

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 10 (130)
октябрь
2015

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.

А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.

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.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.

С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.

Н.К. КРИОНИ

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:

И.Н. МЫМРИНА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" 85159, "Пресса России" 39269, "Почта России" 60252) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.

Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

- Балдаев Л.Х., Хамицев Б.Г., Гавриленко Т.П., Балдаев С.Л., Ахметгареева А.М., Исмагилова Р.Р.** Абразивная подготовка напыляемой поверхности с помощью детонационной установки3
- Кокорева О.Г.** Разработка модели способа обработки тяжело нагруженных поверхностей деталей машин8
- Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Воронков В.И.** Теоретико-экспериментальное исследование охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях противодавления металлоплакирующих смазочных материалов 11



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н.** Улучшение эксплуатационных характеристик деталей поверхностным модифицированием методом плакирования гибким инструментом 16
- Тихонов А.А., Тихонов Ал.А.** Формирование шероховатости поверхности при гидроабразивной обработке21



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

- Боровик Д.И., Пантелеенко Ф.И., Столин А.М.** Получение композиционных электрохимических покрытий на железной основе, упрочненных СВС-частицами с последующей лазерной обработкой25
- Веселовский А.А., Ерофеев В.В.** Повышение срока службы деталей из серого чугуна для телескопических и поршневых гидроцилиндров29
- Рослякова Л.И., Росляков И.Н.** Моделирование комплекса легирования стали при цементации, влияющей на образование карбидной фазы32
- Степанов М.С., Домбровский Ю.М.** Формирование карбидного покрытия при микродуговом молибденировании стали34



ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

- Гончаров С.В., Алексеенко В.Г.** Технология ремонта корпуса дифференциала автоматической коробки перемены передач переднеприводного автомобиля с применением полимерных композиционных материалов39
- Михальченков А.М., Лушкина С.А., Михальченкова М.А.** Восстановление деталей почвообрабатывающих машин абразивостойким дисперсионно-упрочненным композитом на основе эпоксидной смолы43

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

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 10 (130)
October
2015

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. BEZYAZHCHNYI

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
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
N.K. KRIONI
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.A. SHULOV
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription,
which can be issued in any post office
(index on the catalogues: "Rospechat"
85159, "Pressa Rossii" 39269, "Pochta
Rossii" 60252) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry
Tele- and Broadcasting of Mass
Communications Media. The certificate
of registration ПИ № 77-17733,
March 9, 2004

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Baldaev L.Kh., Khamitsev B.G., Gavrilenko T.P., Baldaev S.L., Ahmetgareeva A.M., Ismagilova R.R. Abrasive treatment of substance surface by using D-Gun.....3

Kokoreva O.G. Development of a method model for processing heavy duty surfaces of machine parts.....8

Shchedrin A.V., Kozlov A.Yu., Voronkov V.I. Theoretical and experimental study of covering the surface plastic deformation in a counter-metalplacking lubricants..... 11



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Levantsevich M.A., Maksimchenko N.N. Improving the performance characteristics of the details by the surface modification method of cladding by flexible tool 16

Tikhonov A.A., Tikhonov A.I.A. Forming a surface roughness with waterjet machining21



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Borovik D.I., Panteleenko F.I., Stolin A.M. Obtaining of iron-based composite electrochemical coatings reinforced by SHS-particles with successive laser surface treatment25

Veselovsky A.A., Erofeev V.V. Increasing service life of parts made of cast iron for telescopic and piston hydraulic cylinders29

Roslyakova L.I., Roslyakov I.N. Complex's modeling of steel alloying during cementation, influencing the formation of the carbide phase.....32

Stepanov M.S., Dombrovsky Yu.M. The formation of carbide coating at the microarc molybdenizing of steel.....34



POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

Goncharov S.V., Alekseenko V.G. The repairing technology for the differential case of the automatic transaxle assy of the front-wheel car with application of polymeric composite materials39

Michalchenkov A.M., Lushkina S.A., Mikhailchenkova M.A. The restoration of parts of tillage machines with abrasion resistant dispersion-strengthened composites based on epoxy resin43

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



УДК 621.793

¹Л.Х. Балдаев, ¹Б.Г. Хамицев, ²Т.П. Гавриленко, ²С.Л. Балдаев, ¹А.М. Ахметгареева, ¹Р.Р. Исмагилова
(¹ ООО "Технологические системы защитных покрытий", г. Щербинка, ² ООО НТЦ "Детонация", г. Новосибирск)
E-mail: neuimin@tspc.ru

Абразивная подготовка напыляемой поверхности с помощью детонационной установки

Исследована возможность использования детонационного оборудования не только для получения слоя покрытия, но и для абразивной обработки напыляемой поверхности в целях ее активации перед напылением. Предложены различные способы абразивной подготовки поверхности подложки с помощью детонационной установки.

Ключевые слова: детонационное напыление, пескоструйная обработка, абразивные частицы, активация поверхности, детонационная волна, микрошлифпорошки.

Ability of using detonation spray method to simultaneous coating deposition and abrasive activation of substance surface was investigated. Different technologies of abrasive treatment of substance surface by using D-Gun were considered.

Keywords: D-Gun spraying, sandblasting, abrasive particles, surface activation, detonation wave, microcrystalline grinding powders.

Введение

Качество подготовки поверхности изделия перед нанесением газотермических покрытий играет весьма существенную роль в технологии получения защитного слоя. От эффективности подготовки поверхности, степени ее активации во многом зависит основная характеристика покрытия — прочность сцепления с подложкой. Наиболее распространенным способом подготовки напыляемой поверхности деталей является пескоструйная обработка.

При традиционной обработке деталей в камере пескоструйной установки частицы корунда с помощью струи сжатого воздуха направляются на напыляемую поверхность и активируют ее, создавая требуемый микрорельеф.

Выделение этапа подготовки поверхности в отдельную операцию приводит к появлению большого промежутка времени (до нескольких часов) между моментом получения активированной поверхности при абразивно-струйной очистке и моментом непосредственного напыления покрытия. За это время происходит переход поверхности в равновесное состояние. Кроме того, снижается производительность производственного процесса в целом.

В ряде случаев данный способ подготовки поверхности оказался вообще неприемлемым из-за значительных остаточных напряжений, возникающих при его исполь-

зовании. Под действием этих напряжений происходит сильное коробление деталей небольшой толщины, например тонких пластин, лент фольги и т. п. (рис. 1).

Данная работа посвящена исследованию возможности использования детонационного оборудования не только для получения слоя покрытия, но и для абразивной подготовки напыляемой поверхности.

Используемое оборудование и материалы

Абразивная подготовка напыляемой поверхности и нанесение покрытий проводились на автоматической детонационной установке "Обь", оснащенной двумя по-

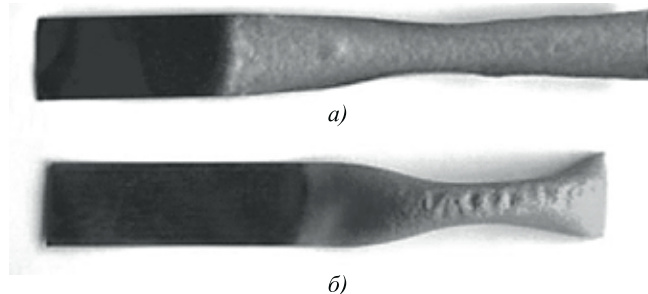


Рис. 1. Коробление ленты фольги после обработки в пескоструйной камере:

а — никромовая фольга; б — медная фольга

рошковыми дозаторами. Конструкция установки позволяет располагать каждый из дозаторов в различных местах по длине ствола, а также обеспечить их попеременную или одновременную работу. Варьируя режимами работы установки путем изменения места ввода порошка в ствол, степени заполнения ствола рабочей взрывчатой смесью газов, грануляции используемого порошка, устанавливалась требуемая температура частиц на выходе из ствола, т. е. контролировалось их агрегатное состояние.

В качестве абразивного материала для активации поверхности подложки использовались корундовые микрошлифпорошки марки 25А с зернистостью F120, F360, F400, F500 и F600 (ТУ 3980-075-00224450—99).

Гранулометрический состав порошков исследовался методом лазерной дифракции в водных дисперсиях на приборе Analysette 22 (Fritsch).

Исследования микрорельефа напыляемой поверхности после абразивной подготовки, а также структуры напыляемого покрытия проводились на оптическом микроскопе Zwick/Roel Zhм. Механические свойства напыленных покрытий оценивались по прочности сцепления с подложкой ($\sigma_{\text{сц}}$), определяемой по штифтовой методике, а также измерением твердости по Виккерсу (HV 50).

Результаты исследований

Средний размер абразивных частиц в обычной пескоструйной установке составляет около 1 мм. При относительно невысоких скоростях этих частиц при встрече с подложкой их кинетической энергии достаточно для возникновения больших остаточных напряжений и появления значительных деформаций обрабатываемых поверхностей.

В работе [1] описывается способ подготовки поверхности детали перед напылением детонационного покрытия, основанный на воздействии на напыляемую поверхность потока абразивных частиц, формируемого с помощью установки детонационного напыления. При этом подготовка поверхности осуществляется частицами порошка, который в дальнейшем используется для напыления покрытия. Однако режимы работы детонационной установки подбираются такие, чтобы температура частиц порошка при выходе из ствола не достигала температуры плавления и они сохраняли необходимую твердость для получения требуемого микрорельефа. После завершения этапа подготовки поверхности производят перенастройку установки на режимы работы, при которых частицы порошка при выходе из ствола нагреваются до температуры плавления, и начинают процесс напыления покрытия.

В связи с тем что размер частиц корунда, применяемого для напыления детонационных покрытий, как правило, не превышает 50 мкм, кинетическая энергия, кото-

рой они обладают в момент встречи с подложкой при режимах абразивной подготовки поверхности, несмотря на высокие скорости значительно меньше энергии частиц в обычной пескоструйной установке. Поэтому степень деформации поверхности подложки, а также остаточные напряжения существенно снижаются, что позволяет проводить обработку деталей малой толщины.

На рис. 2 представлены характерные микрорельефы поверхностей подложки после абразивной подготовки в пескоструйной камере и с помощью детонационной установки. Следует отметить, что для большинства напыляемых материалов при незначительной толщине напыленного слоя (до 0,2 мм) высота микронеровностей не оказывает заметного влияния на прочность сцепления покрытия с подложкой.

Промежуток времени между этапами абразивной подготовки напыляемой поверхности и напыления покрытия в описанном выше способе [1] гораздо короче, чем при традиционной абразивной обработке, но все же вполне достаточен для перехода ее в равновесное состояние и значительного снижения степени активации. Для перехода от этапа подготовки поверхности к этапу нанесения покрытия необходимо остановить работу детонационной установки и перенастроить ее на режим непосредственного напыления, на что в зависимости от конструкции установки может потребоваться до 10 мин.

Для сокращения промежутка времени между этапами подготовки поверхности и нанесения покрытия авторами был предложен способ подготовки поверхности из-

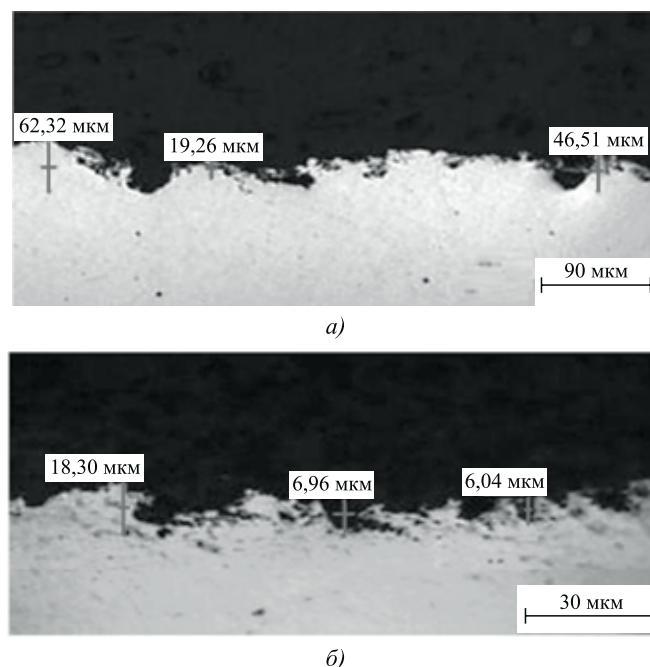


Рис. 2. Характерные микрорельефы поверхности подложки после абразивной подготовки:

а — в пескоструйной камере; *б* — с помощью детонационной установки микрошлифпорошком корунда F120

деля перед нанесением покрытия, исключая операцию перехода от режима очистки к режиму напыления [2]. Указанная цель достигается тем, что порошок для очистки напыляемой поверхности подается из отдельного дозатора, расположенного на таком расстоянии от среза ствола, чтобы очищающие частицы при встрече с подложкой находились в твердом состоянии и обеспечивали максимальную степень активации. После завершения этапа подготовки поверхности данный дозатор отключается и одновременно, без остановки работы детонационной установки, включается дозатор с порошком для непосредственного напыления слоя покрытия. Таким образом, абразивная подготовка поверхности и напыление покрытия осуществляются на одних и тех же режимах.

В качестве абразивного материала для очистки использовался корунд марки 25А с зернистостью от F120 до F400 в зависимости от допустимой степени коробления детали. Реализация описываемого способа осуществлялась на детонационной установке "Обь", система управления которой позволяет обеспечить выполнение указанных этапов в требуемой последовательности и с заданной продолжительностью.

В целях еще большего сокращения промежутка времени между моментом активации поверхности и моментом начала формирования слоя покрытия был разработан способ детонационного напыления [3] с синхронной абразивной обработкой напыляемой поверхности, в котором абразивные частицы порошка и напыляемые частицы подаются одновременно с помощью двух дозаторов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга на стволе установки (рис. 3).

Частицы напыляемого материала и абразивные частицы для активации напыляемой поверхности, вводимые в ствол в различных местах, разгоняются и

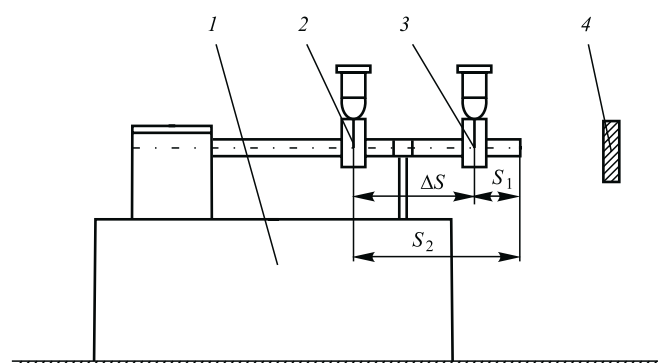


Рис. 3. Схема расположения порошковых дозаторов при напылении с синхронной абразивной подготовкой подложки:

1 — детонационная установка; 2 — дозатор с порошком для напыления покрытия; 3 — дозатор с абразивным материалом для активации поверхности подложки; 4 — подложка; S_1 — глубина загрузки абразивного материала; S_2 — глубина загрузки напыляемого порошка; ΔS — расстояние между дозаторами

разогреваются за счет детонационной волны и потока газов, следующего за ней.

Глубины загрузки (расстояние от места ввода в ствол до среза ствола) абразивного материала S_1 и напыляемого порошка S_2 , а также расстояние между дозаторами ΔS выбирались таким образом, чтобы абразивные частицы достигали напыляемой поверхности в твердом состоянии, а напыляемые частицы не могли их догнать до момента соударения с подложкой.

Специальное программное обеспечение применяемой детонационной установки «Обь», разработанное на основе методов численного моделирования динамики двухфазного потока [4–6], позволяет определить основные энергетические характеристики частиц различного размера — скорость, температуру, агрегатное состояние как внутри ствола, так и на его срезе. На рис. 4 показана динамика разогрева и разгона абразивных частиц корунда и напыляемых частиц никеля в стволе, а в табл. 1 представлены значения температуры и скорости частиц на выходе из ствола.

Расчеты данных энергетических параметров частиц проводились для варианта работы детонационной установки на следующем режиме:

Состав рабочей взрывчатой смеси пропан-бутана и кислорода.....	1:4
Длина ствола установки, мм.....	1000
Диаметр ствола, мм.....	22
Степень заполнения ствола взрывчатой смесью, %	42
Глубина загрузки абразива, мм	200
Глубина загрузки напыляемого материала, мм.....	400

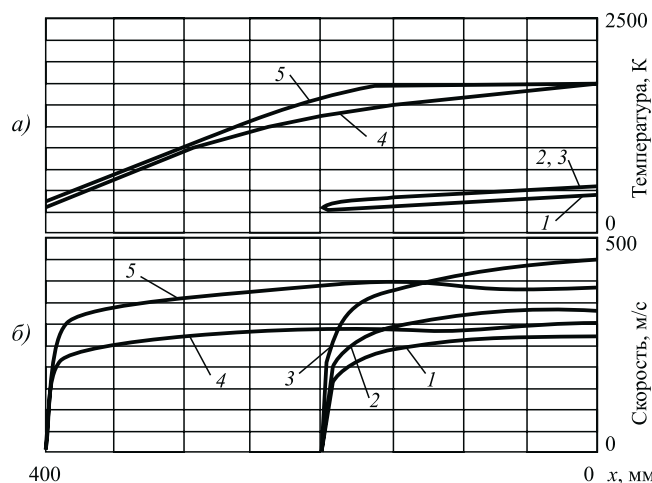


Рис. 4. Изменение температуры (а) и скорости (б) абразивных частиц корунда (F120) и напыляемых частиц никеля в стволе детонационной установки начиная от места ввода (200 и 400 мм от среза ствола) до выхода:

1 — частицы Al_2O_3 (диаметр частиц $d_{\text{ч}} = 120$ мкм); 2 — частицы Al_2O_3 ($d_{\text{ч}} = 80$ мкм); 3 — частицы Al_2O_3 ($d_{\text{ч}} = 40$ мкм); 4 — частицы Ni ($d_{\text{ч}} = 50$ мкм); 5 — частицы Ni ($d_{\text{ч}} = 30$ мкм)

Таблица 1

Расчетные значения температуры и скорости абразивных частиц корунда и напыляемых частиц никеля при выходе из ствола детонационной установки

Характеристика	Материал частиц, мкм				
	Al ₂ O ₃ (корунд)			Ni	
Диаметр частиц, мкм	120	80	40	50	50
Температура частиц, °С	264	265	203	1455	1455
Скорость частиц, м/с	267	328	446	300	386
Глубина загрузки порошка, мм	200	200	200	400	400

Как видно из графиков, приведенных на рис. 4, и табл. 1, при выбранных месте ввода и размерах абразивных частиц их температура при выходе из ствола не превышает 265 °С, что позволяет частицам находиться в твердом состоянии при встрече с подложкой. При этом их скорость может превышать скорость частиц никеля, формирующих слой покрытия, что обеспечивает возможность достижения абразивными частицами поверхности подложки раньше напыляемых частиц.

Таким образом, с помощью разработанной программы, варьируя параметрами процесса напыления, можно подобрать оптимальные места ввода и размеры абразивных частиц для обеспечения качественной подготовки напыляемой поверхности. В зависимости от допускаемого уровня остаточных напряжений зернистость абразивного материала может измениться от F120 до F600, т. е. от размеров шлифпорошков до размеров микрошлифпорошков.

При активации поверхности подложки с весьма малой толщиной (0,1...0,5 мм), например при нанесении покрытия на фольгу, степень ее коробления настолько велика, что в качестве абразивного материала приходится использовать микрошлифпорошки F500 или

F600. В связи с этим для нанесения керамических покрытий на детали малой толщины был разработан способ абразивной подготовки поверхности изделия при детонационном напылении оксида алюминия [7]. Данный способ заключается в том, что для абразивной подготовки напыляемой поверхности и для напыления покрытия из Al₂O₃ используется один и тот же порошок материал, подаваемый из одного дозатора, причем оба процесса осуществляются синхронно. Для реализации данного способа использованы характерные особенности гранулометрического состава корундовых микрошлифпорошков, применяемых для детонационного напыления. Используемый порошок материал представляет собой мелкие частицы корунда, гранулометрический состав которого определяется техническими условиями на его изготовление и характеризуется кривой распределения частиц по размерам для каждого уровня зернистости. На рис. 5 представлена гистограмма, которая показывает распределение частиц по размерам в микрошлифпорошке Al₂O₃ с зернистостью F500 (ТУ 3980-075-00224450—99).

Для получения покрытия из данного порошка и одновременной абразивной подготовки поверхности подложки назначены следующие характеристики процесса:

- Состав рабочей взрывчатой смеси газов (Q_{C₂H₂}/Q_{O₂})..... 1,0/2,5
- Расход ацетилен на один цикл (Q_{C₂H₂}), см³47,0
- Расход кислорода на 1 цикл (Q_{O₂}), см³ 118,2
- Степень заполнения ствола установки рабочей взрывчатой смесью газов, %45
- Длина ствола детонационной установки, мм ... 1000
- Глубина загрузки порошка, мм 200
- Дистанция напыления, мм 110
- Частота стрельбы, выстрел/с 4
- Скорость перемещения напыляемой

- поверхности, мм/с24
- Толщина единичного слоя, мкм/выстрел 8

Проведение процесса напыления на указанном режиме обеспечивает получение равномерного слоя электроизоляционного покрытия из оксида алюминия толщиной 0,03...0,04 мм. Прочность сцепления покрытия с подложкой из меди составляет 30...45 МПа.

Расчетные значения температуры и скорости частиц различных размеров, содержащихся в порошке корунда с зернистостью F500 при выходе из ствола детонационной установки, представлены в табл. 2.

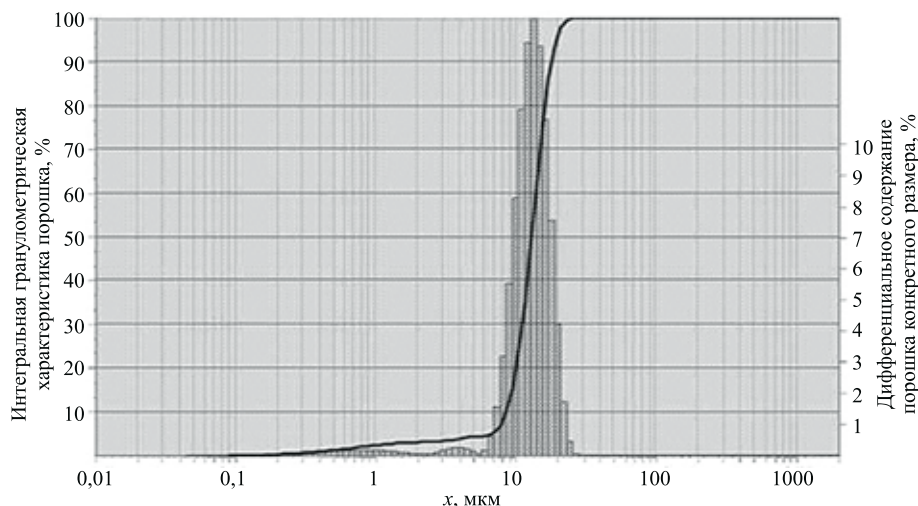


Рис. 5. Распределение частиц по размерам в микрошлифпорошке Al₂O₃ с зернистостью F500, ТУ 3980-075-00224450—99

Таблица 2

Энергетические характеристики частиц порошка Al_2O_3 с зернистостью F500 на срезе ствола детонационной установки

№ частицы	1	2	3	4	5
Исходный размер частиц, мкм	30,0	20,0	10,0	5,0	2,0
Температура частицы на срезе ствола, °С	1722	2046	2665	2801	1610
Скорость частицы на срезе ствола, м/с	642	764	960	1078	1088

На рис. 6 приведены графики изменения температуры и скорости частиц используемого порошка начиная с момента старта до выхода из ствола установки. Глубина загрузки составляет 200 мм.

Как видно графиков, приведенных на рис. 6, и табл. 2, за время движения в стволе детонационной установки до температуры плавления успевают прогреться лишь определенная часть от общего диапазона частиц — размерами 5...20 мкм.

Самые крупные частицы (более 20 мкм) не прогреваются до температуры, достаточной для формирования покрытия ($0,9T_{пл}$), из-за значительной массы, поэтому, находясь в твердом состоянии и бомбардируя напыляемую поверхность, они создают абразивный эффект.

Частицы размером 5...20 мкм успевают прогреться до температуры плавления и выше (для Al_2O_3 $T_{пл} = 2050$ °С). Именно за счет них в основном происходит формирование напыляемого слоя.

Разгон самых мелких частиц — размером менее 2 мкм — происходит сразу за фронтом детонации, при этом они очень быстро прогреваются и приобретают скорость, равную скорости газа за фронтом детонации.

