сохраняет в энергонезависимой памяти следующие параметры:

— значения калибровочных коэффициентов для распыляемых порошков, а также изделий, на которые наносится покрытие;

— значение температуры контрольного образца-свидетеля и калибровочные коэффициенты ТР для ее расчета.

Информация об изменении толщины газоплазменного покрытия в процессе его нанесения также хранится в энергонезависимой памяти МК и по запросу ПК передается по локальной сети.

МК ATmega164 реализует два независимых контура регулирования: для стабилизации температуры детали, на которую наносится покрытие, и для стабилизации амплитуды колебаний камертонного осциллятора [4]. В состав каждого контура входят:

— нормирующий преобразователь аналогового сигнала с датчика внутри КИПДТП для приведения диапазона с датчика к диапазону входного сигнала аналого-цифрового преобразователя (АЦП), встроенного в МК;

— один из каналов АЦП, встроенного в МК;

— цифровой вычислитель внутри МК;

— ЦАП, подключенный к порту вывода МК;

— усилитель мощности для непосредственного управления нагрузкой в виде ЭМ в контуре стабилизации амплитуды колебаний или НО в контуре стабилизации температуры.

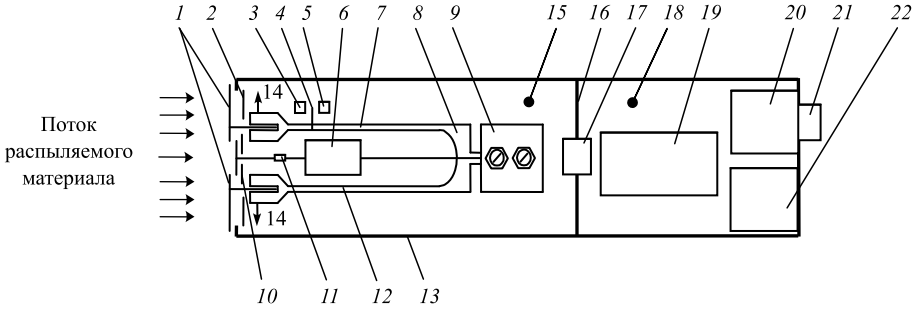


Рис. 3. Схема модифицированного камертонного датчика толщины покрытий (МКДТП):
1 — контрольные образцы; *2* — нагреватель; *3* — осветитель; *4* — флажок; *5* — фотодиод; *6* — электромагнит; *7*, *12* — ветви камертона; *8* — U-образный камертонный осциллятор; *9* — жестко закрепленное основание камертона; *10* — "свидетель" температуры; *11* — терморезистор; *13* — водоохлаждаемый корпус; *14* — направление колебаний ветвей камертона; *15* — объем корпуса, в котором находится КИПДТП; *16* — перегородка; *17* — герметичный разъем; *18* — пылезащищенный объем корпуса, в котором находятся электронные модули; *19* — модуль преобразователей (МПФУ); *20* — модуль контроллера Ethernet; *21* — Ethernet-разъем; *22* — модуль МК

Для получения точных значений калибровочных коэффициентов, используемых при расчете толщины покрытия, выполняется контрольный проход манипулятора с соплом вблизи МКДТП с нанесением покрытия минимально возможной толщины.

При достижении 90 % от предельного значения толщины покрытия на образце, при котором контур регулирования обеспечивает стабилизацию амплитуды колебаний КИПДТП, МК информирует об этом через сеть удаленный ПК, с которого идет общее управление процессом нанесения покрытий.

Выводы

Изменение конструкции камертонного датчика толщины газоплазменных покрытий и применение современной элементной базы позволили повысить его ресурс до замены контрольных образцов и устранить воздействие помех на линии связи между КИПДТП и устройством управления. Погрешность измерения толщины покрытия при этом не превышала 5 % при максимальной толщине покрытия на контрольном образце до 3 мм. Это позволило обеспечить стабильную работу измерителя толщины покрытий, улучшить качество наносимых покрытий и сократить потери дорогостоящих материалов в процессе газоплазменного нанесения покрытий на детали машин. В настоящее время проводятся дальнейшие исследования усовершенствованного измерителя в целях получения зависимости калибровочных коэффициентов от формы и размеров изделия, на которое наносится покрытие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Мчедлов С.Г.** Газотермическое покрытие в технологии упрочнения и восстановления деталей машин (обзор). Ч. 1. Газоплазменное и детонационное напыление // Сварочное производство. 2009. № 10. С. 35—45.
2. **Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н.** Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
3. **Обеспечение** заданной толщины покрытий при газоплазменном нанесении на детали ГТД / Э.И. Семенов, А.Н. Ломанов, А.В. Гусаров и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 46—48.
4. **Гусаров А.В., Седлецкая С.Э., Семенов Э.И.** Совершенствование измерителя толщины нанесенного слоя при получении наноструктурированных покрытий на деталях ГТД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 1. С. 41—44.
5. **Пат. 2274676 РФ, МПК C23C 14/54.** Устройство для контроля толщины покрытий в процессе нанесения их в вакууме / Э.И. Семенов, И.Ю. Паутов. № 2004109779/02; заявл. 30.03.2004; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11. 7 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

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

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

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

УДК 658.58

[1]В.Ф. Безъязычный, [2]Н.В. Румянцева
([1]Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева,
[2]ПАО "Научно-производственное объединение "Сатурн", г. Рыбинск)
E-mail: technology@rsatu.ru

Анализ технологий ремонта лопаток компрессора газотурбинных двигателей с использованием поверхностного пластического деформирования их рабочих поверхностей

Приведены результаты исследования пескоструйной, гидропескоструйной, гидродробеструйной обработки рабочих поверхностей лопаток компрессора ГТД в целях удаления коррозионных повреждений. Установлены зависимости шероховатости обработанной поверхности и съема металла при каждом методе обработки от давления воздуха, времени обработки и расстояния от сопла установки до обрабатываемой поверхности. Получены расчетные зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля неровностей на поверхности и величины съема металла в зависимости от комплекса параметров, степень влияния параметров процесса обработки на величину и глубину залегания в поверхностном слое остаточных напряжений, обусловленных различными способами обработки.

Ключевые слова: *лопатка компрессора ГТД, поверхностное пластическое деформирование, шероховатость поверхности, съем металла, остаточные напряжения.*

The study results of sandblasting, abrasive jet, hydroblasting treatment of the working surfaces of GTE compressor blades in order to remove corrosion damage are presented. The dependences of the machined surface roughness and metal removal at each treatment method are established on the air pressure, processing time and distance from nozzle of installation to the work surface. The calculated dependences for determination of the arithmetical mean deviation of irregularities profile on the surface and the magnitude of metal removal depending on the range of parameters, the degree of influence of processing parameters on the magnitude and depth in the surface layer of residual stresses due to different processing methods are determined.

Keywords: *GTE compressor blade, surface plastic deformation, surface roughness, metal removal, residual stresses.*

Изготовление сложных по конфигурации и точности деталей и узлов авиадвигателей из труднообрабатываемых материалов взамен изношенных в процессе эксплуатации механическим способом с использованием методов традиционной технологии снятия стружки — трудозатратный процесс. Эффективным путем решения проблемы повышения ремонтопригодности деталей является применение методов поверхностно-пластического деформирования, которые обеспечивают максимальные эксплуатационные характеристики [1—3].

Проведенный анализ качества полированных поверхностей, полученных при ремонте лопаток компрессора, изготовленных из материала ВД-17, показал наличие направленной шероховатости в виде рисок глубиной до 0,02...0,05 мм, расположение которых перпендикулярно к кромкам лопатки. При эксплуатации это может стать одной из причин возникновения трещин и разрушения лопаток. Поэтому принципиально важно при ремонте обеспечить минимальный съем металла при полном удалении продуктов коррозии и обеспечения требуемого качества поверхностного слоя.

Экспериментальные работы по удалению коррозионных повреждений с поверхностей лопаток проводили на разных установках: пескоструйной, гидропескоструйной и гидродробеструйной. Давление воздуха p, расстояние от обрабатываемой поверхности до сопла установки L, время обработки t, угол атаки α деформирующего материала устанавливали различными, с тем чтобы определить оптимальные режимы обработки. В качестве рабочей среды использовали кварцевый песок $2K_2O_3016$, абразивное зерно 24А6, 24А12 и стеклошарики диаметром 0,25 мм. Время обработки образцов лопаток составляло 1...3 мин, давление воздуха — 15...30 МПа, расстояние от обрабатываемой поверхности до сопла — 100...300 мм.

Анализ результатов исследований показал, что при повышении давления, времени обработки и уменьшении расстояния от обработанной поверхности до сопла увеличиваются съем металла и высота микронеровностей на обработанной поверхности при всех методах обработки.

На основе математической обработки экспериментальных данных получены зависимости шероховатости обработанной поверхности образцов Ra и съема металла T от давления воздуха p, расстояния от поверхности до сопла L и времени обработки t (рис. 1). Также получены зависимости для определения параметра шероховатости обработанной поверхности и величины съема металла при различных методах обработки (см. таблицу).

Систематизация данных, полученных при проведении экспериментов, позволила сделать вывод, что наиболее предпочтительными методами обработки являются гидро-

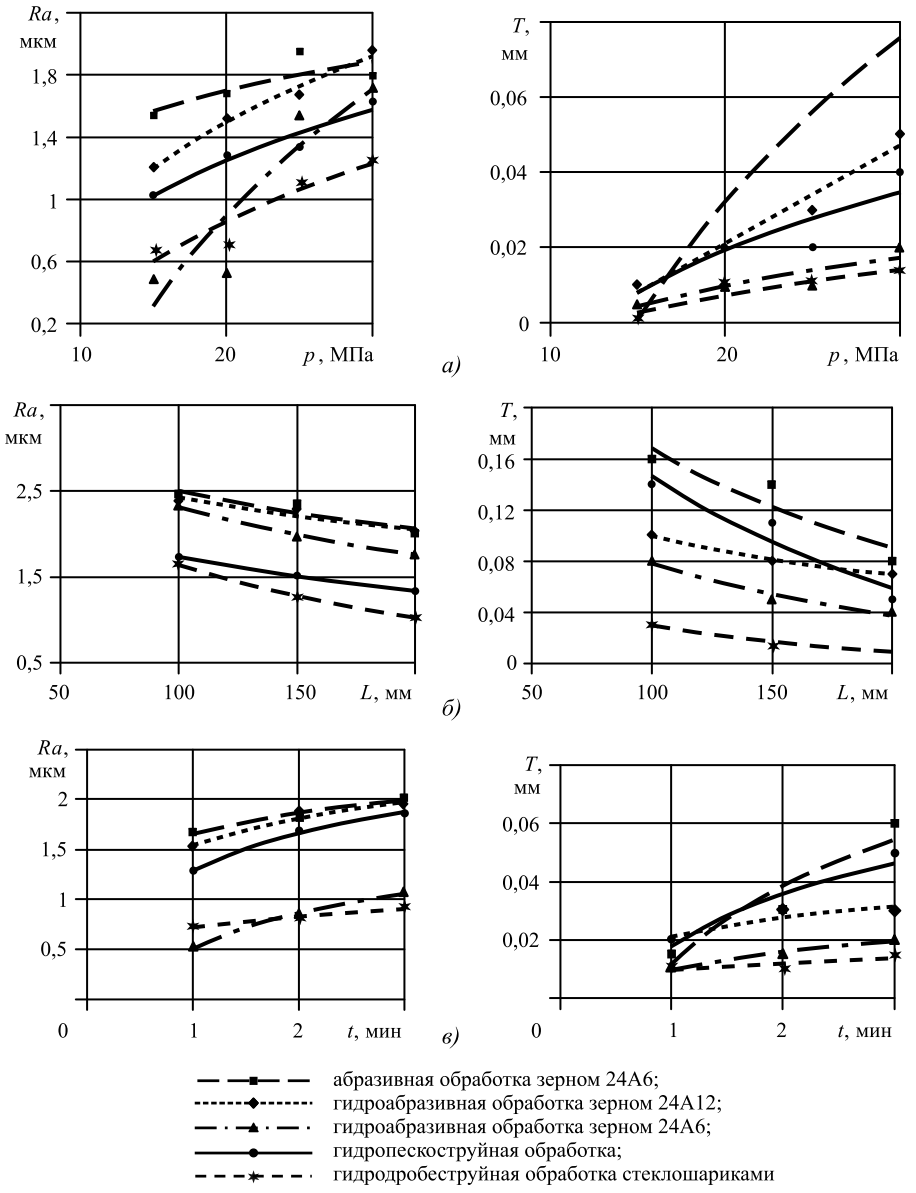


Рис. 1. Зависимости параметра шероховатости обработанной поверхности и съема металла:
а — от давления воздуха при L = 150 мм, α = 45°, t = 1 мин; *б* — от расстояния от поверхности до сопла при p = 30 МПа, α = 90°, t = 1 мин; *в* — от времени обработки при p = 20 МПа, L = 150 мм, α = 45°

Зависимость съема металла и параметра шероховатости обработанной поверхности от метода и параметров обработки

Метод обработки	Формулы
Гидроабразивная обработка зерном 24А12	$T = 0{,}06p^{1,87}L^{-1,27}t^{0,46}$ $Ra = 12{,}35p^{0,65}L^{-0,25}t^{0,27}$
Гидропескоструйная обработка	$T = 0{,}01p^{4,11}L^{-1,9}t^{0,07}$ $Ra = 136{,}29p^{1,02}L^{-0,34}t^{0,21}$
Гидроабразивная обработка зерном 24А6	$T = 0{,}001p^{2,61}L^{-0,68}t^{0,63}$ $Ra = 150{,}76p^{1,22}L^{-0,17}t^{0,29}$
Сухая абразивная обработка зерном 24А6	$T = 0{,}001p^{2,42}L^{-0,96}t^{0,61}$ $Ra = 10{,}01p^{0,38}L^{-0,35}t^{0,19}$
Гидродробеструйная обработка стеклошариками	$T = 0{,}003p^{2,36}L^{-1,22}t^{0,67}$ $Ra = 28{,}96p^{0,5}L^{-0,53}t^{0,10}$

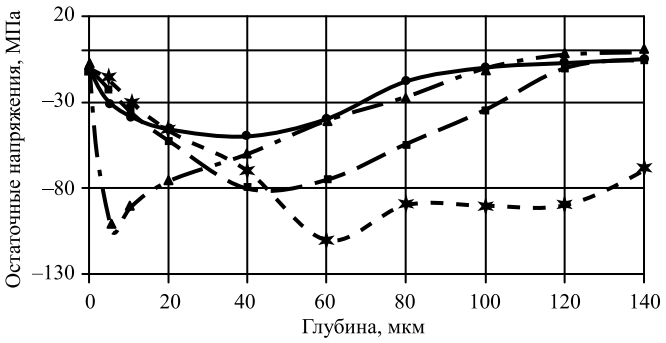


Рис. 2. Результаты замера остаточных напряжений на приборе "ПИОН-2"

дробеструйная обработка стеклошариками и гидроабразивная обработка зерном 24А6, при которых съем металла составил 0,001...0,015 мм, а параметр шероховатости обработанной поверхности Ra = 0,4...0,8 мкм. Значительное увеличение Ra происходит при абразивной обработке зерном 24А12 (от 0,65 до 1,692 мкм).

После проведения обработки различными методами был выполнен анализ состояния поверхностного слоя. Качество поверхностного слоя было проверено на отсутствие продуктов коррозии и трещин визуально, при помощи микроскопа (×25) и люминесцентным методом. Трещины и свечения не выявлены ни на одном образце, поэтому можно сделать вывод, что продукты коррозии были полностью удалены из коррозионных раковин. Исключен процесс шаржирования наполнителя в материал образцов при гидрообработке в связи с наличием прослойки непрерывной жидкостной пленки.

Исследование остаточных напряжений проводили двумя способами: рентгеноструктурным неразрушающим методом контроля и методом электрохимического травления поверхности образца с записью размера деформации на приборе "ПИОН-2". В поверхностном слое лопаток наблюдается благоприятное распределение сжимающих остаточных напряжений (рис. 2).

Микрогеометрия поверхности обработанных образцов характеризуется мелкими равномерно распределенными углублениями, без микротрещин и направленных следов обработки (рис. 3). Прижогов также не обнаружено.

Важным достоинством предлагаемых методов обработки является то, что они не изменяют структуру материала, а улучшают ее, создавая сжимающие напряжения, и практически неизменными остаются геометрические размеры обрабатываемых деталей. При проведении исследований образцов установлено, что микротвердость на поверхности соответствует микротвердости сердцевины материала ВД-17, что указывает на отсутствие наклепа.

Таким образом, методы поверхностного пластического деформирования могут широко применяться при ремонте как лопаток компрессоров, так и для других деталей сложной конфигурации.

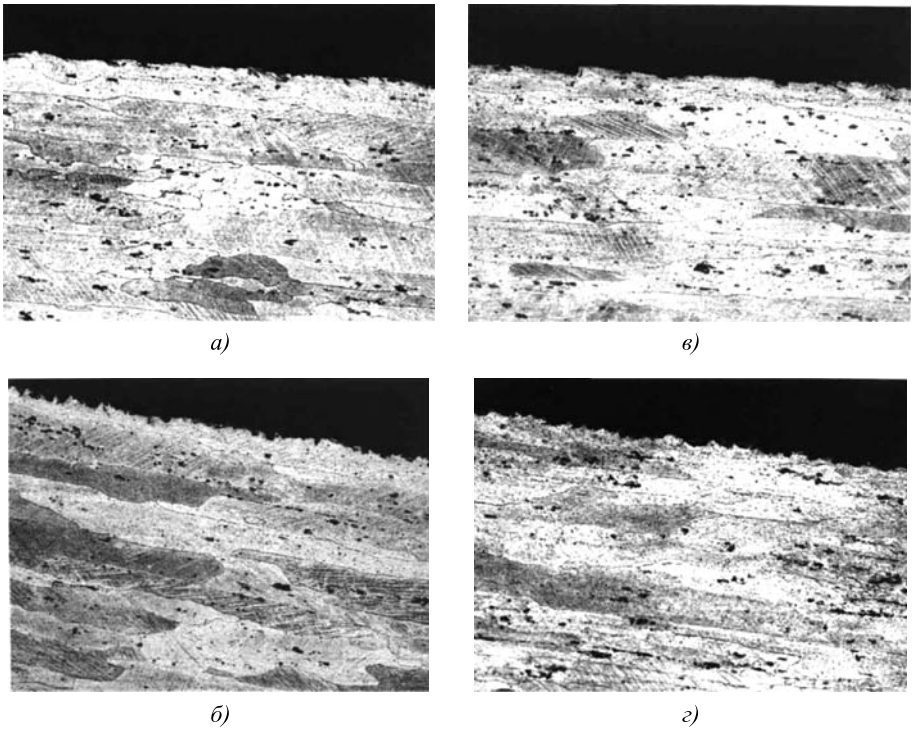


Рис. 3. Поверхность и структура образца после обработки (×200):
а — гидропескоструйная обработка; *б* — гидроабразивная обработка зерном 24А6; *в* — гидродробеструйная обработка стеклошариками; *г* — гидроабразивная обработка зерном 24А12

Заключение

На основе экспериментальных исследований процесса обработки методами гидропескоструйной, гидроабразивной, абразивной и гидродробеструйной обработки стеклянными шариками предложен новый подход к обеспечению шероховатости поверхности материала лопатки за счет назначения метода и режимов обработки. При этом происходит полное удаление продуктов коррозии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
2. **Применение** вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей / под ред. А.П. Бабичева. Ростов-на-Дону, 2006. 213 с.
3. **Киричек А.В., Соловьев Д.В., Афонин А.Н. и др.** Технологические методы упрочнения деталей машин / под ред. А.В. Киричека. М.: Машиностроение-1, 2009. 296 с.

УДК 621.7

Н.И. Бойко, Г.В. Санамян, В.В. Коробейников, Н.И. Юрасов
(Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС))
E-mail: erm@kaf.rgups.ru

Влияние накатки роликом горячего наплавленного металла на его трение и изнашивание

Представлены результаты исследований эксплуатационных свойств металлопокрытий при восстановлении изношенных деталей наплавкой с упрочнением наплавленного металла накатным роликом. Установлено, что обкатка роликом горячего металла в процессе его наплавки способствует повышению износостойкости формируемого покрытия, снижает коэффициент трения и улучшает условия работы пары трения.

Ключевые слова: *деталь, восстановление, износостойкость, металлопокрытие, наплавка, сварочная дуга, ролик, упрочнение.*

The studies results of the operational properties of metal coatings in the recovery of worn parts by welding with hardening of the weld metal with rolling roller are presented. It is established that rolling by hot metal roller during its deposition contributes to increasing the wear resistance of the coating being formed, reduces the friction coefficient and improves the working conditions of the friction pair.

Keywords: *part, restoration, wear resistance, metal plating, surfacing, welding arc, roller, hardening.*

Снижение эксплуатационных свойств изделий во многом связано с физическим износом деталей. Практика показывает [1, 2], что большинство деталей машин (85...90 %) выбраковывается вследствие износа рабочих поверхностей, хотя более 60 % из них при достижении предельно допустимого износа сохраняют значительный остаточный ресурс долговечности по прочности и могут быть использованы повторно при компенсации износа поверхностей. Одним из методов восстановления изношенных деталей является наплавка. Основное достоинство этого метода — возможность формирования поверхностного слоя детали с требуемыми физико-механическими свойствами за счет подбора и использования соответствующих легированных проволок и флюсов. Однако наплавленные поверхности, как правило, необходимо подвергать последующей механической обработке для улучшения физико-механических свойств.

Известно [1, 3], что механическая обработка наплавленного металла из-за специфики его свойств (большой и неравномерный припуск на обработку, наличие пор, раковин, шлаковых включений, растягивающие остаточные напряжения, широкий разброс параметров физико-механических свойств и др.) связана со значительными трудностями, что повышает себестоимость процесса восстановления деталей, ограничивая тем самым возможность применения в ремонтно-восстановительном производстве современных высокопрочных износостойких материалов. Разработка прогрессивных технологий механической обработки наплавленного металла, улучшающих физико-механические свойства наносимых покрытий, является серьезной проблемой, требующей своего решения. В соответствии с этим в РГУПС проводятся исследования по управлению формообразованием и качеством наплавлен-

ного металла при восстановлении изношенных деталей машин.

