

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 9 (105)
сентябрь
2013

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р техн. наук
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

д-р техн. наук, заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора

д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК

д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ

А.П. БАБИЧЕВ

В.П. БАЛКОВ

В.М. БАШКОВ

А.И. БЕЛИКОВ

А.И. БОЛДЫРЕВ

С.Н. ГРИГОРЬЕВ

В.А. ЗЕМСКОВ

С.А. КЛИМЕНКО

Ю.Р. КОПЫЛОВ

В.А. ЛАШКО

В.А. ЛЕБЕДЕВ

В.В. ЛЮБИМОВ

Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО

Х.М. РАХИМЯНОВ

Б.П. САУШКИН

В.П. СМОЛЕНЦЕВ

А.М. СМЫСЛОВ

Г.А. СУХОЧЕВ

В.П. ТАБАКОВ

В.А. ШУЛОВ

М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:

Л.П. ШЕСТОПАЛОВА

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, 269-66-00, 268-40-77.
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	
	Носков А.С., Королев А.В., Салимов Б.Н., Решетникова О.П. Экспериментальное исследование нанесения на поверхность дорожки качения подшипников твердой графитовой смазки ультразвуковым методом	3
➔	МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА	
	Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшанов А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачёв М.С. Обработка стали твердыми частицами с использованием газодинамических установок	7
➔	ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ	
	Барабанова И.А., Афанасьева Л.Е., Ботянов Е.В., Раткевич Г.В. Градиентное упрочнение наплавленной быстрорежущей стали газолазерной резкой	13
➔	ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	
	Колмыков В.И., Горожанкин В.В., Романенко Д.Н. К вопросу об использовании химико-термической обработки для повышения стойкости бурового инструмента и деталей горных машин	17
➔	ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ	
	Демин П.Е., Петрова Л.Г., Александров В.А. Повышение коррозионной стойкости стальных заглушек на двигателях способами комбинированной металлизации алюминием и титаном	20
➔	ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ	
	Родионов И.В., Фомин А.А., Ромахин А.Н. Газотермическое оборудование для получения упрочняющих оксидных покрытий на металлах и сплавах различного назначения	24
➔	КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ	
	Шестопалова Л.П., Александров В.А. Методика определения размера наночастиц	31
➔	ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ	
	Белов В.К., Дьякова М.В., Дьяков П.А., Железков О.С. Влияние режимов ультразвуковой финишной обработки на параметры микро топографии обрабатываемых поверхностей	34
	Муравьев В.И., Лончаков С.З., Пицик В.С., Дебеляк А.А. Эффективность методов защиты от газонасыщения титановых сплавов при нагреве заготовок под штамповку и термо-обработку	39
	Барац Ф.Я., Кочетков А.В. Оптимизация режимов отделочно-упрочняющей обработки алмазным индентором	45

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

№ 9 (105)
September
2013

Since 2005, January

Editor-in-Chief
Dr of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council
Dr of Eng. Sci., The honoured
worker of a science and
technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

Editorial Assistants
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
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOICHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
L.P. SHESTOPALOVA
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, 269-66-00,
268-40-77. 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
	Noskov A.S., Korolev A.V., Salimov B.N., Reshetnikova O.P. Experimental study of application to the surface raceway bearing solid graphite grease by ultrasonic surface treatment. 3
➔	MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING
	Arkhipov V.E., Londarsky A.F., Melshanov A.F., Moskvitin G.V., Pugachev M.S. Processing steel hardness particles with use of gasdynamic installations. 7
➔	PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY
	Barabonova I.A., Afanasieva L.E., Botyanov E.V., Ratkevich G.V. Gradient hardening of fused high-speed steel after gas-laser cutting 13
➔	CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING
	Kolmykov V.I., Gorozhankin V.V., Romanenko D.N. To the question of chemical heat treatment use for increase of firmness of the boring tool and details of mountain cars 17
➔	PROCESSING BY COMBINED METHODS
	Dyomin P.E., Petrova L.G., Aleksandrov V.A. Increase of corrosion resistance of steel covers in engines by methods of combined metallization by aluminum and titanium 20
➔	PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS
	Rodionov I.V., Fomin A.A., Romakhin A.N. Gas thermal equipment for strengthening oxide coatings on metals and alloys for various purposes 24
➔	QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING
	Shestopalova L.P., Alexandrov V.A. The method to determine the size of the nanopowder particles 31
➔	INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE
	Belov V.K., Dyakova M.V., Dyakov P.A., Zhelezkov O.S. Influence between modes of ultrasonic finishing processing and parameters of microtopography of the processed surfaces . . 34
	Muravyev V.I., Lonchakov S.Z., Pitsyk V.S., Debelyak A.A. Efficiency of methods of protection against gas saturation of titanium alloys when heating preparations under punching and heat treatment. 39
	Barats F.Ya., Kochetkov A.V. Optimization of finishing and hardening treatment diamond indenter. 45

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 537.534, 620.179. 112(075.8)
371-279-868

А.С. Носков, А.В. Королев, Б.Н. Салимов, О.П. Решетникова
(Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина)
E-mail: noskovsacha@mail.ru

Экспериментальное исследование нанесения на поверхность дорожки качения подшипников твердой графитовой смазки ультразвуковым методом

Приведены данные экспериментальных исследований процесса обработки ультразвуком дорожек качения упорных подшипников. Построена математическая модель и получены выражения для определения уровня влияния каждого из регулируемых факторов в исследуемом диапазоне, а также на основе проведенной работы построены графики, которые наглядно показывают степень влияния каждого из факторов.

Ключевые слова: ультразвуковое выглаживание, поверхностно-упрочняющая обработка, суперфинишная обработка.

Experimental data processing ultrasound raceways thrust bearings. A mathematical model and expressions for determining the level of influence of each of the controlled factors in the range studied, as well as on the basis of the work the graphs that demonstrate the degree of influence of each factor.

Keywords: ultrasonic processing, strengthening process, superfinish processing.

Известно, что при поверхностной механической обработке происходит активация поверхностных слоев металла, что приводит к возникновению дефектов в его кристаллической решетке. Это обеспечивает возможность в процессе чистовой механической обработки наносить на поверхность различные покрытия на основе диффузионного эффекта.

На кафедре "Технология машиностроения" Саратовского государственного технического университета имени Ю.А. Гагарина разработана прогрессивная технология обработки поверхностей типа дорожек качения колец упорных подшипников ультразвуковым выглаживанием с нанесением твердой графитовой смазки.

В целях выявления эффективности этого метода нанесения твердой смазки на поверхность дорожек качения подшипников выполнены экспериментальные исследования. В качестве объекта исследований использовались кольца подшипников 1118-2902840-04. Подшипник предназначен для восприятия радиальных и осевых нагрузок в верхней опоре стойки передней подвески автомобилей семейства ВАЗ, моделей "Калина", "Приора" и "Гранта".

Обработка дорожек качения упорных подшипников велась по следующей схеме: на станине 1 (рис. 1)

смонтирован механизм, состоящий из индентора 4, закрепленного в ступенчатом концентраторе 3, получающем ультразвуковые колебания от пьезокерамического преобразователя 2. Под действием силы P индентор 4 прижимается к обрабатываемой поверхности 5 детали 6, а именно к дорожке качения упорного подшипника. Величину силы P устанавливают в определенных пределах так, чтобы, с одной стороны, контакт индентора осуществлялся по всему профилю обрабатываемой поверхности 5, а с другой – чтобы

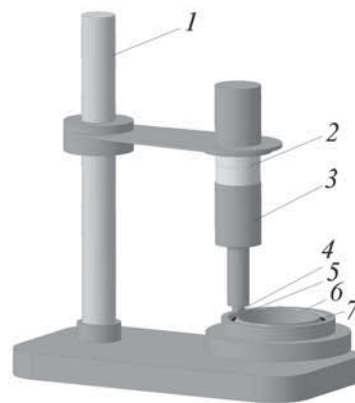


Рис. 1. Схема процесса обработки

на поверхности контакта не возникали контактные напряжения более допустимой величины. Деталь 6 имеет возможность вращаться с регулируемой скоростью. Порошок 7 графита или дисульфида молибдена засыпается на обрабатываемую поверхность 5 детали 6 в несвязанном виде.