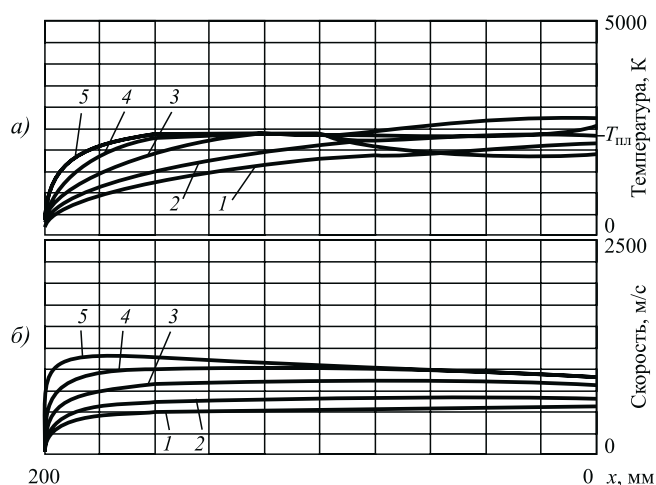


Рис. 6. Динамика разогрева (а) и разгона (б) частиц порошка F500 в стволе детонационной установки:

1 — диаметр частиц $d_ч = 30$ мкм; 2 — $d_ч = 20$ мкм; 3 — $d_ч = 10$ мкм; 4 — $d_ч = 5$ мкм; 5 — $d_ч = 2$ мкм

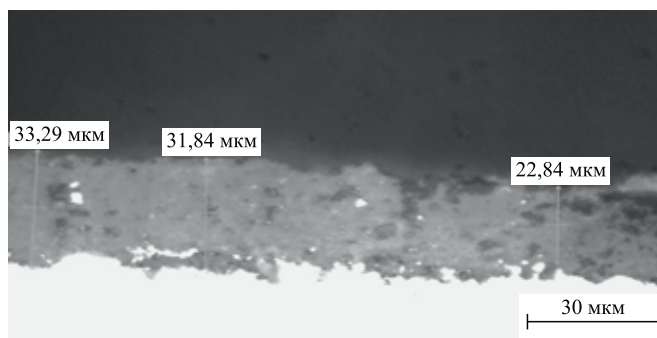


Рис. 7. Характерный вид покрытия из Al_2O_3 при абразивной обработке напыляемой поверхности корундом с синхронным нанесением напыляемого слоя

Когда начинается второй этап разгона и разогрева за счет потока газов за волной разрежения, эти частицы оказываются либо очень близко от среза ствола, либо за его пределами. Поэтому этот поток газов не успевает оказать на них теплового воздействия, и частицы даже успевают охладиться. После выхода из ствола самые мелкие частицы следуют за фронтом затухающей ударной волны и приобретают скорость, равную скорости газа за ней. При встрече с поверхностью подложки затухающая ударная волна отражается, а поток газов за отраженной ударной волной останавливается. При этом мелкие частицы затормаживаются и не достигают напыляемой поверхности. Таким образом, абразивная обработка напыляемой поверхности осуществляется за счет самых крупных частиц порошка.

Следует отметить, что часть частиц, достигших поверхности подложки в твердом состоянии, может увязнуть в формирующемся слое покрытия (рис. 7). При оптимальных режимах напыления прочность сцепления покрытия, полученного из микрошлифпорошка корунда с зернистостью F500, с подложкой из латуни составила 27...47 МПа. Твердость по Виккерсу (50 HV) составляла 12 420...15 000 МПа.

Применение данного способа при нанесении покрытия из Al_2O_3 на ленту из медной фольги дало возможность повысить производительность процесса в целом на 60...90 %. Благодаря одновременному проведению абразивной обработки напыляемой детали и самого процесса напыления частицы напыляемого порошка попадают на практически ювенильную поверхность, что позволяет повысить прочность сцепления покрытия с подложкой на 15...25 %.

Выводы

Использование детонационной установки для абразивной подготовки напыляемой поверхности является перспективным направлением в развитии технологии детонационного напыления.

Абразивная обработка напыляемой поверхности с помощью детонационных установок позволяет существенно повысить производительность процесса получения покрытия в целом.

Применение детонационной установки в качестве средства для ускорения абразивных частиц позволяет избежать возникновения значительных остаточных напряжений на напыляемой поверхности и ее деформации.

Использование детонационного оборудования для подготовки напыляемой поверхности дает возможность до минимума сократить промежуток времени между моментом ее активации и началом процесса формирования напыляемого слоя, что способствует повышению прочности сцепления покрытия с подложкой.

В зависимости от конкретных задач и условий получения слоя покрытия (напыляемый материал, вид и форма детали, материал подложки и т. д.) абразивная подготовка с помощью детонационного оборудования может проводиться различными способами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баргенов С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 133 с.
2. Заявка № 2013119882/02 (029462) от 30.04.2013.
3. Заявка № 2013133429/02 (050033) от 19.07.2013.
4. Ждан С.А. Моделирование двухфазного потока за детонационной волной // Механика быстропротекающих процессов. Вып. 62. 1983. ИГСО АН СССР. С. 39—48.
5. Ждан С.А. Численное моделирование динамики двухфазного потока в стволе детонационной установки при учете дробления частиц // Вопросы использования детонации в технологических процессах. Новосибирск, 1986. С. 63—70.
6. Гавриленко Т.П., Николаев Ю.А. Анализ детонационно-газового способа нанесения порошковых покрытий // Вопросы использования детонации в технологических процессах. Новосибирск, 1986. С. 3—16.
7. Заявка № 2014132687 от 08.08.2014.

УДК 621.8

О.Г. Кокорева (Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета)
E-mail: kokoreva_olga_2.11@mail.ru

Разработка модели способа обработки тяжело нагруженных поверхностей деталей машин

Представлена модель способа обработки тяжело нагруженных поверхностей деталей машин, в которой учитываются характеристики процесса обработки и качества поверхности деталей, а также явления, сопровождающие процесс обработки. Выполнена количественная оценка исследуемых факторов, составлена структурная схема обработки детали.

Ключевые слова: модель способа обработки, тяжело нагруженные поверхности деталей машин, поверхностно-пластическая деформация, физико-химические процессы, условия эксплуатации, технологические ограничения, формообразование.

The model of a method of processing heavy-duty surfaces of machine parts, which takes into account the characteristics of the treatment process, the surface quality characteristics of parts, as well as the phenomena accompanying the process of treatment. The quantitative estimation of researched factors compiled block diagram of the part.

Keywords: fashion model processing, heavy duty surfaces of machine parts, surface plastic deformation, the physico-chemical processes, operating conditions, technological constraints, shaping.

Применение поверхностного пластического деформирования (ППД) при обработке тяжело нагруженных поверхностей деталей позволяет активизировать физико-химические процессы, определяющие размерное формообразование, упрочнение и финишную обработку, и является одним из важнейших факторов современного производства деталей. От его уровня во многом зависят качество и надежность, себестоимость и долговечность деталей, особенно транспортного назначения [2].

Одной из задач исследования является разработка технологических предпосылок, учитывающих особенности свойств, сочетание геометрических структур функционального назначения деталей и связи их характеристик при обработке тяжело нагруженных поверхностей самой детали.

При выполнении исследований в этом направлении рассматривается обобщающая концептуальная модель способа обработки (СО) ППД поверхности

детали, представленная в виде аналитического выражения

$$CO = f(N_{c.o}, OP_{c.o}, \mathcal{E}_n, C_{n.э}, P_э, W, K, Д, Б, И, O), (1)$$

где $N_{c.o}$, $OP_{c.o}$ — наименование способа обработки поверхностей и область его применения соответственно; \mathcal{E}_n — энергия, подводимая в зону обработки; $C_{n.э}$ — способ подвода энергии в зону обработки; $P_э$ — энергетический режим процесса формообразования детали; W — способ воздействия инструмента на материал заготовки детали; K — кинематическая схема обработки; $Д$ — динамические характеристики процесса обработки детали; $Б$ — схема относительного базирования обрабатываемой детали и инструмента; $И$ — тип обрабатывающего инструмента; O — смазывающая охлаждающая среда [1].

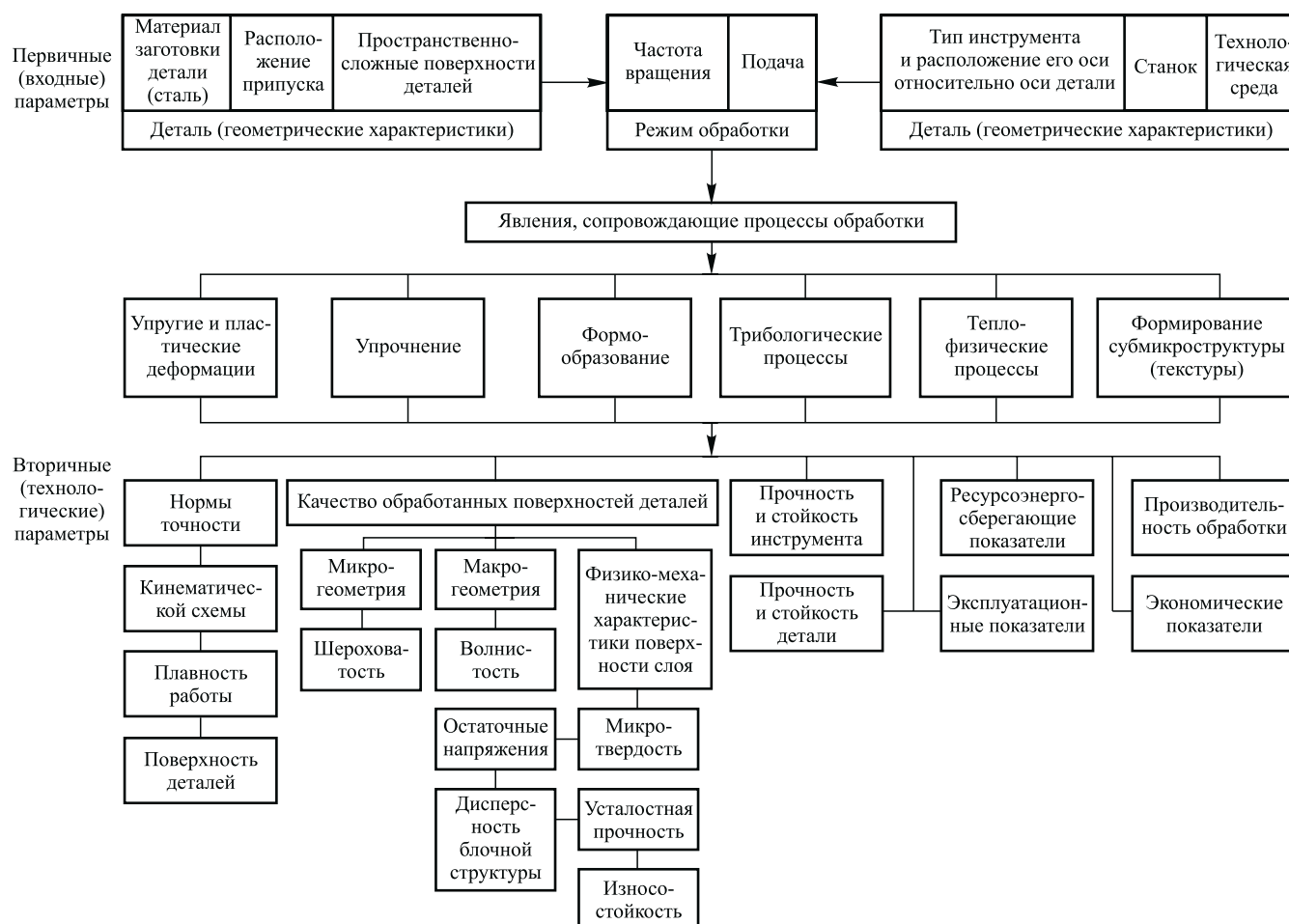
Выражение (1) дает достаточно полное и наглядное представление о составе и структуре компонентов способа обработки, но не позволяет проводить какие-либо логические операции и преобразования. Для формализации условий целенаправленного формирования новых способов обработки деталей ППД каждую совокупность одноименных компонентов r_i удобно пред-

ставить как некоторое множество технологических решений R_i [3]. Такой подход позволяет представить способ обработки деталей ППД в виде

$$r_{c.o} = f(r_{пов}, r_m, r_{обл}, r_w, r_{э.п}, r_{н.с.о}, r_{с.п.э}, r_{и.э}, r_{р.э}, r_i, r_k, r_{ст}). (2)$$

Каждый элемент (2) является элементом соответствующего множества технологических решений, т. е. $\{r_i\} = R_i$ или $r_i = R_i$, где множества R_i и их элементы имеют следующие обозначения: $R_{пов} = \{r_{пов}\}$ — обрабатываемые смежные поверхности, составляющие в совокупности полный профиль и тело детали; $R_m = \{r_m\}$ — материал обрабатываемых деталей; $R_{обл} = \{r_{обл}\}$ — области применения; $R_w = \{r_w\}$ — способ воздействия на поверхность деталей; $R_{э.п} = \{r_{э.п}\}$ — вид(ы) энергии, подводимые в зону обработки; $R_{н.с.о} = \{r_{н.с.о}\}$ — название способа обработки поверхности детали; $R_{с.п.э} = \{r_{с.п.э}\}$ — способ подвода энергии в зону обработки; $R_{и.э} = \{r_{и.э}\}$ — источники энергии; $R_{р.э} = \{r_{р.э}\}$ — энергетические режимы обработки; $R_i = \{r_i\}$ — тип обрабатывающего инструмента; $R_k = \{r_k\}$ и $R_{ст} = \{r_{ст}\}$ — кинематическая и статическая схемы обработки соответственно [4].

Выражение (2) дает возможность сделать выбор не-



Структурная схема обработки детали

обходимых технологических решений на множестве $R_{с.о.}$, их возможных комбинаций в сочетании с комбинациями обрабатываемых смежных поверхностей, составляющих в совокупности полный профиль и тело деталей и материалов для их изготовления [1]. Это способствует построению операционных технологических решений любого способа обработки деталей в виде структурной схемы, приведенной на рисунке. Она представляет собой регулируемую физико-химическим механизмом ППД совокупность первичных (деталь, режимы обработки и обрабатывающая система) и вторичных (технологических) параметров. Структурная схема определяется функциями, связывающими, с одной стороны, первичные параметры и механизм ППД, а с другой — механизм ППД и вторичные параметры. В структурной схеме процесс ППД, в свою очередь, представляет сложную систему, одновременно совершающихся и взаимосвязанных между собой физических явлений при обработке поверхностей деталей [3].

Первичные параметры определяются технологическим комплексом, включающим обрабатывающую систему: станок, приспособление, инструменты, технологическую среду; деталь, для которой заданы материал, припуск, параметры, а также режимы обработки.

Технологическая система, которую можно регулировать изменением режима обработки, должна обеспечивать заданные на операцию вторичные (технологические) параметры: точность и качество пространственно-сложных поверхностей деталей, стойкость и прочность инструмента, производительность и экономичность обработки, энергоресурсосберегающие, экологические и эксплуатационные показатели с тенденцией обеспечения ресурсосберегающей технологии.

Решающее значение приобретает надежность отдельных элементов обрабатывающей системы (прежде всего инструмента и технологической системы в целом). Заданные параметры обрабатываемой детали, а также вторичные параметры (точность, качество обрабатываемой детали) являются для технологической системы регулирования технологическими ограничениями (критериями); все остальные параметры оптимизируются [5].

Изложенный материал позволяет сформулировать положения для разработки современных способов обработки деталей, которые заключаются в необходимости:

системного подхода к разработке формообразования, финишной обработке и упрочнению тяжело нагруженных поверхностей деталей ППД в целом, при котором обрабатывающая система рассматривается как единый комплекс — многоцелевой станок для поэлементной обработки тяжело нагруженных поверхностей, составляющих полный профиль обрабатываемых деталей;

использования обобщенного понятия процесса обработки ППД поверхностных слоев деталей в результате всех возможных видов воздействия, в том числе

механического (статического и динамического), электрического, трибологического, а также технологической среды;

рационального проектирования способа формообразования, финишной обработки и упрочнения тяжело нагруженных поверхностей деталей ППД как организованного перемещения объемов материала поверхностных слоев по заданным кинематикой тяжело нагруженным поверхностям деталей. В этом случае обрабатывающая система должна обеспечить такую схему нагружения при поэлементной обработке тяжело нагруженных поверхностей деталей, при которой процесс обработки протекает наиболее эффективно т. е. с наименьшими энергозатратами, при обеспечении заданных технологических ограничений (критериев) по качеству изготавливаемой детали;

создания инженерных методик выбора способа обработки, что требует разработки классификации существующих методов обработки тяжело нагруженных поверхностей деталей ППД исходя из задач, стоящих перед технологом в конкретных производственных условиях, когда необходимо выбрать из большого числа возможных оптимальный вариант изготовления с назначением для него режима, учитывая заданные технико-экономические ограничения как по параметрам точности и качеству обрабатываемых деталей, так и по условиям эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орлов В.В., Кокорева О.Г. Особенности конструирования инструментов для обработки зубчатых колес пластическим деформированием // Механизация ручных работ и трудоемких технологических процессов в инструментальном производстве. Пермь. 1985. С. 51—53.
2. Смелянский В.М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного деформирования // Объединение "МАШМИР". 1992. 60 с.
3. Корнаухов А.П., Орлов В.В., Юдин Д.Л. Упрочняющая технология обработки крупномодульных зубчатых колес // Повышение качества и эффективности в машиностроении и приборостроении: Материалы юбилейной науч.-техн. конференции с участием зарубежных специалистов / под ред. чл.-кор. АТН РФ В.М. Сорокина. Нижний Новгород. 1997. С. 59—60.
4. Кокорева О.Г. Исследование параметров качества поверхностного слоя при обработке статико-импульсным методом // СТИН. 2012. № 3. С. 29—30.
5. Кокорева О.Г. Статико-импульсная обработка как эффективный способ упрочнения деталей машин // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина". 2012. № 2 (53). С. 96—98.

А.В. Щедрин (Университет машиностроения, г. Москва, ОАО "НПП "Респиратор"),
 А.Ю. Козлов (ООО МЗ "ТОНАР", г. Орехово-Зуево), В.И. Воронков (Университет машиностроения, г. Москва)
 E-mail: t-5511@yandex.ru

Теоретико-экспериментальное исследование охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях противодействия металлолакирующих смазочных материалов

Проведены теоретические сравнительные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования (ОППД) инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях самовозбуждающегося противодействия инновационных металлолакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского". С учетом параметров очага деформации и эффекта избирательного переноса при трении уточнена и адаптирована формула А.Л. Воронцова для прогнозирования удельного усилия ОППД. Проведено моделирование ОППД в программном комплексе QForm 3D.

Ключевые слова: охватывающее поверхностное пластическое деформирование, металлолакирующая смазка, очаг деформации.

Theoretical comparative studies covering surface plastic deformation (DFND) instrument with a regular surface microgeometry in a self-excited counter-metalplacking innovative lubricants realizing fundamental scientific discovery "Garkunov—Kragelskii effect of zero wear during frictional". Within the parameters of the deformation zone and the effect of selective transfer in friction refined and adapted A.L. Vorontsov formula to predict specific efforts DFND. DFND simulated in the software package QForm 3D.

Keywords: covering the surface plastic deformation, metalplacking lubricant deformation zone.

Охватывающее поверхностное пластическое деформирование (ОППД) — эффективный технологический метод отделочно-упрочняющей обработки сплошных и полых профилей различной формы поперечного сечения и длины. В настоящее время методы ОППД системно [1] совершенствуются за счет совместного использования инструментов с регулярной микрогеометрией поверхности [2, 3] и перспективных технологий применения инновационных металлолакирующих смазочных материалов [5], реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского" [4, 6].

В работе [7] предложена теоретическая модель усилия ОППД при реализации схемы обработки с проталкиванием обрабатываемой заготовки через рабочий канал инструмента. Данная схема ОППД не учитывает особенности схемы ОППД, приведенной в работе [5], в виде возможного самовозбуждающегося противодействия металлолакирующих смазочных материалов по канавкам регулярного микрорельефа поверхности рабочего канала фильеры, а также не учитывает толщину образующейся сервопитной пленки и параметры очага деформации.

С учетом возможного противодействия технологических смазочных материалов, параметров очага деформации [6] и толщины возникающей сервопитной пленки [5] теоретическая модель [7] будет иметь вид

$$q_d^T = 0,25(D_n - 2h_{c.n})\sigma_T \left[\left(2 + f \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \times \ln \left(\frac{R_3 \pm \Delta R_3 + h_{c.n}}{0,5D_n - h_{c.n}} \right) + \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} + 2fL_n \right] + q_n, \quad (1)$$

где q_d^T — теоретическое значение удельного усилия ОППД, Н/мм; D_n — диаметр рабочего канала фильеры по калибрующей ленточке, мм; $h_{c.n}$ — толщина сервопитной пленки (мм в выражении (1), мкм в выражении (2)); σ_T — среднее по очагу пластической деформации напряжение текучести обрабатываемого материала заготовки детали, МПа; α — угол рабочего конуса фильеры, °; f — коэффициент трения скольжения; R_3 — радиус заготовки детали, мм; $\pm \Delta R_3$ — знак и величина внеконтактной деформации, возникающей на рабочем конусе фильеры, мм; L_n — ширина калибрующей ленточки фильеры, мм; q_n — удельное усилие ОППД от самовозбуждающегося противодействия металлолакирующих смазок по канавкам регулярного микрорельефа поверхности рабочего канала фильеры.

Коэффициент трения скольжения f [1, 9] определяется по упрощенной формуле на основе адгезионно-деформационной теории трения И.В. Крагельского [10]:

$$f = f_a + f_d = \left(\frac{\tau_0}{HB_3} + \beta \right) + \left(0,28 \sqrt{\frac{\varepsilon_3 (H_{3max} + h_{c.n})}{R_n}} \right), \quad (2)$$

где f_a, f_d — адгезионная и деформационная компоненты коэффициента трения скольжения соответственно; τ_0 — прочность адгезионной связи при отсутствии нормального контактного давления, МПа; $HВ_3$ — поверхностная твердость заготовки детали по Бринеллю, МПа; β — пьезокоэффициент влияния нормального контактного давления на прочность адгезионной связи, МПа; ϵ_3 — относительная деформация максимального микровыступа шероховатой поверхности заготовки детали; $H_{3\max}$ — высота максимального микровыступа шероховатой поверхности заготовки детали, мкм; $R_{и}$ — продольный радиус при вершине единичного микровыступа регулярного микрорельефа шероховатой поверхности рабочего канала фильеры с учетом толщины сервовитной пленки, мкм.

Вывод формул для перечисленных выше параметров и их определения частично рассмотрены в работах [1, 6–10].

В качестве экспериментального объекта проверки теоретических моделей приняли метод ОППД сплошных цилиндрических заготовок из стали марки 40X (223 НВ) через деформирующую фильеру из стали марки 9ХС (58...61 HRC), рабочий канал которой упрочнен регулярным микрорельефом в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм, шагом 0,5 мм и глубиной на участке калибрующей ленточки 6,5 мкм [5]. Длина участка заготовок под ОППД составляла 20, 40 и 60 мм, предварительная обработка — шлифование. Номинальная абсолютная деформация i_n на диаметр (абсолютное обжатие) варьировалась в диапазоне 0,05...0,15 мм через 0,05 мм. Скорость обработки составляла 0,05 м/мин. В качестве технологической смазки применялось минеральное масло марки И-40 с добавкой 10, 20 и 50 % об. металлоплакирующей присадки "Валена" (пат. РФ № 2277579), реализующей "эффект безызносности (эффект избирательного переноса) при трении".

Для реального учета в математической модели удельного усилия ОППД упрочнения обрабатываемого материала была использована кривая упрочнения стали 40X (МПа):

$$\sigma_{тк} = 426,15 + 1244,16e,$$

где $\sigma_{тк}$ — конечное напряжение текучести обрабатываемого материала заготовки детали, рассчитываемое по значению накопленной деформации e [7].

Исходная информация для расчета коэффициента трения и удельного усилия ОППД представлена в таблице.

На рис. 1...3 представлены продольные профилограммы очага деформации, по которым можно определить знак и величину ΔR_3 , зависимость которой от фактической абсолютной деформации i_ϕ и концентрации при-

садки для стали 40X приведена на рис. 4. Для получения данной зависимости применялись образцы типа рассматриваемых в работе [5] с длиной участка ОППД 20 мм. Анализ зависимости, приведенной на рис. 4, показывает, что на рабочем конусе фильеры формируется очаг деформации в виде положительной волны внеконтактной деформации. Как известно [6], с технологической точки зрения такой характер очага деформации увеличивает площадь контакта заготовки и инструмента, а также увеличивает усилие обработки и затрудняет поступление в очаг деформации технологической смазки, исключая реализацию гидродинамического режима трения.

Исходные данные для расчета коэффициента трения скольжения и удельного усилия ОППД

Параметр	Значение параметра при фиксированном значении i_ϕ	
i_ϕ , мм	0,09125	0,1325
D_d , мм	20,02	20,02
α , °	5	5
L_d , мм	5	5
Коэффициент уточнения $K_y (Ra)$	8,64	8,788
ϵ_3	0,884	0,886
$R_{и}$, мкм	3906	3906
$H_{3\max}$, мкм	3,9816	4,092
$\pm \Delta R_3$, мкм	+2	+15
$h_{с.п}$, мкм	1,5	1,5
e	0,01068	0,01676
R_3 , мм	10,0566	10,0762
$\sigma_{тк}$, МПа	439,44	447
σ_3 , МПа	432,798	436,576
$HВ_3$, МПа	2230	2230
f_a	0,00804	0,00804
f_d	0,00986	0,00997
f	0,0179	0,01801
$q_d^т$, Н/мм	501,11	524,258
q_d^3 , Н/мм	457,197	523,65

С эксплуатационной точки зрения положительная волна внеконтактной деформации снижает служебные качества получаемых деталей из-за наличия растягивающих напряжений и образования трещин, переходящих в поверхностный слой.