Исследованиями [1, 3, 4] установлено, что эффективным методом улучшения технико-экономических показателей механической обработки наплавленного металла является обработка его в горячем состоянии. Наибольший эффект при этом достигается в результате совмещения в одной технологической операции процессов автоматической электродуговой наплавки под слоем флюса и упрочнения горячего наплавленного металла поверхностным пластическим деформированием (ППД) накаткой роликами. Структурно-кинематическая схема технологической системы, обеспечивающей совмещение в единой технологической операции процессов автоматической электродуговой наплавки под слоем флюса и отделочно-упрочняющей обработки ППД горячего наплавленного металла накаткой роликами, представлена на рис. 1. Представленная технология позволяет при относительно небольших затратах использовать остаточный ресурс долговечности изношенных деталей, улучшить показатели качества и эксплуатационные свойства металлопокрытий, повысив конкурентоспособность процессов восстановления изношенных деталей.

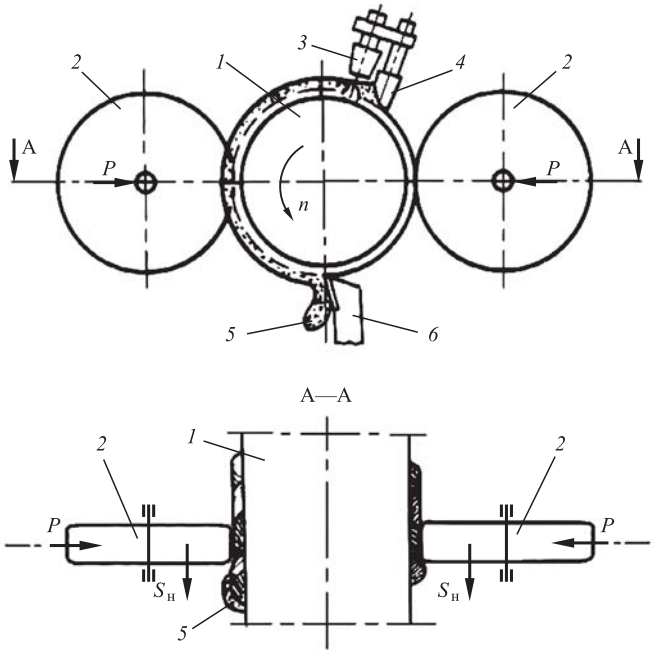


Рис. 1. Схема наплавки и упрочнения ППД обкаткой роликом горячего наплавленного металла при восстановлении цилиндрических деталей:
1 — восстанавливаемая деталь; *2* — накатные ролики; *3* — мундштук наплавочного автомата; *4* — флюсопровод; *5* — шлаковая корка; *6* — резец шлакоудаляющего устройства

Несмотря на это, на практике в большинстве случаев технико-экономические показатели процесса восстановления изношенных деталей по описанной технологии значительно ниже возможных. Обусловлено это недостаточной изученностью процесса, особенно в части влияния режимов накатки роликами горячего наплавленного металла на трение и изнашивание восстановленных поверхностей. Имеющиеся сведения недостаточны для разработки эффективных технологических процессов и средств их оснащения, что требует проведения дальнейших исследований особенностей процесса, его закономерностей и технологических возможностей.

В качестве объекта исследования выбраны металлопокрытия, наносимые на изношенные поверхности цилиндрических деталей автоматической электродуговой наплавкой под слоем флюса с упрочняющей обработкой ППД горячего наплавленного металла накатными роликами. **Цель исследования** — установить связь показателей износостойкости покрытия с силой накатки.

Технологическая система, реализующая описанный выше процесс, включает в себя токарно-винторезный станок модели 16К20, сварочный преобразователь и универсальную наплавочную головку ГМВК-2У, суппорты наплавочной и накатной головок. Частота вращения наплавленной детали снижается до 0,5...30 мин$^{-1}$ посредством редуктора Р4Н-120 (Р4П-120), включенного в кинематическую цепь шпинделя станка.

Исследования выполнены с использованием наплавочных проволок марок Св-08А, Св-08Г2С, Нп-30ХГСА, пружинной проволоки класса 2. В качестве флюсов применяли АН-348-А и АН-348-А с легирующими добавками. При выборе наплавочных материалов преследовалась цель получения износостойких металлопокрытий широкого диапазона физико-механических свойств и возможности применения результатов исследований в условиях реального производства. Химический состав наплавленных сплавов представлен в таблице. Режимы наплавки назначали с учетом рекомендации [1]. В качестве образцов использовали ролики из стали 45 диаметром 60 мм, шириной 10 мм, вырезанные из цилиндрических деталей с различной наплавкой, как прошедших операцию упрочнения ППД, так и без нее. Обкатку проводили роликами из стали ШХ15 диаметром 100 мм и шириной 12 мм с цилиндрическим пояском 6 мм и профильным радиусом 6 мм. Силу обкатки выбирали в пределах 2...18 кН.

Перед испытанием на износ поверхности испытуемых образцов обрабатывали на шлифоваль-

Химический состав наплавленных металлопокрытий

Марка флюса	Наплавочная проволока	Содержание элементов в наплавленном металле, %		
		C	Cr	Mn
АН-348-А	Св-08А	0,18	0,23	1,00
	Св-08Г2С	0,35	0,62	1,44
	Нп-30ХГСА	0,29	0,24	1,57
	Пружинная класса 2	0,32	0,16	1,82
АН-348-А легированный (2,5 % графита и 2 % феррохрома)	Св-08А	0,75	0,40	1,42
	Св-08Г2С	0,94	0,50	2,30
	Нп-30ХГСА	1,60	0,54	2,74
	Пружинная класса 2	1,02	0,48	1,38

ном станке до значений Ra = 0,16...0,32 мкм. Все операции механической обработки образцов, за исключением операции обкатки роликом, выполняли при обильной подаче смазочно-охлаждающей жидкости.

Контробразцы выполняли из бронзы БрОЦС5-5-5 (ГОСТ 613—79). Для обеспечения полного прилегания истираемые поверхности предварительно притирали. Качество прилегания оценивали по методу красок.

Исследовали, главным образом, два наиболее характерных для тяжелонагруженных деталей машин и механизмов (в том числе, подвижного состава железнодорожного транспорта) вида износа — износ при граничной смазке и абразивный (гидроабразивный) износ. Износостойкость металлопокрытия оценивали по потере массы образцов, подвергнутых изнашиванию. Взвешивание образцов осуществляли на аналитических весах АДВ-200 с точностью ±0,1 мг.

Относительную износостойкость определяли по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{\Delta G_э}{\Delta G_м},$$

где $\Delta G_э$, $\Delta G_м$ — весовой износ эталона и испытуемого образца соответственно.

Коэффициент трения вычисляли по формуле:

$$\tau = \frac{F}{N} = \frac{M_{тр}}{NR},$$

где F — сила трения, Н; N — нормальная составляющая нагрузки, Н; $M_{тр}$ — момент трения (определяется по показаниям электронной аппаратуры машины трения); R — радиус образца, м.

Испытания на гидроабразивное изнашивание проводили на машине трения РГУПС (рис. 2). Исполнение данной машины позволяет имитировать трение при различных видах относительного перемещения испытуемых образцов и контробразцов, при различной равномерно постоянной или изменяющейся по пути трения (во времени) по заданному закону силе прижатия контробразцов к испытуемой поверхности, при наличии или отсутствии в зоне трения смазочного материала. Испытания проводили в основном при скорости относительного перемещения трущихся тел 0,63 м/с и удельном давлении в зоне контакта 3 МПа с подачей в зону трения масла индустриального И-20А с содержанием абразива 5 % мас. Масло с абразивом подавали в зону трения по 5—6 капель в минуту посредством дозирующе-капельного устройства. В качестве абразива использовали кварцевый песок фракции 0,1...0,25 мм микротвердостью 7,8...8 ГПа. Путь трения доводили до 10 000 м при пяти циклах по 2000 м.

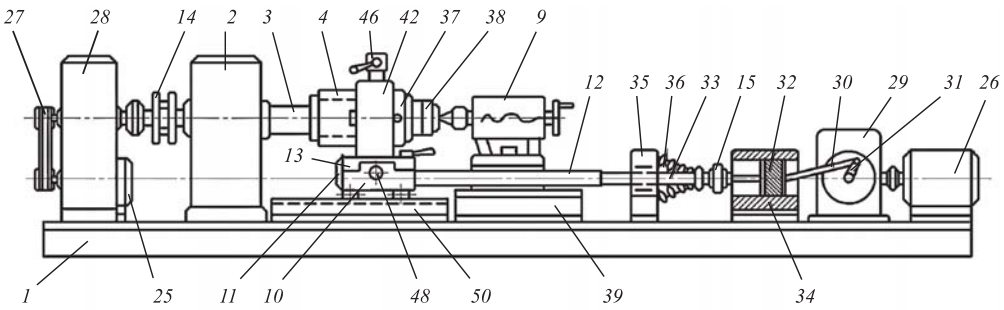
Исследование влияния силы накатки роликом на трение и износ наплавленного металла при граничной смазке осуществляли на машине трения СМЦ-2 по схеме "диск—колодка" при скорости скольжения 1,57 м/с и удельном давлении 3 МПа. В качестве смазки использовали масло индустриальное И-20А, которое подводили в зону трения посредством дозирующе-капельного устройства по 2—3 капли в минуту. Общую длину пути трения доводили до 50 000 м.

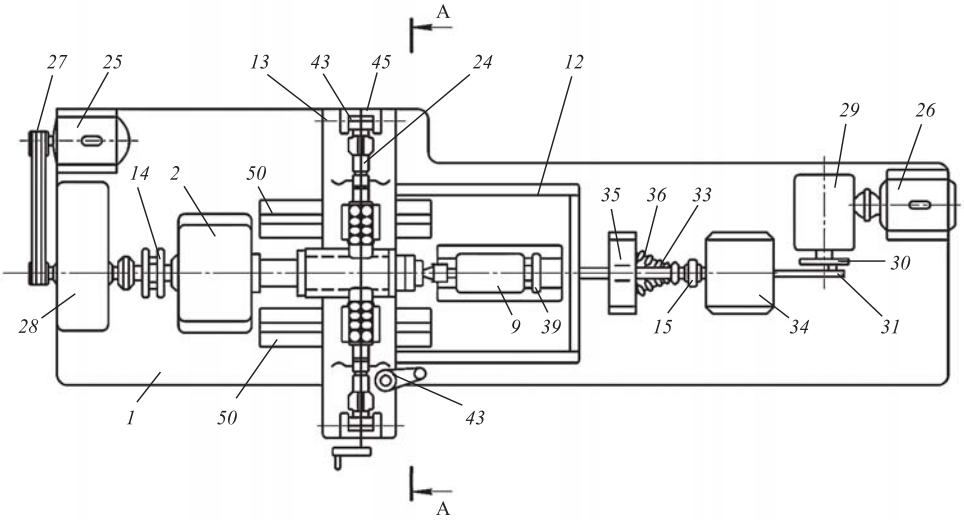
Анализ полученных данных, некоторые из которых представлены на рис. 3—7 показал, что обкатка роликом горячего наплавленного металла способствует заметному снижению износа восстановленных поверхностей. Так, для исследованных материалов (см. таблицу) обкатка с силой 8...12 кН позволила снизить износ металлопокрытий:

— при гидроабразивном изнашивании на 57...97 %;

— при граничной смазке на 37...85 %.

При этом наблюдается следующая общая закономерность. По мере увеличения силы обкатки характерные для наплавленного металла микропоры, раковины и микротрещины уменьшаются. При обкатке с силой P в диапазоне 5...12 кН указанные дефекты устраняются, поверхностный слой приобретает более однородную и мелкозернистую структуру. При значениях P = 12,5 кН у поверхности наплавленного слоя отмечается на-





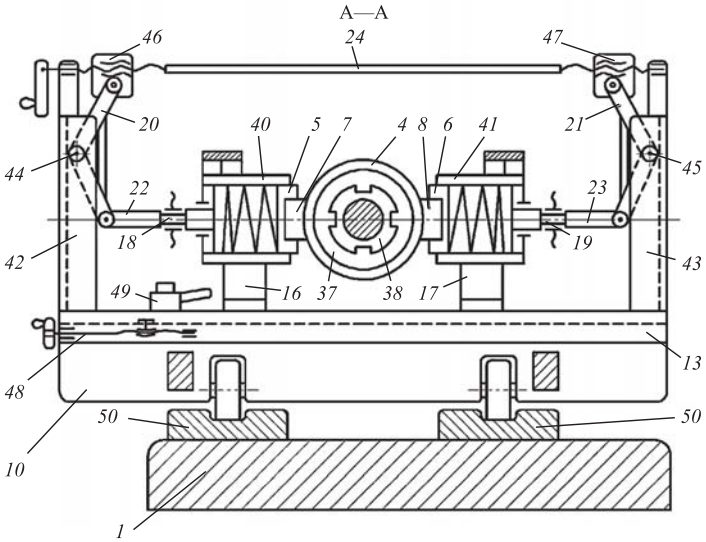


Рис. 2. Машина трения для испытания наплавленного металла при гидроабразивном изнашивании:
1 — станина; *2* — передняя бабка; *3* — вал; *4* — испытуемые образцы; *5* и *6* — держатели контробразцов; *7* и *8* — контробразцы; *9* — задняя бабка; *10* — тележка; *11* — направляющие; *12* — рама тяговая; *13* — самоцентрирующийся суппорт; *14* — измеритель момента трения; *15* — измеритель силы трения; *16* и *17* — узлы нагружения образцов; *18* и *19* — узлы измерения нормальной силы прижатия контробразцов; *20* и *21* — двуплечие рычаги; *22* и *23* — тяги; *24* — нагрузочный винт; *25* — привод вращения вала; *26* — привод перемещения тележки с суппортом; *27* — ременная передача; *28* и *29* — редукторы; *30* — кривошипно-шатунный механизм; *31* — кривошип; *32* — ползун; *33* — шток; *34* и *35* — направляющие; *36* — пружина; *37* — втулка; *38* — гайка; *39* — направляющие; *40* и *41* — втулки; *42* и *43* — стойки; *44* и *45* — оси; *46* и *47* — гайки; *48* — регулировочный винт; *49* — стопорная гайка; *50* — направляющие

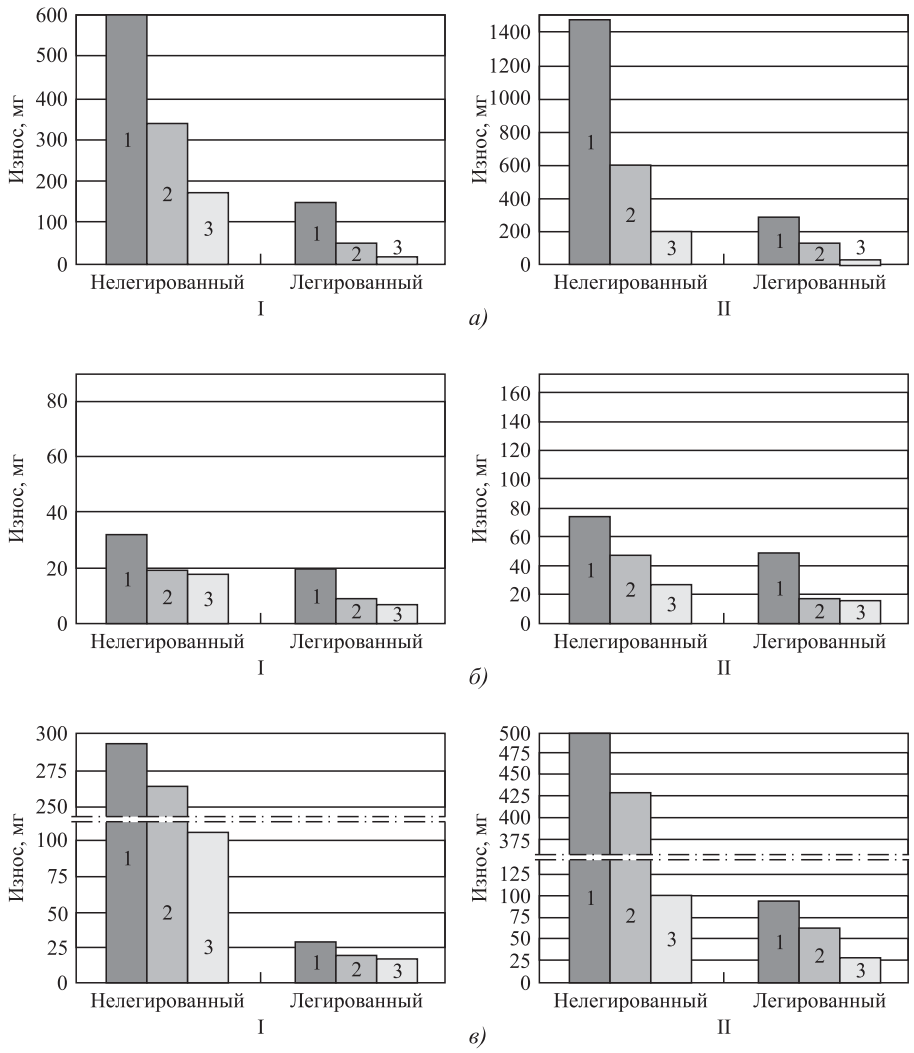


Рис. 3. Диаграмма износа за 10 000 м пути трения образцов (I) и контробразцов (II), наплавленных проволокой Св-08А (*а*), проволокой класса 2 (*б*), проволокой Св-08Г2С (*в*), подвергнутых упрочнению с силой:
1 — P = 0 кН; 2 — P = 5 кН; 3 — P = 10 кН

рушение сплошности по границам зерен (начало образования новых микротрещин), которое при P = 15 кН принимает характер шелушения. Коэффициент трения у образцов, обработанных ППД обкаткой роликами, значительно (0,014...0,016) ниже коэффициента трения образцов, не прошедших операцию упрочнения ППД обкаткой роликами (0,03...0,048). Температура в зоне трения контробразцов с металлопокрытием образцов, упрочненных ППД обкаткой роликами, на 15 °С и более ниже температуры пары трения с металлопокрытием образцов без обработки ППД роликами. На поверхности металлопокрытий, упрочненных ППД обкаткой роликами в диапазоне оптимальных сил сжатия, практически отсутствуют задиры и царапины, установившиеся в результате износа.

Износ контробразцов, работающих в паре трения с образцами, подвергнутыми упрочнению ППД обкаткой роликами, существенно ниже износа контробразцов, работающих в паре трения с образцами без упрочнения обкаткой роликами. Снижение износа при этом достигает 60...75 % и более.

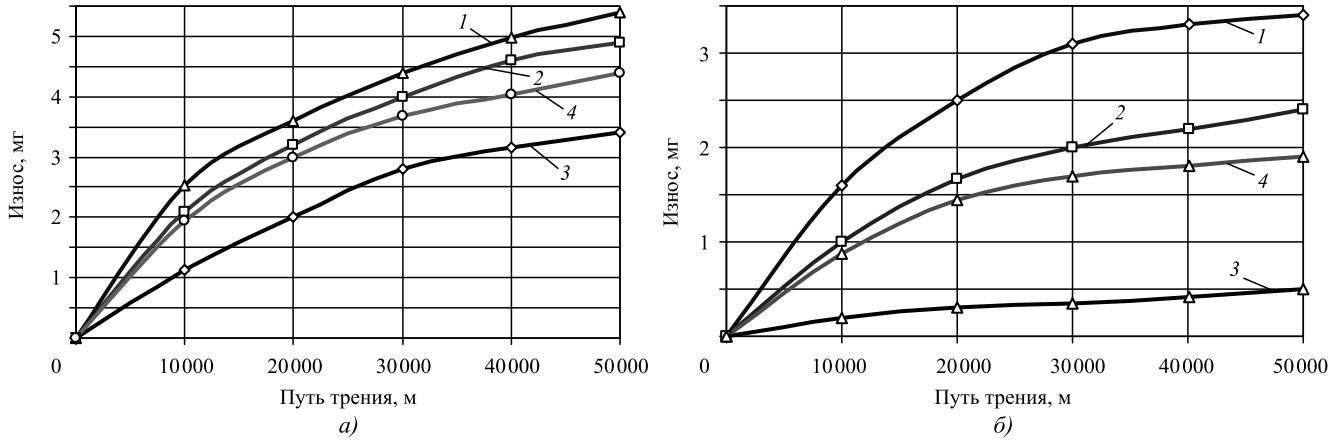


Рис. 4. Износ в зависимости от пути трения образца, наплавленного проволокой Св-08Г2С (*а*) и проволокой Нп-30ХГСА (*б*) под слоем легированного флюса АН-348-А:
1 — P = 0 кН; *2* — P = 5 кН; *3* — P = 10 кН; *4* — P = 12,5 кН

При гидроабразивном изнашивании (рис. 3) наиболее износостойкими являются металлопокрытия, полученные наплавкой под слоем легированного флюса пружинной проволокой класса 2 и проволокой Св-08Г2С, подвергнутые упрочнению ППД обкаткой роликами с силой 5...10 кН. Прирост износостойкости при этом составляет 45 и 40 % для металлопокрытий из пружинной проволоки класса 2 и 28, 32 % для металлопокрытий из проволоки Св-08Г2С при обкатке роликом с силой 5 и 10 кН соответственно (см. рис. 4, 5).

При наплавке образцов под флюсом АН-348-А лучшие результаты показывают металлопокрытия, полученные пружинной проволокой класса 2, обработанные ППД обкаткой роликом с силой 5...10 кН (прирост износостойкости 20 и 30 % при обкатке роликом соответственно).

В условиях граничной смазки лучшую износостойкость показывают образцы, наплавленные проволоками Св-08Г2С, Нп-30ХГСА и пружинной проволокой класса 2 под слоем легированного флюса, обкатанные роликом с силой 10 кН. Прирост износостойкости при этом составляет 20, 30 и 40 % соответственно (см. рис. 4). При использовании флюса АН-348-А лучшие результаты наблюдаются у образцов, наплавленных пружинной проволокой класса 2, обкатанных роликом с силой 5...10 кН. При этом отмечается рост износостойкости 75 % и более.

Наиболее износостойкими наплавленными материалами, работающими в условиях трения без смазки при возвратно-поступательном перемещении и изменяющейся ступенчато по нагрузке (от 0 до 300 Н) являются покрытия, наплавленные под легированным флюсом проволокой Св-08Г2С и пружинной проволокой класса 2, упрочненные ППД обкаткой роликом с силой 10 кН. Снижение интенсивности износа при этом достигает 1,5 и 2 раз для металлопокрытий, полученных наплавкой проволокой Св-08Г2С и пружинной проволокой класса 2 соответственно.

Выводы

Обкатка роликом горячего металла в процессе его наплавки является самостоятельным независимым фактором управления технологическим процессом восстановления изношенных деталей машин, способствует повышению износостойкости формирующегося металлопокрытия, снижает коэффициент трения и улучшает условия работы пары трения.