Для осуществления обработки включают вращение детали 6 вокруг ее оси, а индентор 4, совершающий ультразвуковые колебания, прижимают к обрабатываемой поверхности 5 через слой порошка 7 с силой P . По истечении некоторого времени порошок 7 диффундирует в обрабатываемую поверхность 5 на заданную глубину. После этого вращение детали 6 отключают, индентор отводят от обрабатываемой поверхности, обработку прекращают.

Особенность данного метода заключается в следующем. На обрабатываемую поверхность детали типа дорожки качения подшипников наносят порошок мелкодисперсного графита и оказывают воздействие через слой порошка ультразвуковыми колебаниями индентора со сферической рабочей поверхностью. Радиус индентора устанавливают равным минимальному значению радиуса профиля дорожки качения, минимальную силу воздействия индентора на обрабатываемую поверхность устанавливают из условия возникновения контакта индентора по всему профилю обрабатываемой поверхности.

Использовали графит трех видов: терморасширенный мелкодисперсный графит с размерами частиц 0,1 и 0,5 мм и обычный аккумуляторный графит АКГ05 с размером частиц 0,3...0,5 мм. На обрабатываемую поверхность насыпали графит в свободном виде и в процессе обработки придавливали индентором к обрабатываемой поверхности. Индентор изготовлен из сплава ВК6 двух размеров: $\varnothing 5,2$ и $\varnothing 5,6$ мм. Генератор ультразвуковых колебаний представляет собой лабораторную установку с частотой на выходе 18 000 Гц.

Для получения математической модели процесса выглаживания дорожек качения упорных подшипников использовали метод полуфакторного эксперимента 2^{4-1} .

Регулируемыми факторами являлись: индентор, время обработки (20, 60 с), сила прижатия индентора к обрабатываемой поверхности (100, 160 Н) и частота вращения заготовки (240, 360 Гц). Показателями эффективности обработки являлись радиус дорожки качения R и момент сопротивления вращению подшипника M , а также толщина слоя образовавшегося покрытия.

Для проверки критерия однородности дисперсии использовался критерий Кохрена, значимость коэффициентов регрессии оценивалась по t_1 – критерию Стьюдента, оценка адекватности модели определя-

лась по критерию Фишера с уровнями значимости 0,05.

В результате обработки экспериментальных исследований были получены математические модели, устанавливающие связи радиуса дорожки качения, момента сопротивления вращению с основными влияющими факторами: диаметром индентора, временем выглаживания t , силой прижатия индентора и частотой вращения заготовки n при обработке колец подшипников.

Результаты исследования показали, что наибольшее влияние на величину радиуса дорожки качения R оказывает радиус r индентора. Время обработки t , сила, воздействующая на индентор P , и частота вращения заготовки n оказывают менее значительное влияние. На момент сопротивления вращению подшипника M основное влияние оказывают радиус индентора r и сила P , с которой он давит на обрабатываемую поверхность. В меньшей степени оказывают влияние время обработки t и частота вращения заготовки n . При этом зависимость обратная, т.е. с увеличением основных параметров момент уменьшается.

В качестве примера на рис. 2 приведены сравнительные значения показателя качества подшипников в разных партиях, обработанных с разными значениями регулируемых факторов до и после ультразвукового выглаживания в среде порошка графита. Как видно, момент сопротивления вращению подшипника после ультразвуковой обработки резко снижается,

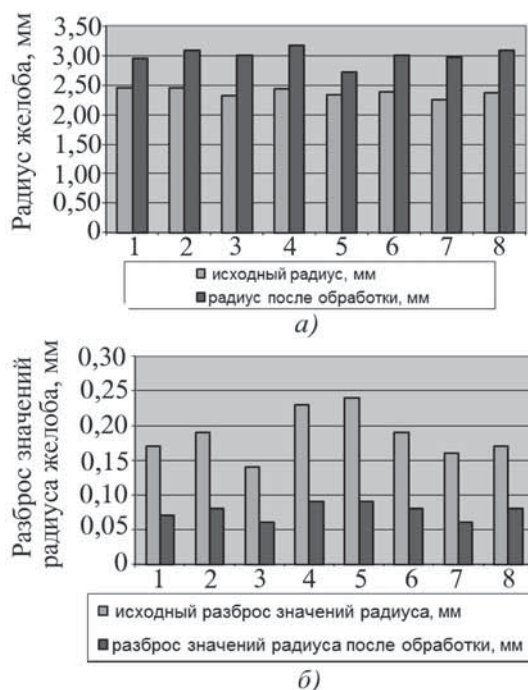


Рис. 2. Зависимость радиуса дорожки качения подшипника (а) и разброс значений радиуса (б) до и после обработки

что свидетельствует о высокой эффективности нанесения антифрикционного покрытия. Радиус дорожки качения несколько увеличивается, но при этом существенно уменьшается разброс значений этого параметра.

После окончательных расчетов получены зависимости в виде степенных уравнений:

для радиуса дорожки качения

$$r = 0,413 R^{0,812} t^{0,209-0,068 \ln(r)} P^{0,318} n^{0,043};$$

для момента сопротивления вращению

$$M = 3,57 R^{-0,032} t^{-0,392} P^{-0,613+0,503 \ln(r)} n^{-0,151}.$$

Как видно из рис. 3, 4, одно из значительных влияний на радиус дорожки качения подшипника, а также сопротивление вращению подшипника оказывают радиус индентора и сила его прижатия к обраба-

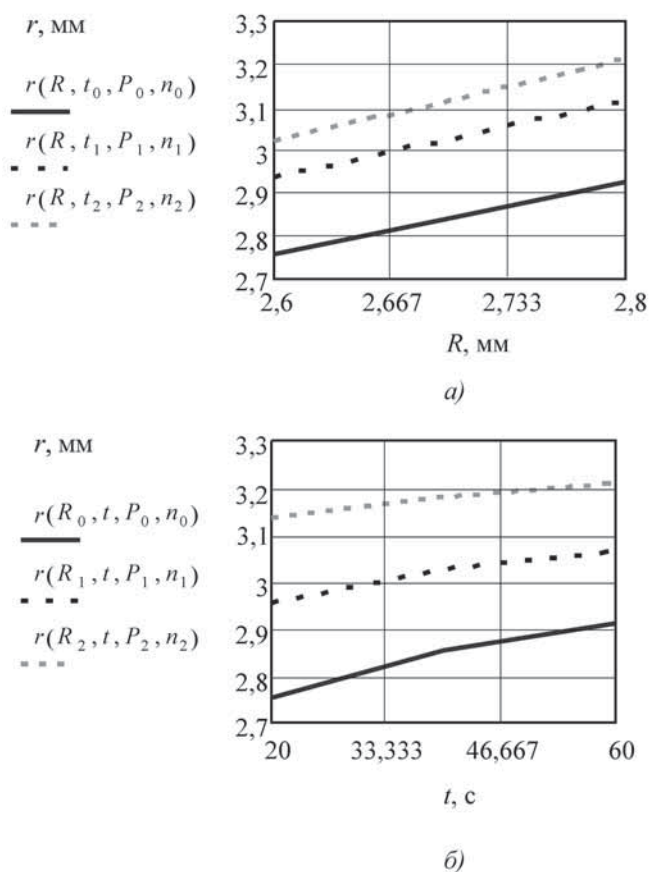


Рис. 3. Зависимость радиуса дорожки качения r упорного подшипника: а – от радиуса индентора R ; б – от времени t обработки при: 0 – максимальных; 1 – средних и 2 – минимальных значениях других факторов

тываемой поверхности. С возрастанием времени обработки уменьшается сила сопротивления вращению, что логично. Объясняется это тем, что при увеличении времени обработки толщина покрытия из углерода растет по всему профилю дорожки качения, а также снижается шероховатость вследствие выглаживания [3, 4].