В таблице представлены рассчитанные значения коэффициентов трения скольжения и удельного усилия ОППД заготовок из стали 40X при содержании присадки 10 % в базовом составе И-40. Экспериментальное удельное усилие ОППД, Н/мм, в диапазоне $i_\phi = 0,09...0,14$ мм определяется выражением

$$q_d^3 = 310,19 + 1611,04i_\phi. \quad (3)$$

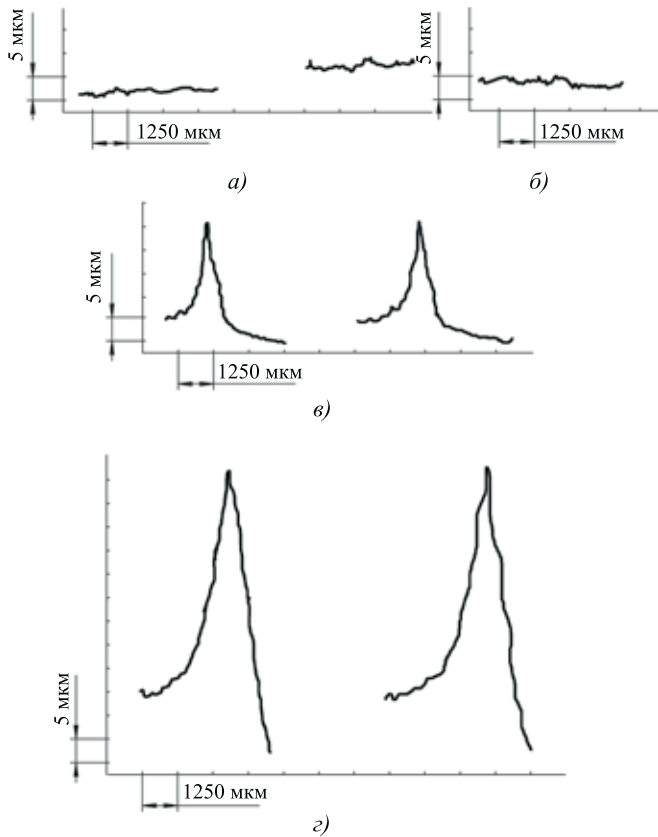


Рис. 1. Продольные профилограммы очага деформации при ОПД без противодействия смазки (содержание металлоплакирующей присадки "Валена" 10 %):

$a - i_{\phi} = 0,053 \text{ мм}; б - i_{\phi} = 0,1 \text{ мм}; в - i_{\phi} = 0,14 \text{ мм}; г - i_{\phi} = 0,206 \text{ мм}$

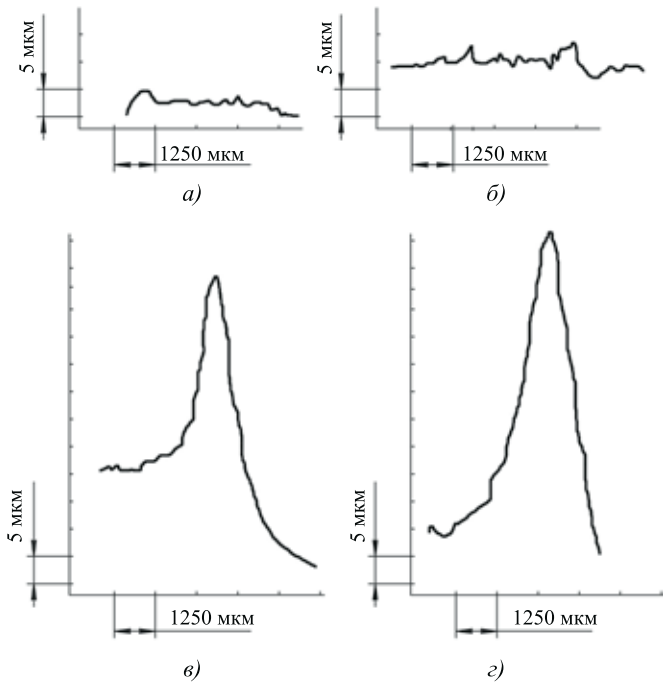


Рис. 2. Продольные профилограммы очага деформации при ОПД без противодействия смазки (содержание металлоплакирующей присадки "Валена" 20 %):

$a - i_{\phi} = 0,046 \text{ мм}; б - i_{\phi} = 0,1 \text{ мм}; в - i_{\phi} = 0,15 \text{ мм}; г - i_{\phi} = 0,21 \text{ мм}$

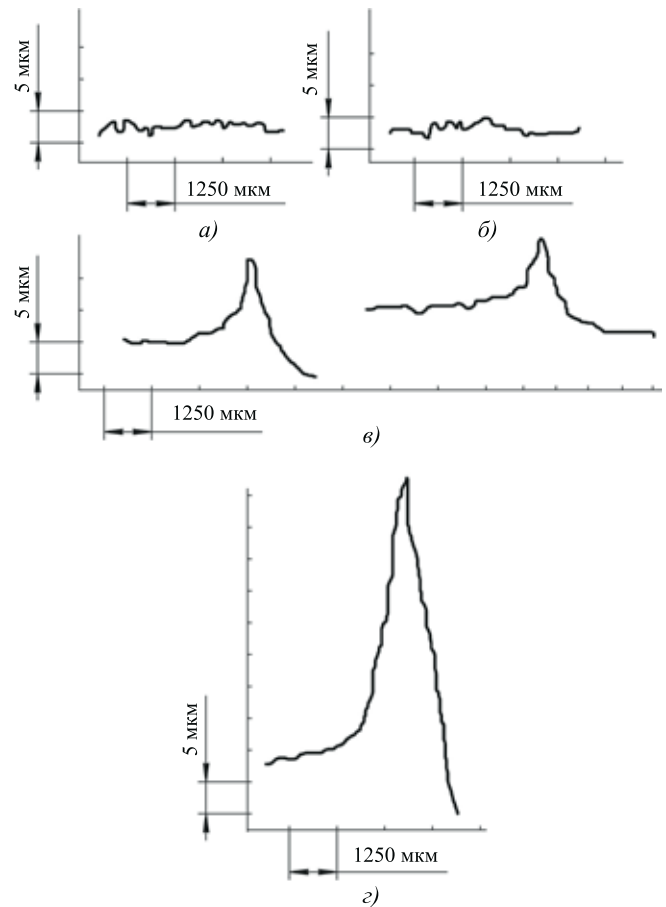


Рис. 3. Продольные профилограммы очага деформации при ОПД без противодействия смазки (содержание металлоплакирующей присадки "Валена" 50 %):

$a - i_{\phi} = 0,046 \text{ мм}; б - i_{\phi} = 0,1 \text{ мм}; в - i_{\phi} = 0,148 \text{ мм}; г - i_{\phi} = 0,193 \text{ мм}$

$\pm \Delta R_3, \text{ мкм}$

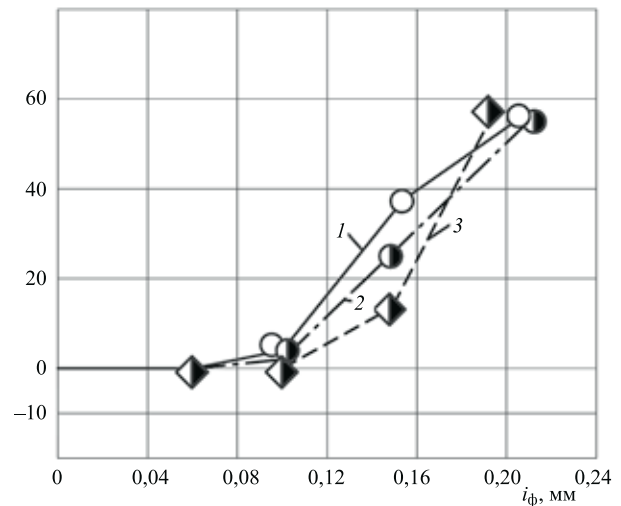


Рис. 4. Зависимость знака и величины внеконтактной деформации от содержания металлоплакирующей присадки и абсолютной фактической деформации:

1 — содержание присадки 10 %; 2 — содержание присадки 20 %; 3 — содержание присадки 50 %

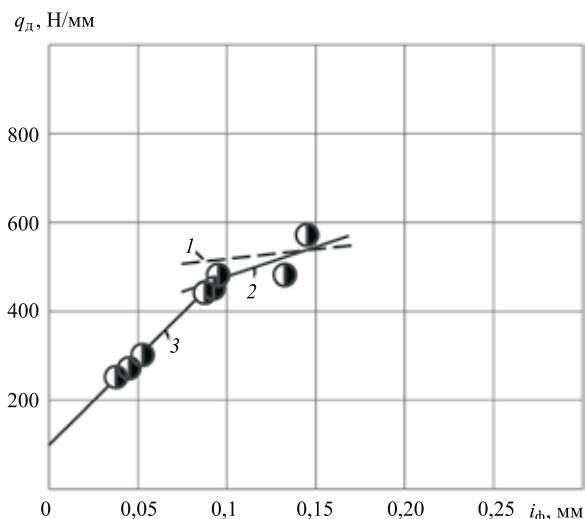


Рис. 5. Зависимость удельного усилия ОППД от абсолютной фактической деформации (содержание присадки в базовом масле И-40 10 %):

1 — теоретическая зависимость для диапазона $i_\phi = 0,09...0,14$ мм; 2 — экспериментальная зависимость для диапазона $i_\phi = 0,09...0,14$ мм; 3 — экспериментальная зависимость для диапазона $i_\phi = 0...0,09$ мм

Для получения выражения (3) использовались образцы типа приведенных в работе [5] с длиной участка ОППД 40 и 60 мм. Зависимость (3), как и в работе [5], соответствует случаю ОППД в условиях самовозбуждающегося противодействия металлоплакирующей смазки по канавкам регулярного микрорельефа поверхности рабочего канала инструмента. При этом имеет место свободное истечение смазки по канавкам регулярного микрорельефа и реализуется режим трения, близкий к жидкостному, на что указывает значение коэффициента регрессии при i_ϕ [5]. В этом случае дополнительно $q_n \approx 0$, так как не требуется больших затрат энергии на раскрытие стыка между инструментом и заготовкой вследствие свободного тока смазки по канавкам регулярного микрорельефа в результате только сокращения объема смазочной полости экспериментального приспособления [5].

Рисунок 5 позволяет сопоставить теоретическое (расчетное) 1 и экспериментальное 2 удельные усилия ОППД.

Теоретические значения удельного усилия ОППД после аппроксимации данных таблицы, полученных расчетным путем, можно представить в виде выражения

$$q_d^T = 449,88 + 561,16i_\phi. \quad (4)$$

Из полученных результатов можно сделать вывод о применимости теоретической модели удельного усилия ОППД с противодействием металлоплакирующих смазок [5, 11] для инженерной практики.

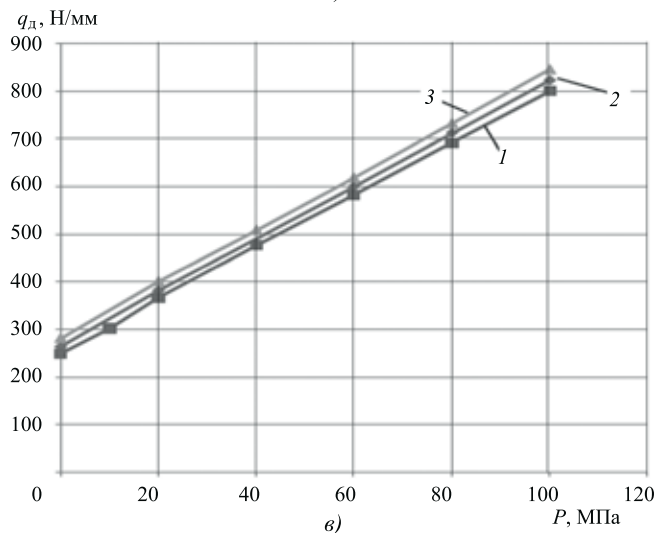
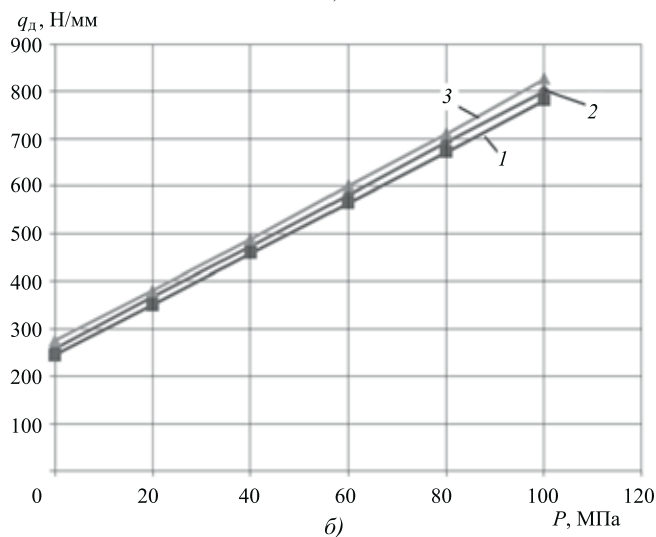
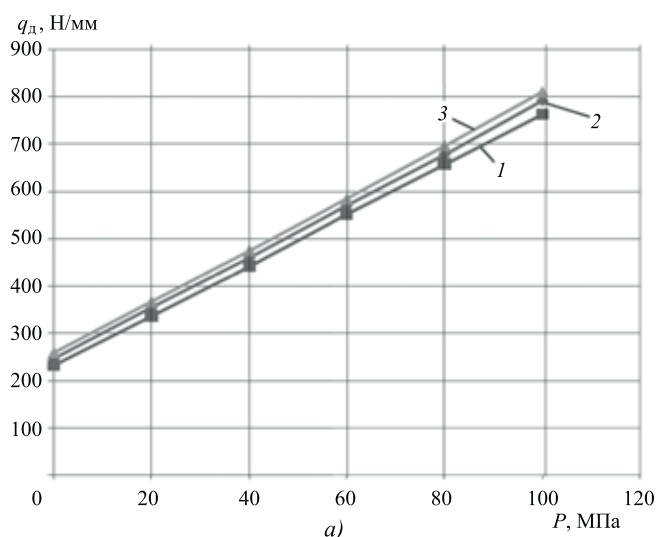


Рис. 6. Зависимость удельного усилия ОППД цилиндрических сплошных заготовок из стали марки 40Х от коэффициента трения скольжения и противодействия смазочного материала:

а — $i_\phi = 0,1$ мм; б — $i_\phi = 0,15$ мм; в — $i_\phi = 0,2$ мм; 1 — $f = 0,01$; 2 — $f = 0,03$; 3 — $f = 0,05$

Экспериментальная зависимость z удельного усилия ОППД в диапазоне $i_\phi = 0..0,09$ мм (см. рис. 5) использовалась для получения параметра τ_0 .

На следующем этапе теоретических исследований было проведено моделирование метода ОППД с противодавлением металлоплакирующего смазочного материала по схеме, приведенной в [5, 11], в программном комплексе QForm 3D. Исходные данные для моделирования (геометрия заготовок и инструмента, их материалы, физико-механические свойства, коэффициенты трения) задавались исходя из реальных условий натурального эксперимента, рассмотренного в работе [5].

С использованием возможностей программного комплекса QForm 3D исследовалось влияние степени абсолютной деформации, коэффициента трения и противодействия смазочного материала P (МПа) на удельное усилие ОППД (рис. 6). Дополнительно был выполнен анализ распределения интенсивности напряжений и накопленной деформации (рис. 7, 8, см. с. 2 обложки). Анализ полученных результатов свидетельствует о существенном влиянии контактных процессов (коэффициент трения) и противодействия смазочного материала на напряженно-деформированное состояние заготовки и удельное усилие ОППД.

Полученная информация расширяет физическую обозримость и повышает комплексность математических моделей [1, 6, 7, 12] для структурно-параметрического синтеза перспективных методов ОППД с самовозбуждающимся противодавлением металлоплакирующих смазок по канавкам регулярного микрорельефа воздействующей поверхности соответствующего обрабатываемого инструмента [3, 11, 13].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Трибология** как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Щедрин, В.В. Ульянов, Н.Ю. Чихачева и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15—20.
2. **Повышение** эффективности методов комбинированного волочения за счет регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности инструмента / А.В. Щедрин, В.В. Ульянов, В.М. Скоромнов и др. // Вестник машиностроения. 2006. № 11. С. 58—60.

3. **Совершенствование** комбинированных методов ре-дуцирования и прошивания / А.В. Щедрин, В.В. Ульянов, В.М. Скоромнов и др. // Металлург. 2005. № 10. С. 66—69.

4. **Повышение** качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок / А.В. Щедрин, С.А. Гаврилов, В.В. Ерохин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 8. С. 21—25.

5. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю.** Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3. С. 8—12.

6. **Формирование** очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании / А.В. Щедрин, С.А. Гаврилов, И.В. Косарев и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3—7.

7. **Воронцов А.Л.** Технологические задачи теории пластичности. В 3 т. Т. 2. М.: Машиностроение. 2006. 397 с.

8. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (износ и безызносность): Учебник. М.: Изд-во МСХА, 2001. 616 с.

9. **Shchedrin A.V.** Generalized space-time model of deforming-cutting process // Russian Engineering Research. 1997. Vol. 17. № 3. P. 55—59.

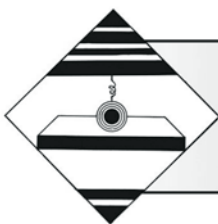
10. **Справочник** по триботехнике / под. общ. ред. М. Хеды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. 400 с.

11. **Гаврилов С.А., Щедрин А.В.** Совершенствование технологий применения металлоплакирующего кондиционера в методах комбинированной обработки // Вестник машиностроения. 2012. № 6. С. 75—78.

12. **Теоретические** и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов / В.А. Кузнецов, А.В. Щедрин, С.А. Гаврилов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 2. С. 11—17.

13. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А.** Перспективные методы комбинированного волочения сплошных и полых профилей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 6. С. 51—53.





Улучшение эксплуатационных характеристик деталей поверхностным модифицированием методом плакирования гибким инструментом

Приведены результаты использования технологии плакирования гибким инструментом для поверхностного модифицирования деталей металлорежущих станков, технологического оборудования и инструмента: направляющих скольжения, зубчатых передач, деталей прокатного оборудования, кузнечно-прессовой оснастки. Показано, что модифицирование рабочих поверхностей плакированием гибким инструментом позволяет снизить коэффициент трения скольжения в сопряжениях, повысить износостойкость, снизить уровень шума, генерируемого при работе зубчатых механизмов, повысить стойкость оснастки, что в совокупности позволяет существенно повысить долговечность используемого оборудования.

Ключевые слова: плакирование гибким инструментом, направляющие скольжения, зубчатые передачи, коэффициент трения, уровень шума.

The article presents the results of the using of technology cladding by flexible tool for surface modification of parts of machine tools, process equipment and instrument: the slide-ways, gears, parts of rolling equipment, forging press equipment. It is shown that the modification of the working surfaces of the cladding by flexible tool allows to reduce the coefficient of sliding friction at the interfaces, to increase wear resistance, reduce the noise level generated by gears, to extend the life of accessories, all of which can significantly improve the durability of the equipment used.

Keywords: cladding by flexible tool, slide-ways, gear, coefficient of friction, level of noise.

Введение

Возникшие в последние годы проблемы экологической безопасности и необходимость внедрения энерго-сберегающих технологий обусловили развитие новых способов поверхностного модифицирования, в том числе с нанесением покрытий, у которых формирование поверхностного слоя происходит путем механического силового воздействия на поверхность. Механические способы получения покрытий, к числу которых относятся и метод плакирования гибким инструментом [1—8], в котором основную роль играет пластическая деформация поверхности, обладают рядом преимуществ по сравнению с другими, хотя не являются универсальными. Эти способы не требуют сложного специализированного оборудования и термического воздействия, в результате чего окончательные структура и свойства во всем объеме детали, достигнутые на предыдущих этапах обработки, остаются неизменными. В них обычно не используются химически активные реагенты, загрязняющие окружающую среду. Следовательно, развитие подобных способов

и поиск рациональных областей их практического применения — актуальная задача, решение которой будет способствовать значительному улучшению эксплуатационных показателей и повышению срока службы технологического оборудования и вспомогательной оснастки.

Технология плакирования гибким инструментом основана на механотермическом воздействии гибких элементов (ворса) быстровращающейся металлической щетки на элемент из материала покрытия и обрабатываемую поверхность. При этом ворс щетки переносит частицы материала покрытия на поверхность детали, формируя плакирующий слой, и одновременно осуществляет наклеп обрабатываемой поверхности. Метод экономичен, прост в использовании, позволяет наносить покрытия толщиной от долей до десятков микрон непосредственно перед установкой детали, так как не требует дополнительной механической обработки после нанесения покрытий.

С использованием метода плакирования гибким инструментом можно осуществлять поверхностное модифицирование рабочих поверхностей деталей с формиро-

ванием комплексно легированных самоупрочняющихся поверхностных слоев практически любого функционального назначения. Формирование подобных слоев выполняют по соответствующим технологическим схемам, выбор которых зависит от условий эксплуатации и технических требований, предъявляемых к деталям, входящим в состав ответственных компонентов технологического оборудования и вспомогательной оснастки.

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси на протяжении многих лет ведутся работы по изучению технологических возможностей метода плакирования гибким инструментом.

Цель работы — обобщение накопленного опыта использования технологии плакирования гибким инструментом для улучшения эксплуатационных характеристик деталей металлорежущих станков, технологического оборудования и инструмента.

Содержание и результаты работы

Поверхностному модифицированию методом плакирования гибким инструментом подвергали различные детали металлорежущих станков, технологического оборудования и инструмента, представленные ниже.

Направляющие скольжения. Известно, что одну из серьезных проблем при функционировании направляющих скольжения представляют силы трения и зависимость этих сил от скорости и нагрузки, которые оказывают существенное влияние на плавность хода подвижных узлов станка при малых (до 200 мм/мин) скоростях перемещений. Это объясняется тем, что непосредственный контакт сопряженных поверхностей в направляющих скольжения характеризуется нестабильностью сил трения скольжения при малых скоростях движения, усугубляемой разрушением защитных поверхностных пленок (смазочных, адсорбированных, окисных) и микроадгезионным схватыванием на участках фактического контакта трущихся поверхностей, при недостаточной жесткости всей системы. По сравнению с другими парами трения условия трения в

направляющих скольжения отличаются такими особенностями, как: 1) очень широкий диапазон изменения скоростей и нагрузок; 2) вызванные большой протяженностью и высокой жесткостью контактирующих деталей существенные микро- и макронеровности поверхности; 3) наличие в зоне трения загрязняющих веществ вследствие трудности создания достаточно герметичных защитных устройств.

Формирование на рабочих поверхностях направляющих скольжения поверхностно-модифицированных антифрикционных слоев на основе меди и железа с легирующими добавками олова, свинца, графита и дисульфида молибдена способствует снижению коэффициента трения скольжения в 1,45...1,78 раза, интенсивности изнашивания пары трения в 1,32...9 раз, а также улучшению условий трения сопряжения. При удельных нагрузках на направляющие 0,5...2,0 МПа и скоростях перемещения ползуна 125 и 190 мм/мин композиционное покрытие позволяет уменьшить разницу между статическим и динамическим коэффициентами трения в 2,6...2,9 раза, что способствует уменьшению усилия страгивания ползуна в 1,7...2,3 раза и устранению его скачкообразных перемещений [3]. При движении ползуна в режиме рабочей подачи динамический коэффициент трения скольжения снижается в 1,2...1,4 раза. Благодаря этому значительно улучшается плавность хода формообразующих узлов станка при их медленных перемещениях по направляющим скольжения, что обеспечивает повышение их точности позиционирования и, соответственно, повышение точности обработки деталей.

Полученные экспериментальные данные были использованы для разработки и внедрения на Минском заводе автоматических линий им. П.М. Машерова промышленной технологии формирования антифрикционных покрытий методом плакирования гибким инструментом на рабочих поверхностях направляющих скольжения станин металлорежущих станков. Технологический процесс реализуется на продольно-шлифовальном станке модели SZ-1250 (фирма HECHEART) с помощью разработанных устройств для плакирования (рис. 1).

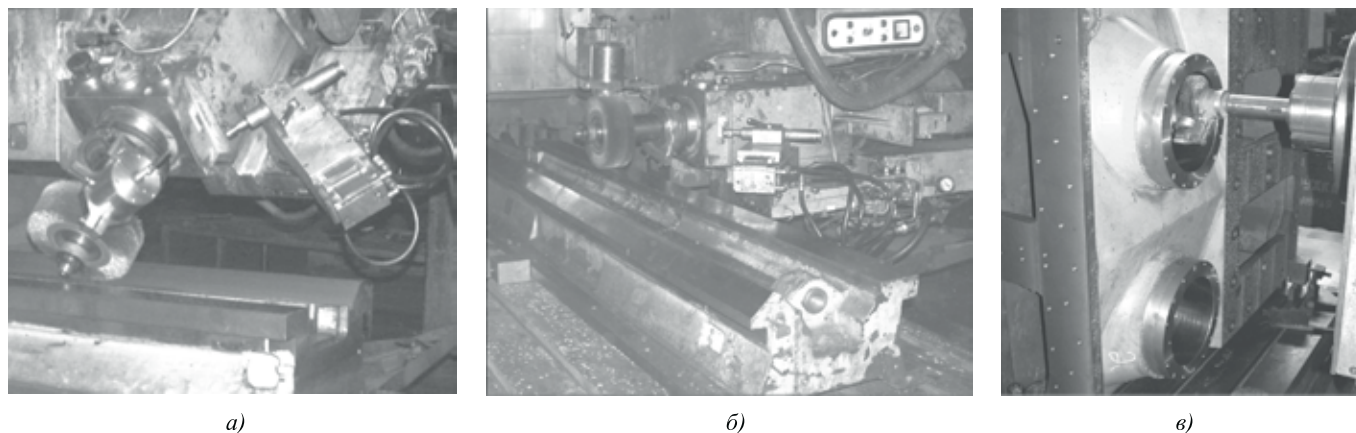


Рис. 1. Фрагменты нанесения покрытия на треугольные (а), прямоугольные (б) и цилиндрические (в) направляющие скольжения

Устройства для формирования антифрикционных покрытий методом плакирования гибким инструментом на плоских и цилиндрических направляющих скользящих станин металлорежущих станков, отличающиеся возможностью обеспечения контроля и поддержания на заданном уровне подачи материала-донора в зону контакта со щеткой, защищены патентами РБ и РФ [6–8].