Сделанный вывод хорошо согласуется с результатами работ [5—7], устанавливающими положительный характер закономерностей воздействия ППД обкаткой роликом горячего наплавленного металла на физико-механические свойства (твердость, микротвердость, остаточные напряжения, структуру и др.) формируемого металлопокрытия, определяющие его эксплуатационные показатели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бойко Н.И., Санамян Г.В.** Малооперационная ресурсосберегающая технология повышения качества наплавленного металла. Ростов н/Д.: РГУПС, 2007. 226 с.

2. **Иванов В.Н., Салихов Р.Ф., Щукин К.В.** Влияние наработки, технических обслуживаний и ремонтов на эксплуатационную производительность дорожно-строительных машин // Изв. вузов. Строительство. 2003. № 3. С. 97—100.

3. **Санамян Г.В.** Пути повышения производительности механической обработки труднообрабатываемых наплавленных материалов // Труды Всерос. науч.-практ. конф. "Транспорт-2010". Ч. 3. Ростов н/Д.: РГУПС, 2010. С. 121—124.

4. **Санамян Г.В., Санамян В.Г.** Технико-экономические предпосылки применения операций упрочнения ППД в технологии изготовления и восстановления деталей машин // Труды Всерос. науч.-практ. конф. "Транспорт-2008". Ростов н/Д.: РГУПС, 2008. С. 337—339.

5. **Бойко Н.И., Зиновьев В.Е., Хачкинаян А.Е.** Технические средства и методы повышения долговечности деталей транспортных машин / под ред. Н.И. Бойко. Ростов н/Д.: РГУПС, 2003. 239 с.

6. **Бойко Н.И., Санамян Г.В.** Исследование механических свойств упрочненного наплавленного металла // Материалы 10-й Междунар. практ. конф. "Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки". Ч. 1. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. С. 62—69.

7. **Бойко Н.И., Хачкинаян А.Е., Санамян Г.В.** Исследование технологических параметров процесса обкатывания роликами наплавленного металла // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 10. С. 34—37.

УДК 621.762:621.373.8

[1]Л.Х. Балдаев, [2]А.Ф. Телегин, [1]С.П. Мерчев, [2]Д.Н. Фролов, [1]А.А. Мацаев
([1]ООО "Технологические системы защитных покрытий", г. Москва,
[2]ОАО "Газэнергосервис", г. Москва)
E-mail: info@tspc.ru

Опыт ремонта турбинных рабочих лопаток газоперекачивающих агрегатов методом прямого лазерного синтеза

Рассмотрены проблема механического износа замковой полки рабочей лопатки турбины высокого давления газотурбинной установки (ТВД ГТУ) и возможности проведения ее восстановительного ремонта методом прямого лазерного синтеза. Проведены металлографические исследования порошкового материала, а также изготовлены образцы-имитаторы и проведены их испытания для определения механических свойств. Выполнен ремонт трех комплектов турбинных рабочих лопаток с проведением комплексных исследований структуры металла и усталостных испытаний деталей.

Ключевые слова: *рабочие лопатки ТВД ГТУ, прямой лазерный синтез, порошковый материал, микроструктура, механические свойства.*

Advantages of direct laser synthesis feeding technique are reviewed. Turbine blade root shelf mechanical wear restoration is described. Powder metallography is performed also testaments for mechanical properties determination are produced. Fatigue properties are investigated and three sets of turbine blades for gas turbines are restored.

Keywords: *high-pressure turbine blades, direct laser synthesis, powder material, microstructure, mechanical properties.*

Введение

Прямой лазерный синтез — семейство процессов модификации поверхностей и аддитивных технологий, получающее сегодня все большее развитие и распространение. Появившаяся более полувека назад технология-прародитель, благодаря существенному снижению цены владения оборудованием, сегодня применима для создания функциональных слоев (антикоррозионная защита, защита от износа, кавитационная защита, защита от удара), а также для восстановления геометрии таких изделий, как пресс-формы, винты, элементы насосов, сегодня по принятой классификации получило название direct metal deposition (DMD) — прямое нанесение металла. Лазерное излучение в качестве источника энергии определяет ряд технологических преимуществ DMD, основное из которых — незначительное тепловложение. Преимущества DMD, а также быстрое его развитие позволяют ведущим производителям турбин, таким как General Electric, Siemens, "Авиадвигатель", рассматривать эту технологию для использования при производстве и ремонте деталей и узлов газотурбинных двигателей. Различным технологиям восстановительного ремонта сфокусированным лазерным излучением посвящены работы [1—4].

Для обеспечения надежной эксплуатации при высоких технико-экономических показателях газоперекачивающие агрегаты (ГПА) требуют своевременного проведения ремонтов и обеспечения ремонтного производства запчастями. Вовлечение в эксплуатацию поврежденных деталей после их восстановления обеспечивает продление ресурса работы деталей и значительно снижает стоимость эксплуатации ГПА.

Однако, несмотря на значительные инвестиции в технологии восстановительного ремонта методом прямого лазерного синтеза, основными причинами, сдерживающими их внедрение в производство и уход от традиционных методов ремонта, является необходимость проведения трудоемкого комплекса исследований и отработки технологического процесса, что требует большого объема сертификационных испытаний и накопления статистики промышленной эксплуатации. Также негативно сказывается удельная стоимость проведения работ ввиду высокой стоимости порошкового материала и оборудования прямого лазерного синтеза в РФ.

Тем не менее технологический процесс восстановительного ремонта геометрии полки рабочих лопаток ТВД ГТУ методом прямого лазерного синтеза — перспективный способ восстановления деталей из-за ряда отличительных особенностей, таких как:

— полная автоматизация процесса производства с минимальным вмешательством рабочего персонала в технологический цикл производства и ремонта деталей;

— минимизация последующей механической обработки;

— равномерность структуры, малая зона термического влияния, отсутствие внутренних и внешних дефектов, отсутствие деформаций изделия в процессе восстановления, получение цельнометаллических деталей с уменьшенным размером зерна.

Таким образом, **цель работы** — разработка технологии восстановительного ремонта рабочих лопаток ТВД ГТУ турбогруппы ГТК 10-4 методом прямого лазерного синтеза с проведением исследований и усталостных испытаний для подтверждения целесообразности и эффективности разработанной технологии.

Исследование износа лопаток

В процессе эксплуатации на некоторых агрегатах происходит механический износ замковой полки рабочей лопатки ТВД в результате их трения о статорную диафрагму направляющего аппарата. Основная причина "наползания" диафрагмы на диск ТВД — перегрев конфузорной части корпуса турбины из-за выдувания внутренней изоляции и продувов горячего газа по разъемам корпуса. Это приводит к неравномерному прогреву конфузорной части корпуса и местному перегреву этой части корпуса, который приводит к наклону и развороту диафрагмы. Из-за наклона периферия диафрагмы приближается к диску ТВД и задевает за рабочие лопатки в зоне замковой полки (рис. 1).

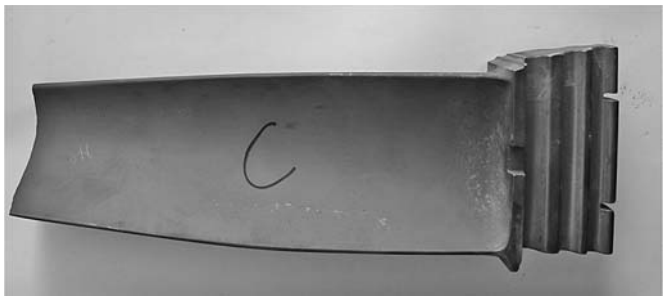


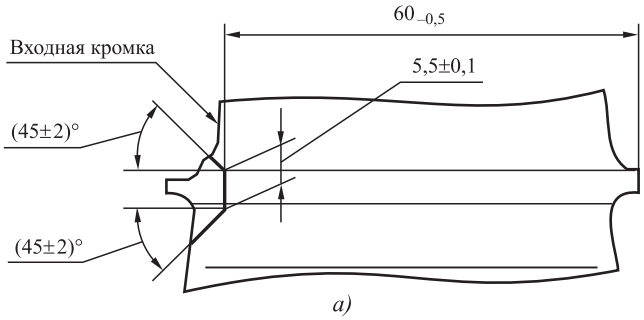
Рис. 1. Механический износ рабочей лопатки ТВД

Дефект, получаемый в результате задевания, характеризуется различной глубиной износа. Ранее подобный дефект на рабочих лопатках признавался неремонтопригодным, так как применение наплавки в зоне замковой полки считалось недопустимым. Корневое сечение пера лопатки и зона замка, где располагается полка, испытывают наибольшие напряжения в процессе работы. Применение традиционных методов дуговой сварки [5] для восстановления геометрии увеличивает риск развития трещины вследствие большого тепловложения в зону наплавки. Структурные и фазовые превращения, микро- и макронеоднородности, а также остаточные напряжения, образующиеся в процессе, являются недопустимыми для замковой части рабочей лопатки.

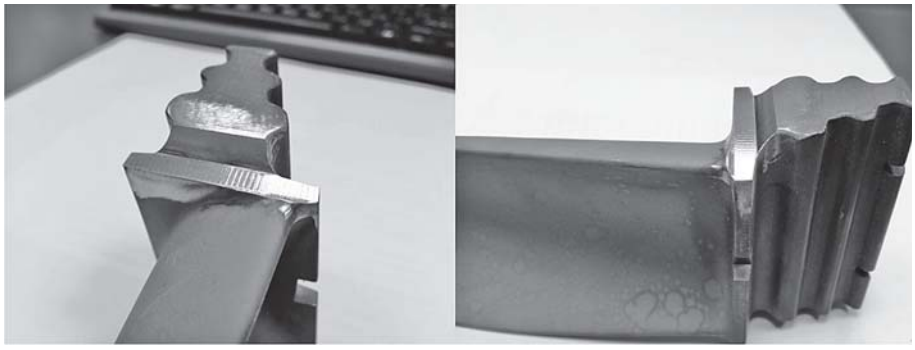
Для применения лазерной технологии был проведен люминесцентный контроль на отсутствие трещин и дефектов в зоне износа, выходящих на поверхность пера лопатки.

Проанализировав размеры и форму износа на трех комплектах рабочих лопаток, были определены тип механической разделки дефекта под наплавку со стороны входной кромки пера и ее форма при длине разделки менее 65,5 мм (рис. 2). Технология восстановления должна обеспечивать наплавку с получением чертежных размеров полки плюс припуск, достаточный для механической обработки.

Были определены нормы дефектов после наплавки: цепочки пор, группы точечных кучных дефектов, трещины любого вида и происхождения не допускаются. В наплавленном металле и прилегающей к нему зоне не допускаются более пяти дефектов диаметром более 0,3 мм; при этом расстояние между ними должно быть не менее 8 мм. Поры и раковины размером менее 0,3 мм допускается механически зачистить с плавным переходом к основному металлу. В противном



а)



б)

Рис. 2. Форма разделки механического износа полки рабочей лопатки (*а*) и общий вид лопатки после механической обработки под восстановление (*б*)

случае поверхностные дефекты должны быть локально разделаны и наплавлены вновь.

Подготовка лопаток к ремонту

Для освоения технологии ремонта с применением прямого лазерного синтеза были использованы три комплекта лопаток (в комплекте 90 лопаток) с наработкой от 20 000 до 50 000 ч. Назначенный ресурс лопаток составляет 50 000 ч.

Рабочие лопатки ТВД изготовлены из заготовок, штампованных под прессом из горячекатаных и кованых прутков жаропрочного сплава на никелевой основе ХН65ВМЮТ-ВИ (ЭИ893-ВИ) по ТУ 108.02.027—79 (табл. 1).

Все лопатки предварительно прошли восстановительную термообработку по режиму: 1050 °С, 2 ч, охлаждение в вакууме со скоростью 30 °С/мин. Микроструктуру металла лопаток определяли на образцах, вырезанных из лопаток каждого комплекта. Исследование микроструктуры показало ее полное соответствие типовой структуре сплава ЭИ893-ВИ, ее однотипность во всех участках лопаток со средним размером зерна, соответствующим 1—3-му номерам зерен по шкалам 1 и 2 ГОСТ 5639—82.

Механические свойства определяли на стандартных образцах (тип 3) по ГОСТ 1497—84 при комнатной температуре (табл. 2). Из таблицы следует, что прочностные и пластические свойства металла лопаток полностью соответствуют требованиям ТУ.

Проведение ремонта замковой полки лопаток, проведение исследований и испытаний деталей

Для ремонтного восстановления лопаток был выбран порошковый материал стандартной фрак-

Таблица 1

Химический состав сплава ЭИ893-ВИ, % мас.

Fe	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ce	Mo	W	Ti	Al	B
До 3	До 0,07	До 0,6	До 0,6	60,968...70,6	До 0,012	До 0,015	15...17	До 0,025	3,5...4,5	8,5...10,0	1,2...1,6	1,2...1,6	До 0,01

Таблица 2

Механические свойства материала ремонтируемых лопаток

Зона выборки образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	$\sigma_в$, МПа	δ, %	ψ, %
Перо	557...590	984...994	39...42	34...42
Замок	541...548	953...967	39...41	37...43
ЭИ893-ВИ по ТУ 108.02.027—79	490...666	⩾883	⩾20	⩾25

ции 50...150 мкм марки Inconel 625 (табл. 3, рис. 3). Материал Inconel 625 является свариваемым, не уступает по механическим свойствам и температуре эксплуатации сплаву лопаток — ЭИ893-ВИ (до 982 °С), устойчив к широкому спектру коррозионных сред и к газовой коррозии при температурах выше 780 °С.

Для определения механических свойств наплавленного методом прямого лазерного синтеза металла были изготовлены образцы согласно ГОСТ 1497—84 (цилиндрические образцы типа 3) и проведены их испытания. Образцы изготовлены с применением иттербиевого волоконного лазера с максимальной мощностью излучения 3000 Вт (модель IPG Photonics YLS-3000). Подачу порошкового материала осуществляли коаксиально с оптической системой (модель Precitec YC-52). В качестве защитной среды использовали аргон высокой чистоты с объемным содержанием не менее 99,998 %. Инертный газ подавали локально в ванну расплава.

Таблица 3

Химический состав порошкового сплава Inconel 625, % мас.

Ni	Cr	Mo	Nb	Fe	C	Mn	Si
Основа	20...23	8...10	3,15...4,15	5	0,1	0,5	0,5

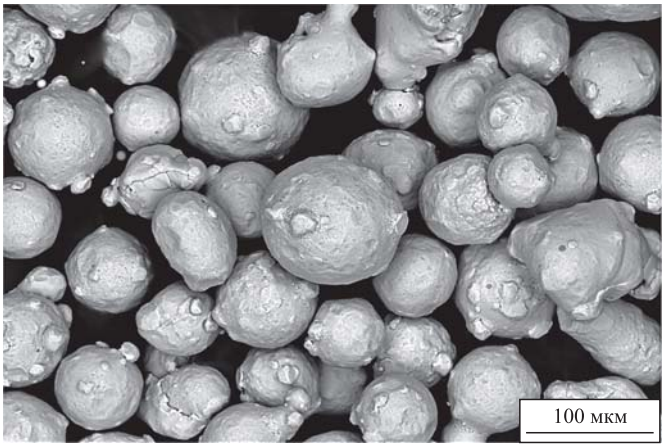


Рис. 3. Порошковый материал Inconel 625 фракции 50...150 мкм

После изготовления образцы были термообработаны в электропечи по режиму: (1050 ± 10) °С, 40 мин, охлаждение на воздухе.

Результаты исследований приведены в табл. 4, из которых следует, что прочностные свойства наплавленных образцов, изготовленных с применением лазерной технологии из порошкового сплава Inconel 625, превышают справочные данные для этого сплава. Однако по сравнению с ЭИ893-ВИ наплавленный сплав Inconel 625 несколько уступает материалу лопаток по характеристике временное сопротивление (примерно на 15 %), по пределу текучести — на 3 %. На основании полученных результатов механических испытаний был подобран рациональный режим лазерной наплавки.

По выбранному режиму было выполнено восстановление замковой полки на шести лопатках (рис. 4).

В процессе восстановительных работ выполняли следующие операции:

1. Визуальный, размерный и капиллярный контроль.

2. Контроль твердости материала лопаток (не более 30 HRC).

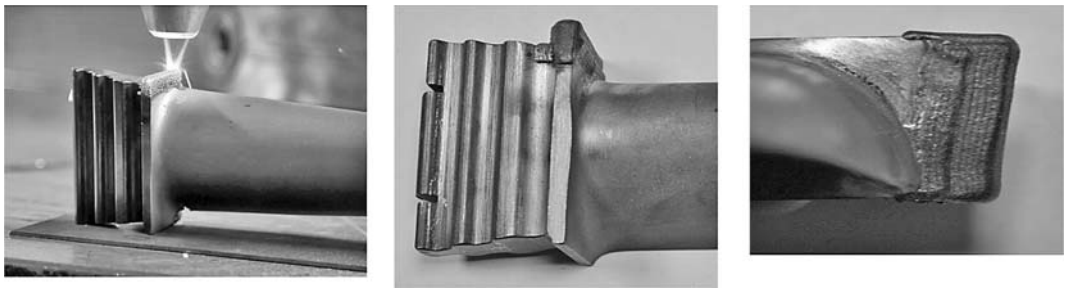


Рис. 4. Наплавленный участок замковой полки

Таблица 4

Механические свойства наплавки из сплава Inconel 625 в сравнении с ЭИ893-ВИ

Параметр	Inconel 625 (образцы)	Inconel 625 (справочное)	ЭИ893-ВИ (перо)	ЭИ893-ВИ по ТУ 108.02.027—79
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	495...610	⩾414	557 ... 590	490...666
Временное сопротивление $\sigma_в$, МПа	848...872	⩾827	984 ... 994	⩾883

а) *б)*

Рис. 5. Результаты люминесцентного контроля лопатки:
а — наличие подповерхностных дефектов; *б* — после корректировки режима наплавки — отсутствие дефектов

3. Контроль микроструктуры и определение размера зерна на вырезанных микрошлифах до и после восстановительной термической обработки.

4. Рекомендуемый режим восстановительной термообработки: нагрев до (1050 ± 10) °С с выдержкой от 2 до 3 ч и последующим охлаждением на воздухе, затем старение с нагревом до (840 ± 10) °С и выдержкой в течение не менее 12 ч с последующим охлаждением на воздухе.

5. Механическая обработка (подготовка поверхности для лазерной наплавки).

6. Термообработка по режиму: 400 °С, выдержка 30 мин.

7. Люминесцентный контроль.

8. Восстановительный ремонт порошковым материалом Inconel 625.

Проведенный люминесцентный контроль (класс чувствительности I по ГОСТ 18442—80), а также металлографические исследования лопаток после механической обработки выявили внутренние и подповерхностные дефекты: цепочка пор с нерасплавленными частицами порошка вдоль линии сплавления с основным металлом лопатки, поры треугольной формы между слоями валиков (сторона треугольника 450 мкм), неметаллические включения (размером до 300 мкм) и нерасплавленные частицы порошка (диаметром до 80 мкм). При этом металл наплавки на лопатках однородный, имеет единичные дефекты в исследуемых сечениях (рис. 5, *а*).

Проведенная дополнительная корректировка технологических параметров — уменьшение количества подаваемого порошкового материала в ванну расплава с увеличением перекрытия валиков, — позволила избавиться от данных дефектов (рис. 5, *б*), а также улучшить микроструктуру наплавки, которая стала более однородной и не имела дефектов. Зона термического влияния минимальна по ширине и не меняет структуры основного металла входной кромки в прикорневом сечении (рис. 6), что свидетельствует о минимальном тепловложении в зону наплавки и является основным преимуществом по сравне-

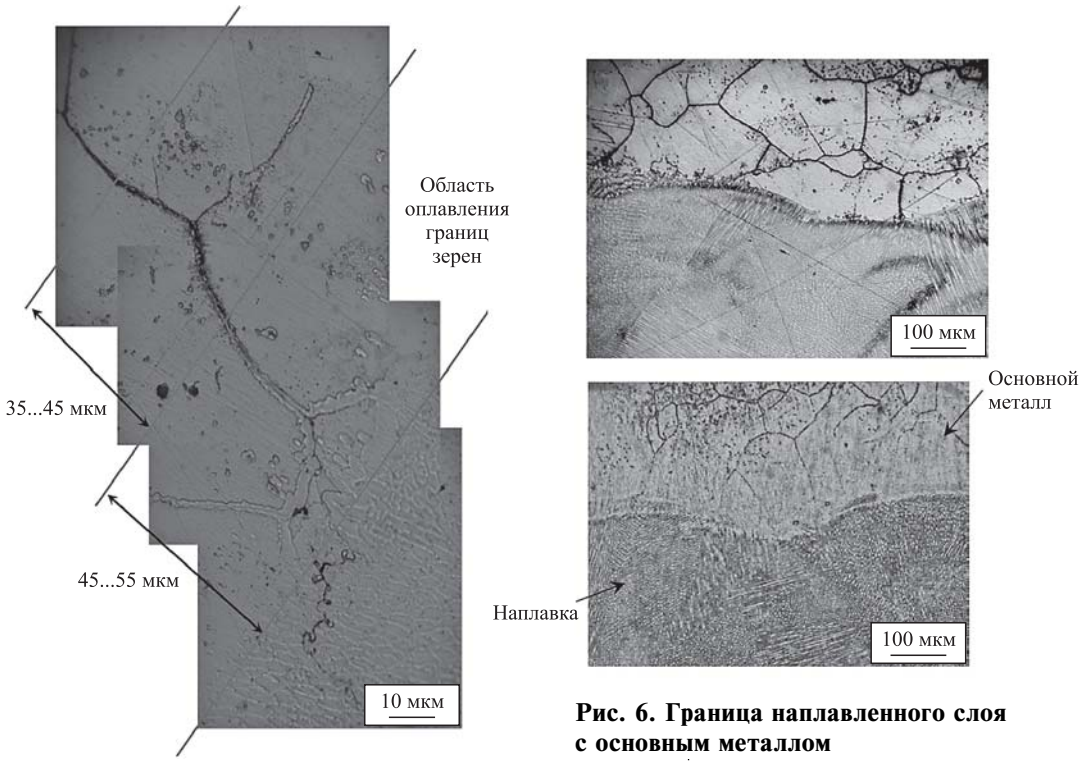


Рис. 6. Граница наплавленного слоя с основным металлом

нию с дуговой сваркой. Каких-либо изменений в микроструктуре металла входной кромки в сечении, максимально приближенном к ремонтной наплавке полки, не установлено.

Чтобы оценить влияние прямого лазерного синтеза на условный предел выносливости лопаток были проведены усталостные испытания путем возбуждения резонансных механических колебаний профильной части пера лопатки по первой изгибной форме при нормальной температуре при симметричном цикле нагружения. Как было установлено, условный предел выносливости σ_{-1} лопаток находится в диапазоне 240...260 МПа, со средним значением 257 МПа, что соответствует значению σ_{-1} для новых лопаток 250 МПа.