Из рис. 3 видно, что при изменении радиуса индентора R от 2,6 до 2,8 мм при прочих минимальных значениях (времени обработки, силы прижатия индентора к обрабатываемой поверхности и числа оборотов заготовки) радиус дорожки качения r подшипника возрастает с 2,76 до 2,93 (в 1,06 раза), при верхнем уровне факторов происходит увеличение радиуса дорожки качения подшипника с 3,03 до радиуса 3,22 (в 1,063 раза). Объясняется это тем, что при росте действующей силы прижатия индентора к обрабатываемой поверхности происходит незначительное пластическое деформирование поверхности дорожек качения подшипника.

Выполнено исследование микрошлифов обработанной поверхности. Исследования показали, что

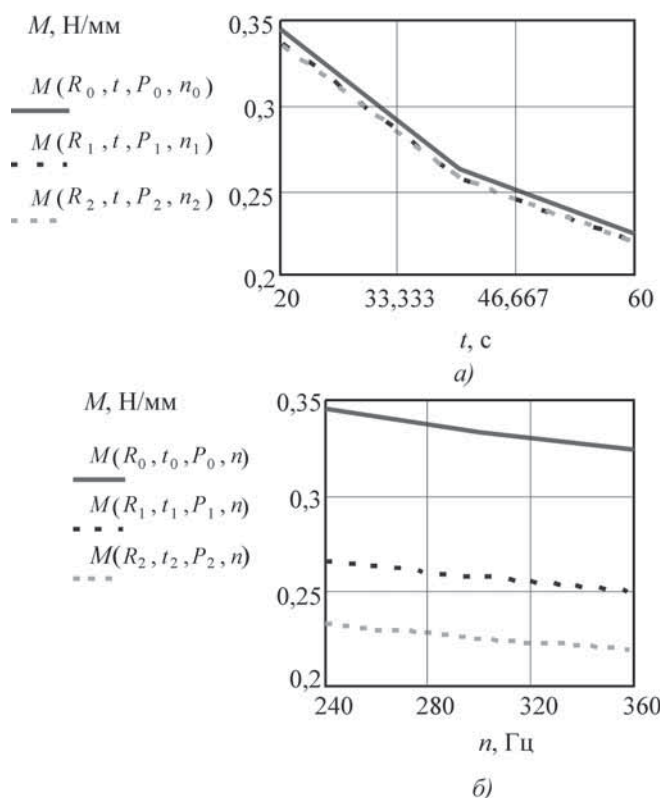


Рис. 4. Зависимость момента сопротивления вращению подшипника $M(R, t, P, n)$: а – от времени обработки t ; б – от скорости вращения заготовки n при: 0 – максимальных; 1 – средних и 2 – минимальных значениях других факторов

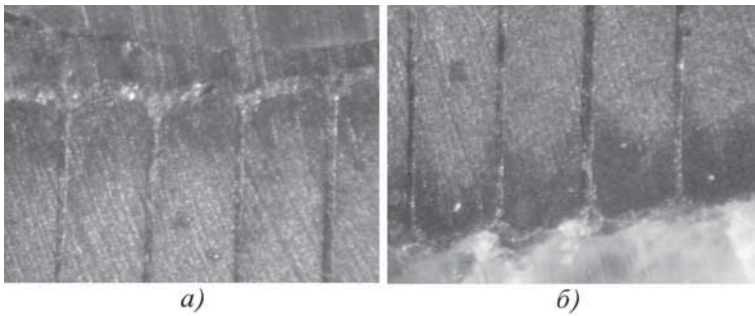


Рис. 5. Микрошлифы дорожек качения:
а – $\times 50$; б – $\times 100$

толщина слоя углерода на поверхности дорожки качения составляет до 0,5 мм. Глубина измененного слоя металла составляет до 0,3 мм (рис. 5). Структура металла становится более мелкодисперсной.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования подтвердили высокую эффективность предложенной технологии обработки дорожек качения подшипников, а также на основе этого можно сделать рекомендации для обработки: с увеличением радиуса индентора увеличивается радиус получаемого профиля дорожки качения и его диаметр следует подбирать с учетом прочих действующих регулируемых факторов. Для уменьшения момента

сопротивлению вращения следует увеличивать время обработки в независимости от прочих регулируемых факторов, поскольку из рис. 3, б видно, что разброс значений момента сопротивления вращению подшипника при прочих действующих факторах очень мал. Прочие регулируемые факторы оказывают малое влияние на контролируемые параметры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / под ред. В.В. Яценко. М.: Наука, 1976. 277 с.
2. Носков А.С., Березняк Р.А. Молекулярно-кинетическое явление переноса углерода в поверхностные слои детали при ультразвуковом выглаживании / VI Междунар. науч.-практ. конф. "Технологическое обеспечение качества машин и приборов": сб. науч. тр. 2011. С. 53–55.
3. Носков А.С., Королев А.В. Молекулярно-кинетический перенос углерода в поверхностные слои детали при ультразвуковом выглаживании // Автомобильная промышленность. 2012. № 7. С. 35–37.
4. Носков А.С., Королев А.В. Исследование технологии нанесения на поверхность дорожки качения подшипников твердой графитовой смазки методом ультразвуковой поверхностной обработки // Вестник СГТУ. 2011. № 3. С. 106–108.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ПРИПУСКИ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ

Г.А. Харламов, А.С. Тарапанов

2013 г. Объем 256 с. Формат 60x88 1/16 ISBN 978-5-94275-607-9 Цена 800 р.



Приведены нормативные материалы, необходимые технолог-машиностроителю для расчета и выбора припусков на механическую обработку, даны рекомендации по выбору вида заготовок, составлению маршрута обработки, нормы точности, а также операционные припуски на обработку различных поверхностей деталей.

Для инженеров-технологов заводов, проектно-конструкторских организаций, а также может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

УДК 621.793

В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, А.Ф. Мельшанов, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва)
E-mail: mnsv@mail.ru

Обработка стали твердыми частицами с использованием газодинамических установок

На основании результатов исследования изменений в пластичности и тонкой структуры низкоуглеродистой стали показана возможность поверхностной пластической деформации (ППД) корундом с использованием газодинамических установок. Получено повышение твердости стали 40X на глубину до 2×10^{-4} м со степенью наклепа 25 %, а механические испытания на деформацию подтвердили возможность упрочнения металла. При обработке стали корундом с температурой потока воздуха 360°C на поверхности формируются значительные окружные остаточные напряжения сжатия величиной до 119 МПа. Выявлены факторы, которые оказывают влияние на снижение усталости металла после обработки корундом.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, твердые частицы, твердость, наклеп, электрическое сопротивление стали.

On the basis of results research of changes in plasticity and thin structure of low-carbonaceous steel possibility of SPD by corundum with use of gasdynamic installations is shown. It is promoted the hardness of steel 40X on depth to 2×10^{-4} m with degree of a peening of 25 %, and mechanical tests for deformation confirmed possibility of hardening of metal. When processing steel by corundum with a temperature of a stream of air 360°C on a surface it is formed the considerable district residual tension of compression up to 119 MPa. Factors which have impact on decrease in fatigue of metal after processing by corundum are revealed.

Keywords: gasdynamic dusting, firm particles, hardness, peening, electric resistance steel.

Газодинамическое оборудование, в котором используется аэродинамическое сопло для разгона потока газа до скоростей, превышающих скорость звука, нашло применение в промышленности для решения ряда технологических задач. При введении в поток газа пластичных частиц, например меди, цинка или алюминия, на изделие наносят покрытия, обладающие токопроводящими свойствами или повышенным сопротивлением коррозии. Газодинамическая обработка (ГДО) поверхности твердыми частицами, например корундом, позволяет очищать загрязненную поверхность и подготавливать ее для последующих технологических операций [1].