Зубчатые передачи. Зубчатые приводные механизмы (редукторы, ведущие мосты, коробки передач и др.) входят в число узлов, в значительной степени определяющих шумовые характеристики как мобильных машин, так и металлорежущих станков и технологического оборудования. Поэтому поиск и отработка конструкторско-технологических решений, направленных на снижение шума и вибраций, генерируемых зубчатыми передачами, является важной и актуальной задачей. Нанесение покрытий на рабочий профиль зубьев позволит демпфировать возникающие при работе зацепления ударные силы и тем самым снизить генерируемый передачей шум.

В качестве материалов-доноров для формирования однослойных покрытий методом плакирования гибким инструментом использовали спеченную бронзу БрО5С20Гр0,5ДМ0,5, легированную графитом и дисульфидом молибдена, и литую оловянную бронзу БрО10С10. Для двухслойного покрытия использовали литую медь М1 с последующим нанесением слоя из баббита Б83. Каждый вид покрытия апробировался на отдельных парах шестерен. Покрытие из бронзы БрО10С10 наносили как на оба колеса зубчатой пары, так и только на одно из колес. Толщина сформированных слоев покрытий не превышала 5...10 мкм.

Для формирования покрытий на зубьях зубчатых колес был спроектирован и изготовлен технологический модуль, который монтируется на корпусе шпиндельного узла вертикально-фрезерного станка с ЧПУ модели ГФ2171С5 (рис. 2).

В результате испытаний конических зубчатых колес с композиционным модифицированным слоем, сформированным методом плакирования гибким инструментом на зубчатом венце, установлено, что эффективность применения технологии плакирования гибким инструментом для снижения шума конических зубчатых передач во многом определяется рациональным выбором материала-донора, используемого для формирования покрытия. Наиболее заметный эффект улучшения виброакустических характеристик колес с плакированным венцом зубьев по сравнению с колесами без покрытия практически во всем спектре частот обеспечивает покрытие БрО5С20Гр0,5ДМ0,5 из спеченной бронзы, легированной компонентами твердой смазки, а также покрытие из литой бронзы БрО10С10, сформированное на одном из колес зубчатой пары (на отдельных частотах). Снижение шума передачи по общему уровню составляет в среднем 3,5...7,0 дБ, а на отдельных спектральных со-

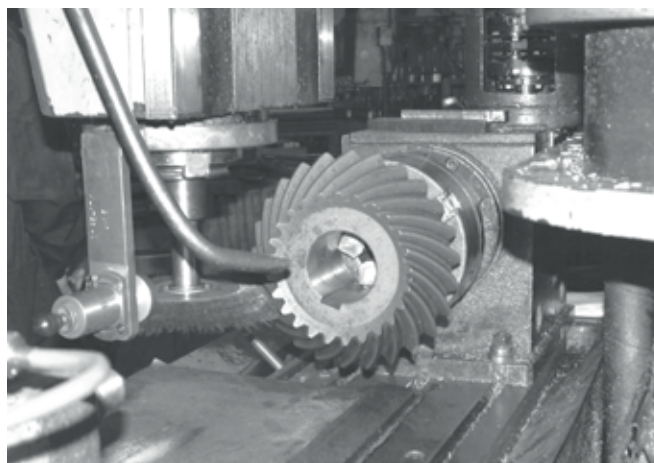
ставляющих оно достигает 10 дБ [4]. Кроме того, покрытия, сформированные из материалов-доноров на основе бронзы БрО10С10, повышают устойчивость конической зубчатой пары к задиру и заеданиям при работе передачи.

Полученные экспериментальные данные были использованы для разработки и внедрения на Минском заводе автоматических линий им. П.М. Машерова промышленной технологии формирования покрытий методом плакирования гибким инструментом на рабочих поверхностях зубьев зубчатых колес.

Детали прокатного оборудования. Для изготовления подрессорника грузовых автомобилей используют малоотходную технологию, в основу которой заложен принцип поочередной прокатки двух ветвей на специальной профилированной оправке. Схема подобной прокатки заключается в том, что нагревают поочередно каждую ветвь заготовки, которая затем подвергается прокатке на стане с верхним неприводным валком и нижней подвижной профилированной оправкой. Условия эксплуатации этих оправок чрезвычайно тяжелые. Наряду с действием вы-



а)



б)

Рис. 2. Процесс нанесения покрытия на зубья колеса (а) и шестерни (б)

соких контактных нагрузок, возникающих при обжатии, значительное влияние на стойкость оказывает температура заготовки, которую перед прокаткой нагревают до 950 °С. Наличие коррозии, окалины и абразивных загрязнений на заготовках способствует интенсификации процесса утраты работоспособности оправки. Основными причинами выхода из строя оправок подпрессорника являются неравномерный размерный износ, возникновение пригара материала заготовки к поверхности оправки, а также повреждения в виде сколов, раковин, трещин, отслоений и др. Формирование на рабочей поверхности профилированной оправки жаростойкого покрытия методом плакирования гибким инструментом позволит значительно повысить ее стойкость за счет улучшения условий контактного взаимодействия с раскаленным металлом.

Экспериментальную оценку работоспособности натурального образца оправки подпрессорника 076-370-307, изготовленной в соответствии со штатным технологическим процессом 4370-2913101, проводили в производственных условиях Минского рессорного завода. Перед началом испытаний на плоской и клиновидной поверхностях оправки методом плакирования гибким инструментом формировали композиционное износостойкое покрытие. Формирование покрытия осуществляли на продольно-шлифовальном станке модели SZ-1250 (фирмы HECHEPT) с использованием дисковой проволочной щетки диаметром 250 мм и шириной 80 мм (рис. 3).

В качестве материала-донора использовали спеченный композиционный материал на основе нержавеющей стали с легирующими добавками нанопорошка оксида иттрия, плакированного карбидом хрома. Сформированный слой покрытия толщиной 10...12 мкм представлял собой пленку из нержавеющей стали с включениями кристаллов карбида хрома. Испытания натурального образца оправки подпрессорника с композиционным покрытием проводили на промышленном стане продольной прокатки БП-076 в режиме подконтрольной эксплуатации.

Выполненные исследования показали, что стойкость экспериментального образца профилированной оправки

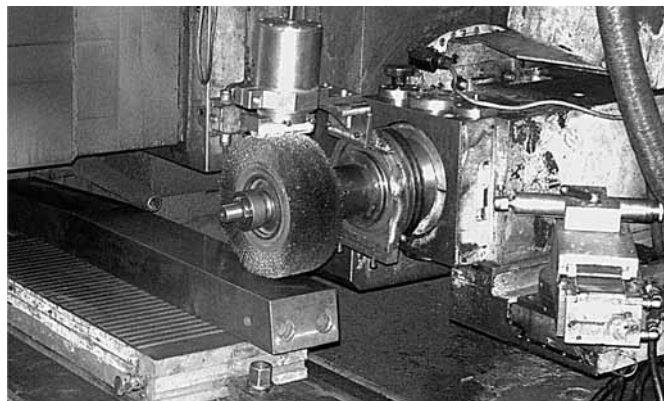


Рис. 3. Устройство для формирования покрытия на рабочей поверхности оправки подпрессорника

с композиционным покрытием составила 4700 заготовок деталей подпрессорника, в то время как стойкость серийной оправки — 3000 деталей. Визуальным осмотром рабочих поверхностей серийной и экспериментальной оправок установлено, что число имеющихся на них повреждений в виде раковин, трещин, отслоений, следов задиров и др. у экспериментальной оправки значительно (на 60 %) меньше, чем у серийной. Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что сформированные методом плакирования гибким инструментом композиционные покрытия на поверхности изделий, контактирующих с раскаленным металлом, способствуют повышению их работоспособности не менее, чем в 1,5...1,7 раза [5].

Детали кузнечно-прессовой оснастки. Высокая стойкость кузнечно-прессовой оснастки — основное условие рентабельной работы цехов горячей и холодной штамповки. В машиностроении повышение стойкости традиционно обеспечивают упрочнением поверхностного слоя штампового инструмента, а также путем улучшения условий фрикционного взаимодействия пуансона и матрицы с обрабатываемым материалом, в частности за счет формирования антифрикционного покрытия. Формирование покрытия из порошковых материалов методом плакирования гибким инструментом осуществляли на рабочей поверхности вырубных пуансонов, используемых при выполнении операции пробивки отверстия под ключ в секретных шайбах сердцевин замков, выпускаемых Минским заводом автоматических линий им. П.М. Машерова (рис. 4).

Испытания пуансонов проводили в производственных условиях завода на прессе-автомате холодной штамповки модели ПА-25 силой 25 кН при скорости 95 двойных ходов в минуту. Пуансон и матрица экспериментального штампа были изготовлены из стали Х12М с двусторонним технологическим зазором 0,075 мм и термообработаны до твердости 58...59 и 60...61 HRC соответственно. Толщина модифицированного слоя составляла 2...4 мкм. Секретные шайбы и отверстия под ключ для сердцевин замков штамповали из углеродистой стальной ленты (Ст 08кп) толщиной 1,5 мм. Заглубление пуансона в рабо-

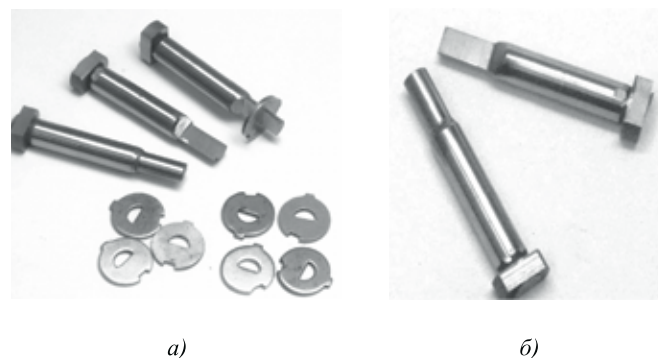


Рис. 4. Изделия и пуансоны для пробивки отверстий без покрытия (а) и с покрытием (б)

чее окно матрицы было постоянным и составляло 1,0 мм. За критерий завершения эксперимента принималась высота заусенцев на разделяемых контурах более 60 мкм.

По сравнению со среднестатистическим числом деталей, вырубаемых штатными пуансонами (около 60 тыс.), стойкость до переточки экспериментальных пуансонов с модифицированным слоем в 1,5 раза выше, что объясняется улучшением условий фрикционного взаимодействия в зоне разделения вырубаемого металла и основного.

Рекомендации

Обобщение полученных результатов по изучению технологических возможностей метода плакирования гибким инструментом позволяет сформулировать рекомендации по рациональному практическому применению модифицирующих покрытий и определить области, в которых технически и экономически эффективно их применение:

1. Повышение фрикционных и антифрикционных свойств деталей пар трения различных машин и механизмов путем формирования комплексно легированных самоупрочняющихся поверхностных слоев.

2. Увеличение срока службы режущего инструмента за счет создания на его рабочих кромках тончайших металлических и полимерных пленок.

3. Формирование покрытий на поверхностях резьбовых соединений, длительное время находящихся под воздействием высоких нагрузок, для предотвращения их схватывания и заклинивания.

4. Повышение коррозионной стойкости стальных и чугунных изделий нанесением алюминиевых или алюминидных защитных слоев.

5. Восстановление размеров и эксплуатационных свойств изношенных деталей пневмо- и гидроаппаратуры.

6. Увеличение стойкости деформирующего инструмента, например прокатных роликов при обжимке труб, штампов кузнечно-прессового оборудования и др.

7. Нанесение технологических покрытий на заготовки перед нагревом и горячим пластическим деформированием в целях снижения теплопотерь излучением, уменьшения интенсивности окисления и предотвращения появления поверхностных дефектов.

8. Создание подслоя перед газоплазменным или плазменным напылением.

9. Нанесение декоративных и токопроводящих слоев на поверхность стекла, керамики или камня.

10. Получение износостойких керамических покрытий путем формирования покрытий из алюминиевых или титановых сплавов на стальных изделиях с последующим микродуговым оксидированием.

Выводы

Обобщение накопленного опыта использования

технологии плакирования гибким инструментом показало, что модифицирование рабочих поверхностей плакированием гибким инструментом в целях снижения коэффициента трения скольжения в сопряжениях, повышения износостойкости, снижения уровня шума, генерируемого при работе зубчатых механизмов, и т. п. позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики деталей металлорежущих станков, технологического оборудования и инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Анцупов В.П.** Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом. Магнитогорск, МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. 241 с.

2. **Максимченко Н.Н.** Исследование фрикционного плакирования гибким инструментом с использованием некомпозиционных планов второго порядка // Вестник машиностроения. 2013. № 9. С. 38—42.

3. **Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Калач В.Н.** Исследование влияния покрытий на антискачковые свойства направляющих скольжения // СТИН. 2012. № 9. С. 4—8.

4. **Улучшение** триботехнических свойств и снижение шума зубчатых передач плакированием функциональных покрытий на рабочие поверхности сопрягаемых зубьев / В.Л. Басинюк и др. // Трение и износ. Т. 34. № 6. 2013. С. 575—582.

5. **Повышение** работоспособности профилирующей оправки для изготовления подрессорников грузовых автомобилей формированием износостойких покрытий / М.А. Леванцевич и др. // Актуальные вопросы машиноведения: Сб. научн. трудов. / ОИМ НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев и др. 2013. Вып. 2. С. 445—448.

6. **Устройство** для нанесения металлических покрытий на поверхность металлических изделий: Пат. 1143 Респ. Беларусь, МПК7 С 23 С 26/00 / Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Адашкевич В.И., Лукашик А.А., Зольников В.Г.; заявитель Институт механики и надежности машин НАН Беларуси. № 20030204; Заявл. 03.05.2003; Оpubл. 30.12.2003. Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2003. № 4. С. 285.

7. **Устройство** для нанесения покрытий на поверхности изделий: Пат. 3678 Респ. Беларусь, МПК (2006) С 23 С 26/00 / Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Белоцерковский М.А., Давыдовский Ф.Ф., Калач В.Н.; заявитель Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. № 20060827; Заявл. 07.12.2006; Оpubл. 30.06.2007 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 3. С. 198—199.

8. **Устройство** для нанесения металлических покрытий на поверхность металлических изделий: Пат. 2243290 РФ, МПК7 С 23 С 24/02 / Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Адашкевич В.И., Лукашик А.А., Зольников В.Г.; заявитель Институт механики и надежности машин НАН Беларуси. № 2003132020/02; Заявл. 31.10.2003; Оpubл. 27.12.2004. Изобретения. Полезные модели / Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. 2004. № 36. С. 865.

Формирование шероховатости поверхности при гидроабразивной обработке

Представлены результаты исследования процесса гидроабразивной обработки. Получены зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости поверхности.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, шероховатость поверхности, единичное взаимодействие, влияние зернистости.

The article presents the results of the researchment process of waterjet machining. It was found the dependences for determining the arithmetic average deviation contour established surface roughness.

Keywords: waterjet machining, surface roughness, single interaction, effect of grain.

В современном машиностроении перспективным методом обработки поверхностей деталей машин является гидроабразивная обработка. Задача данного исследования заключалась в определении зависимости для расчета среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности на основе проведения экспериментальных и теоретических исследований.

В процессе обработки происходит перекрытие царапин, оставленных абразивными частицами, в результате чего ширина контакта каждой частицы с обрабатываемой поверхностью неодинакова, а края царапин расположены на различном уровне.

Таким образом, глубина внедрения соседних частиц также неодинакова. Это обуславливает сложность описания функции распределения глубин внедрения частиц в обрабатываемую поверхность. В работе [1] установлено, что небольшая доля частиц от общего числа частиц, которые участвуют во взаимодействии, будет оставлять следы глубиной, близкой к h_{\max} . Аппроксимируем их функцию распределения степенной зависимостью:

$$z_i = 0,5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k \quad \text{при } 0 \leq h_i \leq H_0, \quad (1)$$

где z_i — число лунок на уровне h_i от отпечатка наибольшей глубины h_{\max} ; z_0 — номинальное число взаимодействующих частиц над квадратом упаковки рабочей среды; H_0 — разность глубин следов; k — показатель распределения глубин отпечатков.

Величина H_0 соответствует глубине залегания половины из всех царапин, измеренной от дна наиболее глубокой царапины, при условии, что функция распре-

деления глубин царапин в начальной части была справедлива для слоя царапин.

Для описания процесса образования профиля шероховатости поверхности при гидроабразивной обработке в качестве критерия предлагается параметр H_{yc} , названный "условная высота неровностей обрабатываемой поверхности", и рассматривается методика определения стандартных параметров шероховатости поверхности при его использовании.

Пусть в процессе обработки через нормальное сечение профиля шероховатости поверхности детали прошло некоторое число абразивных частиц. Каждая i -я частица оставляет царапину глубиной a_i и шириной b_i . Царапины от частиц частично перекрывают царапины от предыдущих частиц, причем частицы осуществляют неполные срезы. При этом происходит постепенное смещение профиля, в процессе которого удаляются выступы исходной шероховатости. При формировании профиля установившейся шероховатости (рис. 1) его впадины представляют собой дно наиболее глубоких царапин, а выступы образуются пересечением боковых сторон царапин от отдельных частиц.

Учитывая, что края царапин от частиц примерно равномерно смещаются вверх и вниз от линии AM , за

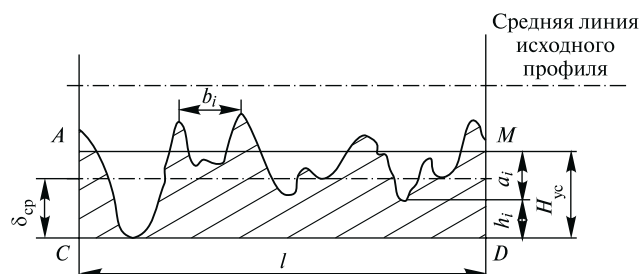


Рис. 1. Схема образования профиля шероховатости поверхности при обработке свободными абразивами

глубину внедрения зерен в данном поперечном сечении будем принимать глубину, отсчитанную от этой линии.

В работе [1] установлено, что отношение ширины абразивных царапин к глубине слабо зависит от размеров частиц:

$$b_i \approx 3,8a_i.$$

Учитывая экспоненциальный характер изменения высотных параметров шероховатости поверхности детали при обработке свободными абразивами, можно разработать математическую модель изменения значений этих параметров в зависимости от времени обработки. Для получения такой модели необходимо прежде всего разработать методику расчета установившейся шероховатости для конкретных значений исходных данных (технологических факторов), что позволит определить асимптоту экспоненциальной функции $R_a = f(t)$.

Царапины частично налагаются друг на друга и поэтому имеют неровные края (см. рис. 1), однако если бы частицы делали только полные срезы, то на некотором уровне нормального сечения детали сумма ширины всех полных срезов была бы равна ширине обрабатываемого участка:

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i = L_{\text{ед}},$$

где $z_{\text{сеч}}$ — число зерен, оставивших свой след в данном нормальном сечении детали, а вершины всех неровностей в сечении *AMDC* располагались бы на одной линии.

В действительности за счет перекрытия царапин по ширине вершины неровностей смещаются вверх и вниз от линии *AM*. А так как они смещаются от этой линии примерно равномерно вверх и вниз, то данную линию можно рассматривать как среднюю между вершинами всех неровностей.

Таким образом, средняя линия между вершинами всех неровностей в данном нормальном сечении детали находится на том уровне, где сумма ширины всех частиц, прошедших через данное сечение детали, равна ширине обрабатываемого участка. Дальнейшие расчеты будем производить для единицы длины нормального сечения детали, так как величины $z_{\text{сеч}}$ и $L_{\text{ед}}$ связаны между собой.

Учитывая соотношение (1), для уровня H_{yc} можно записать

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} b_i = \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} 3,8a_i = 3,8 \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} a_i = L_{\text{ед}}. \quad (2)$$

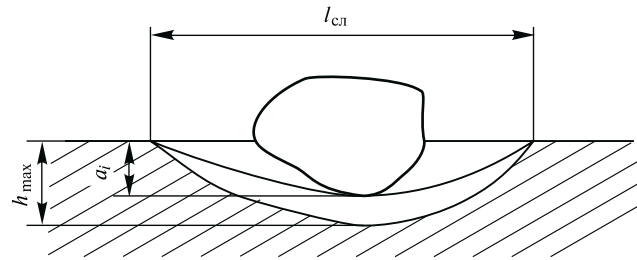


Рис. 2. Схема продольного сечения единичного следа абразивной частицы

Для нахождения глубины царапины a_i в рассматриваемом нормальном сечении детали обратимся к форме единичного следа при обработке свободными абразивами (рис. 2).

За расчетную глубину внедрения a_i частицы можно взять произведение максимально возможной глубины $h_{\text{max}} - h_i$ (см. рис. 1) на вероятность $P_{\text{вн}}$ внедрения частицы с этой глубиной. Исходя из геометрической интерпретации вероятности случайного события получим, что искомая вероятность равна отношению площади, ограниченной продольной траекторией данной частицы при ее внедрении, к площади, ограниченной продольной траекторией движения частицы с максимальной глубиной внедрения:

$$P_{\text{вн}} = \frac{l_{\text{ед}} (h_{\text{max}} - h_i)}{l_{\text{ед}} h_{\text{max}}} = \frac{h_{\text{max}} - h_i}{h_{\text{max}}}.$$

А для глубины царапин запишем соотношение

$$a_i = \frac{(h_{\text{max}} - h_i)^2}{h_{\text{max}}} = h_{\text{max}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^2. \quad (3)$$

Тогда сумма глубин всех царапин, оставленных частицами в нормальном сечении *AMDC*,

$$\sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} a_i = h_{\text{max}} \sum_{i=1}^{z_{\text{сеч}}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\text{max}}} \right)^2, \quad (4)$$

где $z_{\text{сеч}}$ — общее число всех зерен, для которых возможен контакт с данным нормальным сечением детали.

При этом на уровне *AM* (см. рис. 1) $z_{\text{сеч}}$ определится следующим образом:

$$z_{\text{сеч}} = 0,5z_0 \left(\frac{H_{\text{yc}}}{H_0} \right)^k.$$

После преобразования получим

$$3,8kz_0 \left(\frac{H_{yc}}{H_0} \right)^k \frac{\Gamma_{(k)}}{\Gamma_{(k+3)}} = L_{ед}.$$

Учитывая, что значения показателя степени k для всех видов абразивной обработки лежат в пределах $1 \leq k \leq 3$ [1], сделаем допущение, что при гидроабразивной обработке можно принять $k = 2$.

После соответствующих преобразований получим зависимость

$$H_{yc} = H_0 \sqrt{\frac{L_{ед}}{0,32h_{max}z_0}}. \quad (5)$$

Теперь можно перейти к определению среднего арифметического отклонения профиля Ra при гидроабразивной обработке. Установлено [1, 2], что параметры Ra и H_{yc} характеризуют вид опорной кривой шероховатости поверхности, но коэффициент пропорциональности f_0 , в свою очередь, определяется отношением H_{yc}/Ra :

f_0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
H_{yc}/Ra	3,25	4,26	5,36	6,36	7,32	8,12	9,0	10,1	10,9

Распространив эту зависимость на процесс гидроабразивной обработки при $f_0 = 3$, можно принять $H_{yc}/Ra = 6,4$. Используя соотношение (5), после преобразований получим зависимость для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости

$$Ra = \frac{H_0}{3,6} \sqrt{\frac{L_{ед}}{h_{max}z_0}}. \quad (6)$$

Для проведения расчетов необходимо определить величину разновысотности активных зерен H_0 . При гидроабразивной обработке значение H_0 не может быть определено экспериментально. Однако величина H_0 зависит от зернистости абразивных частиц, режимов обработки и механических свойств материала обрабатываемой детали, т.е. от тех же параметров, что и h_{max} . При этом согласно определению ее значение должно быть меньше h_{max} . Для проведения теоретических расчетов, учитывая данные, приведенные в работах [1, 2], сделаем допущение, что при гидроабразивной обработке

$$H_0 = \frac{h_{max}}{3}. \quad (7)$$

Тогда зависимости для расчета условной высоты и среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости будут выглядеть следующим образом:

$$H_{yc} = 0,58 \sqrt{\frac{h_{max}L_{ед}}{z_0}}; \quad Ra = 0,09 \sqrt{\frac{h_{max}L_{ед}}{z_0}}.$$

Так как z_0 — это число зерен, проходящих через единичную длину в единицу времени, обозначив λ число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки, получим, что через сторону квадрата упаковки $2R$ будут проходить $\sqrt{\lambda}$ частиц, а через единичную длину пройдет в $L_{ед}/(2R)$ больше частиц:

$$H_{yc} = 0,84 \sqrt{\frac{h_{max}R}{\sqrt{\lambda}}}; \quad Ra = 0,13k_a^{Ra} \sqrt{\frac{h_{max}R}{\sqrt{\lambda}}}, \quad (8)$$

где k_a^{Ra} — коэффициент, учитывающий угол падения струи α ; R — радиус частицы.

Для анализа влияния размеров обрабатываемой среды, динамического давления пульпы и механических свойств материала детали на величину Ra при гидроабразивной обработке произведем расчеты по зависимости (8). Результаты расчетов приведены в табл. 1...3.