При этом следует отметить, что испытания проведены на лопатках с наработкой, бывших в эксплуатации. Результаты испытания подтверждают отсутствие критичного влияния прямого лазерного синтеза на отремонтированную лопатку.

Заключение

Полученные результаты позволяют утверждать, что лопатки с восстановленной замковой полкой методом прямого лазерного синтеза могут быть установлены в турбину и эксплуатироваться дальше, что свидетельствует о качественном выполнении ремонта методом прямого лазерного синтеза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Brandt M., Harris J., Chipperfield C.** In-situ laser repair of steam turbine blades // Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing. Munich, June 2007.
2. **Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н.** Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: Изд-во политехнического университета, 2013. С. 56—65.
3. **Dutta B., Palaniswamy S., Choi J. et al.** Additive Manufacturing by Direct Metal Deposition // Advanced materials & processes. May 2011. P. 33—36.
4. **Ермолаев А.С., Иванов А.М., Василенко С.А.** Лазерные технологии и процессы при изготовлении и ремонте деталей газотурбинного двигателя // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2013. № 35. С. 49—63.
5. **Белявин А.Ф., Куренкова В.В., Федотов Д.А., Салий С.Г., Щербинин А.П.** Продление ресурса рабочих лопаток ГТК 10-4 из сплава ЭИ 893 после продолжительного срока эксплуатации // Автоматическая сварка. 2016. № 4 (752). С. 9—25.

УДК 620.179.4:621.793

Е.М. Биргер, В.Е. Архипов[1], А.Н. Поляков[1]
([1]Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва)
E-mail: mnsv@mail.ru

Триботехнические и коррозионно-стойкие покрытия на основе меди и цинка: современное состояние технологии газодинамического напыления и основные свойства покрытий

Приведены результаты исследований, экспериментов и испытаний покрытий, нанесенных газодинамическим напылением с использованием порошков латуни, цинка, меди, а также механической смеси меди с разными металлами и соединениями, опубликованные в зарубежных изданиях. Описано получение качественного покрытия латуни практически без содержания пор и отмечено положительное влияние предварительной термической обработки на процесс напыления. Показано, что добавки к меди MoS_2 снижают коэффициент трения с 0,7 до 0,14. Измельчение исходного размера частиц меди до 20 нм значительно снижает пористость и увеличивает твердость, а последующая термическая обработка повышает механические свойства покрытия, например прочность на изгиб. Большое внимание уделено исследованию влияния формы сопла на эффективность процесса напыления.

Ключевые слова: *газодинамическое напыление, покрытие, механические, коррозионные, трибологические свойства, структура, термическая обработка.*

The results of studies, experiments and tests of coatings applied by gas-dynamic deposition using powders of brass, zinc, copper, as well as mechanical mixture of copper with different metals and compounds, published in foreign editions, are presented. High-quality brass coating with virtually no pore content is obtained and positive effect of pre-heat treatment on the deposition process is noted. It is shown that additives to copper MoS_2 significantly reduce the coefficient of friction from 0.7 to 0.14. Grinding of the initial size of copper particles to 20 nm significantly reduces porosity and increases hardness, and subsequent heat treatment increases the mechanical properties of the coating, for example, bending strength. Considerable attention is paid to the study of the influence of the nozzle shape on the efficiency of the deposition process.

Keywords: *gas-dynamic deposition, coating, mechanical, corrosion, tribological properties, structure, heat treatment.*

Газодинамическое напыление медных порошков и смесей

Исследование трибологических характеристик двух видов покрытий [1], полученных газодинамическим напылением (ГДН) — Cu и композитное покрытие Cu—MoS_2, в условиях сухого трения показало, что небольшая добавка MoS_2 (1,8 ± ± 0,99 % мас.) может существенно уменьшить коэффициент трения (0,7 для меди, 0,14 для композитного покрытия). При этом темп износа был высокий в начале скольжения (8,61...12,8 нм глубины на цикл за первые 100 циклов) и существенно снижался впоследствии (0,12...0,22 нм за цикл), что авторы [1] объясняют постепенным выделением MoS_2 на изношенных участках и притиркой. Впоследствии накопления MoS_2 вымываются из бороздок и выводятся из зоны трения. Динамику процессов, а именно перенос материалов и фазовые превращения, отслеживали с использованием сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской рамановской спектроскопии.

Условия эксплуатации часто требуют особых свойств поверхности, которые могут быть получены, например, с использованием композиционных материалов. В работе [2] авторы исследовали свойства композитных покрытий, полученных ГДН порошков на основе меди с примесями B_4C, TiB_2 и TiC. Микроструктуру полученных слоев изучали с использованием сканирующей электронной микроскопии и анализа дифракции в рентгеновском излучении. Кроме того, измеряли твердость, износостойкость и электропроводность образцов, а также проводили тесты на коррозионную стойкость в среде Cl^-. Во всех случаях использованная технология позволяет получать сплошные покрытия высокого качества и с хорошей прочностью сцепления с основой. Электрохимические тесты не показали влияния присадок на изменение коррозионной стойкости медных покрытий. Более того, наилучшие результаты по износостойкости при испытании в условиях сухого трения были получены для чисто медных слоев. По мнению авторов, снижение износостойкости для композитных покрытий объясняется расслаиванием структуры металла покрытия и удалением примесей (добавок) по мере износа. Важный результат — отсутствие влияния керамических присадок на механические и электромеханические свойства покрытий, нанесенных методами ГДН.

Часто повышения служебных характеристик покрытий добиваются простым подбором (оптимизацией) технологических режимов. В частности, в работе [3] были оптимизированы режимы ГДН медных покрытий и покрытий из смеси Cu + Al_2O_3 (при концентрации оксида алюминия 10, 20 и 30 % мас.), при использовании которых покрытия имели высокую плотность. Добавки Al_2O_3 позволили получить покрытия с более высокой твердостью и существенно более высокой износостойкостью по сравнению с покрытиями из чистой меди. Естественно, что коэффициент трения был наименьшим для покрытия из чистой меди среди всех испытанных вариантов. Механизмы износа, отмеченные авторами: абразивный, усталостный и окислительный.

В работе [4] авторы решали задачу оптимизации режимов напыления для улучшения связи между медным покрытием и алюминиевой подложкой в целях улучшения электропроводности определенных деталей. Авторы этой работы, как и многие исследователи метода холодного ГДН, помимо собственно процесса напыления изучали влияние последующей термообработки на свойства покрытий. При последующем отжиге получали прочные покрытия не только с улучшенными электрическими, но и повышенными механическими свойствами, например прочности на изгиб.

Интересные сравнительные исследования проведены китайскими специалистами, которые оценивали некоторые свойства ГДН-порошков меди разной зернистости [5]. Напыление медных порошков, полученных криопомолом и распылением расплава в газовой среде, проводили на алюминиевую подложку. Особое внимание было

обращено на формирование покрытия и трибологические свойства нанокристаллических слоев меди и их сравнение с покрытиями меди, полученными при напылении порошков традиционных размеров. При напылении порошков меди после криопомола получали плотные покрытия с размером зерна порядка 30 нм, которые имели повышенную твердость и износостойкость, что объясняется особым строением структуры и размером зерна. При этом практически отсутствовали видимые следы растрескивания. Авторы делают вывод, что параметры холодного напыления нанопорошков и свойства получаемых покрытий имеют существенные отличия от традиционного процесса ГДН, где используют порошки меди с размером зерна в десятки-сотни микрометров.

В работе [6] напыляли толстые покрытия (депозиты), используя порошки чистой меди. Исследовали эволюцию микроструктуры и механические свойства покрытия после напыления и последующей термической обработки (отжига). В качестве одной из наиболее важных задач исследования рассматривали анизотропию механических свойств депозитов, нанесенных методом ГДН, что особенно важно при использовании методов ГДН для аддитивного изготовления или восстановления деталей. Авторы утверждают, что такое исследование проведено впервые. Результаты показывают, что плотность напыленного покрытия увеличивается после отжига, при этом твердость снижается, а предел прочности возрастает. После отжига увеличивается также и растрескивание. Очевидно, что определена существенная механическая анизотропия в депозитах (покрытиях) меди. Максимальный предел прочности определен под углом 30°, в то время как минимальные значения — под углом 90°. Особо критичными являются участки между соседними технологическими проходами, где прочностная анизотропия наибольшая. Для улучшения этих параметров предлагается последующая термообработка и напыление под несколькими углами одновременно.

Другим, достаточно важным характеристикам процесса напыления, была посвящена работа [7] индийских специалистов, в которой оценивали свойства медных покрытий в сочетании с латунными подложками. Исследования проводили в PEC University of Technology, Chandigarh, медный порошок напыляли на подложку из латуни ASTM B 36 (Cu — 64,0...68,5 %; Pb — 0,15 %; Fe — 0,05 %; Zn — остальное), используя ГДН низкого давления. Режим напыления: давление 104...120 psi (1 psi = 6894,76 Па) при использовании воздуха и аргона, температура 350...400 °С, дистанция 2,5...7,5 мм. Использовали коммерчески доступные медные порошки Centreline Ltd. (Windsor, Canada) с поперечным размером частиц не более 45 мкм. Целью данной лабораторной работы было исследование применимости и эффективности медных покрытий, нанесенных ГДН для снижения или устранения электрохимической коррозии сплавов латуни в условиях воздействия морской (NaCl) и промышленной (Na_2SO_4) агрессивной среды. Авторы провели анализ публикаций и определили, что открытых работ и данных, посвященных коррозионной стойкости медных ГДН-покрытий, на момент постановки эксперимента нет. В то же время результаты такой работы могли бы быть полезными при разработке технологий ГДН в электротехнических приложениях.

При обработке результатов и анализе продуктов коррозии использовали гравиметрический анализ, методы рентгеновской дифракции, сканирующей электронной микроскопии и электронной зондовой микроскопии [7]. Образцы латуни с медным покрытием показали в зависимости от режимов напыления меньшие изменения массы, а покрытие, в основном, оставалось неповрежденным. Дифракционный и спектральный анализы покрытия после испытаний показали помимо основной фазы (Cu) наличие значительного количества оксидов Cu_2O и ZnO в покрытии, что зависело от параметров напыления.

Необходимо отметить и работы, использовавшие математический аппарат и компьютерное моделирование для оптимизации режимов ГДН и элементов оборудования для холодного газодинамического напыления порошков меди. В частности, большой интерес может представлять работа [8], где авторы оптимизировали конструкцию сопла для напыления мелкозернистого медного порошка (5 мкм), используя численные методы моделирования. При напылении на стальную подложку через сопло диаметром 7 мм и длиной ствола 200 мм скорость потока составляла 585 м/с при давлении воздуха 3 МПа. Практически в 8 раз увеличена производительность напыления при использовании оптимизированного сопла, хотя скорость частиц была даже меньше по сравнению с напылением традиционным соплом. По сравнению с традиционной конфигурацией удалось значительно увеличить толщину напыленного слоя и твердость покрытия (рис. 1, 2) при тех же режимах напыления.

В другой, более современной, работе [9] провели существенно больший объем численного моделирования для оптимизации процессов напыления частиц меди диаметром 5 мкм. В частности,

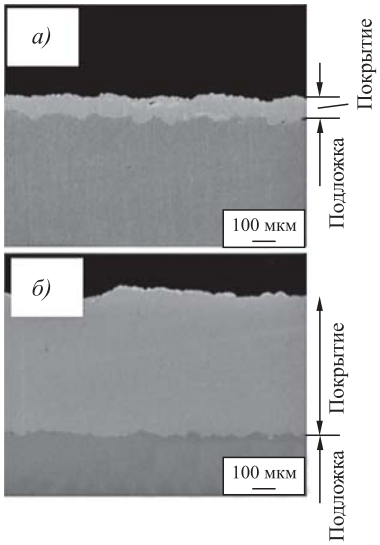


Рис. 1. Сравнение поперечных сечений образца после напыления традиционным соплом (*а*) и специальным соплом (*б*)

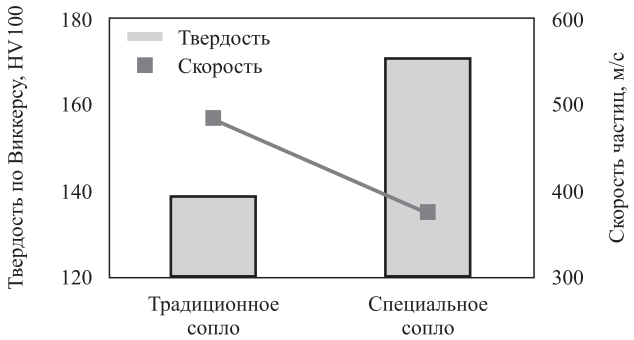


Рис. 2. Сравнение твердости по Виккерсу и скорости частиц меди при напылении традиционным и оптимизированным соплом

Таблица 1

Оптимальные параметры сопла для напыления частиц меди 5 мкм

Параметр	Воздух и азот	Гелий
Входной диаметр, мм	15	20
Длина сходящейся части, мм	13,66	16,1
Диаметр перетяжки (горловины), мм	2	2
Длина расходящейся части, мм	35,99	48,22
Диаметр на выходе, мм	9	9,2
Длина ствола, мм	144,1	131,78

параметрами для оптимизации служили тип рабочего газа, его давление и температура, размеры частиц меди, а также диаметр сопла на выходе и конфигурация ствола. В табл. 1 представлены параметры оптимизированного сопла, использованного для моделирования процессов напыления.

Холодное газодинамическое напыление латуней

Медно-цинковые сплавы обладают высокими прочностными и антикоррозионными свойствами. В то же время изготовление объемных деталей или их частей традиционными методами порошковой металлургии является затруднительным из-за высокого давления паров цинка. Эти проблемы можно решить при холодном газодинамическом напылении. В таком процессе твердые частицы порошка, разогнанные до сверхзвуковых скоростей потоком газа и не подвергнутые длительному тепловому воздействию, осаждаются на подложке, образуя покрытия высокой плотности.

Среди немногочисленных работ по исследованию покрытий из латуни заслуживает внимания работа японских ученых [10], при постановке которой предполагали провести лишь минимум исследований в целях определения возможности ГДН латуни достаточно сложного химического состава. Работа была поставлена на высоком техническом уровне с привлечением высококлассного современного аналитического оборудования. Для напыления авторы использовали порошки Cu—Zn—Mn—Al—Fe латуни со средним диаметром зерна 30 мкм, полученные распылением в воду. Порошок напыляли на алюминиевую подложку струей предварительно разогретого до 873 K азота. Порошок использовали в двух состояниях: с предварительным отжигом и без него. Порошок латуни без отжига состоял преимущественно из бета-твердого раствора, в то время как порошок после отжига при 1023 K включал в себя и альфа- и бета-растворы.

С использованием холодного ГДН обоих видов порошка латуни были получены покрытия толщиной до 3 мм с почти 100%-ной плотностью (очень низкой пористостью). Более высокая эффективность напыления отмечена при образовании покрытий из порошка с предварительным отжигом. Общий вывод — холодное ГДН является реальным методом получения латунных покрытий высокой прочности.

При анализе результатов газодинамического напыления покрытия меди и латуни можно отметить совместную работу, которую выполнили российские и канадские ученые [11]. При выполнении исследований были оптимизированы медно-цинковые порошковые смеси в целях получения покрытий, снижающих энергетические

потери в электрических контактных проводах железнодорожного транспорта. ГДН проводили на плоские поверхности образцов из наклепанной меди. Для напыления использовали два варианта порошков — чистый медный и его смесь с 20...30 % порошка цинка. Напыление выполняли струей нагретого воздуха (300 °С) при скорости потока 90 % скорости звука.

Среди основных результатов, которые отмечают авторы, — слоистость покрытия, образующаяся при напылении порошка меди, при которой происходит некоторое снижение прочности сцепления (до 3...5 МПа). При напылении смеси меди и цинка наблюдали более высокую прочность сцепления (до 10,4 МПа при содержании 20 % Zn и до 12,3 МПа при содержании 30 % Zn) и снижение слоистости, которую к тому же никогда не наблюдали в зонах, обогащенных цинком. Микрофотографические изображения получали с помощью растрового (сканирующего) электронного микроскопа.

Как правило, при напылении смеси порошков зона вблизи подложки была насыщена цинком и содержала 50...54 % Zn (начальное содержание Zn было 20 %). При этом слоистость уменьшалась, а прочность сцепления росла. Таким образом, оптимальной является смесь используемых порошков с содержанием цинка 50...54 %. При увеличении содержания цинка в смеси прочность сцепления существенно растет, в частности, при содержании в смеси 50 % Zn, прочность сцепления повышалась до 19,9 МПа. Однако увеличение содержания цинка приводит к нежелательному снижению электропроводности напыленного слоя. В большом количестве экспериментов (порядка 1/3 от общего числа) наблюдали растрескивание напыленного слоя. Растрескивания не наблюдали в зонах, обогащенных цинком. По мере увеличения содержания цинка в порошковой смеси растрескивание снижалось и не наблюдалось вообще при содержании в смеси 50 % Zn.

Другая работа является дипломным исследованием, проведенным в условиях лабораторий Академии ВМФ США [12]. Автор предполагает, что эта работа является первым серьезным исследованием микроструктуры и свойств покрытий из латуни при холодном газодинамическом напылении смеси порошков меди и цинка. Процессы ГДН чистой меди достаточно хорошо исследованы, известны и параметры оптимизации ГДН цинка и его сплавов. В то же время открытых публикаций по ГДН латуни практически нет. Автор использовал бинарный сплав Cu—Zn как модельную систему. Медь и цинк формируют простой твердый раствор замещения с единственной фазовой областью при концентрации цинка до 35 % мас.

Дополнительным фактором является то обстоятельство, что температура плавления сплава уменьшается с увеличением содержания цинка. Известно также, что сплавы латуни имеют очень низкие уровни энергии дефектов кристаллической решетки (stacking fault energies), что повышает вероятность наклепа и по совокупности свойств повышает сцепляемость напыляемых частиц с подложкой для начальных напыляемых слоев. Такая концепция была подтверждена еще полвека назад для меди и медно-цинковых сплавов.

Таким образом, в соответствии с отмеченной концепцией предполагается, что чем больше цинка добавлено к меди, тем большего числа и более разветвленной дислокационной структуры можно ожидать. Соответственно, в образцах Cu—Zn после холодной обработки твердость должна быть существенно выше, а размер зерна в таких сплавах существенно меньше, чем у чистой меди после холодной обработки. Отсюда можно достаточно обоснованно предположить, что в холодном ГДН, где происходит существенная пластическая деформация материалов с образованием большого количества дислокаций, должны образоваться покрытия высокой твердости, что приводит к ухудшению сцепляемости для последующих слоев. Такой механизм предполагает, что при напылении материалов с более высокой твердостью получают более тонкие покрытия из того же самого количества порошка.

Термодинамика и механика поведения газовых потоков в холодном ГДН достаточно хорошо исследованы, в то время как эффекты влияния состава и микроструктуры исходного порошка на параметры самого процесса и структуру результирующего покрытия по-прежнему остаются в большой степени не изученными. В данной диссертационной работе исследовали эффективность осаждения, толщину покрытия, получаемую за один проход, твердость, пористость и изменения структуры как функции давления, температуры и состава напыляемой порошковой смеси.

Латунные сплавы были успешно напылены с использованием ряда различных композиций порошков, основными из которых были по массовому соотношению Cu/Zn: 100/0; 90/10; 80/20; 70/30. Эффективность напыления с увеличением содержания цинка в порошке с 0 до 10 % увеличивается на 67 %, а затем быстро падает по мере повышения доли цинка. Предполагается, что начальное увеличение производительности связано

с уменьшением температуры примерно на 5 %, однако последующее снижение эффективности напыления автор относит к уменьшению энергии дислокаций и соответственному повышению твердости и уменьшению пластичности.

Твердость покрытия увеличивалась с повышением содержания цинка в порошке. В частности, при напылении смеси Cu—Zn 70/30 % мас. твердость достигала 3,31 ГПа, что существенно выше, чем в самом порошковом материале и тем более в медных покрытиях. Очевидно, что эти результаты связаны с механизмами дислокаций, упомянутыми выше.

Микроструктура латуней, полученных при холодном ГДН, сложная. Автор отмечает, что, несмотря на то, что напыление покрытий из латуни не представляло особой проблемы, результирующие покрытия не были монолитными. Пористость, наблюдавшаяся во всех напыленных латунях, была много выше, чем для всех медных покрытий, напыленных при тех же условиях. К примеру, при напылении смеси Cu—Zn 90/10 % мас. пористость достигала 400 % от случая напыления чистой меди, т.е. пустоты составляли не менее 25 % площади поперечного сечения покрытия. Пористость медных покрытий может составлять всего 0,1 % при оптимальных параметрах напыления. Наблюдалась строгая корреляция между повышением температуры напыления и увеличением пористости. Предположительно, цинк выщелачивается из твердого раствора в паровой фазе. При этом состав собственно латуни неравномерно меняется и распределяется по площади и глубине, значительно отличаясь от состава напыляемой смеси [13].

Особо отмечается процесс холодного газодинамического напыления смеси из нанопорошков. Используя криопомол, автор получил нанозернистые порошки, которые отличаются от коммерчески доступных значительно меньшим размером зерна. Параметры ГДН нанокристаллических порошков меди и цинка несколько отличаются от таковых для ГДН микрокристаллических порошков. Более того, результаты напыления покрытий также оказались принципиально отличными. В частности, были получены латунные покрытия высокого качества практически без пористости для смеси Cu—Zn в отношении 90/10 % мас. Эффективность напыления нанопорошков значительно ниже, чем для стандартных порошков. Твердость медного слоя, напыленного из нанопорошков, приближается к 4 ГПа, что на 40 % выше, чем в стандартном случае.

В работе [14], проведенной в Германии и недавно доложенной на международной конференции по газотермическому напылению, сделан серьезный шаг в сторону промышленного применения технологии ГДН латуни. Современные методы изготовления подшипников скольжения предполагают пайку компонентов из латуни к соответствующим частям изделия, что дорого и энергоемко. Более того, до сих пор большинство таких подшипников все еще содержит свинец, который представляет собой опасность для здоровья персонала и должен быть исключен из процесса производства в соответствии с требованиями ЕС к новым деталям.

Авторы доклада демонстрируют возможность применения метода ГДН для аддитивного наращивания подшипников в соответствующих местах детали. Одним из важных параметров для трибологического поведения покрытия и его адгезии с основой является шероховатость поверхности подложки. Особое внимание в данной работе и было уделено исследованию влияния шероховатости поверхности на адгезию покрытия из латуни. Результаты исследования материалов основы, зернистости шлифовального материала, давления в пескоструйном аппарате и т.д. показали, что при оптимизации режимов возможно 200%-ное повышение прочности сцепления покрытия с подложкой, тем самым создавая необходимые условия для технологии аддитивного наращивания подшипников скольжения из латуни без примеси свинца.