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей ГДО и возможности ее применения для повышения прочностных характеристик стали.

Ранее проведенное исследование потока частиц корунда при ГДО показало, что они имеют достаточно высокую кинетическую энергию — $8,7 \cdot 10^{-4}$ Дж. Используемые для поверхностной пластической деформации (ППД) стали дробеударные методы облада-

ют максимальной энергией частиц (дروби) $6,0 \cdot 10^{-4}$ Дж, которая наблюдается при пневмодинамическом упрочнении (ПДУ). Использование ПДУ позволяет повысить сопротивление усталостному разрушению стали 40ХНМА в несколько раз по сравнению с остальными способами дробеударной обработки [3]. Если сравнить энергию частиц при ПДУ и ГДО, то нельзя исключить возможность упрочнения стали газодинамической обработкой и повышения сопротивления усталостному разрушению.

Материалы, оборудование и методы проведения исследований

Обработка поверхности корундом проводилась на газодинамической установке модели "ДИМЕТ-404" с использованием порошка корунда марки К-00-04-16 (ТУ 3988-004-40707672—2002) [1].

Как известно, в процессе поверхностной пластической деформации со структурой металла происходят изменения, к которым в основном можно отнести из-

мельчение исходной структуры зерна, а также значительное повышение числа точечных и линейных (дислокаций) дефектов. В результате изменений в структуре металла формируются значительные по величине напряжения, повышается твердость, материал наклепывается и упрочняется, а пластичность падает [3].

Поэтому при оценке возможности использования газодинамической обработки корундом для упрочнения была выбрана низколегированная холоднокатаная оцинкованная сталь по ГОСТ 9045–93 толщиной $0,8 \cdot 10^{-4}$ м, которая обладает хорошей пластичностью. Если под воздействием корунда происходит наклеп, то механические испытания должны показать наличие эффекта ППД за счет снижения пластичности металла.

В качестве основного объекта исследования была выбрана среднеуглеродистая легированная конструкционная сталь 40X, которая достаточно широко используется в машиностроении для изготовления ряда ответственных деталей. Из стали 40X в состоянии поставки (термическая обработка – нормализация, ГОСТ 2590–88) изготавливались образцы для испытания на прочность и долговечность.

Исследования механических характеристик стали до и после обработки корундом проводили при испытаниях на растяжение на образцах, изготовленных по ГОСТ 11701–84, с использованием универсальной электромеханической испытательной машины фирмы "INSTRON". Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 1497–84. Скорость нагружения составляла 33·10 м/с. Регистрация данных велась системой сбора данных фирмы "L-card" с программным обеспечением ACtest 1.16.

Изучение влияния поверхностной обработки корундом на усталость круглых образцов из стали 40X проводилось в соответствии с ГОСТ 25.502–79 на сервогидравлической установке фирмы "INOVA" модели ИК-6033 на растяжение при асимметричном цикле нагружения с частотой 20 Гц и коэффициентом асимметрии 0. Максимальное напряжение цикла составляло 441 МПа, что соответствует 75 % от временного сопротивления.

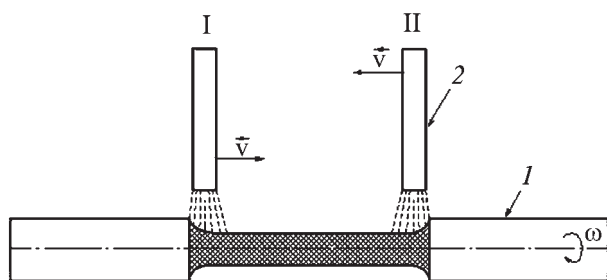


Рис. 1. Схема обработки образцов:
1 – образец; 2 – сопло

Обработка корундом цилиндрических образцов из стали 40X для проведения испытаний на сопротивление разрушению при растяжении и на усталость проводилась по всей рабочей части образцов. Для этого сопло выставлялось напротив галтели образца (рис. 1, поз. I) и после включения вращения на образец подавался корунд. При таком положении сопла образец совершал один оборот, после чего включалась команда на перемещение сопла относительно вращающегося образца. После обработки всей поверхности сопло останавливалось напротив второй галтели без выключения команды вращения и подачи корунда (рис. 1, поз. II). При завершении одного оборота образца подавалась команда на перемещение сопла в обратном направлении.

Визуальный осмотр поверхности образцов, обработанных корундом, показал, что она имеет достаточно равномерный и одинаковый характер по телу образца и галтелям и четкие границы по краям.

Все образцы при ГДО подвергались воздействию при периодическом возвратно-поступательном смещении поверхности образца по отношению к потоку частиц (цикл обработки). Расстояние от среза сопла, а также скорость перемещения относительно поверхности составляли: 10^{-2} м и 10^{-2} м/с соответственно. Параметры обработки выбирались как обеспечивающие максимальные энергетические характеристики процесса. Давление в системе подачи воздуха поддерживалось на уровне $6 \cdot 10^5$ Н/м², максимальном для данного типа газодинамических установок. Обработка поверхности корундом проводилась без подогрева воздуха и с подогревом до 360 °С.

Для оценки величины и знака остаточных напряжений, возникших в металле после обработки корундом, использовался метод разрезных цилиндров Давиденкова [5]. Согласно этому методу для определения напряжения в тонкостенном цилиндре ($R_{cp} / h \geq 3$) производится его разрезка по образующей и последовательное снятие цилиндрических слоев.

Если предположить, что распределение остаточных напряжений по толщине кольца близко к линейному при $h \ll D_{cp}$, то приближенная формула для их оценки окружных остаточных напряжений будет иметь вид [5]:

$$\sigma_{\theta}(a) = \pm 2 \frac{E \delta_p}{(1-\mu^2) D_{cp}^2 \pi} \left(\frac{h}{2} - a \right), \quad (1)$$

где a – толщина удаляемого металла, м;
 D_{cp} – средний диаметр кольца, м;
 h – толщина кольца, м;
 δ_p – изменение ширины реза, м;
 E – модуль упругости, МПа;
 μ – коэффициент Пуассона.

Кольцо разрезалось с проведением замеров реза на инструментальном микроскопе с точностью $5 \cdot 10^{-6}$ м в начале и конце процесса; по изменению его размера (δ_p) рассчитывалась величина и оценивался знак остаточных окружных напряжений.

Твердость измерялась методом Виккерса в соответствии с ГОСТ 2999–75 на специально подготовленных образцах на поверхности и по глубине с шагом $2 \cdot 10^{-5}$ м при нагрузке 0,98 Н (0,1 кгс), приложенной в течение 10 с, с проведением трех замеров на одном расстоянии от поверхности и статистической обработкой результатов.

Состояние тонкой структуры стали в зависимости от параметров обработки корундом оценивали на основе измерения удельного электрического сопротивления по схеме двойного моста [4]. Как известно, удельное электрическое сопротивление материала не зависит от размера образца и определяется его химическим составом и состоянием структуры.

Согласно правилу Матиссена, удельное электрическое сопротивление чистых металлов и твердых растворов низкой концентрации можно представить в виде [4]:

$$\rho = \rho_{(t)} + \rho_0, \quad (2)$$

где $\rho_{(t)}$ — часть сопротивления, которая зависит от температуры; ρ_0 — остаточное сопротивление.

Считается, что возрастание электрического сопротивления при пластической деформации обусловлено увеличением искажения кристаллической решетки. Кроме того, так как остаточное сопротивление обусловлено наличием примесей и дефектов строения, то любое воздействие на материал, которое повышает их количество, приводит к увеличению удельного сопротивления. При исследовании удельного электрического сопротивления и оценке результатов следует учитывать, что основной вклад в его повышение вносят вакансии и межузельные атомы, а влияние границ зерен и других дефектов на этот параметр незначительно [4].