Таблица 1

Значения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$, мкм, при гидроабразивной обработке в зависимости от давления струи $p_{дин}$ ($L = 60$ мм, $\alpha = 90^\circ$)

$p_{дин}$, МПа	Медь М06, $\sigma_t = 70$ МПа	Сталь 45, $\sigma_t = 350$ МПа
0,1	4,19	2,75
0,2	4,98	3,28
0,3	5,51	3,62
0,4	5,92	3,89

Таблица 2

Значения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$, мкм, при гидроабразивной обработке в зависимости от расстояния до обрабатываемой поверхности L ($p_{дин} = 0,4$ МПа, $\alpha = 90^\circ$)

L , мм	Сталь 12Х18Н10Т, $\sigma_t = 230$ МПа	Алюминиевый сплав Д16, $\sigma_t = 90$ МПа
30	3,99	4,91
60	4,13	5,02
90	4,01	4,79
120	3,77	4,61

Таблица 3
Значения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$, мкм, при гидроабразивной обработке в зависимости от угла обработки α ($p_{лин} = 0,4$ МПа, $L = 60$ мм)

$\alpha, ^\circ$	Латунь ЛС59-1, $\sigma_T = 133$ МПа	Сталь 45, $\sigma_T = 350$ МПа
20	3,23	2,37
45	4,64	3,40
65	5,25	3,85

Проанализировав результаты теоретических рассуждений, можно сделать следующие **выводы**:

1. Применение обрабатывающей среды (частиц) меньшего размера, а также уменьшение давления струи позволяют получить шероховатость поверхности с меньшим значением Ra .

2. При обработке более мягких материалов образуется более грубая шероховатость.

3. Полученные результаты имеют физический смысл и не противоречат установившимся представлениям о процессе гидроабразивной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Королев А.В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.

2. **Королев А.В., Новоселов Ю.К.** Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. 320 с.

3. **Богомолов Н.И.** О работе трения в абразивных процессах // Труды ВНИИАШ. 1965. С. 27—29.

4. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Ростов-на-Д. 1995.



Продолжается подписка на журнал «Упрочняющие технологии и покрытия»

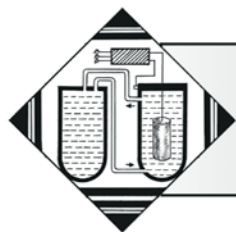
- За наличный и безналичный расчет
- С любого номера и на любой срок
- Без почтовых наценок

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2А

Тел.: (495) 785-60-69

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru



УДК 621.793

Д.И. Боровик, Ф.И. Пантелеенко (Белорусский национальный технический университет, г. Минск),
А.М. Столин (Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН, г. Черноголовка)
E-mail: borovikdi@gmail.com

Получение композиционных электрохимических покрытий на железной основе, упрочненных СВС-частицами с последующей лазерной обработкой*

Приведены результаты исследования структуры композиционных электрохимических покрытий, сформированных при электрохимическом осаждении из растворов-электролитов с порошковым наполнителем с последующей лазерной обработкой. Порошковым наполнителем являются композиционные частицы титан — углерод, полученные с применением метода магнетронного напыления, способные к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС). Установлено, что введение композиционного порошка титана, плакированного углеродом, в структуру электрохимического железа и последующая лазерная обработка приводят к локальному СВС на поверхности частиц и улучшению связи между упрочняющей частицей и матрицей.

Ключевые слова: композиционное электрохимическое покрытие, порошковый наполнитель, электрохимическое осаждение, самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), структура, лазерная обработка, магнетронное напыление.

The results of the research of a structure of composite electrochemical coatings formed from powder-filled electrolytic solutions with the help of electrochemical deposition with successive laser surface treatment are provided. The powder filling are composite particles of titanium—carbon capable of self-propagating high-temperature synthesis (SHS) obtained by magnetron sputtering. The introduction of carbon-clad composite titanium powder into the structure of electrochemical iron with successive laser surface treatment leading to a local SHS on the surface of the particles and the improvement of linkages between the reinforcing particles and the matrix is considered.

Keywords: composite coating, powder filler, electrochemical deposition, self-propagating high-temperature synthesis (SHS), structure, laser surface treatment, magnetron sputtering.

Введение

Для восстановления и упрочнения быстроизнашиваемых деталей машин широко используются технологии электрохимического осаждения металлов и сплавов. Самой производительной и дешевой в практике производства является технология электрохимического железнения. Однако получаемые гомогенные электрохимические железные покрытия не удовлетворяют все возрастающим требованиям к восстанавливаемым поверхностям по твердости, износостойкости и другим специальным свойствам, что неизбежно приводит к необходимости конструирования гетерогенных электрохимических железных покрытий. Одним из способов создания гетерогенных электрохимических железных покрытий является модифицирование структуры покрытий с помощью дисперсных порошковых керамических наполнителей [1] в целях

формирования композиционного электрохимического покрытия. Другой способ улучшения структуры электрохимических железных покрытий — термическая и химико-термическая обработка [2, 3], которая позволяет улучшить свойства поверхностного слоя железного покрытия и повысить прочность связи частица — матрица. Для повышения износостойкости покрытий применяют методику создания дискретной структуры таким образом, чтобы получалась система участков с чередующимися разнородными свойствами (твердость, плотность, состав) [4]. Но наиболее перспективным, по нашему мнению, является способ, который объединяет все названные выше подходы и заключается в лазерном модифицировании поверхности композиционных электрохимических покрытий на железной основе, содержащих кроме железной матрицы сложнoкомпонентные включения, способные к самораспространяющемуся высокотемпературному синтезу (СВС). Подобными включениями можно считать, например, порошок титана, на поверхность которого нанесен слой углерода методом магнетронного напыления.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-90914).

Нами было сделано предположение, что при высокоэнергетической лазерной обработке композиционного электрохимического покрытия, содержащего в своей структуре сложные двухкомпонентные частицы, представляющие собой титан, плакированный углеродом, возникает экзотермическая реакция, или так называемый самораспространяющийся высокотемпературный синтез, который приводит к образованию карбидных соединений на поверхности частицы. По нашему мнению, СВС позволит увеличить прочность связи матрица — частица и приведет к общему повышению физико-химических свойств самого покрытия.

Методика проведения исследований

Изучение влияния лазерной обработки на физико-механические свойства композиционного электрохимического покрытия (КЭП) проводили на примере КЭП на железной основе с добавлением дисперсной упрочняющей фазы. Покрытия получали из хлористого электролита-суспензии (ЭС) при механическом перемешивании и следующих режимах электролиза: температура электролита (65 ± 5) °С, плотность катодного тока 30 А/дм^2 и водородный показатель $\text{pH} = 1,0$. Покрытия толщиной $\sim 0,3 \text{ мм}$ наносили на образцы из стали Ст3 площадью $0,25 \text{ дм}^2$. Анодную обработку образцов и деталей проводили в растворе 30%-ной серной кислоты при плотности тока 60 А/дм^2 в течение 1 мин.

Дисперсная фаза представляет собой порошок титана (рис. 1) дисперсностью 1...20 мкм, на который нанесен слой углерода толщиной до 5 мкм с помощью магнетронного напыления при следующем режиме:

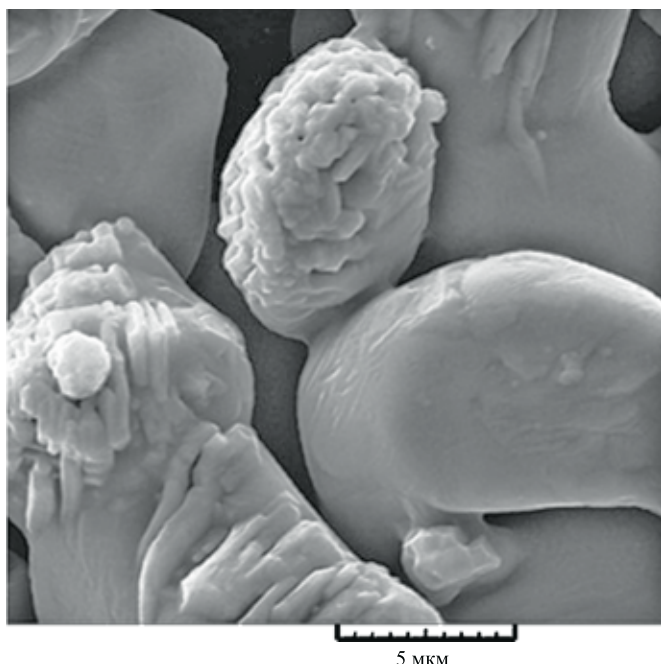


Рис. 1. Морфология поверхности частиц дисперсной фазы Ti + C

Материал катода	С (графит)
Ток разряда I_p , А.....	0,6
Напряжение разряда U_B , кВ.....	0,45
Ток катушки, А.....	0,45
Рабочее давление газа, Па	0,30
Магнитная индукция, мТл	75,0
Диаметр максимальной эрозии, мм	78
Рабочий диаметр катода, мм	110/72

Порошок дисперсной фазы Ti + C предварительно не обрабатывали, только перед внесением предварительно замачивали в небольшом количестве электролита с добавлением ПАВ, после этого проводили контроль pH и смесь постепенно добавляли в рабочий электролит. Режим перемешивания во всех опытах был постоянным.

Покрытия получали в электрохимической ванне объемом 5 л (рис. 2), оборудованной осевой лопастной мешалкой для поддержания постоянной концентрации дисперсной фазы. Фотография морфологии полученного покрытия поверхности представлена на рис. 3.

При проведении экспериментов был использован комплекс лазерной наплавки, состоящий из установки лазерной наплавки "Комета-2" и манипулятора. Схема процесса представлена на рис. 4. Режим лазерной обработки (непрерывное излучение): мощность излучения — 1 кВт; диаметр пятна нагрева 1 мм; скорость перемещения пятна нагрева — 500...2500 мм/мин; расстояние между дорожками — 1 мм.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При лазерном модифицировании поверхности КЭП происходит значительное изменение внешнего

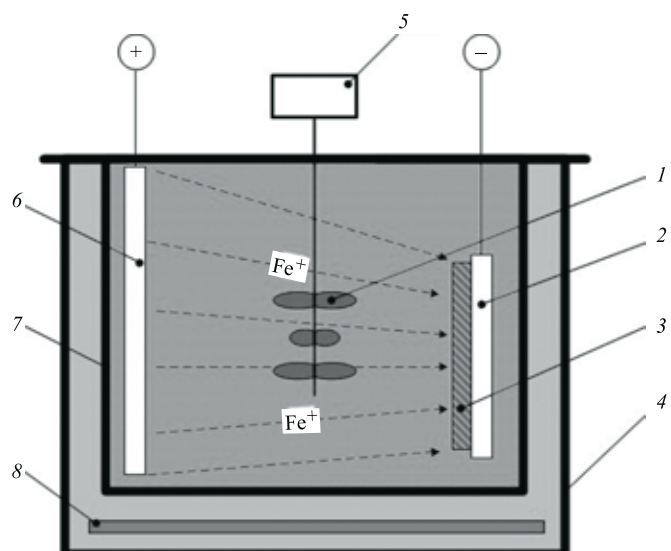


Рис. 2. Экспериментальная лабораторная установка для получения композиционных электрохимических покрытий:

1 — мешалка; 2 — катод (подложка); 3 — композиционное покрытие; 4 — водяная баня; 5 — привод мешалки; 6 — растворимый анод; 7 — корпус ванны осаждения; 8 — нагреватель

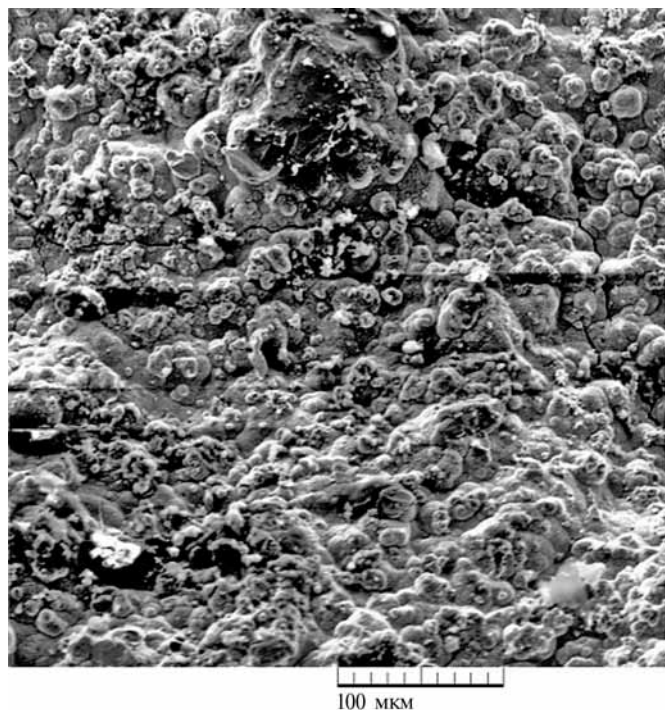


Рис. 3. Морфология поверхности КЭП Fe — (Ti + C) до лазерной обработки

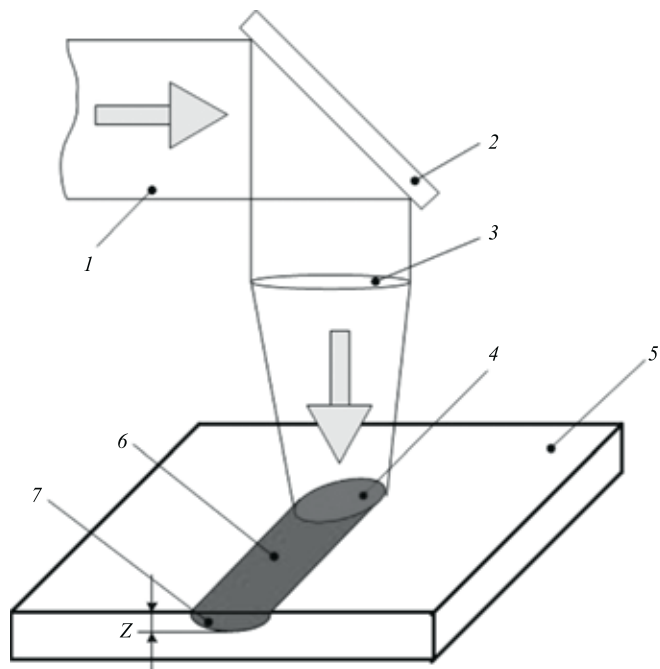


Рис. 4. Принципиальная схема лазерной обработки поверхности КЭП:

1 — лазерный пучок; 2 — управляющее зеркало; 3 — фокусирующая линза; 4 — пятно нагрева; 5 — обрабатываемая поверхность; 6 — площадь зоны обработки; 7 — поперечный вид зоны обработки; Z — глубина зоны закалки

вида покрытия, значительно увеличивается шероховатость и в эпицентре обработки образуются так называемые наплавочные валики (рис. 5). В связи с этим раз-

меры обрабатываемых деталей должны рассчитываться с учетом припуска на механическую обработку.

Микроструктура покрытия до обработки (рис. 6) — пористая, с явно различимыми частицами дисперсной фазы (рис. 7). Причина появления нежелательной пористости заключается в электропроводности самих частиц дисперсной фазы, которые по мере попадания на поверхность осаждения становятся центрами электрохимической кристаллизации, а это приводит к неравномерности покрытия по всей поверхности осаждения, и в особенности вокруг самой частицы. На фото микроструктуры покрытия после обработки (рис. 8) виден след воздействия лазерного излучения (ЛИ) на структуру композиционного покрытия. Граница области воздействия ЛИ, или так называемой зоны тер-

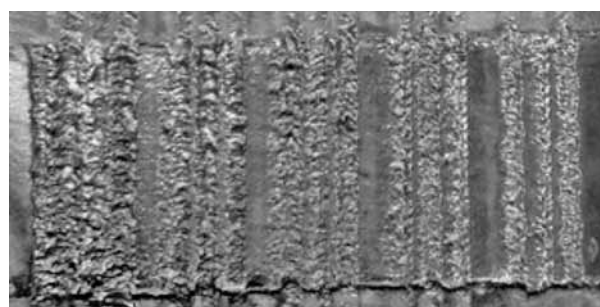


Рис. 5. Внешний вид обработанной поверхности КЭП Fe — (Ti + C) после лазерной обработки

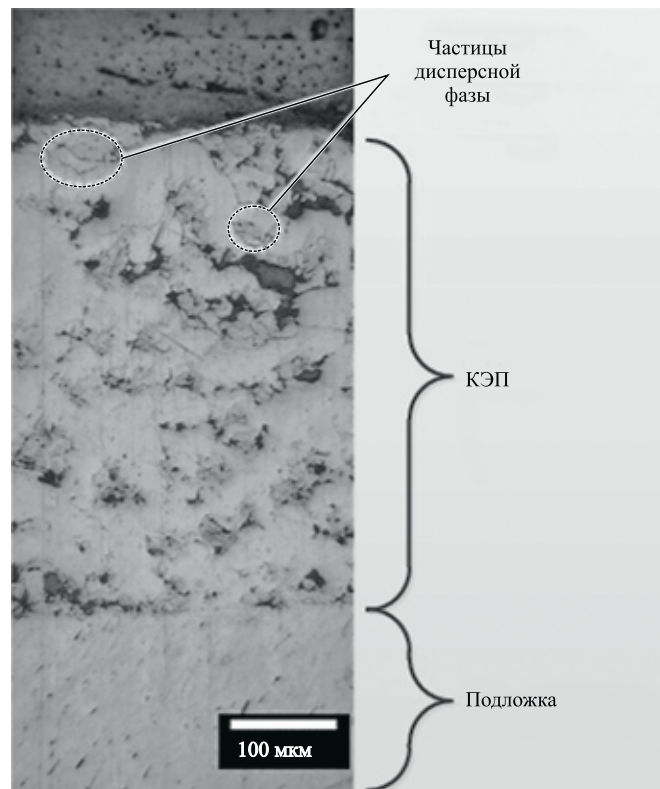


Рис. 6. Микроструктура КЭП Fe — (Ti + C) до лазерной обработки

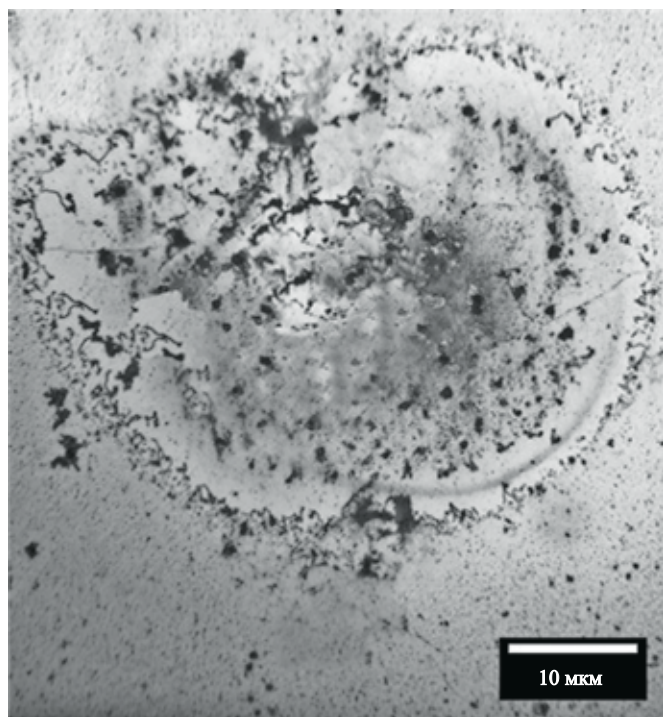


Рис. 7. Частица дисперсной фазы в КЭП Fe — (Ti + C) до лазерной обработки

мического влияния (ЗТВ), является нижней границей фазовых превращений железа при 900 °С.

Очевидно, что по мере рассеяния тепловой энергии от пятна нагрева выявляются различные по свойствам слои покрытия. В зоне пятна нагрева формируется область гетерогенного материала, в котором происходят фазовые изменения в жидком состоянии (первый слой). Затем следуют область с фазовыми и структурными превращениями в твердом состоянии (второй слой) и область с незначительным тепловым воздействием, в которой видимых изменений в структуре покрытий не происходит (третий слой). В первых двух слоях под воздействием инициирующего лазерного излучения про-

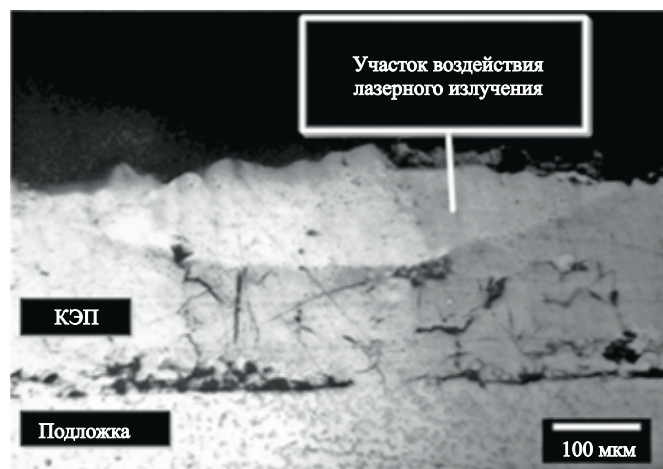


Рис. 8. Микроструктура КЭП Fe — (Ti + C) после лазерной обработки

исходит экзотермическая реакция в частицах дисперсной фазы между титановым ядром и слоем углерода на поверхности между компонентами дисперсных частиц с выделением дополнительной энергии, которая расходуется на образование устойчивой химической связи между дисперсной фазой и матрицей.

После проведения лазерной обработки КЭП Fe — (Ti + C) был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) фрагмента покрытия, который был предварительно отделен от подложки механическим путем. Из результатов РФА покрытия (рис. 9, см. с 3 обложки) следует, что под воздействием лазерного излучения в частицах дисперсной фазы действительно происходит самораспространяющийся высокотемпературный синтез с образованием карбида титана (TiC) непосредственно в покрытии.

Выводы

Лазерное излучение вызывает видимые структурные и фазовые превращения, приводящие к изменению физических свойств покрытия. Как показали предварительные исследования, средняя твердость в области обработки КЭП Fe — (Ti + C) лазерным излучением не отличается от твердости основной части покрытия и составляет ~6000 МПа (50 HV), хотя структурные изменения должны приводить к резкому снижению твердости до 1500 МПа (100 HV), как в случае с чистым электрохимическим железом [5], или к повышению до 10 000 МПа (100 HV), как в случае с КЭП Fe—TiC [4]. По-видимому, на твердость повлияли как объемное количество карбида титана (менее 0,1 %), так и 1-й и 2-й слои ЗТВ, представляющие собой низколегированное титаном железо. В связи с этим необходимо проведение дополнительных исследований свойств КЭП во взаимосвязи со структурными изменениями под воздействием лазерного излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Формирование** композиционных покрытий на основе железа при электрохимическом осаждении из растворов электролитов с керамическими наполнителями / Ф.И. Пантелеенко, В.В. Саранцев, Е.Ф. Пантелеенко, Д.И. Боровик, Б.Б. Хина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 4. С. 27—33.
2. **Кочарян Е.В.** Влияние химико-термической обработки на твердость электролитических осталеных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 12. С. 24—28.
3. **Кочарян Е.В.** Влияние химико-термической обработки на пластичность электролитических осталеных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 3.
4. **Лазерная** обработка износостойких композиционных электрохимических покрытий / Г.В. Гурьянов, С.С. Годунов, П.Е. Кисель, Ю.Е. Кисель // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 9. С. 32—37.
5. **Боровик Д.И.** Лазерная обработка электрохимического железного покрытия // Высокоэнергетические системы, процессы и их модели: Сб. научн. тр. / Редкол.: В.В. Соболев (отв. ред.), В.П. Куприн и др. Днепропетровск: АкцентПП, 2013. 288. С. 5—11.

Повышение срока службы деталей из серого чугуна для телескопических и поршневых гидроцилиндров

Рассматривается новый способ повышения срока службы направляющих для телескопических гидроцилиндров, сквозных втулок и поршней для поршневых одноступенчатых гидроцилиндров, изготавливаемых из чугуна СЧ20. Повышение работоспособности чугунных деталей обеспечивается термодиффузионным насыщением алюминием и ванадием из порошковой среды контактным способом.

Ключевые слова: гидроцилиндр, покрытие, диффузия.

A new way to increase the service life of sending tailored for telescopic hydraulic cylinders, end-to-end bushings and pistons for reciprocating single-stage hydraulic cylinders manufactured from cast iron MF20. Improvement of the health of cast iron parts are termodiffuzion saturation of aluminum and vanadium powder with the contact method.

Keywords: hydraulic cylinder, coating, diffusion.

Для грузовых автомобилей, тракторов, погрузчиков и другой специальной техники применяются гидроцилиндры (поршневые и телескопические), в которых сквозная крышка, поршень и направляющая выполнены из серого чугуна СЧ20. Нарботка гидроцилиндров в 90 % (до отказа) согласно ГОСТ 16514–96 должна быть:

для одноступенчатых гидроцилиндров, рассчитанных на номинальное давление до 16 МПа при ходе штока до 500 мм, не менее $0,8 \cdot 10^6$ циклов нагружения (двойных ходов); в случае если ход гидроцилиндра превышает 500 мм, не менее $0,8 \cdot 10^9 / (2s)$ циклов (s — ход штока);

для телескопических гидроцилиндров не менее 10^4 циклов.

Критерием отказа гидроцилиндра является переход его в нерабочее состояние, требующее остановки работы гидроцилиндра для устранения неисправности.

Критерием предельного состояния гидроцилиндров является уменьшение общего КПД или(и) увеличение удельного объема выносимой рабочей жидкости более чем в 1,2 раза от установленного значения для гидроцилиндров конкретного типа, не устраняемое заменой уплотнителей и опорных колец. Предельное состояние для одноступенчатых гидроцилиндров наступает через $2,5 \cdot 10^6$ циклов, для телескопических — через $0,5 \cdot 10^5$ циклов.