Газодинамическое напыление цинка

Работ по ГДН цинка в открытой печати мало. В основном в работах рассмотрено применение смесей цинка с другими материалами в качестве материала для ГДН. Цинк регулярно используют для катодной защиты стали. Известны многочисленные исследования свойств защитных покрытий из цинка и его сплавов и режимов их нанесения различными методами. Более 60 % цинковых покрытий наносят гальваническими методами. Большое количество работ посвящено газотермическим методам напыления покрытий из цинка и его сплавов [15].

Тем не менее можно отметить публикацию нескольких авторов, в которую вошли результаты многих оригинальных исследований, выполненных коллективно или индивидуально. В работе [16] рассмотрены режимы нанесения покрытий из порошка цинка на подложку из углеродистой стали. Данная работа является пионерским и широким исследованием технологии ГДН и ее возможностей для нанесения антикоррозионных покрытий из цинка и различных комбинаций

на его основе. Помимо оптимизации параметров технологии для напыления достаточно толстых, плотных слоев, авторы исследовали влияние термообработки цинковых покрытий до температуры 150 °С на их коррозионные свойства. Показано, что такая обработка во много раз повышает электрокоррозионные свойства цинковых покрытий, что делает метод ГДН конкурентоспособным применительно к их нанесению (табл. 2).

Другая работа, которую следует отметить, это исследования китайских специалистов в области композиционных покрытий с цинком [17]. В данной работе исследовали композиционные покрытия, полученные напылением комбинаций материалов Zn, Ni и Al_2O_3. В основном авторов интересовало влияние содержания Ni на микроструктуру, механические и трибологические свойства покрытия. Материал подложки — сталь следующего химического состава, %: 0,49 C; 0,37 Si; 0,40 Mn, остальное — Fe. Режимы напыления: расстояние до поверхности — 25 мм; производительность питателя — 12 г/мин; температура газа — 400 °С; скорость перемещения сопла — 20 мм/с; давление сжатого воздуха — 0,6 МПа. Предварительные эксперименты по отработке режимов позволили установить, что устойчивые режимы напыления легко получить при массовом соотношении Zn:Ni в смеси порошков 1:4 или менее.

Согласно картине рентгеновской дифракции композитные покрытия преимущественно состояли из металлических фаз Zn и Ni, а также керамической составляющей Al_2O_3. Содержание последнего уменьшается при увеличении содержания никеля в смеси порошков. Изменение содержания никеля в смеси порошков практически не меняло микротвердость и прочность сцепления покрытия, которые всегда существенно выше, чем для чистого порошка цинка. Средние значения коэффициента трения 0,50...0,52 мало изменялись при содержании Ni в смеси от 10 до 25 %. Износостойкость композиционного покрытия во всех экспериментах более высокая, чем в случае чисто цинкового покрытия.

Таблица 2

Коррозионные свойства цинковых покрытий, нанесенных различными методами (после 1 ч экспонирования в 3,5%-ном растворе NaCl)

Метод депонирования материала	$I_{кор}$, мкА/см^2
ГДН (без последующей обработки)	28,24
ГДН (с термообработкой)	4,10
Электродуговой	14,90
Электродепонированием	13,62...17,40

Проведенные исследования представляли интерес для авиационной и космической промышленности, так как были исследованы сложные композиционные материалы и сочетания материалов [18]. Метод импульсного ГДН использовали для нанесения покрытий из цинка на композит, представляющий собой тонкий слой меди, отвержденный в ламинате углеродного пластика. Не проводили никакой предварительной подготовки поверхности, подогрев не использовали. Совместное ламинирование полимерной матрицы и медного слоя осуществляли в автоклаве. Получили удовлетворительные характеристики адгезии и когезии, низкую пористость и высокую микротвердость для ряда параметров ГДН, сравнимые с таковыми при ГДН на металлические подложки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Zhang Yinyin, Shockley J. Michael, Vo Phuong, Chromik Richard R.** Tribological behavior of a cold-sprayed Cu—MoS_2 composite coating during dry sliding wear // Tribology Letters. 2016. Vol. 62. Iss. 1. P. 1—12.
2. **Cagdas Calli, Onur Tazegul, Eyup Sabri Kayali.** Wear and corrosion characteristics of copper-based composite coatings, Industrial Lubrication and Tribology. 2017. Vol. 69. Iss. 2. P. 300—305. http://doi.org/10.1108/ILT-07-2016-0146.
3. **Kostoula I. Triantou, Dimitris I. Pantelis et al.** Microstructure and tribological behavior of copper and composite copper + alumina cold sprayed coatings for various alumina contents // Wear. August 2015. Vol. 336—337. P. 96—107.
4. **Yuichiro Yamauchi, Shinya Miyaji.** Interfacial state and characteristics of cold-sprayed copper coatings on aluminum substrate // International Symposium on Interfacial Joining and Surface Technology (IJST2013) IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 61 (2014) 012023. DOI:10.1088/1757-899X/61/1/012023.
5. **Jingchun Liu, Xianglin Zhou et al.** Tribological behavior of cold-sprayed nanocrystalline and conventional copper coatings // Applied Surface Science. 2012. Vol. 258. Iss. 19. P. 7490—7496. http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.04.070Get rights and content.
6. **Kang Yang, Wenya Li et al.** Characterizations and anisotropy of cold-spraying additive-manufactured copper bulk // Journal of Materials Science & Technology. Available online 8 January 2018: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.01.002Get rights and content.
7. **Goyal Tarun, Sidhu T.S., Walia R.S.** Cold Sprayed Copper Coatings on Brass: Corrosion Studies in Simulated Marine and Industrial Environment // International Journal of Mechanic Systems Engineering (IJMSE). 2012. Vol. 2. № 1. P. 1—14.
8. **Masahiro Fukumoto, Hiroki Terada et al.** Deposition of Copper Fine Particle by Cold Spray Process // Materials Transactions. 2009. Vol. 50. No. 6. P. 1482—1488.

9. **Gopinath M., John Sujin Mon. T.S., Glarance J. et al.** Optimization of Copper Particles Deposition Using Cold Spray Process // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015. Vol. 4. Iss. 6.

10. **Shinichi Nishimura, Yukitaka Hamada.** Feasibility Study of High-Strength Brass Coatings by Cold Spray Process // Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy. 2017. Vol. 64. Iss. 12. P. 661—666.

11. **Gershman Iosif S. et al.** Description of Seizure Process for Gas Dynamic Spray of Metal Powders from Non-Equilibrium Thermodynamics Standpoint // Entropy. 18. 315. 25 August 2016.

12. **Warren B.E., Warekois E.P.** Stacking Faults in Cold Worked Alpha-Brass // Acta Metallurgica. 1955. Vol. 3. № 5. P. 473—479.

13. **Koivuluoto H., Lagerbom J., Vuoristo P.** Microstructural studies of cold sprayed copper, nickel and nickel-30 % copper coatings // Journal of Thermal Spray Technology. 2007. Vol. 16. № 4. P. 488—497.

14. **Theimer Stephan et al.** Adhesion of cold sprayed brass coatings for lead-free bearings / International Thermal Spray Conference ITSC May 7—10, 2018, Orlando Florida.

15. **Zhao W., Wang Y., Liu C. et al.** Erosion-Corrosion of Thermally Sprayed Coatings in Simulated Splash Zone // Surf. Coat. Technol. 2010. 205. P. 2267.

16. **Chavan Naveen Manhar, Kiran B. et al.** The Corrosion Behavior of Cold Sprayed Zinc Coatings on Mild Steel Substrate // Journal of Thermal Spray Technology. 2013. Vol. 22. Iss. 4. P. 463—470.

17. **Bai Yang, Wang Zhenhua, Li Xiangbo et al.** Microstructure and Mechanical Properties of Zn—Ni—Al_2O_3 Composite Coatings // Materials. 2018. 11 (5). 853. DOI: 10.3390/ma11050853.

18. **Metallic** coating of aerospace carbon/epoxy composites by the pulsed gas dynamic spraying process / F. Robitaille, M. Yandouzi, S. Hind, B. Jodoin // Surface and Coatings Technology. 25 June 2009. Vol. 203. Iss. 19. P. 2954—2960. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.03.011Get rights and content.

УДК 621.981

В.Н. Кокорин, В.П. Табаков, О.Г. Крупенников, А.С. Алёшин, Д.Р. Подмарев, Н.И. Шанченко
(Ульяновский государственный технический университет)
E-mail: vnkokorin@mail.ru

Исследование процесса контурной лазерной резки с использованием механической активации листового металлопроката

Представлены результаты исследований высокоэнергетического метода резки черного и цветного листового металлопроката при использовании механической активации, заключающейся в холодном упрочнении листового металлопроката и, соответственно, изменении его физико-механических свойств. Исследования проведены на стали марок 20, 45, 12Х18Н10Т и сплаве АМцМ, результаты испытаний обработаны с использованием методов математической статистики. Были выявлены функциональные связи между параметрами качества в зависимости от степени деформации, марки материала, отношения D/S_0 вырезаемых элементов. Для оценки характеристики изменения напряженно-деформированного состояния металла при прокатке между валками было проведено моделирование процесса прокатки между валками в среде LS-Dyna.

Ключевые слова: *лазерная резка, упрочнение, металлопрокат, моделирование.*

The results of researches on the high-energy method of cutting of ferrous and non-ferrous metal sheets using mechanical activation, which consists in cold hardening of sheet metal and, correspondingly, changes in its physical and mechanical properties are presented. Studies are conducted on steel of grades 20, 45, 12Kh18N10T and AMtsM alloy, test results are processed by methods of mathematical statistics. Functional relationships between the quality parameters as function of deformation ratio, material grade, D/S_0 of the cut-out elements are revealed. To estimate the change in the stress-strain state during rolling between rolls, simulation of the rolling process between rolls in the LS-Dyna medium is carried out.

Keywords: *laser cutting, hardening, rolled metal, modeling.*

Широкое применение в промышленности получили высокоэнергетические методы обработки листовых материалов и прежде всего контурная лазерная резка (КЛР) листового металлопроката.

Простота, высокие скорость резки и качество поверхности реза, невысокая стоимость оборудования — именно это и позволило технологии лазерной резки получить такое широкое распро-

странение практически во всех отраслях современной промышленности.

Для повышения качества лазерной резки рекомендуется уменьшать тепловое воздействие на металл заготовки в целях уменьшения теплопроводности. В результате пластической деформации увеличивается плотность дефектов кристаллической решетки (дислокаций, точечных дефектов, двойниковых границ и т.д.). При этом 10 % энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию, может аккумулироваться в металле в виде таких дефектов, а остальная энергия выделяется в виде теплоты. В результате пластической деформации изменяются свойства металла: повышаются прочностные свойства, электросопротивление, возрастает скорость диффузионных процессов, снижается пластичность, коррозионная стойкость, уменьшается теплопроводность и т.д. Это обусловлено деформационным упрочнением металла и может быть использовано для изменения свойств металлических материалов в требуемом направлении [1—3].

Для повышения эффективности разделительных операций листовой штамповки на кафедре "Материаловедение и обработка металлов давлением" Ульяновского государственного технического университета предложен новый способ КЛР при механической активации металлопроката, позволяющий существенно повысить технологические возможности разделительных операций.

К числу главных проблем использования мощных лазеров для резки толстолистовых металлов следует отнести следующее. С повышением мощности излучения, вызванного увеличением толщины материала, очень трудно обеспечить необходимое качество одномодового излучения, скорость процесса становится недопустимо низкой, ухудшается качество поверхности реза из-за повышенной шероховатости и наличия грата.

Параметрами, характеризующими процесс КЛР и качество изделий, являются: размеры изделия, скорость резки, мощность излучения, характер взаимодействия лазерного луча с заготовкой, марка материала и его толщина.

В настоящих исследованиях проведен анализ влияния размеров вырезаемых контуров, толщины металлопроката и степени деформации на точность линейных размеров, а также шероховатость поверхности реза.

В экспериментальных исследованиях использовали стали 20, 45, 12Х18Н10Т, сплав АМцМ. Известно, что с увеличением упрочнения в результате холодной пластической деформации наблюдается снижение теплопроводности. Была

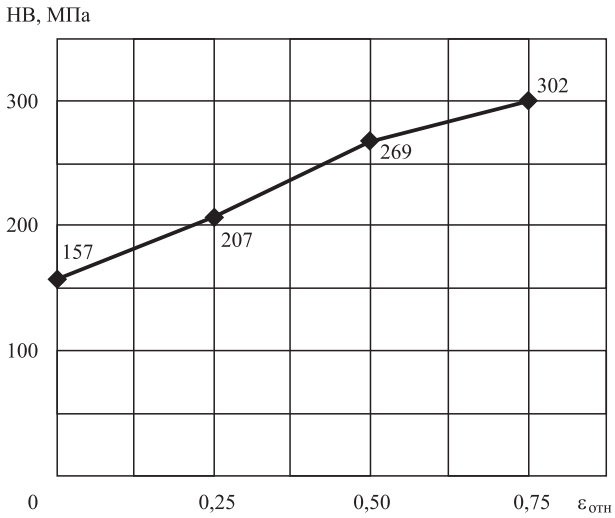


Рис. 1. Изменение твердости стали 20 в зависимости от степени деформации

использована предварительная холодная деформация 25, 50 и 75 %. Твердость исходной и упрочненной структур в диапазоне исследуемых деформаций измеряли твердомером ТК-2М (ГОСТ 23677—79).

На рис. 1 приведена зависимость, отражающая функциональную связь твердости металлопроката и степени предварительной холодной деформации. В табл. 1 и на рис. 2 представлены зависимость теплопроводности *I* от степени деформации при температуре 20 °С [4] и корреляционная связь между степенью деформации (накопленными остаточными напряжениями) и теплопроводностью стали 20 в процессе холодного пластического деформирования.

Графическая интерпретация полученных результатов, определяющих корреляционную связь между степенью деформации и относительным коэффициентом теплопроводности γ, отражающая снижение уровня передачи теплоты в металле, представлена на рис. 3.

Таблица 1

Корреляционная связь между степенью деформации и теплопроводностью

ε, %	*I*, Вт/(м·°С)	$\gamma = I_{тек}/I_{исх}$
0	52	1,00
25	47	0,90
50	41	0,79
75	35	0,67

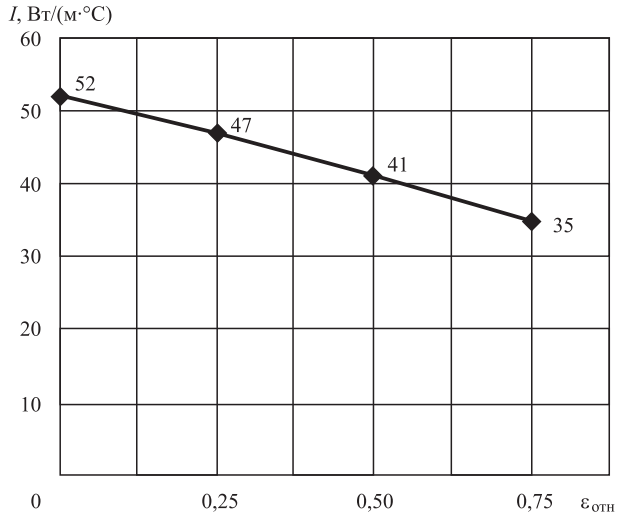


Рис. 2. Зависимость теплопроводности стали 20 от степени деформации

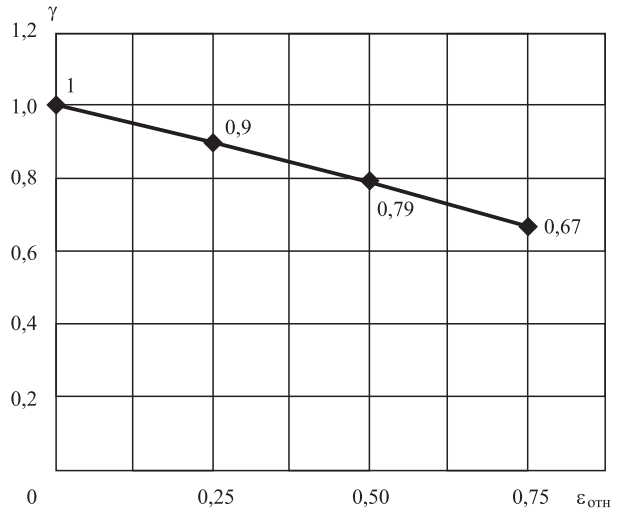


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности стали 20 от степени деформации

Таким образом, для снижения теплопроводности необходимо применять холодное деформационное упрочнение листового металлопроката.

Установлено влияние степени деформации на размерную точность, шероховатость боковой поверхности реза, ширину реза, выявлен характер влияния деформационного упрочнения на кристаллическую структуру металла, способствующего резкому уменьшению теплопроводности с одновременным снижением температурного воздействия в зоне реза.

Выявлено, что наименьшая размерная погрешность достигается при механической активации со степенью деформации 75 %. При этом уменьшение размерной погрешности составляет 45,4 % по сравнению с недеформированной заготовкой.

Шероховатость поверхности реза контролировали, используя образцы материала, вырезанные из листовой заготовки, подвергнутой контурной лазерной резке с механической активацией. Контроль осуществляли на профилометре мод. 130 1-й степени точности, изготовленном ОАО "Завод Протон-МИЭТ".

При малых степенях деформации (0...25 %) наблюдается монотонно убывающая линия тренда погрешностей шероховатости. При степенях деформации 25...55 % присутствует площадка стагнации, при этом $Ra \approx 12$ мкм. При дальнейшем увеличении степени деформации наблюдается резкое снижение шероховатости поверхности до 7 мкм. Таким образом, повышается качество боковой поверхности среза, в частности, шероховатость уменьшается в 3,6 раза в диапазоне степеней деформаций 0...75 %.

При малых степенях деформации (0...20 %) незначительно уменьшается ширина реза B, при степенях деформации 20...75 % уменьшение

Таблица 2

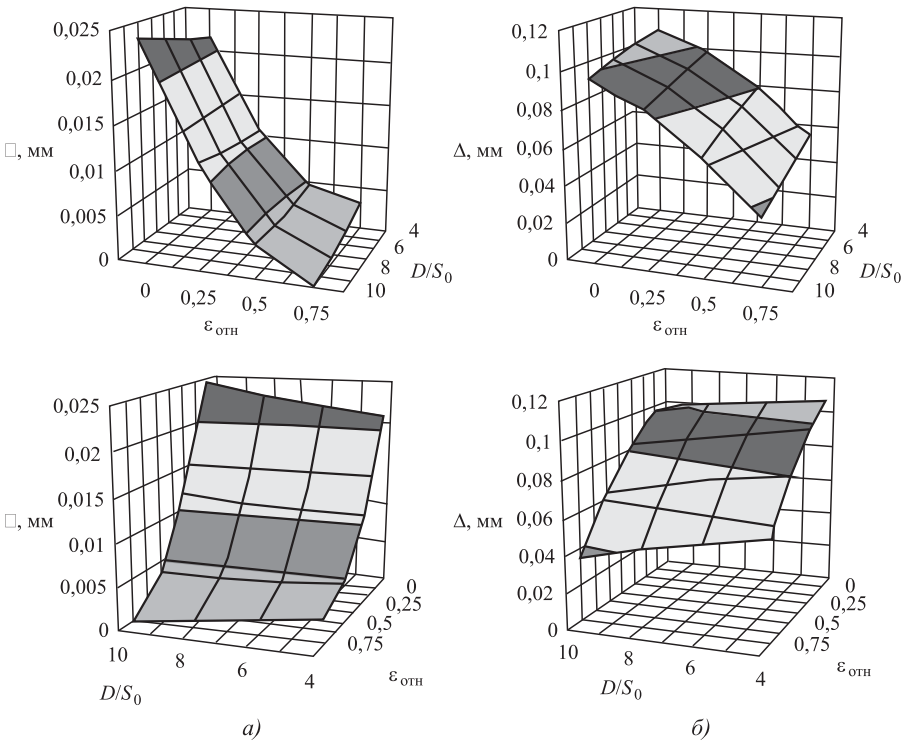
Исходные данные для проведения анализа

Материал/ $\sigma_в$, МПа	Форма детали, размеры	Степень деформации $\varepsilon_{отн}$	Неплоскостность		Отклонение размеров	
			Абсолютная величина □, мм	Относительная величина $□_{отн} = □/П_{от.н}$	Абсолютная величина Δ, мм	Относительная величина $Δ_{отн} = Δ/S_0$
АМцМ/110	Круг, D = 30 мм; D/S_0 = 10	0	0,0250	0,0139	0,098	0,0327
		0,25	0,0108	0,0600	0,085	0,0283
		0,50	0,0039	0,0217	0,061	0,0203
		0,75	0,0004	0,0022	0,037	0,0123
	Круг, D = 12 мм; D/S_0 = 4	0	0,0212	0,1178	0,110	0,0367
		0,25	0,0109	0,0606	0,092	0,0307
		0,50	0,0052	0,0289	0,087	0,0290
		0,75	0,0024	0,0133	0,052	0,0173

Окончание табл. 2

Материал/ $\sigma_в$, МПа	Форма детали, размеры	Степень деформации $\varepsilon_{отн}$	Неплоскостность		Отклонение размеров	
			Абсолютная величина □, мм	Относительная величина □$_{отн}$ = □/П$_{от.н}$	Абсолютная величина Δ, мм	Относительная величина $\Delta_{отн} = \Delta/S_0$
Сталь 45/600	Круг, D = 30 мм; D/S_0 = 10	0	0,0300	0,1667	0,100	0,0333
		0,25	0,0280	0,1556	0,090	0,0300
		0,50	0,0134	0,0744	0,070	0,0233
		0,75	0,0055	0,0306	0,059	0,0197
	Круг, D = 12 мм; D/S_0 = 4	0	0,0615	0,3417	0,110	0,0367
		0,25	0,0534	0,2967	0,092	0,0307
		0,50	0,0211	0,1172	0,090	0,0300
		0,75	0,0093	0,0517	0,075	0,0250
12Х18Н10Т/530	Круг, D = 30 мм; D/S_0 = 10	0	0,0560	0,3111	0,098	0,0327
		0,25	0,0488	0,2711	0,095	0,0317
		0,50	0,0263	0,1461	0,079	0,0263
		0,75	0,0125	0,0694	0,068	0,0227
	Круг, D = 12 мм; D/S_0 = 4	0	0,0705	0,3917	0,107	0,0357
		0,25	0,0642	0,3567	0,098	0,0327
		0,50	0,0308	0,1711	0,095	0,0317
		0,75	0,0210	0,1167	0,080	0,0267

Обозначения: D — диаметр; S_0 — исходная толщина пластины; П$_{от.н}$ — стандартная погрешность (допуск) на отклонение листа по толщине (по ГОСТу П$_{от.н}$ = 0,18 мм).