Оптимизация параметров обработки

Воздействие корундом на тонколистовую сталь осуществлялось с двух сторон плоских образцов при температуре потока воздуха 360°C и 6, 9, 12, 15, 18, 21 циклах обработки. На диаграмме нагрузка–время у образца, не обработанного корундом, наблюдаются "зуб" и площадка текучести (рис. 2, кривая – 0). После 70 с деформации происходит плавное возрастание нагрузки, что свидетельствует о наличии упрочнения вплоть до образования шейки и разрыва. У образцов после 6–18 циклов обработки корундом отсутствуют зуб и площадка текучести.

Нагрузка незначительно повышается вплоть до разрыва и имеет величину, которую наблюдали при испытании не обработанных корундом образцов (см. рис. 2, кривые 6, 12). При 21-м цикле воздействия корундом на сталь нагрузка, необходимая для деформации образца, возрастает по сравнению с деформацией не обработанного корундом металла, но это изменение связано с большей площадью поперечного сечения образца (см. рис. 2, кривая – 21).

Пластичность стали после обработки корундом снижается, что говорит о наличии ППД и наклепа. Если принять предельное удлинение образца без обработки корундом за 100 %, то после 6 циклов воздействия предельное удлинение составило 57 %; после 9–18 циклов обработки эта величина составила 45 %, и после 21-го цикла воздействия корундом предельное удлинение не превысило 30 % от исходной величины (см. рис. 2).

Столь существенное снижение пластичности (70 %) после обработки стали корундом в течение 21 цикла может быть связано с избыточными энергетическими характеристиками процесса и перенаклепом металла. При таком характере обработки зерна не только дробятся и значительно вытягиваются параллельно поверхности ("сплющиваются"), но и по их границам развиваются многочисленные дефекты, приводящие к расслоению металла и, соответственно, резкому снижению пластичности.

Однако нельзя исключать возможного влияния на понижение пластичности такого фактора, как нарушение целостности поверхности (царапины, надрезы) под воздействием твердых с острыми гранями частичек корунда.

Деформация тонколистовой стали не приводит к каким-либо изменениям в электрическом сопротивлении и, следовательно, не сопровождается искажением тонкой структуры металла. После воздействия корундом удельное электрическое сопротивление

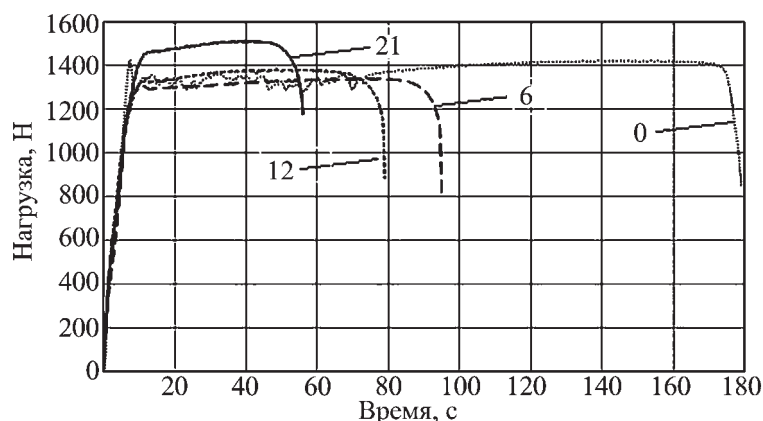


Рис. 2. Диаграмма нагрузка–время при растяжении образца: 0 — без обработки корундом; 6, 12, 21 — циклы обработки

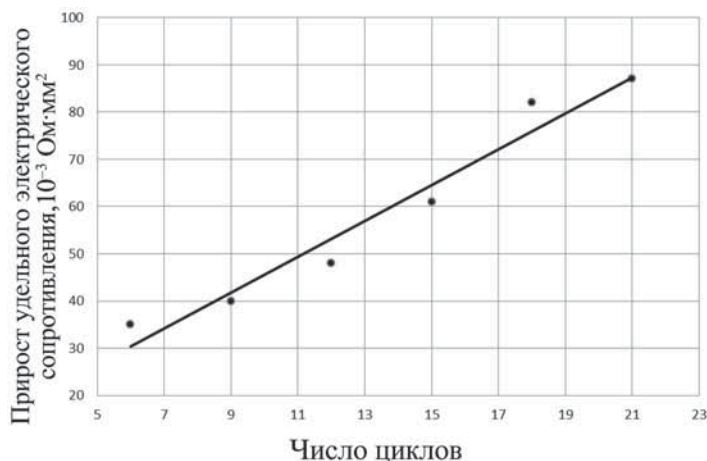


Рис. 3. Прирост удельного электрического сопротивления стали в зависимости от режима обработки корундом

стали возрастает, что свидетельствует о повышении количества точечных дефектов (рис. 3). По мере увеличения числа циклов обработки корундом удельное электрическое сопротивление возрастает, что может быть обусловлено большим объемом металла, в котором происходит деформация металла и искажение решетки, т.е. с увеличением числа циклов обработки возрастает глубина ППД. Искажение решетки должно приводить к формированию напряжений третьего рода.

При переходе от 18 к 21 циклу обработки низкоуглеродистой стали удельное электрическое сопротивление меняется незначительно, что можно объяснить достижением максимальной глубины слоя металла, в котором происходят существенные изменения в тонкой структуре.

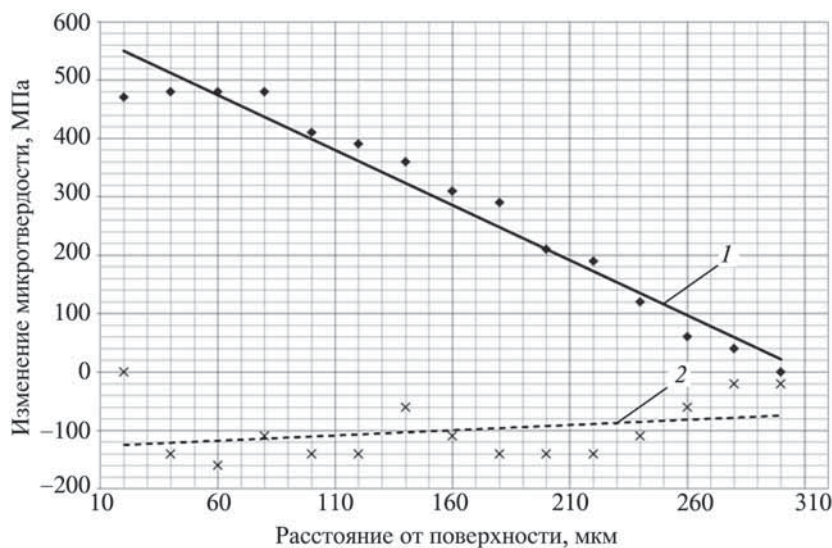


Рис. 4. Изменение твердости по глубине стали 40X в зависимости от времени обработки корундом при температуре 360 °C: 1 – 15, 20, 25 циклов; 2 – 30 циклов

Таким образом, испытание на растяжение модельного пластичного металла и измерение удельного электрического сопротивления показали возможность ППД стали газодинамической обработкой корундом.

Воздействие потоком корунда на сталь 40X при температуре 360 °C приводит к изменению твердости до глубины $2 \cdot 10^{-4}$ м (рис. 4). Твердость обработанного корундом участка металла возрастает от исходной твердости ≈ 2000 до ≈ 2500 МПа после 15, 20, 25 циклов воздействия частицами корунда на металл (рис. 4). При этом происходит упрочнение с максимальной степенью наклепа, ≈ 25 %.

Только при воздействии твердыми частицами в течение 30 циклов наблюдается снижение твердости, что можно трактовать как перенаклеп металла из-за избыточных энергетических параметров обработки [3].

Обработка корундом стали 40X при комнатной температуре повышает твердость только при 25 циклах воздействия. При этом достигаемая степень наклепа не превышает ≈ 15 %.