Анализируя изложенное, можно заключить, что ресурс работы поршневых и телескопических гидроцилиндров, которыми оснащена современная техника, является недостаточным. Выход из строя гидроцилиндра влечет за собой остановку всего агрегата. Увеличение срока службы направляющих позволит продлить срок эксплуатации гидроцилиндров и сократить число текущих и капитальных ремонтов техники, оснащенной гидроцилиндрами.

Для первого этапа исследований были выбраны элементы, позволяющие сформировать в структуре серого

чугуна износостойкое и коррозионно-стойкое покрытие термодиффузионным насыщением. Такими элементами являются алюминий и ванадий. Алюминий [1] позволяет образовывать интерметаллидные соединения, обладающие повышенной коррозионной стойкостью в ряде агрессивных сред. Ванадий является сильным карбидообразующим элементом, его карбиды имеют микротвердость 24...26 ГПа [2].

Невысокая разница в коэффициентах термического расширения чугуна, алюминия и ванадия является необходимым условием формирования качественного покрытия, а превышение атомными радиусами алюминия и ванадия атомного радиуса железа предполагает существование внутренних сжимающих напряжений в формирующемся покрытии.

В качестве реакционной среды выбрана порошковая смесь, содержащая феррованадий ФВд50У03, порошок алюминия А0, окись алюминия и активатор процесса — хлористый аммоний (табл. 1).

Таблица 1

Состав шихты для упрочнения чугунных образцов

Номер образца (шихты)	Состав реакционной шихты, % мас.			
	ФВд50У03	Al ₂ O ₃	Порошок алюминия	Хлористый аммоний (сверх 100 %)
1	60	39,5	0,5	4
2	60	39,25	0,75	4
3	60	39	1	4
4	60	38,5	1,5	4
5	60	38	2,0	4
6	60	37,5	2,5	4
7	60	36	4	4
8	60	35	5	4

Реакционная шихта вместе с образцами из СЧ20 за-сыпалась в контейнер с плавким затвором. Контейнер нагревался до температуры 1020...1050 °С, затем следовала изотермическая выдержка в течение 5 ч.

С использованием данных металлографических исследований и данных, приведенных в табл. 1, была определена регрессионная зависимость влияния концентраций в шихте порошка алюминия и инертного наполнителя на толщину покрытия h , мкм:

$$h = -21,344 - 6,47[Al] + 1,237[Al_2O_3] + 0,197[Al][Al_2O_3].$$

Если содержание алюминия в шихте находится в пределах 1,5...2,5 %, то наблюдается увеличение толщины упрочненного слоя до 35...55 мкм (при чистом ванадировании толщина покрытия составляет 25...35 мкм), но микротвердость покрытия плавно снижается от поверхности вглубь, в среднем составляя 19,5...21 ГПа.

При содержаниях алюминия в шихте более 2,5 % микротвердость покрытия начинает стремительно снижаться пропорционально концентрации алюминия в шихте в силу того, что поток алюминия начинает блокировать диффузионный поток ванадия [3, 4].

Определение внутренних напряжений в покрытии проводили на дифрактометре ДРОН-4, используя C_0K_α -излучение, при значениях угла наклона головки излучателя 0, 15, 30, 45°. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Полученные значения напряжений в покрытиях

Содержание алюминия в шихте, % мас.	Модуль упругости E , ГПа	Коэффициент Пуассона	Значение напряжения, МПа	Вид напряжений
0,75	250	0,3	-260 ± 140	Сжимающие
2	270	0,3	-340 ± 170	Сжимающие
2,5	210	0,3	-380 ± 30	Сжимающие

Полученные значения напряжений следует рассматривать как оценочные, так как, во-первых, при вырезании образцов напряжения частично релаксируются, а во-вторых, на поверхности присутствуют несколько фаз, и поэтому интенсивность линий невелика.

Оценку износостойкости алюмованадированных слоев (1 % Al в шихте) проводили испытаниями упрочненных образцов из серого чугуна трением скольжения без смазки, трением со смазкой, содержащей абразивный материал, и в условиях абразивного истирания.

Исследование износостойкости в условиях сухого трения скольжения проводили на машине для испытания плоских образцов из различного рода материалов, сконструированной в НИИТавтопроме.

Машина работает по следующему принципу. Испытуемый образец (верхний) вставляется во вкладыш механизма зажима и фиксируется. Нижний образец (контртело) устанавливается в приспособлении на подвижном столе и зажимается вручную. Затем включается механизм нагружения (верхний образец подводится к нижнему и создает нужное усилие), а стол через редуктор привода получает возвратно-поступательное движение.

Для сравнительной оценки износостойкости в данном виде испытаний в качестве эталона использовался образец из исходного (неупрочненного) серого чугуна СЧ20. Кривые зависимости износ—время, удельная нагрузка, пройденный путь представлены на рис. 1. При нагрузке 0,2 МПа линейный износ алюмованадированного серого чугуна мало отличается от нуля, а износ исходного серого чугуна СЧ20 составляет 0,1 мм. Значение удельной нагрузки 0,3 МПа является вертикальной асимптотой для кривой, характеризующей износ неупрочненного серого чугуна.

Исследование износостойкости покрытия в условиях трения со смазкой, содержащей абразивный материал, проводилось на установке, схема которой представлена на рис. 2. Для данного исследования использовались такие же образцы, как и при испытаниях в условиях сухого трения, при этом образец контактировал с фрезой поверхностью размером 10 × 10 мм.

Крепление образцов в патроне осуществлялось винтом. К приводу горизонтально-фрезерного станка крепилась отрезная фреза 1, изготовленная из стали Р6М5. К тыльной стороне фрезы прижимался патрон 2 с установленным в нем упрочненным образцом 3 из серого чугуна СЧ20. С помощью специальной масленки 4 со

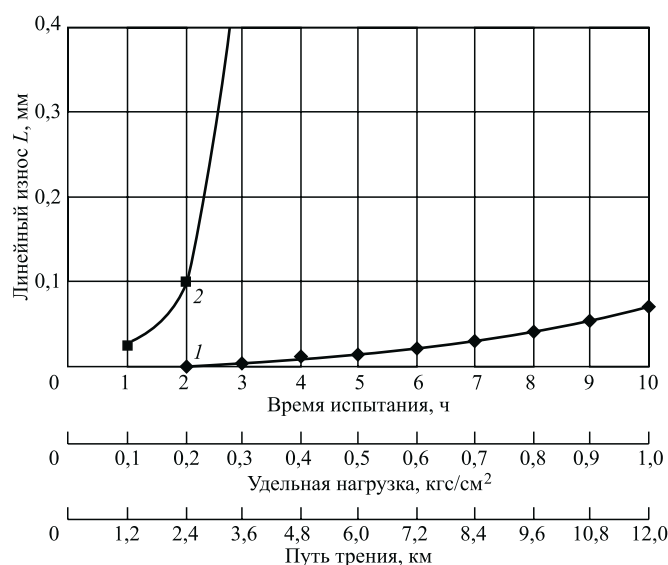


Рис. 1. Зависимость линейного износа от времени испытаний, удельной нагрузки и пройденного пути трения:

1 — алюмованадированный серый чугун СЧ20; 2 — исходный серый чугун СЧ20

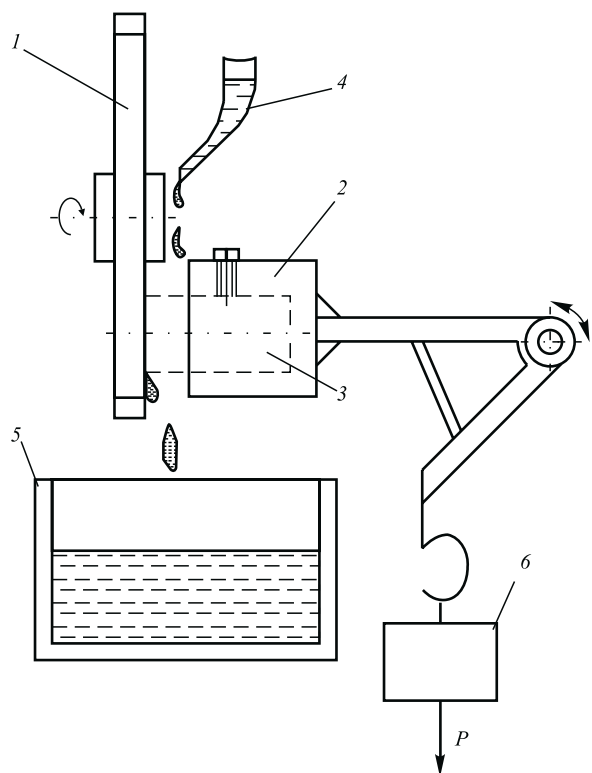


Рис. 2. Схема установки для истирания образцов в условиях трения со смазкой, содержащей абразивный материал

скоростью 5...6 капель в минуту в зону трения подавалось индустриальное масло И-20, содержащее 5 % об. абразивных частиц — Al_2O_3 . Наличие вибрации от работы станка позволило поддерживать масляную суспензию во взмученном состоянии, без осаждения частиц на дно. Нагрузка на образец создавалась грузом 6.

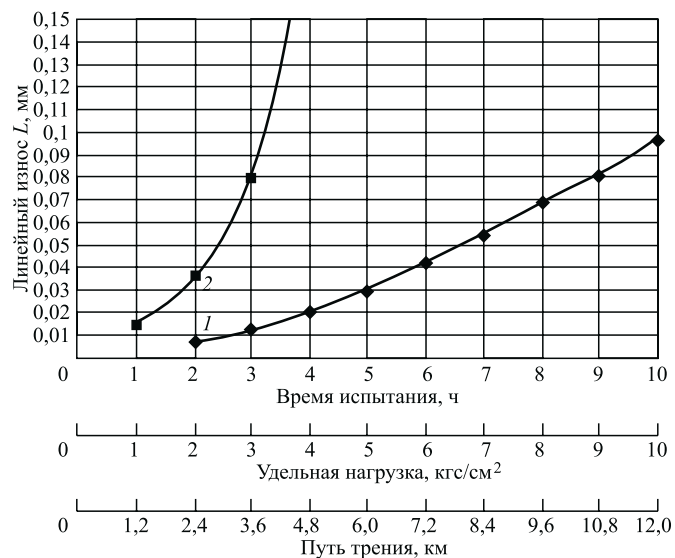


Рис. 3. Зависимость износа испытываемых материалов от времени испытаний:
1 — исходный СЧ20; 2 — алюмованадированный серый чугун СЧ20

В силу низкой скорости вращения фрезы — 200 мин^{-1} разбрызгивания масла не наблюдалось и "отработанная" суспензия удалялась самотеком в приемную ванну 5. Для сравнительной оценки износостойкости упрочненных образцов в данном виде испытания испытанию подвергались образцы из исходного чугуна СЧ20.

Оценку абразивной износостойкости алюмованадиевых покрытий на сером чугуне проводили в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 23.208—79. Результаты проведенных испытаний в графической интерпретации представлены на рис. 3.

Относительная износостойкость при испытаниях на абразивную стойкость по ГОСТ 23.208—79 составляет 5.

Выводы

1. Испытания алюмованадированного покрытия в условиях сухого трения скольжения позволили установить его высокую износостойкость. Образцы из исходного чугуна СЧ20 оказались непригодными для этих испытаний, так как их износ при времени испытаний 2 ч и нагрузке 0,2 МПа составил 0,1 мм, а износ упрочненного чугуна при этом близок к нулю. Дальнейшее их сравнение вообще невозможно, так как износ серого чугуна асимптотически стремится вверх.

2. Износостойкость упрочненного чугуна при трении со смазкой, содержащей абразивный материал (оксид алюминия) в количестве 5 % об., при нагрузке 0,2 МПа в 4 раза, а при нагрузке 0,3 МПа в 8 раз выше износостойкости исходного чугуна СЧ20. При более сильном нагружении сравнение износостойкостей невозможно, так как кривая, характеризующая линейный износ исходного чугуна, приближается к вертикальной асимптоте и не позволяет получить сравнительные показатели.

3. В условиях сухого абразивного истирания алюмованадированные слои в сравнении с отожженной сталью 45 имеют коэффициент износостойкости $K_{и} = 5$, в сравнении с исходным чугуном — $K_{и} = 24$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каргер В.И. Металлические противокоррозионные покрытия. Л.: Судостроение, 1980. 168 с.
2. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. М.: Машиностроение, 1997. 208 с.
3. Веселовский А.А. Определение основных параметров диффузии алюминия и ванадия в серый чугун при термодиффузионном упрочнении контактным способом // Материалы 11-й Международной научно-практической конференции. Пенза, 2007. С. 49—55.
4. Веселовский А.А. Упрочнение поверхностей трения направляющих телескопических гидроцилиндров термодиффузионным алюмованадированием // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 2. С. 14—16.

Л.И. Рослякова (Юго-Западный государственный университет, г. Курск),
И.Н. Росляков (Курская академия государственной и муниципальной службы)
E-mail: roslyakova.rli@yandex.ru

Моделирование комплекса легирования стали при цементации, влияющей на образование карбидной фазы

На серии модельных сталей с хромом и марганцем статистическим методом определен наиболее рациональный комплекс легирования (2,5...4,0 % хрома, 1,5...2,5 % марганца) аустенита в целях получения наилучшего сочетания глубины слоя карбидных частиц и их размеров. Проведен анализ математической модели легирования стали сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными.

Ключевые слова: легирование, карбид, аустенит, цементит, карбюризатор.

On series of model steel with chromium and manganese the most rational complex of austenite alloying (2.5...4.0 % chromium, 1.5 to 2.5 % manganese) is determined as a statistical method in order to obtain the best combination of length layer of carbide particles and their sizes. The analysis of the mathematical model steel alloying was conducted by comparison the calculated results with the experimental data.

Keywords: alloying, carbide, austenit, cementit, karburizer.

Наибольшее влияние на карбидообразование при цементации оказывают такие легирующие элементы в цементуемых сталях, как хром и марганец [1—4]. В целях определения рационального легирования был проведен эксперимент с использованием математического планирования. В качестве факторов принималось содержание в стали хрома (x_1) и марганца (x_2). Критериями оптимизации были выбраны глубина карбидного слоя l и средний размер карбидных включений d . Для исследования и построения математической модели было проведено 13 плавов на установке ЛПЗ-67 по 0,5 кг с различными содержаниями хрома и марганца. В опытных сталях кроме названных элементов содержалось 0,3...0,4 % углерода и для получения мелкозернистой структуры 0,08...0,1 % титана. В результате эксперимента получены два адекватных уравнения для глубины карбидного слоя и предельного размера карбидного включения:

$$l = 186,2 - 29,2x_1 + 4,1x_2 - 48x_1^2 - 49x_2^2, \quad (1)$$

$$d = 6,9 - 0,8x_1 - 0,3x_2 + 0,6x_1^2 - 0,8x_2^2. \quad (2)$$

Графическая интерпретация уравнений (1) и (2), показывающая влияние содержания в стали марганца на глубину карбидного слоя в диффузионной зоне при различных процентных содержаниях хрома и влияние содержания в стали хрома и марганца на средний размер карбидных частиц в диффузионном слое при различных процентных содержаниях данных элементов, имеет вид, аналогичный представленной на рис. 1.

Результаты расчетов показали, что влияние содержания хрома и марганца на глубину карбидного слоя носит экстремальный характер. Так, при увеличении содержания хрома примерно до 2,7 % глубина карбидного слоя зоны увеличивается, и тем больше, чем больше содержание марганца. Далее ее глубина падает. В то же время при увеличении этой зоны под влиянием увеличения содержания хрома и марганца снижается размер карбидной фазы примерно до содержания хрома 4 %, причем, чем меньше марганца, тем больше падение среднего размера карбидных частиц. То есть существует некое сочетание содержаний этих двух элементов, при котором можно получить и достаточно большую глубину карбидного слоя, и большой размер карбидных частиц.

Для получения оптимальных значений содержаний

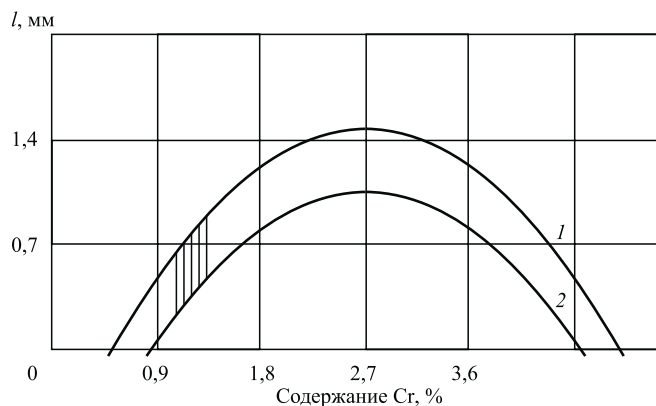


Рис. 1. Влияние содержания в стали хрома на глубину карбидного слоя в диффузионной зоне при содержании 0,8 (1) и 1,1 (2) марганца

хрома и марганца в стали были взяты первые производные от уравнений (1) и (2) по обоим переменным, приравнены к нулю и рассчитаны значения факторов в экспериментальных точках. В результате проведенных исследований получен оптимальный уровень легирования стали: хром — 2,5...4,0 %; марганец — 1,5...2,5 %.

Данные исследования также показали, что дополнительное легирование марганцем, увеличивающим предельную растворимость углерода на границе аустенит — цементит, еще более усиливает карбидообразование, однако только до определенного предела. По-видимому, марганец существенным образом изменяет поверхностное натяжение на границе аустенит — карбид.

Полученные результаты также показали, что граница перехода от карбидов типа M_3C в аустените к карбидам M_7C_3 (в частности, при температуре 1000 °С) примерно соответствует трехпроцентному содержанию хрома, т. е. можно утверждать, что интенсивное карбидообразование идет именно в области $\gamma + M_3C$.

Для выяснения содержания карбидов и глубины карбидного слоя на стали 18ХГТ выполнялись расчеты по модели комплексного легирования. Для этого уравнения регрессии (1) и (2) были преобразованы с целью перейти от кодированных переменных x_1 и x_2 к именованным величинам — содержаниям хрома C_{Cr} и марганца C_{Mn} путем подстановки

$$x_1 = \frac{C_{Cr} - 3}{1,5}; \quad x_2 = \frac{C_{Mn} - 2}{0,9}.$$

В результате преобразований и приведения к каноническому виду получены уравнения

$$l = 185,5 - 21,3(3 - C_{Cr})^2 - 60,5(2 - C_{Mn})^2, \quad (3)$$

$$d = 7,19 - 0,27(2 - C_{Cr})^2 - 0,99(1,83 - C_{Mn})^2. \quad (4)$$

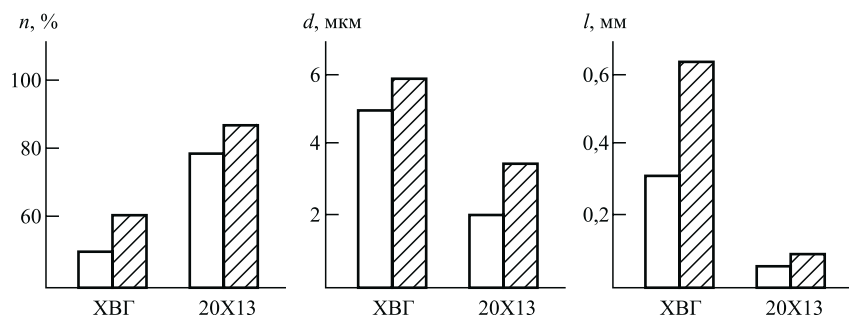


Рис. 2. Сравнительные диаграммы расчетных (□) и экспериментальных (▨) данных:

n — содержание карбидной фазы; d — размер карбидных включений; l — глубина карбидного слоя ($T = 920$ °С, $\tau = 10$ ч)

Таблица 1

Расчетные характеристики карбидосодержащих слоев

Марка стали	Содержание карбидной фазы n , %	Размер карбидных включений d , мкм	Глубина карбидосодержащего слоя l , мм
ХВГ	51	5,1	0,32
20Х13	77	2,2	0,07

Таблица 2

Результаты карбидизации сталей (при температуре 920 °С, 10 ч)

Марка стали	Максимальное содержание карбидной фазы n , %	Средний размер карбидного включения d , мкм	Глубина цементации l , мм	Тип карбида
18ХГТ	48	6...11	0,25	Цементит
ХВГ	63	4...8	0,81	Цементит
20Х13	90	3...4	0,11	Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$

Согласно ГОСТу в стали 18ХГТ содержится марганец в количестве 0,8...1,1 % (линии 1 и 2 на рис. 1) и хром в количестве 1,0...1,3 %. Заштрихованная область на рис. 1 соответствует возможной глубине карбидного слоя, образующегося при цементации, хотя следует отметить, что его экспериментальная глубина соответствует нижнему пределу расчетной глубины.

На основании данных по химическому составу сталей ХВГ и 20Х13 был выполнен расчет, результаты которого приведены в табл. 1. Для анализа математического модели легирования расчетные характеристики сталей сравнивались с экспериментальными [5–8], приведенными в табл. 2.

На рис. 2 приведены сравнительные диаграммы расчетных и экспериментальных данных.

Выводы

Математическая модель, полученная при выборе легирующего комплекса цементуемых сталей, может дать качественную оценку результатов цементации промышленных сталей, что может быть достаточным для прогнозирования свойств цементованных слоев сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Росляков И.Н. К вопросу о кинетике и термодинамике поверхностных реакций при науглероживании стали // Вестник машиностроения. 2011. № 7. С. 56–58.

2. Roslyakova L.I., Poslyakov I.N. Thermodynamic analysis of Equilibrium Condition of Carbon-containing Atmosphere in Nanosized Carbide Structures Formation // *Jornal of Nano- and Electronic Physics*. 2014. Vol. 6. No 3, 03047 (2 pp.).

3. Термодинамика и кинетика взаимодействия углеродосодержащих атмосфер со сталью при науглероживании / И.Н. Росляков, Л.И. Рослякова, Д.В. Колмыков и др. // *Технология металлов*. 2011. № 9. С. 22—25.

4. Poslyakov I.N. Kinetics and Thermodynamics of Surface Reactions when Carburizing steel // *Russian Engineering Research*. 2011. Vol. 31. № 7. P. 666—667.

5. Росляков И.Н., Колмыков В.И. Термодинамические условия образования поверхностных карбидных слоев при на-

углероживании хромомарганцевых сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 4. С. 3—5.

6. Росляков И.Н. Механизм и особенности образования диффузионного слоя при науглероживании с применением термоциклирования для стали 18ХГТ // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 5. С. 31—33.

7. Росляков И.Н. Влияние легирующих элементов на стабильность цементита при науглероживании стали // *Технология металлов*. 2010. № 7. С. 9—13.

8. Росляков И.Н., Колмыков В.И. Низкотемпературное цианирование конструкционных сталей с использованием бесцианистых соляных ванн // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 6. С. 39—41.

УДК 621.793

М.С. Степанов, Ю.М. Домбровский

(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: stepanovms@yandex.ru

Формирование карбидного покрытия при микродуговом молибденировании стали

Проведено исследование процесса формирования карбидного покрытия при микродуговом молибденировании стали с использованием молибдата аммония в качестве источника диффузанта. Установлена последовательность протекания химических реакций образования атомарного молибдена. Экспериментально подтверждена возможность формирования поверхностного карбидного слоя микротвердостью 13,5...15,0 ГПа за счет одновременной диффузии молибдена и углерода. Поверхностный слой состоит из переходной зоны эвтектоида и диффузионного слоя, представляющего собой обогащенную молибденом матрицу, содержащую интерметаллид Fe_3Mo_2 и ряд сложных карбидов, в которой находятся включения карбидной фазы Mo_2C сферической формы размером до 5 мкм.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, химико-термическая обработка, карбидное покрытие, микродуговое молибденирование стали.

Analysis of the research of the process of formation carbide coating at the microarc molybdenizing of steel using ammonium molybdate as a source of diffusant. Defined the sequence of chemical reactions formation of atomic molybdenum. Experimentally confirmed the possibility of forming a carbide surface layer microhardness 13,5...15,0 GPa due to the simultaneous diffusion of molybdenum and carbon. The surface layer consists of a transition zone of eutectoid and the diffusion layer, representing the enriched molybdenum matrix containing intermetallic Fe_3Mo_2 and the complex carbides, which are included Mo_2C carbide phase spherical shape with a size of 5 microns.

Keywords: surface hardening, diffusion heat treatment, carbide coating, microarc molybdenizing of steel.

Введение

Физико-механические свойства поверхностных слоев являются важнейшим фактором, определяющим критерии работоспособности стальных изделий, и это обуславливает повышенное внимание ученых-материаловедов к разработке новых поверхностно-упрочняющих технологий. Широкие возможности для оптимизации химического состава, структуры и свойств поверхности открывает химико-термическая обработка, но традиционные технологии, такие как цементация или нитроцементация, не всегда обеспечивают требуемые

характеристики упрочненных стальных изделий. Этим объясняется повышенный интерес к процессам формирования поверхностных диффузионных карбидных покрытий. Одним из них является покрытие, формируемое при насыщении поверхности молибденом [1—4]. Источником диффузанта обычно являются молибден или ферромolibден с добавлением активатора, а также пасты и обмазки. Возможно применение газовых сред и расплавов. Температура процесса — 1000...1200 °С, продолжительность — 6...7 ч. Однако существующие технологии формирования покрытий на основе карбида молибдена не нашли широкого применения, так

как характеризуются большой продолжительностью и предназначены прежде всего для обработки высокоуглеродистых сталей, в то время как для малоуглеродистых сталей необходима предварительная цементация.