а) *б)*

Рис. 4. График поверхности в двух ортогональных ракурсах модели формирования для заготовок из сплава АМцМ:
а — неплоскостности; *б* — отклонения размеров

ширины реза существенное: при ε = 75 % ширина реза составляет 0,088 мм, тогда как при ε = = 0 % — 0,218 мм. Таким образом, ширина реза в диапазоне ε 0...75 % уменьшается в 2,48 раза.

Для получения комплексных характеристик, определяющих характер влияния степени деформации на параметры контурной лазерной резки, был проведен интегральный анализ габаритного диапазона на размерную точность и неплоскостность. Исходные данные приведены в табл. 2.

Для построения полиномиальных моделей, позволяющих комплексно оценивать функциональные связи, был поставлен двухфакторный эксперимент. Общая рабочая модель имеет вид:

$$Y = a_0 - a_1x + a_2x^2 + b_1y + b_1y^2 - c_1xy.$$

На рис. 4—6 показаны графики поверхности моделей в двух

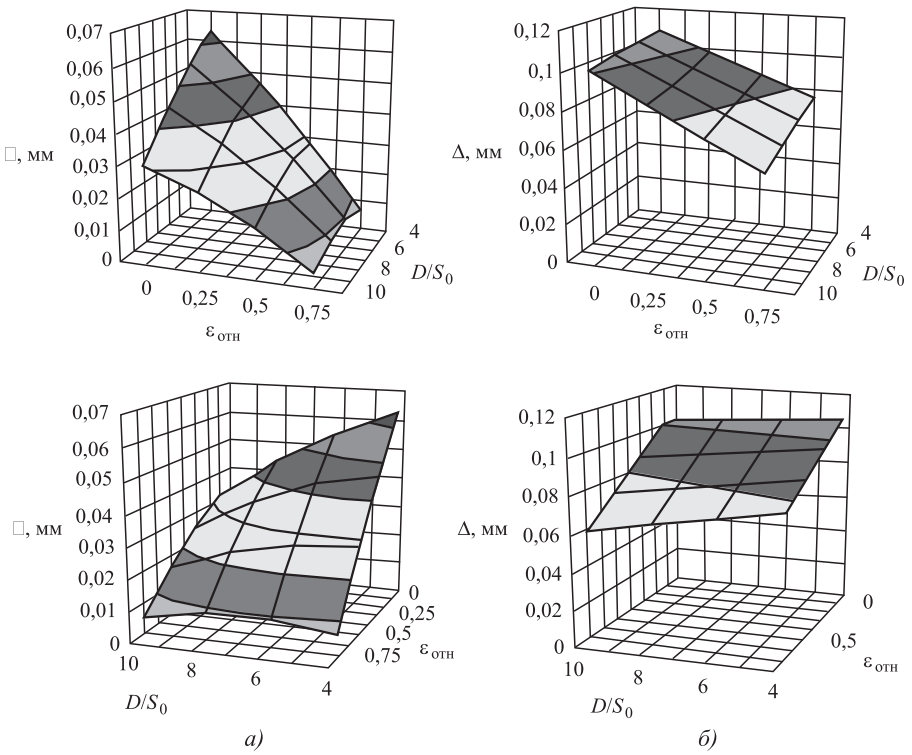


Рис. 5. График поверхности в двух ортогональных ракурсах модели формирования для заготовок из стали 45:
а — неплоскостности; *б* — отклонения размеров

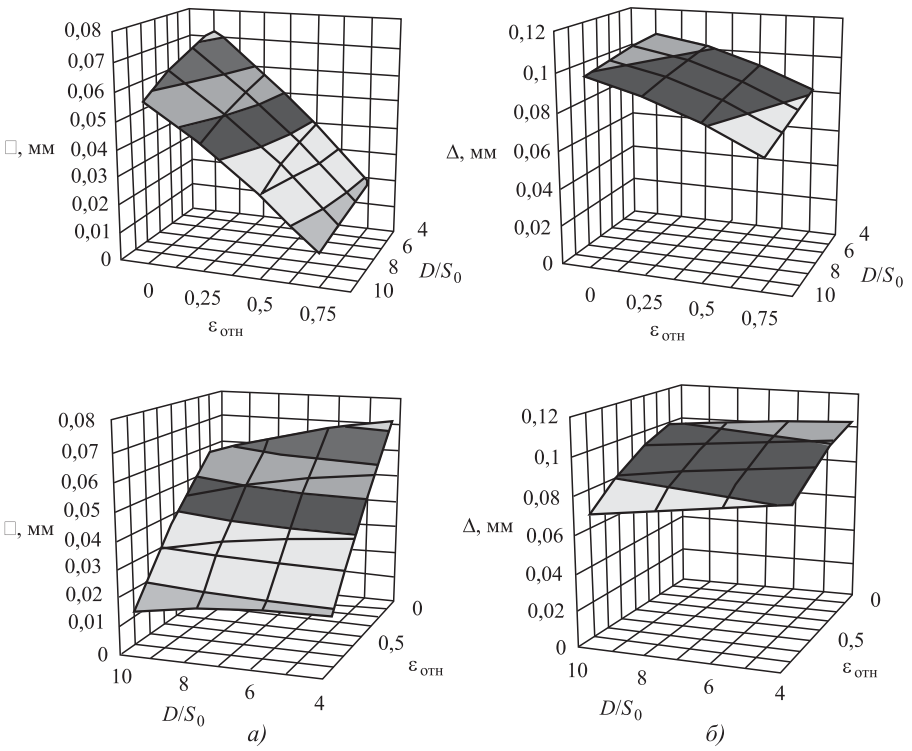


Рис. 6. График поверхности в двух ортогональных ракурсах модели формирования для заготовок из стали 12Х18Н10Т:
а — неплоскостности; *б* — отклонения размеров

ортогональных ракурсах в целях получения развернутого отображения изучаемых функциональных зависимостей для различных марок материалов (сталь 45, 12Х18Н10Т, АМцМ):

$$Y = (\square) = f[x(\varepsilon);\ y(D/S_0)]$$
$$\text{и } Y = (\Delta) = f[x(\varepsilon);\ y(D/S_0)].$$

Исходные данные для построения полиноминальных моделей формирования неплоскостности и отклонения размеров для заготовок из сплава АМцМ представлены в табл. 3.

Для сплава АМцМ ($\sigma_в$ = = 110 МПа) формирование неплоскостности описывается уравнением

$$Y_\square = 0{,}021 - 0{,}0472x + 0{,}0364x^2 + 0{,}000034y^2 - 0{,}00124xy.$$

Среднеквадратичная ошибка модели $\varepsilon_{кв}$ = 0,000523, доля объясненной дисперсии R^2 = 99,6 %, средняя относительная ошибка A = 12,9 %.

Отклонение размеров описывается уравнением

$$Y_\Delta = 0{,}1107 - 0{,}0221x + 0{,}056x^2 + 0{,}000013y^2 - 0{,}00187xy.$$

Среднеквадратичная ошибка модели $\varepsilon_{кв}$ = 0,000359, доля объясненной дисперсии R^2 = 97,6 %, средняя относительная ошибка A = 3,8 %.

Исходные данные для построения полиноминальных моделей формирования неплоскостности и отклонения размеров для заготовок из стали 45 представлены в табл. 4.

Для стали 45 ($\sigma_в$ = 600 МПа) формирование неплоскостности описывается уравнением

$$Y_\square = 0{,}0755 - 0{,}0653x - 0{,}0202x^2 - 0{,}00018y^2 + 0{,}00193xy.$$

Таблица 3

Исходные данные для построения полиноминальных моделей из заготовок из сплава АМцМ

$\varepsilon_{отн}$	D/S_0	□, мм	Δ, мм
x	y	$Y_□$	$Y_Δ$
0	10	0,0250	0,098
0,25	10	0,0108	0,085
0,5	10	0,0039	0,061
0,75	10	0,0004	0,037
0	4	0,0212	0,110
0,25	4	0,0109	0,092
0,5	4	0,0052	0,087
0,75	4	0,0024	0,052

Таблица 4

Исходные данные для построения полиноминальных моделей для заготовок из стали 45

$\varepsilon_{отн}$	D/S_0	□, мм	Δ, мм
x	y	$Y_□$	$Y_Δ$
0	10	0,0300	0,100
0,25	10	0,0128	0,090
0,5	10	0,0134	0,070
0,75	10	0,0055	0,059
0	4	0,0615	0,110
0,25	4	0,0534	0,092
0,5	4	0,0211	0,090
0,75	4	0,0093	0,075

Таблица 5

Исходные данные для построения полиноминальных моделей для заготовок из стали 12Х18Н10Т

$\varepsilon_{отн}$	D/S_0	□, мм	Δ, мм
x	y	$Y_□$	$Y_Δ$
0	10	0,0250	0,098
0,25	10	0,0108	0,095
0,5	10	0,0039	0,079
0,75	10	0,0004	0,068
0	4	0,0212	0,107
0,25	4	0,0109	0,098
0,5	4	0,0052	0,095
0,75	4	0,0024	0,080

Среднеквадратичная ошибка модели $\varepsilon_{кв}$ = = 0,000386, доля объясненной дисперсии R^2 = = 95,8 %, средняя относительная ошибка A = 15,3 %.

Отклонение размеров описывается уравнением

$$Y_Δ = 0{,}1093 - 0{,}0362x + 0{,}0040x^2 - 0{,}00008y^2 + 0{,}0024xy.$$

Среднеквадратичная ошибка модели $\varepsilon_{кв}$ = = 0,000279, доля объясненной дисперсии R^2 = = 96,8 %, средняя относительная ошибка A = 2,7 %.

Исходные данные для построения полиноминальных моделей формирования неплоскостности и отклонения размеров для заготовок из 12Х18Н10Т представлены в табл. 5.

Для стали 12Х18Н10Т ($\sigma_в$ = 530 МПа) формирование неплоскостности описывается уравнением

$$Y_□ = 0{,}0696 - 0{,}088x - 0{,}0192x^2 - 0{,}00038y^2 + 0{,}006724xy.$$

Среднеквадратичная ошибка модели $\varepsilon_{кв}$ = = 0,000445, доля объясненной дисперсии R^2 = = 95,1 %, средняя относительная ошибка A = 10,5 %;

Отклонение размеров описывается уравнением

$$Y_Δ = 0{,}1072 - 0{,}00673x - 0{,}028x^2 - 0{,}00008y^2 - 0{,}00147xy.$$

Среднеквадратичная ошибка модели $\varepsilon_{кв}$ = = 0,000203, доля объясненной дисперсии R^2 = = 97,2 %, средняя относительная ошибка A = 2,0 %.

Анализ графиков (рис. 4—6) позволяет сделать следующие выводы:

— все коэффициенты регрессии у представленных моделей статистически значимы, при этом параметр R^2 > 51 % у всех моделей;

— с увеличением степени деформации неплоскостность и отклонение размеров заготовок из цветных металлов меньше, чем заготовок из черных металлов;

— с уменьшением отношения D/S_0 наблюдается увеличение неплоскостности отклонения размеров при различных степенях деформации заготовок.

На графиках рис. 7—11 показана эффективность контурной лазерной резки с механической активацией листового металлопроката, которую оценивали такими параметрами, как неплоскостность изделий и их размерная точность. Исходные данные для расчета представлены в табл. 2.

На рис. 7 представлены зависимости отклонения размеров Δ и неплоскостности □ от материа-

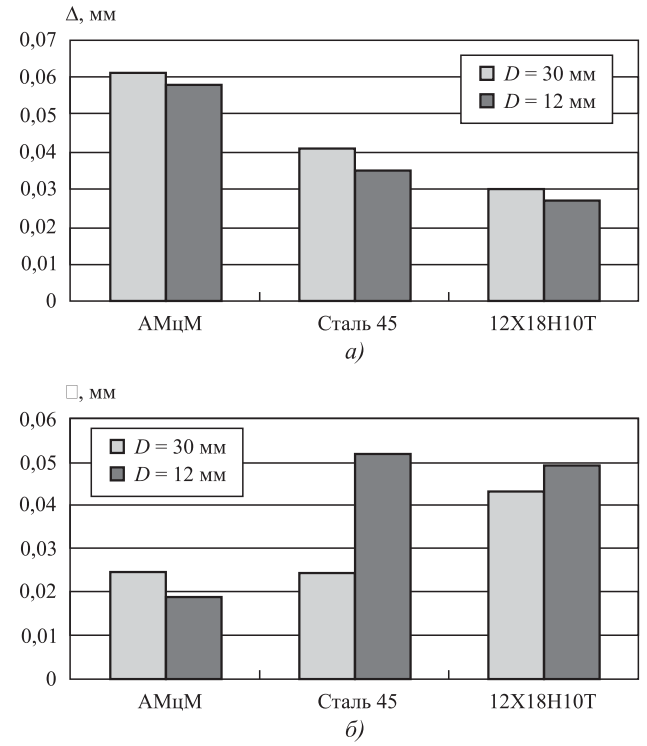


Рис. 7. Зависимость отклонения размеров (*а*) и неплоскостности (*б*) от материала и габаритного диапазона

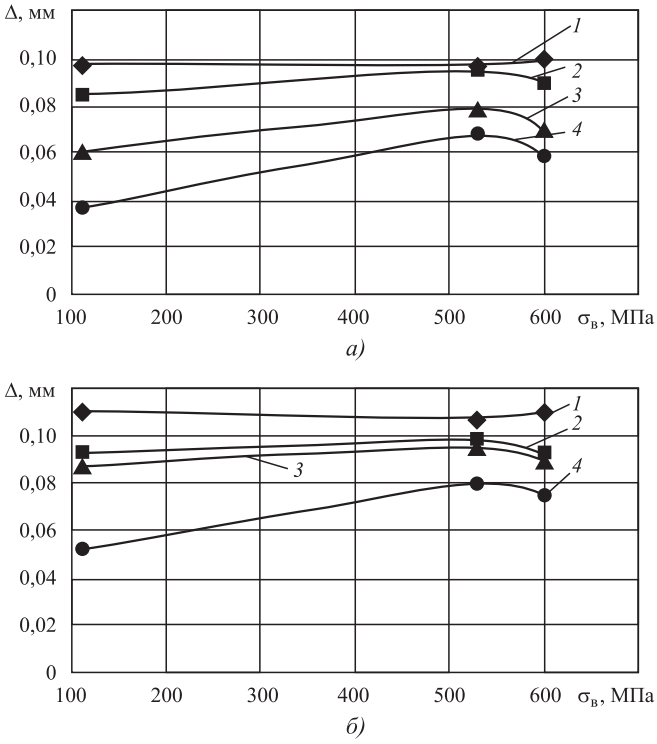


Рис. 8. Зависимость отклонения размеров от предела прочности при:
а — D = 30 мм; *б* — D = 12 мм: *1* — $\varepsilon_{отн}$ = 0; *2* — $\varepsilon_{отн}$ = 0,25; *3* — $\varepsilon_{отн}$ = 0,5; *4* — $\varepsilon_{отн}$ = 0,75

ла и габаритного диапазона. Исследование функциональных связей установило ряд зависимостей отклонения размеров и неплоскостности от предела прочности $\sigma_в$ и степени деформации ε при различных соотношениях D/S_0.

На рис. 8, 9 представлены зависимости отклонения размеров и неплоскостности от предела прочности $\sigma_в$ при различных соотношениях D/S_0.

На рис. 10, 11 представлены зависимости отклонения размеров и неплоскостности заготовок от степени деформации $\varepsilon_{отн}$ при различных соотношениях D/S_0 и марок материалов:

Анализ графиков (рис. 7, 11) позволяет сделать следующие выводы:

— максимальная разница между наибольшим (при ε = 0 %) и наименьшим (при ε = 75 %) отклонениями наблюдается у заготовок из цветных металлов;

— заготовки из цветных металлов имеют меньшую неплоскостность в сравнении с заготовками из черных металлов;

— с увеличением степени деформации неплоскостность и отклонение размеров у цветных металлов снижаются существеннее, чем у черных металлов;

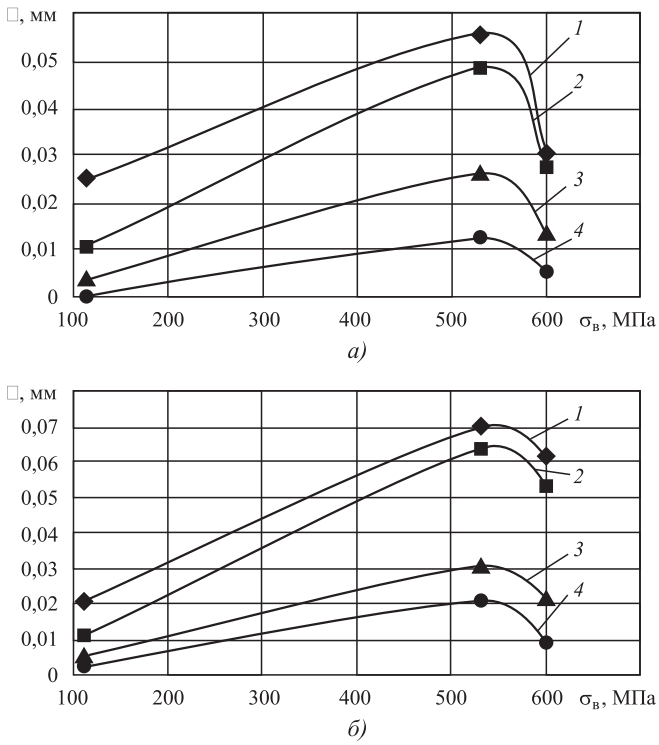


Рис. 9. Зависимость неплоскостности от предела прочности при:
а — D = 30 мм; *б* — D = 12 мм: *1* — $\varepsilon_{отн}$ = 0; *2* — $\varepsilon_{отн}$ = 0,25; *3* — $\varepsilon_{отн}$ = 0,5; *4* — $\varepsilon_{отн}$ = 0,75

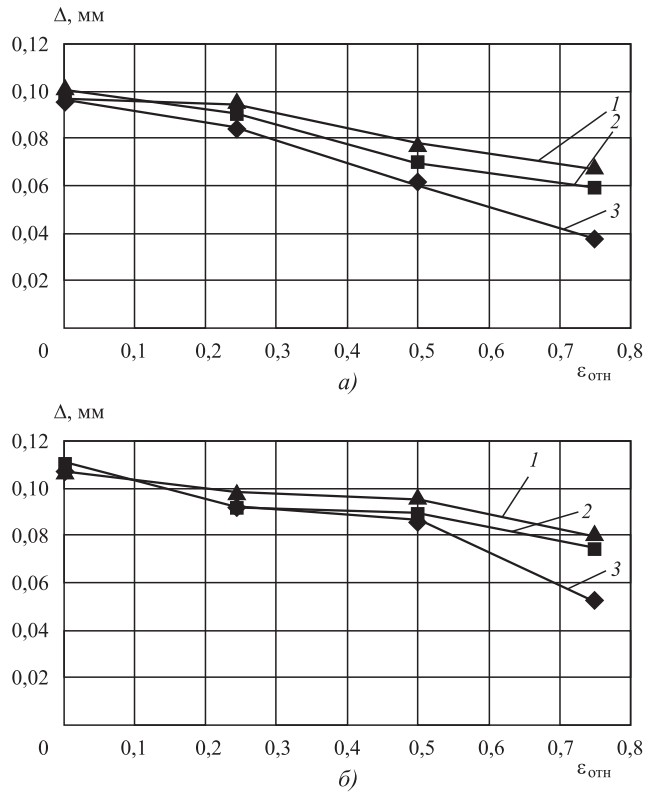


Рис. 10. Зависимость отклонения размеров от степени деформации при:
а — D = 30 мм; *б* — D = 12 мм; *1* — 12Х18Н10Т; *2* — сталь 45; *3* — АМцМ

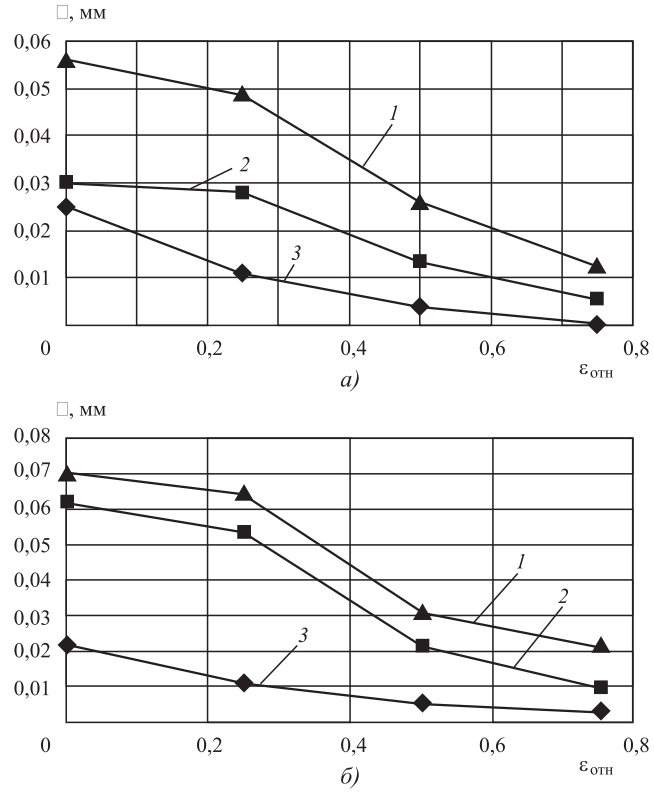


Рис. 11. Зависимость неплоскостности от степени деформации при:
а — D = 30 мм; *б* — D = 12 мм; *1* — 12Х18Н10Т; *2* — сталь 45; *3* — АМцМ

— с уменьшением отношения D/S_0 наблюдается увеличение отклонения размеров и плоскостности заготовок при различных степенях их деформации.

Проведенные исследования показали эффективность контурной лазерной резки с предварительной механической активацией металлопроката черных и цветных металлов в условиях серийного и массового производства. Применение технологии, обеспечивающей активацию металлопроката, позволит уменьшить себестоимость изделия из-за резкого сокращения (до 2,1 раза) трудоемкости слесарных работ за счет существенного уменьшения образования грата на поверхности реза (от 60 % в базовом варианте до 28,5 % по разрабатываемой технологии при использовании механической активации).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Панченко В.Я., Голубев В.С., Васильцов В.В. и др.** Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.