Результаты испытания

Режимы обработки стали корундом были оценены на основе дюрометрических исследований образцов диаметром $24 \cdot 10^{-3}$ м, а испытания на сопротивление усталостному разрушению планировалось провести на образцах диаметром $7,5 \cdot 10^{-3}$ м. Такая разница в размерах образцов (масштабный фактор) могла оказать влияние на результаты испытаний при автоматическом переносе режимов обработки. Кроме того, измерения твердости показали наличие упрочнения (25 % наклепа) в широком интервале циклов обработки (15–25 циклов). Поэтому для уточнения и окончательного выбора оптимального режима обработки образцов диаметром $7,5 \cdot 10^{-3}$ м были проведены предварительные испытания при статическом нагружении.

Механические свойства являются структурно чувствительными и изменяются в зависимости от структуры и обработки в широких пределах. Однако при газодинамической обработке корундом повышение твердости и упрочнение (наклеп) отмечаются на глубине до $(1,2 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$ м (см. рис. 3). Объем упрочненного материала составляет не более 2 % от объема образца и результаты испытания не могут охарактеризовать потенциал метода по повышению прочности стали. В таком случае результаты испытания целесообразно оценивать с позиции выявления тенденции для оценки режимов обработки и выбора тех из них, которые позволили бы полу-

Результаты испытания на растяжение образцов стали 40X

№ п/п	Вариант обработки стали 40X	Результаты испытания		
		σ_B , МПа	Относительная оценка σ_B , %	Изменение σ_B
1	Без обработки корундом	601,32	100,0	—
2	Корунд: 5 циклов, 360 °С	604,52	100,5	≈
3	Корунд: 15 циклов, 360 °С	614,65	102,2	↑↑
4	Корунд: 20 циклов, 360 °С	595,51	99,0	↓
5	Корунд: ≈25 циклов, 360 °С	569,23	94,6	↓↓↓
6	Корунд: 20 циклов, 20 °С	584,42	97,2	↓↓
7	Корунд: 15 циклов, 360 °С+ + напыление меди, 360 °С	614,73	102,2	↑↑

чить значительное преимущество при испытаниях на разрушение при циклическом нагружении, когда долговечность металла зависит от работоспособности тонкого поверхностного слоя.

Результаты испытания на растяжение образцов стали 40X после обработки корундом представлены в табл. 1.

Прежде чем обсудить результаты, представленные в табл. 1, необходимо условиться об определенных критериях оценки, а именно:

1. Ошибки, допущенные при проведении испытаний, которые включают в себя инструментальный и человеческий фактор, имеют закономерный характер для всех образцов как по величине, так и по знаку, т.е. они имеют одну величину (порядок) и их значение носит либо положительный (увеличение), либо отрицательный (уменьшение) характер.

2. Объем металла, в котором прошли изменения после газодинамической обработки корундом, не превышает 2 %, и поэтому его влияние на изменение свойств, если оно присутствует, должно быть минимальным.

3. В зависимости от реакции металла на воздействие корундом полученные результаты могут быть: а) близкими к исходным данным; б) иметь тенденцию к повышению; в) иметь тенденцию к понижению.

Если рассматривать результаты испытаний исходя из представленных выше позиций, то можно отметить следующие тенденции (см. табл. 1):

1. Обработка корундом в количестве 5 циклов при температуре 360 °С не приводит к изменению величины σ_B (см. табл. 1, № 2).

2. При повышении числа циклов обработки корундом до 15 наблюдается увеличение прочности (сопротивление разрушению) по сравнению с исходной величиной — 102,2 % (см. табл. 1, № 3).

3. Дальнейшее увеличение воздействия корундом при температуре 360 °С приводит к снижению прочностных характеристик стали (см. табл. 1, № 4). Обработка стали при таких параметрах воздействия корундом позволяет упрочнить поверхностный слой со степенью наклепа 25 % (см. рис. 3). Однако, учитывая значительное отличие в размерах контрольных образцов и образцов для испытания, можно предположить, что снижение прочности произошло за счет избыточных энергетических характеристик и перенаклепа.

4. Обработка корундом при комнатной температуре приводит к понижению прочностных характеристик металла (см. табл. 1, № 6).

Самые низкие прочностные характеристики были выявлены после обработки корундом стали после 25

циклов и более при температуре 360 °С (см. табл. 1, № 5).

Таким образом, с учетом представленных выше критериев оценки, можно отметить наличие определенной тенденции, которая показывает, что при воздействии на образцы диаметром $7,5 \cdot 10^{-3}$ м корундом более 20 циклов наблюдается тенденция понижения прочности.

Во всем диапазоне использованных режимов отмечается улучшение характеристик стали только при обработке корундом 15 циклов (см. табл. 1, № 3). Аналогичные результаты были получены на образцах после обработки корундом в количестве 15 циклов и последующем нанесении на обработанную поверхность медного покрытия толщиной $3 \cdot 10^{-4}$ м газодинамическим напылением при температуре 360 °С (см. табл. 1, № 7). Несмотря на последующее воздействие потоком теплого воздуха достаточно высокой температуры, у них также отмечено повышение механических характеристик — 102,2 %.

Для проведения испытаний на усталость был выбран режим обработки корундом 15 циклов при температуре 360 °С.

Число циклов до разрушения необработанных образцов составило 77 336 с разбросом результатов в интервале 13 971 циклов, что составляет 18 %. После обработки корундом количество циклов до разрушения составило 39 602, а сопротивление усталостному разрушению стали 40X понизилось в 1,9 раза. При этом разброс результатов находился в интервале 1621 цикла, что составляет 4 %. Такой незначительный разброс результатов испытания показывает, что при проведении обработки поверхности корундом вносятся факторы, оказывающие значительное влияние на снижение долговечности металла.

Параметры шероховатости поверхности стали 40X
после обработки разными частицами

№ п/п	Вариант обработки	Параметры шероховатости поверхности, 10^{-6} м			
		Ra	Rz	Rt	Sm
1	Исходный образец	0,5	1,1	3,0	1250
2	Корунд	5,0	26,4	33,6	132
3	Стеклянные сферические шарики до 10^{-4} м	4,8	23,5	28,8	151
4	Частицы сплава $(1...2) \cdot 10^{-4}$ м	4,8	25,6	43,5	147
5	Частицы сплава до 10^{-4} м	2,8	15,7	19,8	81

К первому фактору можно отнести наличие в подвергнутой обработке поверхности растягивающих напряжений, которые резко снижают способность металла противодействовать разрушению при циклических нагрузках [3]. Вторым фактором можно считать нарушение целостности поверхности в виде микронадрезов, царапин и т.п. после воздействия корундом.

Исследование напряжений по методу Давиденкова образцов стали после воздействия корундом 15 циклов показало наличие в металле окружных остаточных напряжений сжатия и растяжения. У кольца, вырезанного из металла после обработки корундом, ширина реза уменьшилась на $1,5 \cdot 10^{-3}$ м, что говорит о наличии напряжений сжатия. Расчет напряжений по формуле (1) показал наличие достаточного значительных по величине окружных остаточных напряжений сжатия – 119 МПа, которые должны оказывать положительное влияние на повышение ресурса металла. После снятия с обработанной корундом поверхности слоя толщиной $7 \cdot 10^{-5}$ м напряжения сжатия уменьшились и составляли 80 МПа. При дальнейшем снятии слоя металла до $9 \cdot 10^{-5}$ м ширина реза увеличилась на $21 \cdot 10^{-5}$ м, что говорит о наличии напряжений растяжения. Расчет напряжений по формуле (1) показал присутствие на глубине слоя, подвергнутого ППД, незначительных по величине окружных остаточных напряжений растяжения – 2,4 МПа, которые не могут оказать влияние на снижение долговечности.

Таким образом, можно предположить, что снижение усталости образцов обусловлено наличием нарушений целостности поверхности от воздействия твердыми и острыми гранями частиц корунда. Для выявления возможного повышения характеристик усталости металла после ГДО необходимо проводить последующую чистовую механическую обработку с устранением поврежденной поверхности или переходить на другие рабочие тела, например стальные шарики размером $(2...3) \cdot 10^{-4}$ м.