Интенсификация диффузионного насыщения возможна с помощью непосредственного воздействия электрического тока на обрабатываемое изделие и насыщающую среду [4]. Такое воздействие осуществляется в процессе микродуговой химико-термической обработки (МДХТО) в порошковой среде [5, 6]. Поэтому было сделано предположение о возможности ускоренного формирования высокотвердого поверхностного карбидного покрытия с помощью одновременного насыщения стальных изделий углеродом и молибденом.

Целью работы является изучение результатов диффузионного молибденирования стальных изделий в режиме микродугового нагрева.

Методика проведения исследований

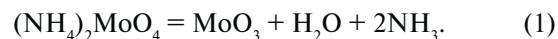
Процесс МДХТО осуществляли на экспериментальной установке [5], обеспечивающей электронагрев цилиндрических образцов, погруженных в контейнер с порошком каменного угля (антрацита) с размером частиц 0,4...0,6 мм. На поверхность образцов наносили электропроводную обмазку, содержащую молибдат аммония $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ в качестве источника диффузанта. Плотность тока на поверхности образцов составляла 0,53 А/см², максимальная температура процесса — 1250 °С, общая продолжительность процесса — 3 мин. Микроструктурный анализ диффузионного слоя осуществляли с помощью микроскопов МИМ-7 и Neophot-21 на поперечных шлифах образцов, протравленных реактивом Ржешотарского. Для получения изображения диффузионного слоя и его концентрационного профиля использовали растровый электронный микроскоп VEGA II LMU фирмы Tescan с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT. Рентгеновский фазовый анализ проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA-435 в Cu K_α -излучении. Рельеф поверхностного слоя получен методом атомно-силовой микроскопии с помощью сканирующего зондового микроскопа NanoEducator. Микротвердость измеряли по ГОСТ 9450—76 с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,49 Н. Регистрацию микроструктур выполняли цифровой фотокамерой с разрешением 7,2 Мп.

Результаты исследований и их обсуждение

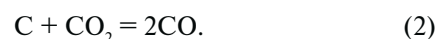
Формирование покрытия на основе карбида молибдена на поверхности низкоуглеродистой стали возможно только в результате одновременной диффузии углерода и молибдена, находящихся в атомарном со-

стоянии [1—4]. Условия процесса МДХТО, осуществляемого в порошковой среде каменного угля, обеспечивают интенсивное науглероживание обрабатываемого изделия [5], поэтому для оценки возможности образования карбида был проведен анализ вероятных реакций, продуктом которых является атомарный молибден.

При нагревании молибдата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ образуется триоксид молибдена по реакции

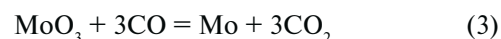


Пиролиз органической массы каменного угля приводит к образованию углерода, монооксида углерода, водорода и метана, создающих защитную атмосферу и являющихся возможными восстановителями триоксида молибдена [7]. Кроме того, углерод взаимодействует с диоксидом углерода, обеспечивая постоянное наличие оксида по реакции

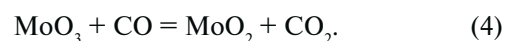


Продуктами реакций восстановления триоксида молибдена могут быть атомарный молибден, его карбид Mo_2C или диоксид MoO_2 в сочетании с оксидом или диоксидом углерода. Для выявления наиболее вероятных реакций выполнен расчет стандартного изменения энергии Гиббса ΔG_T^0 всех возможных реакций с использованием метода Темкина—Шварцмана [8]. Температурные зависимости ΔG_T^0 определяли для одинакового содержания кислорода в газовой фазе в килоджоулях на моль O_2 . Учитывая, что реакция (2) контролирует состав газовой фазы при МДХТО, вероятность и последовательность протекания возможных реакций восстановления триоксида молибдена определяли в соответствии с точками пересечения графика реакции (2) с графиками других возможных реакций.

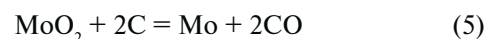
Расчет показал, что при температуре МДХТО наиболее вероятно восстановление триоксида молибдена до атомарного состояния по реакции



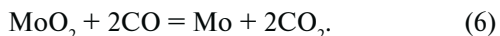
либо до диоксида молибдена по реакции



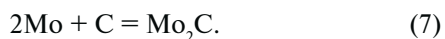
В свою очередь, диоксид молибдена восстанавливается до атомарного состояния взаимодействием с углеродом по реакции



либо взаимодействием с оксидом углерода по реакции



При МДХТО молибден, образовавшийся в результате реакций (3), (5) и (6), и углерод как продукт пиролиза каменного угля одновременно диффундируют в поверхность стального изделия. В соответствии с диаграммой состояния системы Мо—С [9] их взаимодействие позволяет получить карбид Mo_2C (5,88 % С) по реакции



Для экспериментальной проверки проведенных расчетов осуществлено диффузионное молибденирование образцов из стали 20 по указанной выше методике. В результате обнаружено формирование слаботравящегося покрытия толщиной от 80 до 150 мкм (в зависимости от концентрации диффузанта в обмазке) с микротвердостью 13,5...15,0 ГПа, что соответствует микротвердости карбидов молибдена. Под карбидным слоем расположена науглероженная зона с перлитной структурой и далее ферритно-перлитная структура, характерная для стали 20 в исходном структурном состоянии (рис. 1).

Анализ содержания диффузанта в поверхностном слое материала проводили с помощью растрового электронного микроскопа, при этом использова-



Рис. 1. Микроструктура поверхностного слоя после диффузионного молибденирования

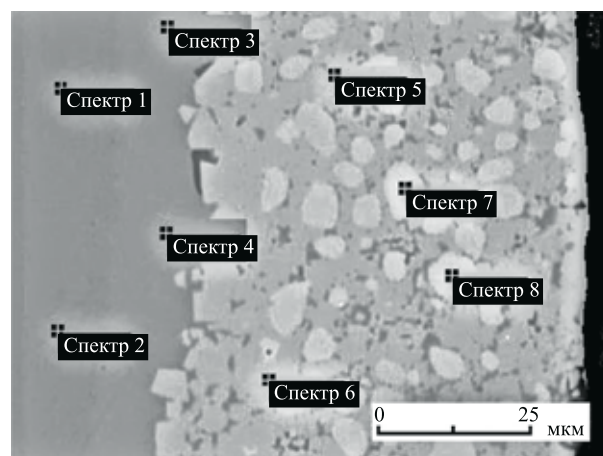


Рис. 2. Изображение диффузионного слоя в отраженных электронах

ли ВЕС-детектор отраженных (обратно-рассеянных) электронов. Получаемое изображение характеризуется фазовым контрастом, четко выражающим различия отдельных участков по атомному весу и обусловленным зависимостью потери энергии электроном первичного пучка от атомного номера того химического элемента, с которым произошло столкновение. Поэтому при неоднородном составе исследуемого материала области с повышенным содержанием молибдена имеют вид светлых областей на более темном фоне, так как от тяжелых химических элементов электроны пучка отражаются лучше, чем от легких. Для получения количественных результатов определено содержание молибдена (табл.) в характерных точках диффузионного слоя (рис. 2).

Содержание Мо в характерных точках диффузионного слоя

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7	8
Содержание Мо, % мас.	—	—	3,10	3,33	46,80	47,00	93,88	94,06

В слое эвтектоида (точки 1 и 2) в процессе микроанализа молибден не обнаружен. Далее по направлению к поверхности образца расположена переходная зона твердого раствора молибдена в железе толщиной около 10 мкм, имеющая более светлый тон (точки 3 и 4) и содержащая около 3 % молибдена. На поверхности образца расположен диффузионный слой толщиной 50...60 мкм, состоящий из основы светло-серого цвета (точки 5 и 6), в которой находятся белые включения округлой формы (точки 7 и 8).

Светло-серая основа содержит около 47 % молибдена и в соответствии с диаграммой состояния может содержать интерметаллид Fe_3Mo_2 (μ -фазу) либо сложные карбиды типа Fe_2MoC , $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$, $\text{Fe}_2\text{Mo}_2\text{C}$ [10]. В белых включениях (точки 7 и 8) содержание молибдена достигает 94 %, что позволяет идентифицировать

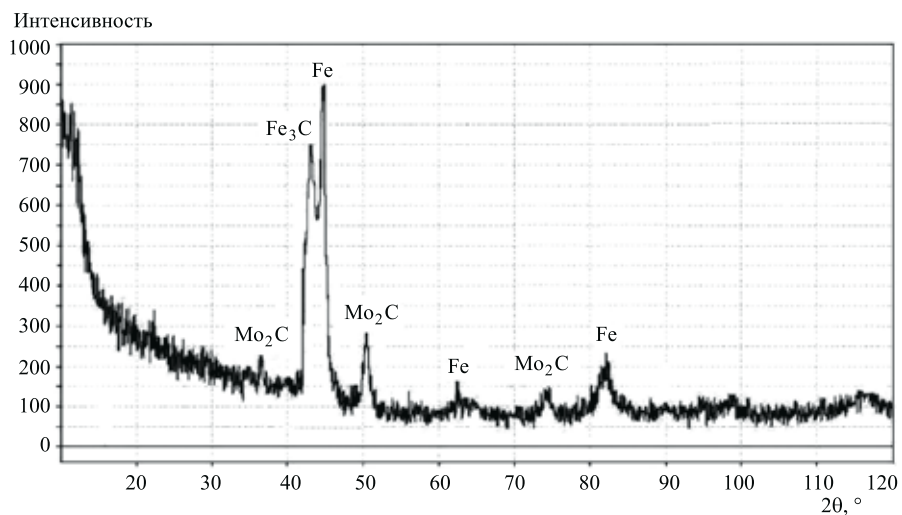


Рис. 3. Рентгеновская дифрактограмма образца после МДХТО

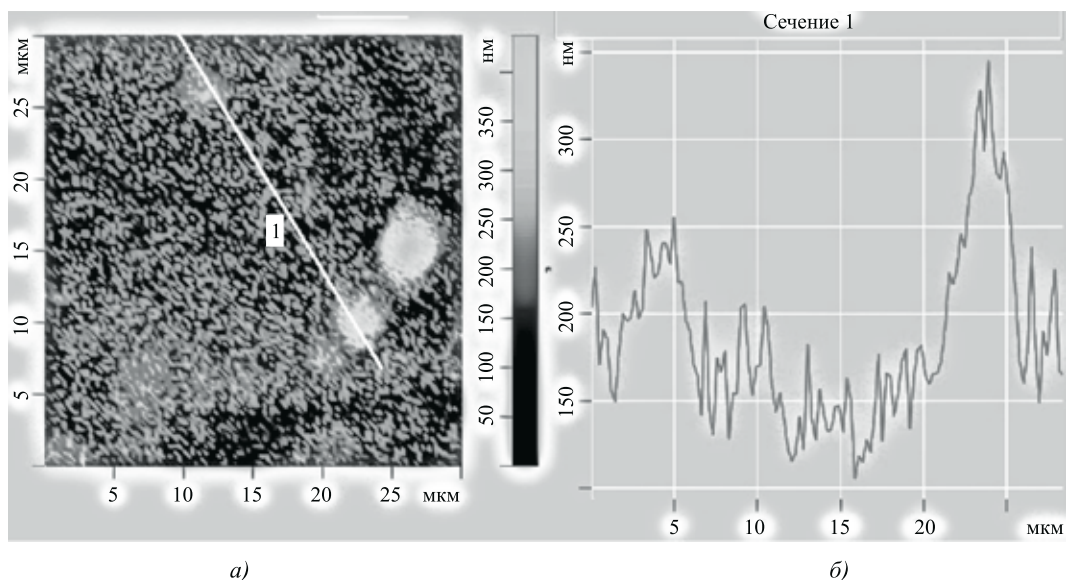


Рис. 4. Рельеф поверхностного слоя, полученный с помощью сканирующего зондового микроскопа:
а — сечение; б — профиль

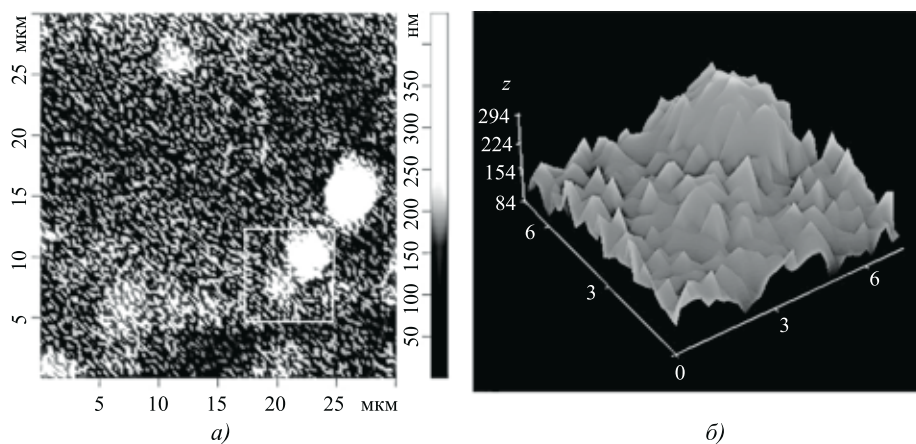


Рис. 5. Трехмерное изображение поверхностного слоя, полученное с помощью сканирующего зондового микроскопа:
а — область сканирования; б — трехмерное изображение

их как карбид Mo_2C . Рентгеновский фазовый анализ образцов после МДХТО подтвердил наличие этих карбидов в поверхностном слое (рис. 3).

Строение поверхностного слоя исследовали методом атомно-силовой микроскопии с помощью сканирующего зондового микроскопа. На рис. 4, а показан фрагмент диффузионного слоя размером 30×30 мкм с выделенным сечением 1, на рис. 4, б — соответствующий профиль по указанному сечению.

Трехмерное изображение выделенного в диффузионном слое участка размером $7,5 \times 7,5$ мкм (рис. 5, а) представлено на рис. 5, б.

Как видно на рис. 4 и 5, рельеф поверхности определяется наличием карбидов молибдена, имеющих вид включений округлой формы размером до 5 мкм и выступающих над поверхностью шлифа на высоту до 300...350 нм, что обусловлено их более высокими твердостью и износостойкостью при полировке по сравнению с более гладкими участками окружающей матрицы.

Выводы

1. Термодинамический анализ показал, что при молибденировании стальных изделий в режиме микродугового нагрева в порошке каменного угля с использованием молибдата аммония в качестве источника диффузанта возможны химические реакции восстановления триоксида молибдена до атомарного состояния. Одновременная диффузия молибдена с углеродом — продуктом пиролиза каменного угля в соответствии с диаграммой состояния системы $\text{Mo}-\text{C}$ может приводить к образованию карбида Mo_2C .

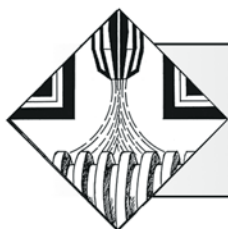
2. При молибденировании стали 20 в обмазке на основе молибдата аммония в условиях микродугового нагрева в порошке каменного угля формируется слабо-травящийся поверхностный слой с микротвердостью 13,5...15,0 ГПа, что соответствует твердости карбидов молибдена. Рентгеновский фазовый анализ подтвердил присутствие карбидов Mo_2C в структуре диффузионного слоя. Под карбидным слоем расположена

науглероженная зона с перлитной структурой, далее — исходная ферритно-перлитная структура.

3. По данным энергодисперсионного микроанализа, диффузионный слой имеет сложное строение. Поверхностная зона представляет собой обогащенную молибденом (около 47 % Mo) основу толщиной 50...60 мкм, которая может состоять из интерметаллида Fe_3Mo_2 и ряда сложных карбидов типа Fe_2MoC , $\text{Fe}_3\text{Mo}_3\text{C}$, $\text{Fe}_2\text{Mo}_2\text{C}$, в которой расположены включения карбида Mo_2C (около 94 % Mo) округлой формы размером до 5 мкм. Далее расположена переходная зона эвтектоида, обогащенного молибденом (около 3 %) толщиной около 10 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Борисенко Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. 424 с.
2. **Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.** Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
3. **Диффузионные карбидные покрытия** / В.Ф. Лоскутов и др. Киев: Тэхника, 1991. 168 с.
4. **Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л., Сметкин В.А.** Теория и технология химико-термической обработки. М.: Новое знание, 2010. 304 с.
5. **Домбровский Ю.М., Степанов М.С.** Микродуговая цементация стальных изделий в порошковых средах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 12. С. 25—29.
6. **Степанов М.С., Домбровский Ю.М.** Формирование карбидного покрытия при микродуговом хромировании стали // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 1. С. 35—37.
7. **Глушенко И.М.** Теоретические основы технологии горючих ископаемых. М.: Металлургия, 1990. 296 с.
8. **Морачевский А.Г., Сладков И.Б.** Термодинамические расчеты в металлургии. М.: Металлургия, 1985. 136 с.
9. **Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа:** справ. изд. / под ред. О.А. Банных. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
10. **Физическое материаловедение:** Учебник для вузов. В 6 т. / под общ. ред. Б.А. Калина. Т. 6. Ч. 1. Конструкционные материалы ядерной техники. М., МИФИ, 2008. 672 с.



Технология ремонта корпуса дифференциала автоматической коробки перемены передач переднеприводного автомобиля с применением полимерных композиционных материалов*

Представлена технология ремонта корпуса дифференциала автоматической коробки перемены передач переднеприводного автомобиля с применением самосмазывающихся эпоксиэфторопластов, получаемых способом центробежного формирования.

Ключевые слова: автоматическая коробка перемены передач (АКПП), полимерные композиционные материалы, MAS-4УГ, износ, выглаживание поверхности.

The repairing technology for an automatic transmission front differential is described. This technology is based on application of the self-lubricated epoxy-PTFE materials received by centrifugal formation.

Keywords: automatic transaxle Assy, polymeric composite materials, MAS-4UG, wear, surfacing.

Введение

Автоматические коробки перемены передач (АКПП) являются неотъемлемой частью современного автомобиля, а также техническим решением, позволяющим облегчить работу водителя, беря на себя некоторые его функции по управлению. Чем больший комфорт при вождении способна обеспечить АКПП, тем сложнее ее конструкция, а следовательно, и ремонт. Зачастую затраты на восстановление некоторых деталей соизмеримы со стоимостью новых запасных частей и их ремонт является экономически нецелесообразным. Поэтому поиск и разработка недорогих и надежных вариантов ремонта узлов такого рода агрегатов является актуальной и важной задачей.

Перспективы прогресса в машиностроении тесно связаны с разработкой и широким применением новых конструкционных материалов [1]. Наряду с металлическими и керамическими материалами появляются перспективные полимерные композиционные материалы (ПКМ), обладающие комплексом свойств и особенностей, отличающихся от традиционных металлических сплавов достаточной для практического использова-

ния прочностью, легкостью, коррозионной и химической стойкостью, высокой износостойкостью, низким коэффициентом трения, экономичностью в изготовлении и легкостью в эксплуатации [2, 3]. Применение таких материалов в ремонтных технологиях является целесообразным.

Анализ условий эксплуатации

Частями корпуса дифференциала АКПП, подверженными наибольшему износу, являются опорные шейки в местах контакта с приводными валами (рис. 1, а). Анализируя работу дифференциала АКПП, нетрудно заметить, что данная пара трения работает довольно непродолжительное время по сравнению с самой коробкой. Трение происходит в условиях жидкостной смазки трансмиссионным маслом, смазывающая способность которого является в данном случае недостаточной. Это становится причиной износа опорных шеек и в меньшей степени приводных валов (сказывается разница в твердости материалов).

Вследствие особенностей действия нагрузок на данную пару трения поверхность шеек изнашивается неравномерно (рис. 1, б). С ростом износа увеличивается изменение формы опорной шейки — она становится ближе к конусной с вершиной конуса снаружи шейки.

* Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ МК-2587.2014.8.

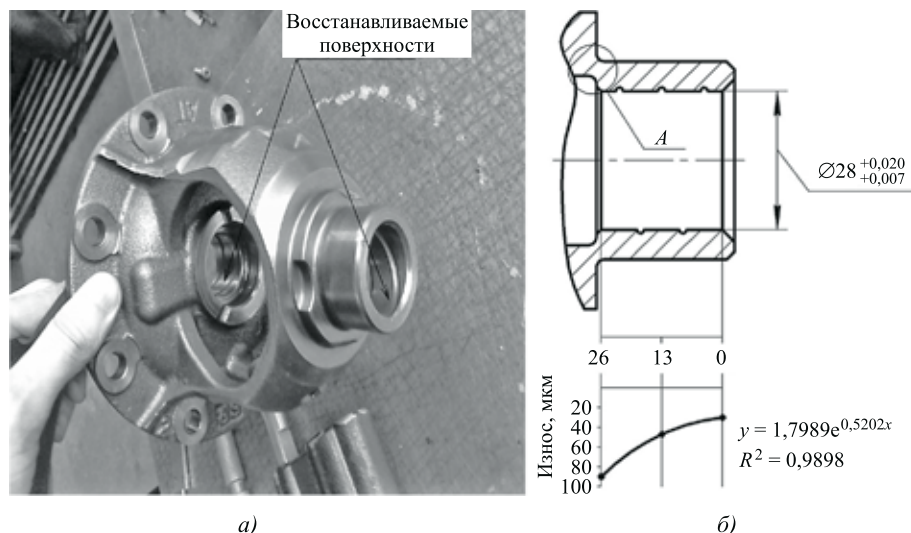


Рис. 1. Общий вид чашки дифференциала (а) и характер износа опорных шеек (б): у — износ; х — длина опорной шейки

Конусность составляет 60...80 мкм на длину опорной шейки. Последствиями такого изменения формы является появление вибраций, люфта приводного вала, а также течи трансмиссионного масла через манжету. Что касается износа приводного вала, то его опорная поверхность также становится конусной, но конусность составляет 3...9 мкм на длину опорной поверхности.

Во время совместной работы вала и чашки дифференциала происходит износ, основным механизмом которого является скалывание вершин неровностей при соприкосновении поверхностей трущихся деталей по причине отсутствия между ними масляного клина, поэтому при ремонте необходимо применять материалы, способные работать в условиях ограниченной смазки.

Технология ремонта

Целью описываемой в статье работы являлась разработка процесса ремонта корпуса дифференциала

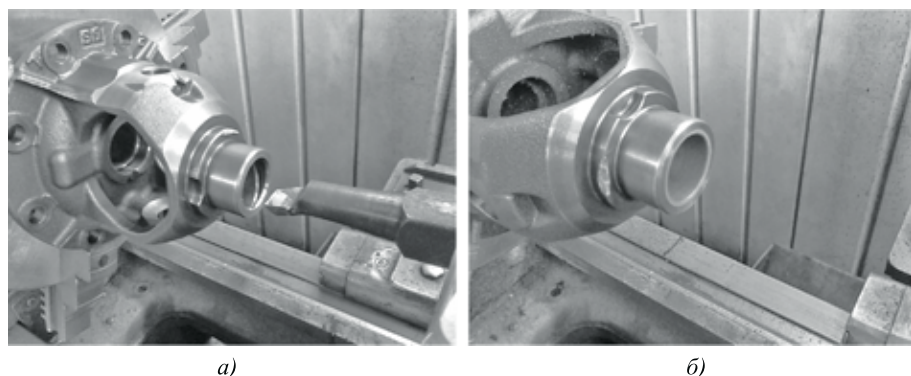


Рис. 2. Процесс ремонта чашки дифференциала: а — расточка; б — установка втулки из материала МАС

АКПП переднеприводного автомобиля с применением полимерного материала МАС-4УГ.

Существует широкая гамма материалов, которые могли бы использоваться для решения данной задачи: металлополимерные составы БЕЛЬЗОНА, ЛОСТИТЕ®, ДИАМАНТ, ЧЕСТЕР и др. Однако применимость этих материалов в рассматриваемом случае ограничена из-за того, что некоторые из данных составов имеют повышенную хрупкость, некоторые — низкую износостойкость [4]. Но основными их недостатками являются высокая стоимость и высокие требования к подготовке обрабатываемых поверхностей, необходимость строгого соблюдения технологии

нанесения, что, в свою очередь, требует квалифицированного персонала и затрудняет использование таких материалов в условиях малых ремонтных предприятий.

В Тихоокеанском государственном университете лабораторией Композиционные материалы разработан полимерный материал, имеющий общее название МАС (материал антифрикционный самосмазывающийся), нашедший применение в высоконагруженных узлах трения лесных и дорожно-строительных машин, в судовых лебедках, лесотранспортерах и т.д. Основными компонентами данного материала являются эпоксидная смола УД-128 (аналог ЭД-20), тканевые армирующие компоненты, антифрикционные добавки (графит, дисульфид молибдена, фторопласт-4 и др.) [5]. Благодаря своим упругопластическим свойствам МАС имеет возможность демпфировать последствия перекоса осей вала и втулки, что является актуальным для данной пары трения. Кроме того, применение в качестве армирующего

материала хлопчатобумажной ткани позволяет ему впитывать масло без потери прочности материала и тем самым дополнительно аккумулировать смазочную среду в узле трения.

Предлагаемая технология ремонта заключается в восстановлении формы и размеров трибосопряжения. В данной технологии учитываются условия работы восстанавливаемой пары трения, напряжения, действующие в местах сопряжения трущихся деталей, а

также время технологического процесса, что является немаловажным фактором.

Восстановление опорной шейки чашки дифференциала (рис. 2) начинается с ее расточки на токарном станке, целью которой является получение цилиндрического отверстия. Глубина проточки определяется глубиной имеющейся винтовой канавки. Благодаря тому, что размеры снимаемого вследствие механической обработки слоя малы, а также "место крепления" опорной шейки к корпусу (участок *A* на рис. 1, б) не обрабатывается, значительного ослабления прочности конструкции не происходит.