2. **Кокорин М.В., Подмарев Д.Р., Левушкин К.С., Кокорин В.Н.** Лазерный технологический комплекс для контурного раскроя листовых материалов "ТЕГРА500Р". 49 НТК "Вузовская наука в современных условиях". Ульяновск.: УлГТУ, 2015. С. 113—117.

3. **Кокорин В.Н., Шанченко Н.И., Мищенко О.В. и др.** Моделирование процесса контурной лазерной резки с механической активацией листового металлопроката // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 11. С. 42—49.

4. **http://metallicheckiy-portal.ru/marki_metallov/stk/20.**

УДК 621.357.7

В.И. Балакай, К.А. Шпанова, А.О. Ковалева, А.В. Гривенко
(Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск)
E-mail: balakaivi@rambler.ru

Электроосаждение сплава золото—медь—бор

В современной радиоэлектронной технике, приборостроении и машиностроении большое внимание уделяется разработке и внедрению новых видов покрытий, обладающих повышенной твердостью, износостойкостью, коррозионной устойчивостью, улучшенными электрическими и другими эксплуатационными свойствами. Высокая стоимость благородных металлов как материала для электрических контактов ограничивает их использование в изделиях радиоэлектронной промышленности и приборостроении. Разработан электролит для нанесения сплава золото—медь—бор. В качестве боросодержащей добавки в электролит вводили декагидроборат натрия. Исследованы физико-механические свойства сплава (микротвердость, переходное и удельное электрическое сопротивление, внутренние напряжения, сцепление с основой из меди и ее сплавов, пористость при толщине 3 мкм, выход по току). Приведен способ приготовления электролита. Показана возможность использования в радиоэлектронной технике, электротехнической промышленности и приборостроении в качестве покрытия для электрических контактов в целях снижения расхода золота и увеличения надежности и долговечности электрических контактов.

Ключевые слова: *сплав золото—медь—бор, микротвердость, переходное сопротивление, пористость, сцепление, покрытие, свойства, электроосаждение.*

In modern radioelectronic equipment, instrument making and machine building, much attention is paid to the development and introduction of new types of coatings that have increased hardness, wear resistance, corrosion resistance, improved electrical and other performance properties. The high cost of precious metals, as material for electrical contacts, limits their use in the products of the electronics industry of instrument-making. The electrolyte for the application of the gold—copper—boron alloy is developed. Decahydroborate sodium is added to the electrolyte as boron-containing additive. The physicomechanical properties of the alloy (microhardness, transient and specific electrical resistances, internal stresses, coupling with base of copper and its alloys, porosity at thickness of 3 μm, current efficiency) are studied. The method of preparation of electrolyte is given. The possibility of using in electronic equipment, electrical engineering industry and instrument making as coating for electrical contacts is shown to reduce the consumption of gold and increase the reliability and durability of electrical contacts.

Keywords: *gold—copper—boron alloy, microhardness, ransitional resistance, porosity, adhesion, coating, properties, electrodeposition.*

Введение

В настоящее время для контактов, коммутирующих токи малой мощности в условиях трения скольжения, применяют материалы на основе драгоценных металлов.

Основное направление экономии драгоценных металлов — получение контактных материалов за счет использования их сплавов. Широкое распространение в радиоэлектронной промышленности нашли сплавы золото—никель, золото—кобальт, золото—медь, серебро—сурьма, серебро—палладий, серебро—кадмий и т.д. Однако экономия драгоценных металлов за счет применения их сплавов с менее дорогими металлами приводит к изменению физико-механических свойств, а особенно к изменению электрических характеристик контактов.

Важное значение для гальванотехники приобретает разработка новых видов покрытий, обладающих повышенной износостойкостью, коррозионной устойчивостью, высокими электрическими свойствами, твердостью и т.д. Особое место занимает решение проблемы замены токсичных, профессионально и экологически вредных цианистых и других электролитов, используемых в промышленности для электроосаждения большинства металлов и сплавов, на нетоксичные электролиты.

Возникает необходимость снижения потребления драгоценных металлов либо замена их на сплавы или композиционные материалы при условии сохранения требуемых физико-механических характеристик. С этой точки зрения наибольший интерес вызывает применение различных сплавов на основе олова и никеля, обладающих способностью к пайке спиртово-канифольными флюсами, сохраняющих электрические, коррозионные и механические характеристики в течение длительного времени.

Наиболее перспективными контактными материалами для слаботочных скользящих контактов (ССК) ответственного назначения считаются сплавы золота, особенно золото—медь, золото—хром.

Цель работы — улучшение электрических характеристик и увеличение износостойкости покрытий на основе сплава золото—медь.

Методика эксперимента

Электролиты готовили из реактивов марок х.ч. и ч.д.а. на дистиллированной воде. Сплав осаждали на детали из меди М1, латуни Л63 площадью 0,0025; 0,01 дм^2 в ячейках объемом 25 мл, без диафрагмы и герметизации. Предварительную подготовку поверхности образцов проводили по методикам [1].

Выход по току гальванических покрытий определяли гравиметрическим методом. Микротвердость покрытий измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,196...0,245 Н (20...25 гс) по ГОСТ 2999—75. Покрытия осаждали на медную пластинку размерами 15×15×1 мм. Толщина покрытия не менее 20 мкм. Продолжительность выдержки образца под нагрузкой 10 с, время опускания и подъема индентора не менее 15 с.

Пористость покрытий, осажденных на медь и ее сплавы, определяли методом наложения фильтровальной бумаги по ГОСТ 9.302—88 на образцах размерами 15×15×1 мм.

Прочность сцепления покрытий с основой определяли методом неоднократного изгиба покрытого образца на 90° до полного излома по ГОСТ 9.302—88. Размеры образца 25×5×1 мм, толщина покрытия 20 мкм.

Удельное и переходное электрическое сопротивление измеряли с помощью цифрового вольтметра типа TR 1652-2 и потенциостата ПЭБ, а также универсального измерительного прибора УПИП-60М и потенциостата ПЭБ. При измерении удельного электрического сопротивления использовали медные проволоки диаметром 0,1 мм и длиной около 200 мм.

Переходное электрическое сопротивление покрытий определяли по методике [2—4] при нагрузках на точечный контакт 0,049; 0,245; 0,490; 0,981 Н (5; 25; 50; 100 гс) и силе тока 20; 50; 100; 250 мА.

Расчет удельного электрического сопротивления осуществляли по методике [2—4]. Сопротивление гальванического покрытия измеряли без отделения от основы. При этом способе проводили два измерения: измерение электросопротивления основы без покрытия и суммарного сопротивления основы с покрытием.

Сопротивление покрытия вычисляли по формуле:

$$R_x = \frac{\pi R'_x R''(d_1^2 - d_0^2)}{4(R'' - R'_x)l},$$

где R'_x — суммарное сопротивление основы и покрытия, Ом; R'' — сопротивление основы, Ом; d_0 — диаметр проволоки, мм; d_1 — диаметр проволоки с покрытием, мм; l — длина проволоки, мм.

Внутренние напряжения покрытия определяли по методике [5], используя гибкий, горизонтально расположенный катод. Испытываемый медный катод размерами 35×10×0,05 мм перед измерениями покрывали с одной стороны полихлорвиниловым лаком и для удобства измерения отклонений к подвижному концу катода приклеивали вольфрамовую проволоку диаметром 10 мкм, отклонение катода от первоначального положения фиксировали микроскопом МИР-2. Расчет внутренних напряжений проводили по формуле:

$$B_н = \frac{Ed^2 z}{3\delta l^2},$$

где E — модуль упругости материала основы [6]; d — толщина катода, м; z — прогиб катода на конце, м; δ — толщина покрытия, м; l — длина покрываемой части катода, м.

Для изучения внешнего вида покрытий в качестве оптической системы применяли микроскоп МИМ-7 при увеличениях 129; 216; 367,5; 487,5.

Стабильность электролита определяли по сохранению свойств электролита и покрытий, выпадению осадка после хранения в течение 3 мес. и примерно 100...150 А·ч/л работы электролита.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для увеличения износостойкости и уменьшения электрических характеристик предложили сплав золото—медь легировать бором. Поэтому в электролит для нанесения сплава вводили декагидроборат натрия (ТУ 6-02-1-513—86).

Используя метод планирования эксперимента, разработали электролит для осаждения сплава золото—медь—бор состава, г/л: золото (в пересчете на металл) 3...5; медь (в пересчете на металл) 5...10; калий железистосинеродистый 150...200; калий сернокислый 40...50; калий углекислый 40...50; декагидроборат натрия 1...2,5; pH = 11...12; катодная плотность тока 0,2...0,8 А/дм^2.

Электролит для нанесения сплава золото—медь—бор готовили из электролитов золочения и меднения, приготовленных отдельно.

Железистосинероистый электролит меднения готовили следующим образом. Соль Шевреля, полученную смешиванием растворов сернокислой меди и сульфита натрия, промывали водой и раствором едкого калия (8 г/л). Отдельно растворяли железистосинеродистый калий, нагревали до кипения, в раствор вводили соль Шевреля. При интенсивном перемешивании продолжали кипячение смеси в течение 40 мин. Затем электролит подщелачивали раствором едкого калия из расчета 80 г/л и продолжали кипятить 4...6 ч, не прекращая перемешивания. Осадок гидрата оксида железа отфильтровывали, объем электролита доводили до расчетного.

Для приготовления железистосинеродистого электролита золочения сливали горячие растворы поташа и железистосинеродистого калия, в полученную смесь вводили золотохлористоводородную кислоту. После кипячения в течение 15 мин на газовой горелке отфильтровывали осадок гидроксида железа, к фильтрату доливали раствор сернокислого калия и продолжали кипячение в термостате, залитом силиконовым маслом (температура масла 170...180 °С), при постоянном перемешивании в течение 6...8 ч.

Электролит для осаждения сплава золото—медь—бор получали сливанием равных объемов электролитов меднения и золочения и введением боросодержащей добавки.

Покрытия, осажденные из данного электролита, получались светлыми, полублестящими. Содержание золота в сплаве 70...85 % мас., бора — 0,8...1,2 % мас., остальное — медь.

Поскольку покрытия сплавами имеют толщину 3...5 мкм, необходимо предотвратить возможность взаимной диффузии подложки и покрытия. В результате проникновения неблагородных металлов через золото на поверхности могут образовываться непроводящие оксиды, что приведет к возрастанию переходного сопротивления. Диффузия одного металла в другой может происходить путем обычного переноса через кристаллическую решетку (роль этого процесса резко возрастает для покрытой золотом меди при температурах выше 250 °С) или путем продвижения по кристаллографическим дефектам, таким как границы зерен и дислокации. К такого рода дефектам можно отнести и пористость электроосажденного золота, которая приобретает большое значение, в случае когда контактные поверхности, в целях экономии золота, покрывают слоем сплава толщиной 0,1...0,3 мкм. Даже если для электроосажденной системы не предполагается проводить термообработку, атомы меди, достигающие поверхности контакта путем диффузии, образуют оксидные пленки, повышающие сопротивление контакта. Это может привести к разогреву слаботочных скользящих контактов. Процесс может стать автокаталитическим, приводя к полному отказу контакта.

В данной работе вначале использовали в качестве барьерного слоя электроосажденный или нанесенный химическим путем никелевый слой толщиной 2...5 мкм.

Данные по изучению диффузии золота в материал основы, состоящей из меди и ее сплавов, свидетельствуют о заметной взаимной диффузии уже при температуре 200...400 °С. Для предотвращения диффузии золота и материала основы предлагается использовать в качестве возможного разделительного слоя покрытие на основе висмута.

Висмут отличается по типу кристаллической решетки и величине ее параметра и от меди, и от золота. Он не взаимодействует с медью и очень ограниченно — с золотом, образует лишь ограниченные твердые растворы с цинком, основным компонентом латуней, на которые часто наносят контактные покрытия сплавами золота. Никель с цинком дает при кристаллизации ряд химических соединений и твердые растворы. Растворимость цинка в никеле при 20 °С составляет 26 % ат.

Висмутирование проводили из электролита следующего состава, г/л: висмут основной углекислый (в качестве исходной соли) 100; смесь Пааля 10 мл/л; pH = 0,7. Температура электролиза 40 °С, катодная плотность тока 7 А/дм^2. Покрытия

полублестящие, серого цвета, хорошо сцепленные с основой.

Для приготовления электролита висмутирования растворяли 100 г основного углекислого висмута в концентрированной соляной кислоте, разбавленной в соотношении 1:1. Затем приливали 10 мл смеси Пааля, приготовленной на основе кровяного альбумина по методике [7] и подкисленной до pH = 2...3. Выпадающий осадок отфильтровывали. Готовый электролит представляет собой прозрачный светло-желтый раствор.

Сплав толщиной 5 мкм осаждали на латунные образцы с барьерными слоями из электроосажденного висмута и химически осажденного никеля толщиной 2 мкм.

Образцы слаботочных скользящих контактов, покрытые барьерными слоями висмута или химического покрытия никелем толщиной 2 мкм и электроосажденным сплавом золото—медь—бор из разработанного электролита толщиной 5 мкм выдержали 500 ч испытаний при нагрузке 0,029 Н (3 гс) при 100%-ной надежности контактирования и показали более высокую надежность, чем палладиевые покрытия.

Физико-механические свойства сплава золото—медь—бор

Показатель	Значения
Переходное электрическое сопротивление при нагрузке на точечный контакт 0,490 Н (50 гс) и токе в цепи 0,15 мА, Ом	$(1{,}39...1{,}48)\cdot 10^{-3}$
Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	$(8...16)\cdot 10^{-8}$
Микротвердость, МПа	2380...2520
Внутренние напряжения, МПа	180...220
Пористость, пор/см^2	5...9
Сцепление с основой из меди и ее сплавов	Удовлетворяет ГОСТ 9.301—86
Выход по току, %	98...99

В таблице приведены физико-механические свойства сплава золото—медь—бор.

По сравнению с чистым электролитическим золотом микротвердость сплава золото—медь—бор увеличивается в 2,3—3 раза, удельное электрическое сопротивление повышается незначительно, а переходное электрическое сопротивление — примерно в 1,1 раза. Поэтому внедрение разработанной технологии может привести к экономии золота, а также к увеличению срока службы и надежности покрытий на основе сплава золото—медь—бор, наносимых на электрические контакты.

Заключение

Разработан электролит для нанесения сплава золото—медь—бор.

Исследованы физико-механические свойства сплава золото—медь—бор и показана возможность использования сплава в электронной промышленности и приборостроении в качестве электропроводящего покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ямпольский А.М., Ильин В.А.** Краткий справочник гальванотехника. Л.: Машиностроение, 1981. 269 с.
2. **Балакай В.И.** Закономерности электроосаждения никеля, серебра и сплавов на их основе: технологические, ресурсосберегающие и экологические проблемы: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2004. 342 с.
3. **Круглова Е.Г., Вячеславов П.М.** Контроль гальванических ванн и покрытий. М.—Л.: Машгиз, 1961. 148 с.
4. **Мельников П.С.** Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. М.: Машиностроение, 1979. 296 с.
5. **Поперека М.Я.** Внутренние напряжения электролитически осаждаемых металлов. Новосибирск: Научно-сибирское книжное издательство, 1966. 336 с.
6. **Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.** Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1980. 208 с.
7. **Карякин Ю.В.** Чистые химические реактивы. М.—Л.: Госхимиздат, 1947. С. 331.

УДК 621.892

В.В. Новиков, Д.А. Зоренко, А.Н. Болотов
(Тверской государственный технический университет)
E-mail: alnikbltov@rambler.ru

Получение антифрикционных композиционных керамических покрытий и их триботехнические свойства*

Приведены основы технологии получения твердосмазочных композиционных керамических покрытий с нано- и микродисперсными антифрикционными наполнителями методом микродугового оксидирования. Показаны особенности электрофоретического внедрения в керамическую матрицу дисперсных частиц магнетита, графита и дисульфида молибдена. Представлены результаты сравнительных триботехнических испытаний синтезированных покрытий.

Ключевые слова: *микродуговое оксидирование, твердосмазочное керамическое покрытие, антифрикционный наполнитель, трение, износ.*

The description of the technology for getting of solid lubricant composite ceramic coatings with nano- and microdispersed antifriction fillers by the microarc oxidation method is presented. It is shown particularities of the electrophoretic introduction disperse particles of the magnetite, graphite and molybdenum disulphide into ceramic matrix. The results of the comparative tribotechnical tests of the synthesized coatings are submitted.

Keywords: *microarc oxidation, solid lubricant ceramic coating, antifriction filler, friction, wear.*

Введение

В настоящее время вновь стала актуальной проблема обеспечения эффективной работы подшипниковых узлов специального оборудования без смазывания их не только жидким, но и пластичным смазочным материалом. Несколько десятилетий назад проблема узлов "сухого" трения была решена посредством применения для изготовления одного из элементов пары трения полимерной композиции, например, на основе тетрафторэтилена или полиамида. В создании антифрикционных полимеров были достигнуты серьезные успехи, и эти материалы в целом удовлетворяли предъявляемым к ним требованиям по коэффициенту трения, износостойкости, прочности и т.д. Однако в последнее время, в связи с интенсивным развитием космической и военной техники, химической и электронной промышленности, а также текстильного и медико-биологического производства, возникла необходимость создания антифрикционных материалов с существенно более высокими свойствами.

Перспективными конструкционными материалами для технически более совершенных трибоузлов являются керамические материалы на основе оксида алюминия, полученные в плазме микродугового разряда методом микродугового оксидирования (МДО) поверхности вентильных металлов [1—3]. Данный метод позволяет формировать оксидные покрытия толщиной до 200 мкм и более на внутренних и наружных поверхностях деталей сложной формы. Такие керамические покрытия без наполнителя характеризуются высокими механическими свойствами, термостойкостью, хорошей адгезией к подложке, но они могут хорошо работать в узлах трения только при граничной или гидродинамической смазке. Появилась необходимость расширить диапазон реализуемых противоизносных и антифрикционных свойств

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-48-690826, 18-48-690001).

покрытий при трении без смазочного материала за счет изменения их структуры и состава [4].

Для этого предлагается модифицировать оксидную керамическую матрицу микро- и наноразмерными частицами антифрикционного наполнителя для получения твердосмазочных керамических покрытий. Ранее аналогичный подход позволил создать уникальные алмазосодержащие керамические покрытия для абразивного инструмента [5—7].

Цель работы — разработать технологические основы получения плазменно-электролитическим оксидированием твердосмазочных композиционных керамических покрытий с антифрикционными наполнителями (магнетит, графит и дисульфид молибдена) на поверхности алюминиевых сплавов. Провести экспериментальные исследования триботехнических характеристик полученных композиционных покрытий.

Материалы и методы экспериментальных исследований

В качестве базового исследуемого материала был выбран широко применяемый в технике сплав на основе алюминия Д1 (содержание меди около 4 %, железа, кремния, марганца — менее 1 %). Формирование композиционных покрытий с дисперсными порошками проводили в электролитах, содержащих в качестве наполнителя дисперсные материалы, которые при оксидировании модифицировали структуру упрочненного поверхностного слоя.

В качестве нанодисперсной фазы керамического покрытия был выбран магнетит, который способен повысить механические свойства покрытия и должен способствовать снижению трения в результате уменьшения адгезионных связей между контактирующими поверхностями. Высокодисперсный магнетит (характерный размер около 7 нм) получали методом химического осаждения [8]. В целях защиты частиц высокодисперсного магнетита от дальнейшего окисления и предотвращения их коагуляции проводили процесс пептизации в растворе силиката натрия для создания электрического заряда на поверхности частиц. Агрегативная устойчивость коллоида достигалась, таким образом, по ионному механизму.

Для повышения антифрикционных свойств формируемых покрытий также были введены в качестве дисперсной фазы известные хорошими твердосмазочными свойствами мелкодисперсные порошки (частицы размером 2...10 мкм) графита и дисульфида молибдена. По результатам предварительных испытаний для модифицирования поверхности частиц графита и дисульфида молибдена при встраивании их в керамическую матрицу установлена необходимость применения полярных жидкостей, для чего из различных веществ был выбран глицерин.

В процессе оксидирования антифрикционные дисперсные компоненты, находящиеся в электролите, перемещаются в зону действующего искрового разряда на поверхности детали под влиянием неоднородного электрического поля (электрофоретический эффект) и встраиваются в формирующуюся керамическую матрицу покрытия.

Установка для синтеза МДО-покрытия состояла из источника тока конденсаторного типа и ванны с рубашкой охлаждения, заполненной опытным электролитом. Электролит состоит из щелочи NaOH, жидкого стекла и основного компонента — дистиллированной воды.

Триботехнические испытания композиционных покрытий с керамической матрицей и различными наполнителями выполняли на машине трения МТП [9], реализуемая схема трения: диск—палец (с покрытием). Контробразец для испытаний полученных антифрикционных покрытий изготавливали из закаленной до твердости 50...55 HRC инструментальной легированной стали марки ХВГ.

Сила трения регистрировалась непрерывно тензометрическим прибором, а линейный износ — дискретно индикатором индукционного типа. Исследования проводили при скорости скольжения 0,15...0,95 м/с и контактных давлениях 0,5...15 МПа без применения дополнительного смазочного материала. Относительная ошибка определения линейного износа не превышала 17 %, а коэффициента (силы) трения — 10 %.

Толщину неэлектропроводных покрытий определяли вихретоковым толщиномером с точностью до 1 мкм.

Технологические основы получения покрытий

За основу технологии получения композиционных покрытий была взята существующая технология микродугового синтеза оксидного покрытия на алюминиевом сплаве. Нанесение рассматриваемого покрытия не требует тщательной предварительной очистки поверхности и сложного лабораторного оборудования. Получаемое по известной технологии покрытие имеет достаточную толщину, хорошую адгезию с материалом подложки (табл. 1) и высокую твердость. Учитывая основной недостаток базового покрытия — высокий коэффициент "сухого" трения, с большой вероятностью вызывающий заедание

Таблица 1

Свойства оксидного керамического покрытия на алюминиевом сплаве Д1 и условия его формирования

Толщина покрытия, мм	Коэффициент сухого трения	Интенсивность линейного износа	Микротвердость, ГПа	Состав электролита
0,1...0,2	0,25...0,35	$13 \cdot 10^{-9}$	9...12	NaOH, жидкое стекло, дистиллированная вода

пары трения и быстрое адгезионное и усталостное разрушение контактирующих поверхностей, модифицирование покрытия вели в направлении снижения коэффициента трения за счет применения твердосмазочного материала. После начала процесса электрохимического оксидирования наблюдается рост барьерного оксидного слоя на поверхности покрываемого алюминиевого образца, из которого в дальнейшем формируется тугоплавкая керамическая матрица. Одновременно из раствора электролита осаждаются и удерживаются электромагнитными силами на поверхности образца мелкодисперсные частицы твердой смазки, которые постепенно встраиваются в матрицу.