Сталь 40X обрабатывалась при идентичных режимах стеклянными сферическими шариками размером до 10^{-4} м и частицами дробленого сплава ПСН 14-60 твердостью 59–61 HRC с размером до 10^{-4} м и $(1...2) \cdot 10^{-4}$ м. Исследование качества поверхности после обработки стали проводили по стандарту ISO 4287. Измерение параметров шероховатости поверхности показало, что обработка стеклянными сферическими шариками практически не улучшает качество поверхности по сравнению с обработкой корундом (табл. 2). Воздействие частицами твердого сплава размером $(1...2) \cdot 10^{-4}$ м приводит к незначительному снижению качества поверхности по сравнению с обработкой корундом, а обработка частицами твердого сплава размером до 10^{-4} м значительно уменьшает искажение поверхности (см. табл. 2). Поэтому дальней-

шие исследования и эксперименты по ППД стали целесообразно проводить с частицами твердого сплава до 10^{-4} м.

Обработка стали частицами твердого сплава размером до 10^{-4} м в количестве 9 циклов не изменила профиль поверхности в отличие от обработки корундом, когда качество поверхности ухудшается с увеличением времени воздействия. При таком режиме обработки были получены окружные остаточные напряжения сжатия 114,35 МПа, т.е. не ниже, чем при обработке корундом после 15 циклов.

Выводы

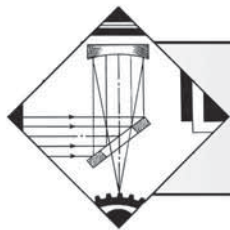
Газодинамическая обработка стали 40X корундом позволяет проводить ППД со степенью наклепа 25 % и повышением прочности металла.

При газодинамической обработке стали с использованием температуры 360 °С на поверхности формируются значительные остаточные окружные напряжения сжатия до 119 МПа, что должно положительно сказываться на повышении долговечности металла.

Очистка корундом поверхности оборудования, котлов, емкостей, испытывающих при эксплуатации циклические нагрузки, может привести к снижению их ресурса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Димет. Применение технологии и оборудования: URL: <http://www.dimet-g.narod.ru/> (дата обращения: 26.03.2013).
2. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшанов А.Ф. и др. Использование газодинамических установок для поверхностной пластической деформации // Заводская лаборатория. 2010. № 4. С. 45–51.
3. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
4. Лифшиц Б.Г., Крапошин В.С., Липецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.
5. Биргер И.А., Мавлютов Р.Р. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1986. 560 с.



УДК 621.7(075.8)

И.А. Барабонова, Л.Е. Афанасьева, Е.В. Ботянов, Г.В. Раткевич
(Тверской государственный технический университет)
E-mail: Ludmila.a@mail.ru

Градиентное упрочнение наплавленной быстрорежущей стали газолазерной резкой*

Установлен градиентный характер формирования структуры и распределения микротвердости наплавленной быстрорежущей стали марки P2M8 в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ) при газолазерной резке (ГЛР). Обработка холодом в жидком азоте позволяет повысить микротвердость стали во всей ЗЛВ, особенно значительно в зоне закалки из жидкой фазы, до 9500 МПа. Показано, что ГЛР может успешно применяться как разделительная и упрочняющая обработка при изготовлении биметаллических инструментов.

Ключевые слова: градиентное упрочнение, быстрорежущая сталь, газолазерная резка.

Gradient character of the structure formation and microhardness distribution in the laser processing zone (LPZ) during gas-laser cutting (GLC) of fused R2M8 high-speed steel is established. Cold treatment by liquid nitrogen makes it possible to increase the microhardness of the steel over the whole LPZ and is mostly (up to 9500 MPa) pronounced in the region of quenching from the liquid phase. It is shown that GLC may be successfully exploited for the purpose of shearing and hardening treatment of bimetallic instruments.

Keywords: gradient hardening, high-speed steel, gas-laser cutting.

Введение

Технический прогресс предъявляет к конструкционным и инструментальным материалам все более жесткие требования. Вместе с тем резервы повышения эксплуатационных свойств традиционными способами практически исчерпаны. Одним из наиболее перспективных путей повышения эксплуатационных свойств инструментальных материалов является создание поверхностных и приповерхностных слоев с градиентами по составу, структуре и свойствам. Наличие градиентной структуры поверхностных слоев позволяет получать новые, более высокие эксплуатационные свойства изделий [1, 2].

При этом немаловажен и экономический аспект. Известно, что одним из эффективных способов экономии дорогостоящих высоколегированных инструментальных сталей и повышения стойкости и долговечности инструмента является наплавка их режущих кромок быстрорежущими сталями и сплавами. Со-

временные способы наплавки позволяют изготавливать биметаллический инструмент с использованием сталей и сплавов практически любого состава, при этом экономия быстрорежущей стали при изготовлении наплавленного металлорежущего инструмента может достигать 90 % [3–5].

Несмотря на существенные преимущества, наплавку при изготовлении рабочих частей разделительных штампов, как и другого металлорежущего инструмента, применяют ограниченно по ряду причин, в том числе из-за припусков на механическую обработку шлифованием наплавленного металла с твердостью 62...66 HRC.

В работе [6] предлагается использовать ГЛР для удаления припусков на механическую обработку по боковым рабочим поверхностям пуансонов и матриц разделительных штампов. Технологическая прочность наплавленной быстрорежущей стали при ГЛР качественно оценена в работе [7]. Показано, что благодаря повышенному содержанию в микроструктуре наплавленного металла остаточного аустенита, ГЛР наплавленных рабочих частей координатно-револьверного пресса быстрорежущей сталью позволяет получить свободную от трещин поверхность реза с

* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.132.21.1394.

достаточно хорошим качеством и сократить объемы и время на финишную механическую обработку рабочих поверхностей.

ГЛР быстрорежущей стали является не только разделительной, но и упрочняющей операцией, так как происходит повторная закалка в поверхностных слоях реза. Поэтому практически важной задачей является вопрос выявления закономерностей формирования и развития структуры и свойств наплавленной быстрорежущей стали при ГЛР.

Методы проведения исследований

На заготовки из низколегированной конструкционной стали 30ХГСА проводили наплавку быстрорежущей стали дугой прямого действия на постоянном токе обратной полярности в защитной среде аргона. Для наплавки применяли порошковую проволоку с химическим составом, близким к быстрорежущей стали Р2М8. После наплавки заготовки подвергали низкотемпературному отпуску для снижения уровня остаточных напряжений. ГЛР выполняли на лазерном комплексе "Bysprint 2" фирмы Bystronic. Параметры резки подбирали экспериментально, чтобы обеспечить высокое качество поверхности реза и оптимальные параметры шероховатости. Упрочнение и глубину закаленного слоя оценивали по микротвердости наплавленного металла в ЗЛВ с использованием отечественного прибора ПМТ-3 согласно ГОСТ 2999–75. После ГЛР первую партию заготовок подвергали отпуску при температуре 200 °С, вторую – обработке холодом, помещая их в жидкий азот на 10 мин, и отпуску при температуре 200 °С. Исследование микроструктуры стали выполняли методами *растровой электронной микроскопии* (РЭМ) на универсальном микроскопе "JEOL 6610LV" (Япония). Для изучения распределения легирующих компонентов в плоскости шлифов использовали энергодисперсионный спектрометр "INCA Energy++" фирмы Oxford Instruments.