После токарной обработки восстанавливаемая поверхность обезжиривается и для улучшения адгезии основного клеящего состава на нее наносится активатор. Активатор наносится также на по-

лимерную втулку из материала МАС, после чего на обе склеиваемые поверхности наносится клей, при этом должен вестись слабый прогрев (до 40 °С) чашки дифференциала. Затем обе склеиваемые поверхности соединяются. Время, через которое клей набирает половину своей прочности, составляет 15 мин, после чего возможна токарная обработка рабочей поверхности полимерной втулки. Окончательную прочность клей набирает после термообработки продолжительностью 2...2,5 ч при температуре (110±10) °С.

На завершающей стадии ремонта вклеенная втулка обрабатывается "в размер" на токарном станке. На этом этапе учитываются посадки, которые были установлены на изготовление оригинального (заводского) узла трения. Шероховатость после обработки состав-

ляет 2,5 мкм. Анализируя профилограмму поверхности, представленную на рис. 3, б, можно заметить, что исходный профиль поверхности материала имеет много выступов, которые при воздействии на них нагрузки сломаются и дадут дополнительный износ уже в процессе притирки. Но если заполнить впадины фторопластом или другой твердой смазкой, то они могут являться дополнительными источниками смазывающего агента в зоне трения. Для этого необходимо провести выглаживание поверхности (рис. 3, а), которое заключается в следующем. На поверхность полимерной втулки *1* в виде порошка наносят композицию *3* из необходимых твердых смазок и обкатывают роликом *2* в два этапа. Первый этап характеризуется большим контактным давлением на поверхности втулки со стороны обкаточного ролика, малой подачей *S* (до 0,2 мм/об) и равными значениями скоростей вращения втулки ω_1 и ролика ω_2 . На данном этапе происходят внедрение частиц твердых смазок композиции во втулку и их предварительное закрепление.

Во время следующего этапа происходит постепенное увеличение разницы скоростей вращения втулки и ролика ($\omega_1 - \omega_2 \neq 0$) для возникновения трения сколь-

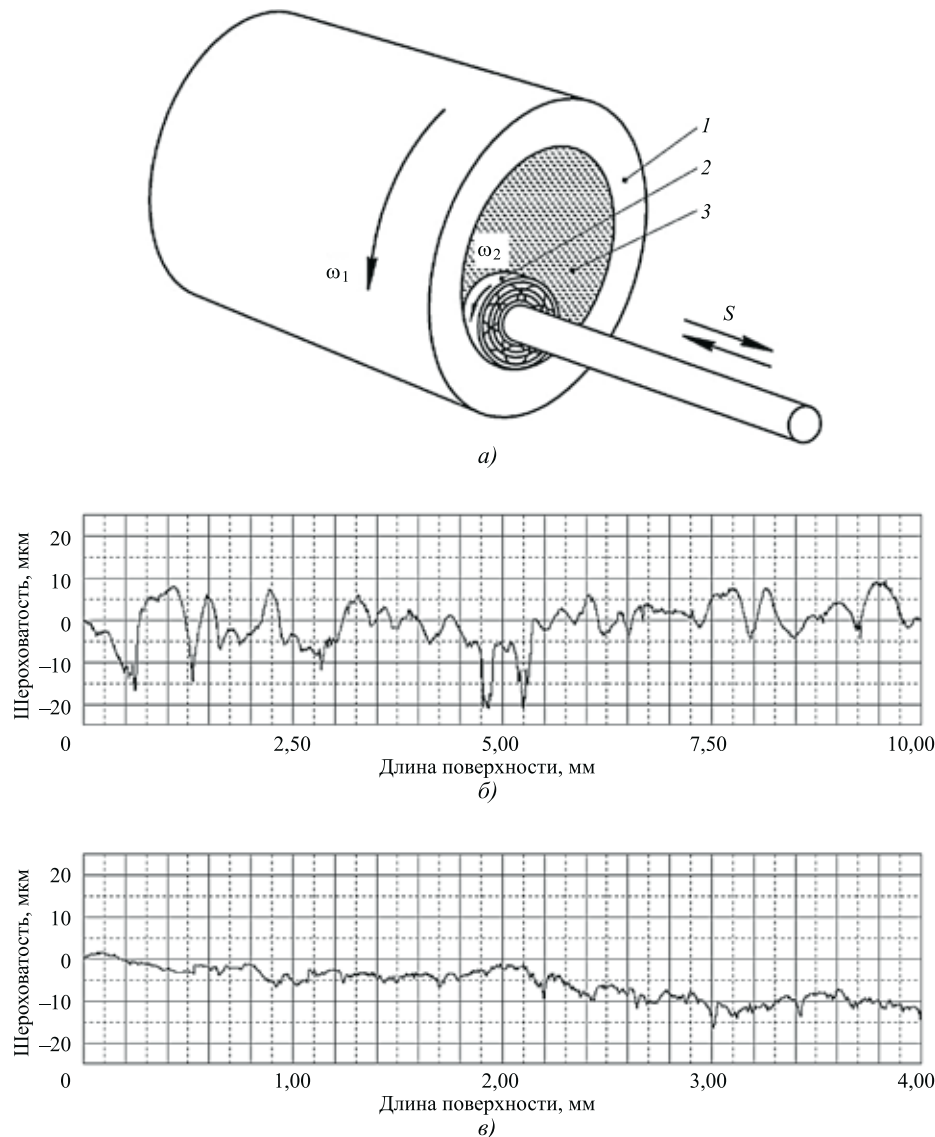


Рис. 3. Поверхностная обработка втулки выглаживанием:
a — схема процесса; *б* — профиль поверхности до обработки; *в* — профиль поверхности после обработки

жения, при котором происходит "сваривание" частиц твердых смазок с материалом втулки. Благодаря малому размеру этих частиц и во много раз большим геометрическим размерам втулки и ролика, обеспечивающим значительный теплоотвод из зоны трения, не происходит термодеструкции поверхностных слоев полимера, и поэтому подшипник скольжения не теряет своих прочностных свойств. В результате процесса выглаживания на поверхности втулки образуется тонкая пленка, имеющая минимальный коэффициент трения, позволяющая ускорить последующий процесс притирки рабочих поверхностей. Профиль поверхности, получаемый после обработки, представлен на рис. 3, в.

Заключение

Предлагаемая технология ремонта корпуса дифференциала АКПП переднеприводного автомобиля базируется на вспомогательных технологиях формирования и обработки полимерных материалов, которые являются специализированными под восстановление тех или иных узлов трения различных машин и механизмов. Стоимость реализации данной технологии вследствие низкой себестоимости сырья, а также из-за того, что разработанная технология требует минимум оборудования, является низкой: около 1,5...2 тыс. руб., что является крайне выгодным по сравнению с другими видами восстановления либо приобретением новых запасных частей. При массовом применении разработанной технологии возможно дальнейшее снижение цены единицы продукции.

Планируют дальнейшие экспериментальные исследования в области износа материала, работающего в подобных узлах трения машин и механизмов, а также составление математических моделей происходящих в них триботехнических процессов согласно выявленным зависимостям в целях улучшения качественных характеристик получаемых изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гончаров С.В., Якуба Д.Д., Якименко Н.А.** Разработка и исследование антифрикционных эпоксиэфторопластов и технологии их центробежного формирования // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2012. № 5 (23). С. 36—46.
2. **Иванов В.А., Ри Хосен.** Прогрессивные самосмазывающиеся материалы на основе эпоксиэфторопластов для триботехнических систем. Владивосток, Хабаровск, ДВО РАН, 2000. 429 с.
3. **Промышленные** полимерные композиционные материалы / под ред. М. Ричардсона; пер. с англ. под ред. П.Г. Бабаевского. М.: Химия, 1980. 472 с.
4. **Сравнительные** испытания полимерных материалов для производства направляющих, уплотнений, а также ремонтных составов LOCTITE® HENKEL / В.А. Иванов, С.В. Гончаров, Д.А. Харченко и др. // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2014. № 11. С. 19—25.
5. **Гончаров С.В.** Разработка и исследование антифрикционных эпоксиэфторопластов и технологии их центробежного формирования: дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2011. 159 с.



УДК 631.173:67.05

А.М. Михальченков (ГОСНИТИ, г. Москва),
С.А. Лушкина (Московский государственный университет путей сообщения, Брянский филиал МИИТ),
М.А. Михальченкова (Брянский институт управления и бизнеса)
E-mail: mihalek@yandex.ru

Восстановление деталей почвообрабатывающих машин абразивостойким дисперсионно-упрочненным композитом на основе эпоксидной смолы

Разработаны состав клееполимерного дисперсно-упрочненного абразивостойкого композита и технология устранения сложнопрофильных износов и сквозных протирааний лемехов, отвалов, стрельчатых культиваторных лап отечественного и импортного производства.

Ключевые слова: эпоксидная смола, песок, композит, абразивостойкость, восстановление, изнашивание, упрочнение, лемех, отвал, культиваторная лапа.

The composition clearimage dispersion-hardened abrasion resistant composite and technology elimination of geometrically-complex of wear and end-to-end proteranii plowshares, dumps, lancet guided paws of domestic and import manufacture.

Keywords: epoxy resin, sand, composite, abrasion resistance, restoration, deterioration, hardening, a plow blade, guided paw, hoe.

Детали почвообрабатывающих машин (лемехи, отвалы, стрельчатые лапы культиваторов) эксплуатируются в условиях интенсивного абразивного изнашивания. В результате они приобретают дефекты, выражающиеся в локальных износах рабочих поверхностей, часто сопровождающихся сквозными протирациями [1]. Число изделий с подобными пороками составляет 30...100 % от общего числа выбракованных. Неизношенная же область не претерпевает существенных изменений геометрических параметров и позволяет проводить восстановление указанных рабочих органов. Нужно отметить, что их высокая цена реализации также диктует необходимость реставрации, особенно это касается изделий зарубежного изготовления. Кроме того, в настоящее время немаловажное значение имеет вопрос импортозамещения ввиду снижения поставок импортных запасных частей и чрезмерно высокой их рыночной стоимости.

Способы устранения износов и сквозных протираций, заключающиеся в использовании термоупрочненных компенсирующих элементов [2] и заправке дефектной области [3], ограничены в применении по ряду причин: сложность технологии; термические воздействия; особенности геометрии дефекта и детали; несоответствие механических свойств изделия и дефектного участка после восстановления.

Наряду с этими технологиями определенное распространение получили методы восстановления изделий с наличием подобных дефектов с применением самотвердеющих клеевых составов на основе эпоксидных смол [4]. Использование таких методов ограничивается заделкой трещин и пробоин небольших размеров на поверхностях, не подвергающихся абразивному изнашиванию и не испытывающих значительных внешних силовых нагрузений. Применительно же к конструктивным элементам, работающим в почвенной среде, где присутствуют силовое и абразивное воздействия, имеющиеся сведения об использовании данных методов весьма малочисленны [5]. Кроме того, в среде исследователей бытует мнение (не подкрепленное экспериментом), что использование известных клеевых эпоксидных составов в качестве противоабразивных покрытий при восстановлении не дает положительного результата.

Указанные недостатки могут быть устранены применением специально разработанных клееполимерных композитов с абразивостойким наполнителем. Такой материал, находясь в жидкой фазе, копирует любой профиль рабочей поверхности и изношенной области (в полной мере подобный эффект не может обеспечить ни один материал или способ), устраняя износы и сквозные протираания. В затвердевшем состоянии он

способен оказывать сопротивление абразивному изнашиванию.

Материал представляет собой песчано-клеевой состав на основе эпоксидной смолы и природного кварцевого песка в весовом соотношении 40:60.

Клеуполимерная составляющая (основа) композита включает эпоксидную смолу ЭД-20 — 10 весовых частей и полиэтиленполиамин (отвердитель) — 1 весовая часть. Средний размер кварцевой частицы (эффективный диаметр), обеспечивающий максимальную износостойкость, составляет около 0,2 мм. Концентрация кварца в песке должна быть не менее 60 %. Композит получают путем тщательного микширования компонентов.

Наличие в композите 40 частей клеевой эпоксидной составляющей позволяет достигнуть необходимой прочности сцепления в системе "покрытие — поверхность детали", что установлено многочисленными испытаниями отремонтированных изделий различного функционального назначения в полевых условиях. Увеличение количества клеящей массы не приводит к росту адгезии, но снижает противобразивные свойства сформированного покрытия.

Присутствие кварцевого песка природного происхождения в составе композита придает ему противобразивные свойства из-за высокой твердости кварцевых частиц, составляющей около 120 HRC. Наличие в композите 60 весовых частей этого наполнителя, как показали натурные испытания, обеспечивает максимальную износостойкость. Данный подход позволяет

использовать эффект, обратный предназначенному для песка природой. В этом случае высокая твердость и истирающая способность частиц песка выступают в роли противобразивной дисперсно-упрочняющей фазы, придавая образованному веществу свойства, отличающие композиты от других материалов. Немаловажным для применения песка является и экономический фактор — разработанный композит по своей цене реализации будет незначительно выше, чем рыночная стоимость компонентов эпоксидного клея.

В общем виде технология устранения износа и сквозного протирания (рис. 1) с одновременным обеспечением износостойкости восстановленного участка рабочей поверхности без нарушения целостности детали состоит в нанесении абразивостойкого клеуполимерного дисперсно-упрочненного композиционного материала на предварительно подготовленную область с охватом, несколько большим периметра дефекта. Причем профили рабочей поверхности и износа могут иметь сложную форму. (Например, характерный для отвалов и лемехов лучевидный износ.) Перед нанесением композита на предварительно очищенную до металлического блеска и обезжиренную поверхность с наличием дефектов укладывается армирующая строительная лента.

Износ и сквозное протирание (рис. 1, а) заполняют жидким самотвердеющим полимерным дисперсно-упрочненным клеевым композитным материалом, придавая детали нормированные размеры. Композит, находясь в жидкой фазе, позволяет устранить образо-

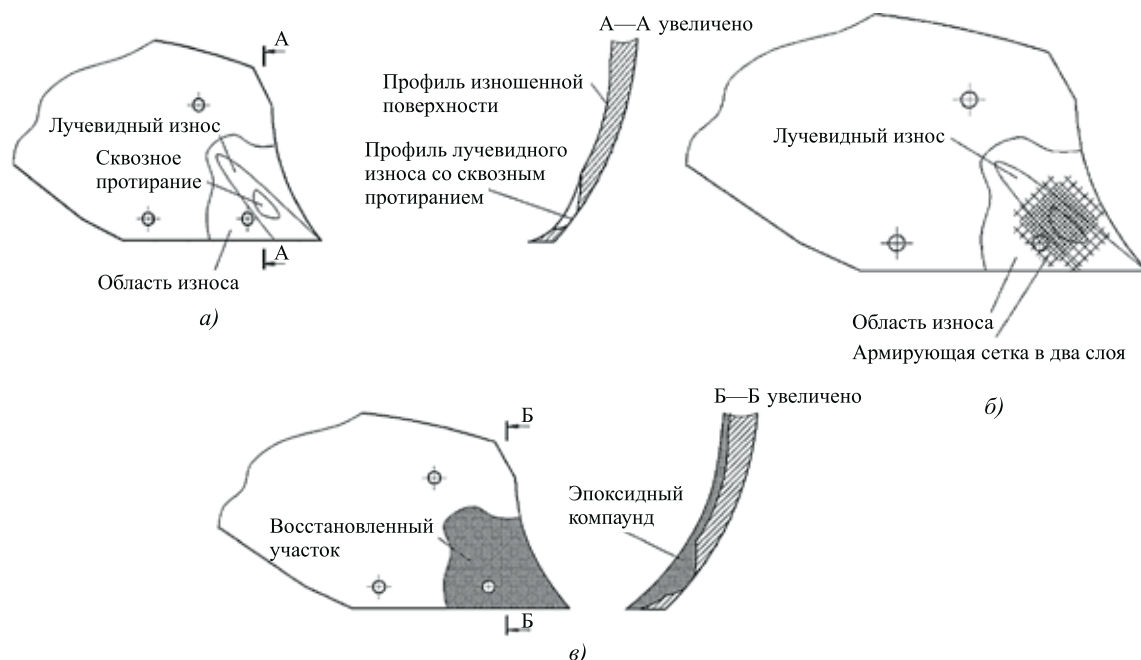


Рис. 1. Схема восстановления:

а — деталь с предельным износом и сквозным протиранием; б — подготовленная к восстановлению деталь; в — деталь с устраненным дефектом

вавшийся профиль износа и воспроизвести фактически любую геометрическую форму поверхности в соответствии с установленной агротехническими условиями.

Подготовка поверхности под нанесение состава заключается в удалении естественных и искусственных загрязнений (методы могут быть различными) и последующей обработке растворителем (уайт-спиритом или ацетоном). Пылевые остатки после механической очистки следует удалять сжатым воздухом.

Армирующая лента приклеивается в два слоя в зоне сквозного протирания с перекрытием ячеек и охватом большего по размерам периметра (рис. 1, б). Размер ячейки выпускаемых промышленностью сеток равен 3 мм. После наложения двух слоев ленты они уменьшатся до 1,5 мм на сторону, что обеспечивает удержание композита в жидкой фазе на поверхности.

Торможение истечения материала способствует формированию покрытия на восстанавливаемом участке без существенных протеканий через сквозное отверстие. Сетка ускоряет затвердевание композита и выполняет функцию армирования, увеличивая стойкость покрытия к ударным воздействиям. Ее наличие также увеличивает прочность сцепления покрытия с восстанавливаемой поверхностью и способствует равномерному распределению полимерного композита по поверхностям сложного профиля.

Реализация способа восстановления (рис. 1, в) не сопровождается нарушением целостности детали и не требует механической обработки сформированной поверхности. При этом сохраняются механические свойства и форма восстанавливаемой детали, так как отсутствуют какие-либо термические и деформационные воздействия в период формирования покрытия.

Отмеченное свидетельствует о широких технологических возможностях способа с использованием разработанного и апробированного абразивостойкого клееполимерного дисперсно-упрочненного композита.

Технологический процесс восстановления реализовывался на дефектных отвалах и лемехах отечественного производства, имеющих лучевидный износ со сквозным протиранием, и стрельчатых лапах культиваторов канадской компании Morris с износом рабочей поверхности и протиранием крепежной стойки. Технологический процесс состоит из следующих операций (рис. 2):

1) удаление загрязнений с восстанавливаемой поверхности, зачистка ее до металлического блеска, удаление следов механической обработки сжатым воздухом;

2) обработка растворителем области для нанесения композита и наклеивание армирующей ленты в два слоя;

3) подготовка композита с эпоксидной клеящей компонентой — 40 частей и наполнителем, кварцевым песком — 60 частей;

4) непосредственно нанесение композита на площадь, большей площади износа. После обработки растворителем операция нанесения должна производиться не более чем через 30 мин во избежание образования на поверхности адсорбционных слоев;

5) сушка или отверждение в естественных или созданных условиях.

Полевые испытания восстановленных лемехов, отвалов и лап по описанному способу позволили установить, что их наработка до предельного состояния не уступает аналогичному показателю деталей заводского исполнения. Опыт эксплуатации показывает, что для

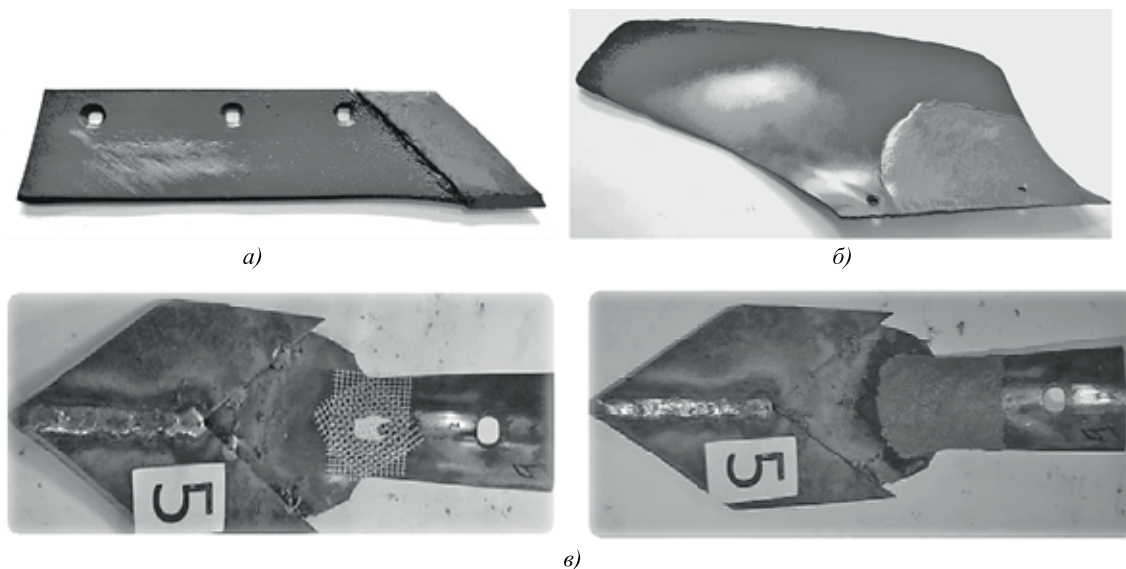


Рис. 2. Примеры восстановления деталей:

а — лемех — лучевидный износ и сквозное протирание в области долота; б — отвал — лучевидный износ и сквозное протирание груди; в — стрельчатая лапа со сквозным протиранием стойки после устранения износа рабочей поверхности

увеличения долговечности следует наносить покрытие на вероятный участок появления износов, когда деталь только поступает в эксплуатацию.

Таким образом, в основу рассмотренного способа восстановления заложены следующие факторы:

1) использование абразивостойкого клеуполимерного дисперсно-упрочненного материала, содержащего 40 частей эпоксидного состава (клеевой компонент) и 60 частей природного песка (противоабразивный компонент);

2) композит наносится на криволинейную поверхность по предварительно уложенной армирующей сетке с заполнением полостей износа сложной формы;

3) после восстановления не нарушается целостность детали; не требуется механической обработки ни до, ни после нанесения покрытия; остаются неизменными свойства и геометрия детали.

Таким образом, разработан самотвердеющий дисперсно-упрочненный абразивостойкий материал следующего состава: клеящая самотвердеющая компонента на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и полиэтиленполиамины — 40 частей; дисперсно-упрочняющая абразивостойкая компонента, кварцевый песок — 60 частей. Реализован способ восстановления деталей почвообрабатывающих машин, имеющих износы ра-

бочей поверхности сложнопрофильной формы, а также сквозные протирания, с применением композита. Использование нового композита для восстановления деталей не требует дорогостоящих и дефицитных компонентов, сложного оборудования и высокой квалификации исполнителей, а также позволяет проводить импортозамещение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Восстановление** деталей машин: Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов и др.; под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
2. **Михальченко А.М., Феськов С.А.** изнашивание стрельчатых лап посевного комплекса "Моррис", восстановление способом "термоупрочненных компенсирующих элементов" // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 12. С. 50—52.
3. **Козарез И.В., Михальченко А.М.** Обзор способов восстановления плужных лемехов // Труды ГОСНИТИ. Т. 109. Ч. 2. 2012. С. 30—34.
4. **Патент RU2421314.** Способ ремонта деталей с трещинами и пробоинами / Левов Н.Н. Оpubл. 20.06.2011. Бюл. № 17.
5. **Михальченко А.М., Кожухова Н.Ю., Случевский А.М.** Песчано-клеевые композиции повышают ресурс отвальных корпусов // Сельский механизатор. 2009. № 5. С. 18—19.





ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ МАШИНОСТРОЕНИЕ



В **40** ТОМАХ

Энциклопедия содержит в справочном виде основы теории, методы расчета, проектирования и конструирования машин, основные сведения о материалах и технологических процессах.

В ней обобщены передовой опыт и современное состояние научно-технического прогресса в различных отраслях промышленного комплекса с учетом сложившихся мировых тенденций.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И УСТАНОВКИ

ТОМ IV-20

Ю.С. Васильев, В.А. Умов, Ю.М. Исаев и др.;
под ред. Ю.С. Васильева, Г.П. Поршнева. — 2015. 584 с.
ISBN 978-5-94275-795-3. ISBN 5-217-01949-2

Цена 3000 р.

Дана характеристика использования гидроэнергетических ресурсов, применяемых типов и схем гидроэнергетических установок. Для лопастных гидравлических машин (турбин, насосов, насос-турбин, гидродинамических передач) и насосов трения (дисковых, вихревых и гидроструйных) рассмотрены основы теории и рабочего процесса, расчета и проектирования элементов проточной части, применяемые и перспективные конструкции машин и агрегатов, режимы работы, характеристики, нагрузки на элементы конструкции, вопросы управления и надежности работы. Изложены методы расчета и конструирования объемных гидромашин наиболее распространенных типов (главным образом, объемных гидравлических насосов), описание их конструкций, характеристик и особенностей эксплуатации.

Для инженеров-расчетчиков, конструкторов, научных сотрудников и эксплуатационного персонала, работающих в области гидромашиностроения, а также может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям высших технических учебных заведений.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2;
по e-mail: realiz@mashin.ru. Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

К сведению авторов журнала «Упрочняющие технологии и покрытия»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию предоставляется статья в электронном виде – файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: utp@mashin.ru

Требования к оформлению статьи

1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.

2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации <http://teacode.com/online/udc/>);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой () на первой странице.*

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

5. После текста должен быть приведен список литературы, используемой при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускаются ссылки на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуючную подпись. Подрисуючные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении ред. совета без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются

Плата за публикацию статей не взимается

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

Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96; факс: (499) 269-48-97.

Дизайнер Подживотов К.Ю. Технический редактор Беликова Е.И. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 06.08.2015 г. Подписано в печать 09.09.15 г. Формат 60×88 1/8.

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

Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

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

Сайт: www.aov.ru