Включение частиц из графита в покрытие осложняется из-за гидрофобности его поверхности и хороших электропроводных свойств. При подключении электрического тока частицы графита осаживаются на поверхности покрываемой детали и вызывают ее коррозию. Происходит нарушение пассивного слоя поверхности и тем самым создаются очаги безразрядного прохождения тока.

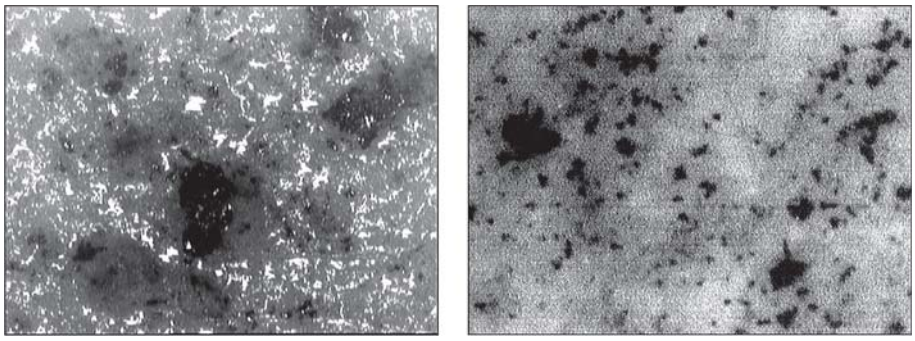
Для решения данной проблемы были использованы два способа формирования покрытия. Согласно первому способу электрохимический процесс получения покрытия разделяли на два этапа. Вначале образец покрывали в электролите без содержания частиц графита в течение 15 мин при напряжении 450...500 В, что вполне достаточно для образования тонкого диэлектрического покрытия толщиной 3...10 мкм. Затем процесс проводили в электролите, содержащем частицы графита при конечном напряжении 550...600 В и плотности тока 3 А/дм^2 в течение одного или более часов. Гидрофобизированные частицы графита в электоролите-суспензии могут коагулировать и оседать, что приводит к снижению их концентрации в покрытии. Для исключения образования конгломератов проводили активное перемешивание электролита посредством барботажа сжатым воздухом. Установленный в ходе экспериментов оптимальный состав электролита приведен в табл. 2. В полученном по данному способу керамическом покрытии имеется градиент концентрации дисперсного графитового наполнителя, и он полностью отсутствует в граничном с алюминием слое.

Отличительная особенность второго способа формирования покрытия заключалась в том, что для снижения электропроводности контакта графит—поверхность алюминия графит покрывался диэлектрической пленкой, образованной глицерином, адсорбированным на его поверхности. Для предотвращения распада глицерина и изменения его свойств как полярной жидкости при высоких температурах, электролит охлаждали до температуры 5...10 °С. Микроструктура покрытия изображена на рис. 1 (черные точки на рисунке представляют собой вкрапления частиц графита).

Таблица 2

Состав электролитов для получения керамических покрытий, содержащих антифрикционные наполнители

Компонент электролита	Концентрации элементов, % мас.		
	Дисперсная фаза		
	Графит	Дисульфид молибдена	Магнетит
Щелочь NaOH	0,1	0,1	0,1
Жидкое стекло	1,5	1,1	1,5
Частицы дисперсной фазы	3,0	4,5	4,0...6,0
Глицерин	2,0	3,0	—



а) *б)*

Рис. 1. Микроструктура поверхности керамического композиционного покрытия с графитовым наполнителем на алюминиевом сплаве Д1 (×500): *а* — в обычном свете; *б* — в поляризованном свете

При введении в состав керамического покрытия дисперсных частиц дисульфида молибдена, являющегося, в отличие от графита, диэлектриком, также возникли определенные трудности. Существенным недостатком дисульфида молибдена является его относительно высокая химическая активность: в процессе формирования покрытия под действием высокой температуры и окислительной среды он может переходить в двуокись MoO_2 и трехокись MoO_3, которые существенно снижают антифрикционные свойства получаемого покрытия. Для предотвращения окисления дисульфида молибдена также были использованы защитные свойства глицерина. Процесс электрохимического формирования покрытия проводили при начальном напряжении 470 В и конечном — 580 В, плотности тока 2,4 А/дм^2 в течение нескольких часов.

Введение нанодисперсных частиц магнетита в состав композиционного покрытия не вызвало технологических трудностей и существенно не повлияло на ход процесса микродугового оксидирования.

Состав электролитов, включающий дисперсные фазы различных наполнителей, приведен в табл. 2.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Триботехнические исследования подтвердили эффективность применения дисперсных твердых смазочных материалов при синтезе керамических покрытий, эксплуатируемых в узлах "сухого" трения, а также показали целесообразность применения полярной жидкости (глицерина) для получения покрытий.

Установлено, что коэффициент трения керамического покрытия с дисперсным наполнителем MoS_2, включенным в покрытие без обработки в глицерине, составляет 0,25...0,30, что соответствует традиционному МДО-покрытию без антифрикционных добавок. Это подтверждает рациональность применения глицерина или аналогичного по ионогенным свойствам поверхностно-активного вещества.

На рис. 2 показаны временные зависимости коэффициента трения исследуемых материалов. Условия испытаний: давление на контакте — 1,5 МПа; скорость скольжения — 0,47 м/с. В начале испытаний происходит приработка материалов покрытий и сила трения снижается. Рост коэффициента трения обусловлен постепенным истиранием покрытий и появлением участков с

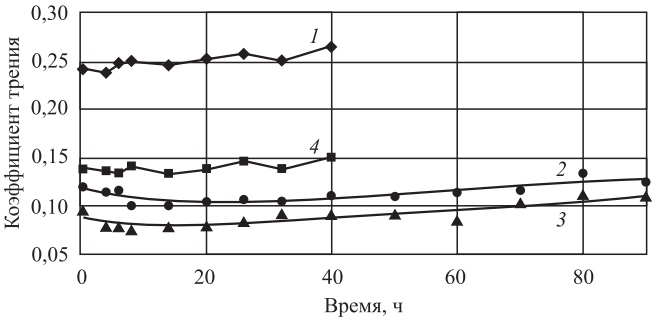


Рис. 2. Коэффициенты трения композиционных керамических покрытий в зависимости от продолжительности испытаний. Антифрикционные наполнители:
1 — без наполнителя; *2* — графит; *3* — дисульфид молибдена; *4* — магнетит

металлическим контактом. Сила трения композиционных покрытий с дисульфидом молибдена ниже, чем у покрытий, имеющих в составе дисперсный графит (см. рис. 2, кривые *2* и *3*), при допустимых температурах работы узла трения не выше 150 °С.

Влияние концентрации в электролите антифрикционного наполнителя на триботехнические свойства керамических покрытий представлено на рис. 3 и 4. Увеличение концентрации частиц MoS_2 и графита ведет к практически линейному снижению коэффициента трения (см. рис. 3). На рис. 4 показано, что зависимости интенсивности линейного износа от концентраций MoS_2 (кривая *1*) и графита (кривая *2*) имеют экстремальный характер. Установлено, что оптимальная концентрация MoS_2 в электролите составляет около 45 г/л, что соответствует около 25 % об. концентрации MoS_2 в композиционном покрытии. При

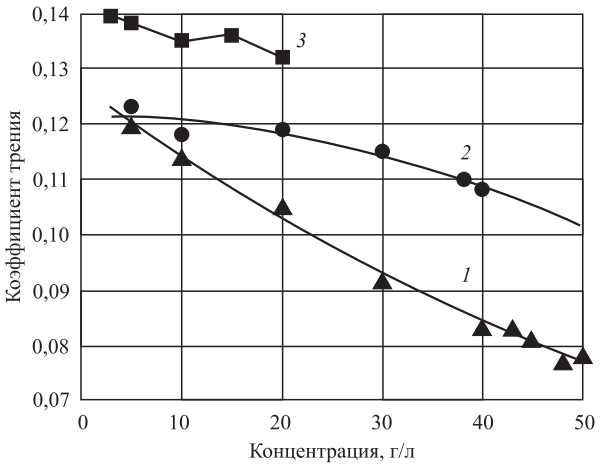


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от концентрации дисперсных частиц MoS_2 (*1*), графита (*2*) и магнетита (*3*) в электролите

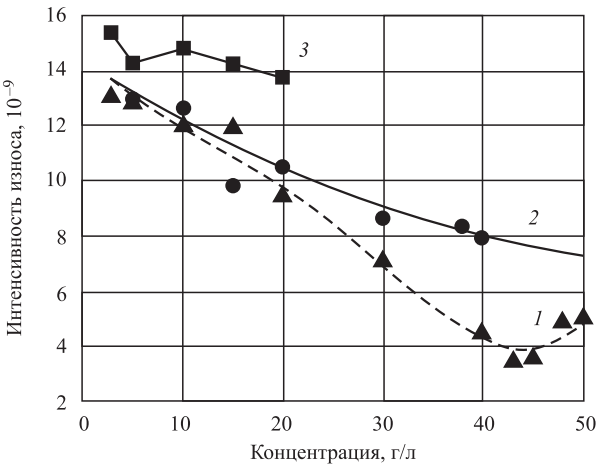


Рис. 4. Зависимость интенсивности линейного износа от концентрации дисперсных частиц MoS_2 (*1*), графита (*2*) и магнетита (*3*) в электролите

дальнейшем повышении концентрации частиц молибдена в электролите (свыше 50 г/л) наблюдается снижение прочности и износостойкости готового покрытия, а также снижение адгезии между покрытием и основным материалом.

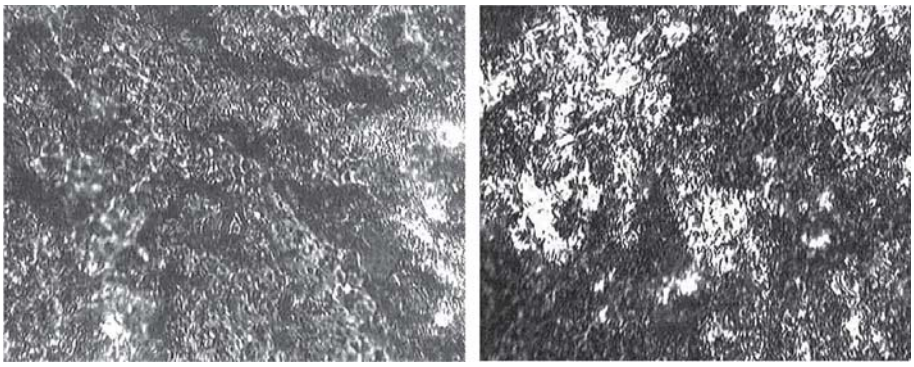
Учитывая, что смазочные свойства графита на воздухе ниже, чем у MoS_2, увеличение его концентрации в электролите ведет к менее значительному снижению коэффициента трения. Оптимальная концентрация составила 30 г/л в электролите и, соответственно, около 20 % об. в композиционном материале покрытия. Значение критической концентрации определено примерно как 35 г/л (см. рис. 4, кривая *2*), выше которой наблюдается увеличение интенсивности линейного износа, из-за снижения толщины сформированного покрытия и нарушения его однородности. При таких концентрациях дисульфида молибдена наблюдается нарушение процесса формирования покрытия, вызванное быстрым ростом очагов коррозии на обрабатываемой поверхности.

Результаты триботехнических испытаний полученных покрытий указаны в табл. 3. Из приведенных в таблице данных видно, что включение в состав покрытия нанодисперсных частиц магнетита привело к увеличению микротвердости покрытия, по-видимому, из-за того, что покрытие стало менее рыхлым в результате уменьшения пористости почти в 2 раза. Фрикционные свойства покрытий с магнетитом при трении без смазки несколько улучшились, но общий уровень их ниже, чем у покрытий с твердыми смазками.

Таблица 3

Результаты триботехнических испытаний фрикционных свойств композиционных покрытий с различными наполнителями (концентрация графита и дисульфида молибдена в электролите около 40 г/л, магнетита — 20 г/л)

Материал наполнителя	Толщина покрытия, мм	Коэффициент трения	Интенсивность линейного износа, 10^{-9}	Микротвердость, ГПа
MoS_2	0,1...0,3	0,08...0,09	4	10...12
Графит	0,1...0,25	0,10...0,11	8	9...11
Fe_3O_4	0,1...0,2	0,13...0,15	14	11...13



а) *б)*

Рис. 5. Поверхности трения композиционного покрытия с частицами MoS_2 (×500):
а — покрытый образец; *б* — контртело—сталь ХВГ

На рис. 5 представлены фотографии дорожек трения на покрытии с частицами MoS_2. Темные области на поверхности трения образца с керамическим антифрикционным покрытием и стального контробразца свидетельствуют об образовании на них защитной смазочной пленки из MoS_2.

Были проведены исследования влияния контактного давления на интенсивности линейного износа покрытий с частицами графита и MoS_2. Во всем исследованном интервале рабочих давлений (0,5...7,0 МПа) наиболее высокие антифрикционные характеристики показало керамическое покрытие с наполнителем MoS_2.

Повышенная температура в зоне трения в значительной степени влияет на покрытия с дисульфидом молибдена и

в меньшей степени — на покрытие с графитом. При температурах до 150 °С покрытия с частицами дисульфида молибдена проявляют лучшие триботехнические свойства, чем покрытия с частицами графита, в то время как при температурах выше 200 °С и до 450 °С покрытия с частицами графита имеют преимущества, что объясняется различной термостабильностью частиц дисперсной фазы и различным механизмом смазочного действия.

В реальных узлах трения зачастую наблюдается интенсивный износ не антифрикционного материала, а материала контртела. В данной работе износ стального контртела был одного порядка с износом покрытия, причем тем меньше, чем выше его твердость.

Заключение

Предложен новый подход к получению твердосмазочных композиционных керамических покрытий на алюминии и его сплавах методом микродугового оксидирования, заключающийся в том, что в электролит дополнительно введен модифицированный полярной жидкостью мелкодисперсный порошок дисульфида молибдена, магнетита или графита.

Проведены испытания физико-механических и триботехнических свойств полученных композиционных материалов. В отличие от традиционных оксидных керамических материалов, полученных методом микродугового оксидирования, они обладают более высокими антифрикционными и противоизносными свойствами, что позволяет применять их в условиях без дополнительной смазки жидкими или консистентными материалами. У композиционного керамического покрытия с твердосмазочным наполнителем MoS_2 интенсивность линейного износа и коэффициент трения в 1,5...2,0 раза ниже, чем у покрытия с частицами дисперсного графита. Хотя триботехнические характеристики покрытия с нанодисперсным магнетитом в составе существенно лучше, чем у традиционных МДО-покрытий, но они также уступают керамическим твердосмазочным материалам с наполнителем MoS_2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

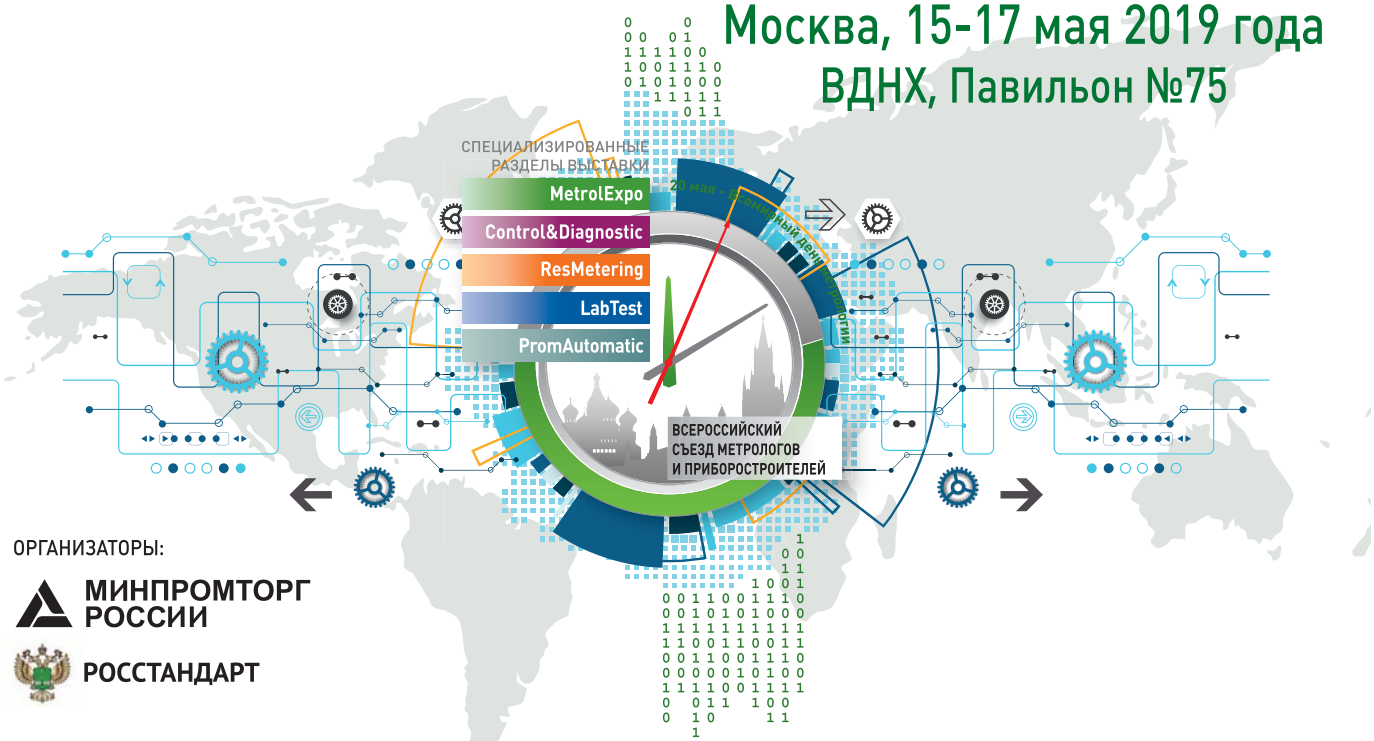
1. **Микродуговое** оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
2. **Белеванцев В.И., Терлеева О.П., Марков Г.А.** Микроплазменные электрохимические процессы // Защита металлов. 1998. Т. 34. № 5. С. 471—486.
3. **Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Ефименко А.В.** Микродуговое оксидирование металлов и сплавов. Владивосток: ДВФУ, 2013. 522 с.
4. **Микродуговое** оксидирование в электролитах-суспензиях (обзор) / А.М. Борисов, Б.Л. Крит, В.Б. Людин и др. // Электронная обработка материалов. 2016. № 1. С. 50—77.
5. **Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.** Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 3. С. 13—16.
6. **Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.** Анализ работы трибосопряжений на основе керамических алмазосодержащих материалов // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 3. С. 279—284.
7. **Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.** Зависимость износа пары трения композиционный алмазосодержащий материал — керамика // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования. 2017. № 10. С. 153—157.
8. **Фертман В.Е.** Магнитные жидкости: справочное пособие. Минск: Вышэйш. шк., 1988. 184 с.
9. **Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В.** Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 107—113.

ГЛАВНОЕ СОБЫТИЕ В ОБЛАСТИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, ТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, МЕТРОЛОГИИ И ИСПЫТАНИЙ

МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ – ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

Москва, 15-17 мая 2019 года
ВДНХ, Павильон №75



ОРГАНИЗАТОРЫ:

МИНПРОМТОРГ РОССИИ

РОССТАНДАРТ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ РАЗДЕЛЫ ВЫСТАВКИ

METROLEXPO
МЕТРОЛОГИЯ, ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ

CONTROL&DIAGNOSTIC
КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

LABTEST
ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

PROMAUTOMATIC
ПРОМЫШЛЕННАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ

RESMETERING
УЧЁТ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

WEIGHT SALON
ВЕСОВОЙ САЛОН

ЦИФРЫ И ФАКТЫ 2018 года:

Участники – 296 компаний из 24 стран мира

Посетители – 5046 специалистов из 63 регионов России

Площадь экспозиции – 6870 м^2

Приборы и оборудование – 2145 единиц

Мероприятия съезда – 25 секций

Докладчики – 84 чел.

Делегаты – 980 чел.

ДИРЕКЦИЯ ФОРУМА

Тел./Факс: +7 (495) 937-40-23

E-mail: metrol@expoprom.ru

Спешите забронировать стенд

www.metrol.expoprom.ru

Международный союз машиностроителей и ряд ведущих университетов и организаций различных стран 23—29 сентября 2019 г. в городе Севастополе проводят

XXVI международную научно-техническую конференцию:

"МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОСФЕРА XXI ВЕКА"

Цель конференции — обмен научно-технической информацией, определение перспективных путей создания и развития новой техники и технологий, разработка совместных научных программ, развитие международного сотрудничества, установление деловых контактов и коммерческих связей в данной области.

Международный программный комитет сформирован из ведущих ученых и специалистов данного профиля различных университетов и организаций мира.

ОСНОВНАЯ ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Практика и перспективы создания и применения прогрессивных и нетрадиционных технологий. Интегрированные технологии. Сборка в машиностроении, приборостроении. Абразивные и виброабразивные технологии.
2. Механизация и автоматизация производственных процессов. Прогрессивное оборудование.
3. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления производством. Экономические проблемы техносферы.
4. Проблемы создания и применения прогрессивных инструментов и инструментальных материалов.
5. Управление качеством продукции и технических систем. Проблемы инженерии поверхностного слоя изделий.
6. Современные проблемы машиноведения и деталей машин.
7. Современные проблемы инженерии материалов, процессов и материаловедения в машиностроении. Упрочняющие технологии и покрытия изделий машиностроения. Наноматериалы и нанотехнологии.
8. Вопросы моделирования и расчетов технических систем.
9. Специальная техника и технологии техносферы. Экологические проблемы техносферы.
10. Современные проблемы инженерного образования. Евроинтеграция в образовании.

В рамках конференции можно проводить рекламу и презентации фирм. Рабочие языки конференции — русский, украинский, английский, немецкий и французский.

Адрес оргкомитета

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ДонНТУ, кафедра "Технология машиностроения", Оргкомитет
☎ Тел.: + 38 062 301-08-40, + 38 062 301-08-05;
☎ Моб. тел.: + 38 071 3060879; + 7 978 1369454 (во время конф.)
✉ E-mail: tm@fimm.donntu.org или mntk21@mail.ru
💻 http://konf-sev.donntu.org, http://iumb.donntu.org, http://www.donntu.org

Михайлов Александр Николаевич — председатель
Голубов Николай Васильевич — ученый секретарь

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 07.02.2019 г. Подписано в печать 26.03.19 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**