Результаты исследования и их обсуждение

Особенностью ГЛР является образование характерной шероховатости поверхности реза (рис. 1). Эта шероховатость проявляется в виде периодических бороздок (бороздчатости) с волнообразными выпуклостями и впадинами. В литературе разные авторы дают различные названия подобным шероховатостям (англ. striations, strokes, patterns,

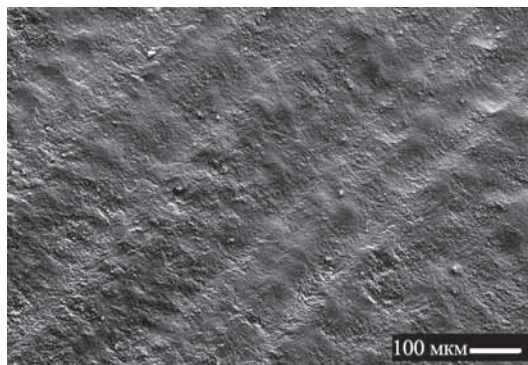


Рис. 1. Поверхность газолазерного реза наплавленной быстрорежущей стали Р2М8 (РЭМ)

grooves, ripples и др.). При увеличении толщины реза ширина и глубина бороздок увеличиваются, при этом качество реза ухудшается. При выборе оптимального соотношения между скоростью ГЛР и плотностью мощности подводимого в зону обработки излучения можно добиться высокого качества поверхности реза инструментальной стали с $Ra = 2,5...3,2$ мкм [8].

ЗЛВ имеет слоистое строение. На рис. 2 цифрами обозначены основные слои: 1 – зона закалки из жидкой фазы протяженностью 3...7 мкм; 2 – зона закалки из твердой фазы размером 100...120 мкм; 3 – зона отпуска размером около 50 мкм и 4 – основной металл. Микроструктура быстрорежущей стали после наплавки представляет собой игольчатый мартенсит, остаточный аустенит и карбиды.

На поверхности реза из-за высоких температурных и концентрационных градиентов возникает высокая степень неравновесности жидкой фазы. Это обеспечивает диспергирование растущих кристаллитов. Поверхностный слой представляет собой зону закалки из жидкой фазы с ячеистой структурой (рис. 3). По данным стереометрического анализа, средний размер ячеек около 1 мкм. Рентгеноспектральный микроанализ выявил значительную химическую не-

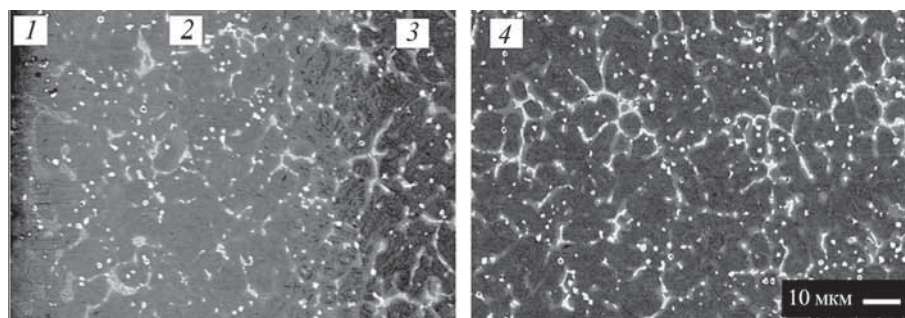


Рис. 2. Микроструктура ЗЛВ:

1 – зона закалки из жидкой фазы; 2 – зона закалки из твердой фазы; 3 – зона отпуска; 4 – основной металл. Поперечный шлиф (РЭМ)

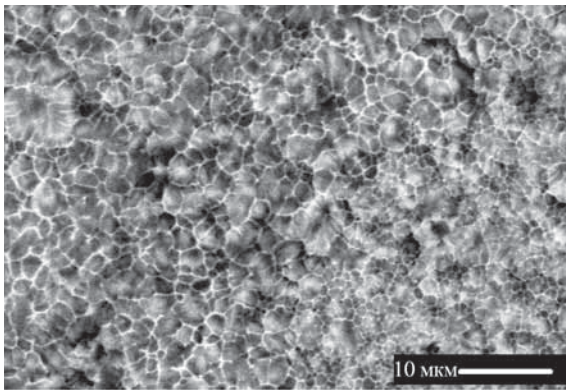


Рис. 3. Микроструктура наплавленной быстрорежущей стали P2M8 в зоне закалки из жидкой фазы. Продольный срез (РЭМ)

однородность. Количество легирующих компонентов по границам ячеек значительно больше, чем в центральной части. Имеющиеся в наплавленной быстрорежущей стали карбиды растворились, обогатив твердые растворы аустенита и мартенсита углеродом и легирующими компонентами. С повышением легированности твердого раствора понижается температура мартенситного превращения и возрастает количество аустенита. В оплавленной зоне высокий процент содержания остаточного аустенита – по данным [9–11], его количество может достигать до 80...100 %. В связи с этим микротвердость на поверхности реза невысокая, около $HV = 7500$ МПа.

В зоне закалки из твердой фазы, нижняя граница которой определяется нагревом до критической температуры A_{c1} , происходит повторная закалка матрицы. Эта зона имеет повышенную микротвердость до $HV = 8500$ МПа. На рис. 4 и в таблице представлены данные рентгеноспектрального микроанализа быстрорежущей стали P2M8 в зоне закалки из твердой фазы. В таблице дано распределение массового содержания (%) легирующих компонентов по спектрам на поверхности шлифа.

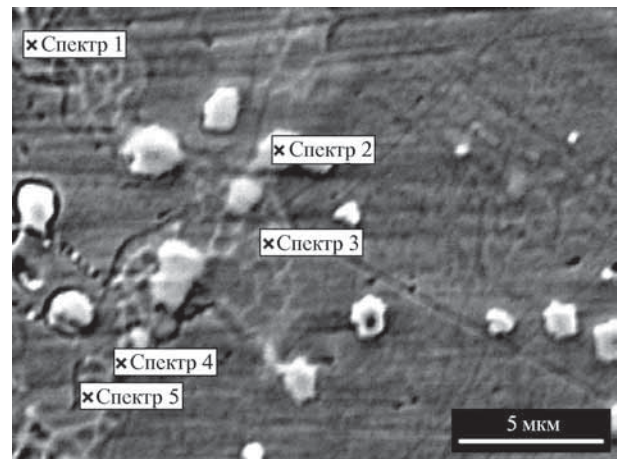


Рис. 4. Рентгеноспектральный микроанализ быстрорежущей стали P2M8 в зоне закалки из твердой фазы (РЭМ). Области микроанализа отмечены крестиками

На глубину до 30...40 мкм от поверхности реза произошло растворение карбидов M_6C , входящих в состав эвтектики. При охлаждении в местах нахождения эвтектик образовались области с высоколегированным остаточным аустенитом и тонкодисперсными карбидами (спектры 1, 3–5). Первичные карбиды со светлым контрастом округлой формы представляют собой обогащенные ниобием карбиды MC (спектр 2). Заметное растворение карбидов ниобия, по данным [12], начинается при нагреве выше 860 °С. Однако результаты исследований методами электронной микроскопии показали, что при кратковременном нагреве во время ГЛР карбиды ниобия растворились только в зоне закалки из жидкой фазы. В зоне закалки из твердой фазы, по всей видимости, растворение прошло в незначительной степени и не проявилось изменением формы и размеров карбидов.

В зоне отпуска (участок 3, см. рис. 2) температура нагрева не превышала критическую A_{c1} . Микротвердость около $HV = 7000$ МПа. Снижение микротвер-

Таблица

Распределение массового содержания, % мас., легирующих компонентов по спектрам на поверхности шлифа наплавленной быстрорежущей стали P2M8 в зоне закалки из твердой фазы

Номер спектра	Легирующие компоненты						
	W	Mo	V	Cr	Nb	Si	Ti
1	1,76	6,58	1,10	7,85	2,30	0,34	0
2	1,69	0	2,02	0	56,25	0	3,63
3	1,64	5,64	0,76	9,50	0	0,30	0
4	2,32	8,53	1,65	9,38	3,03	0,25	0
5	1,02	3,06	0,43	8,42	0	0,34	0
6	1,48	3,95	0,83	7,98	3,69	0,38	0

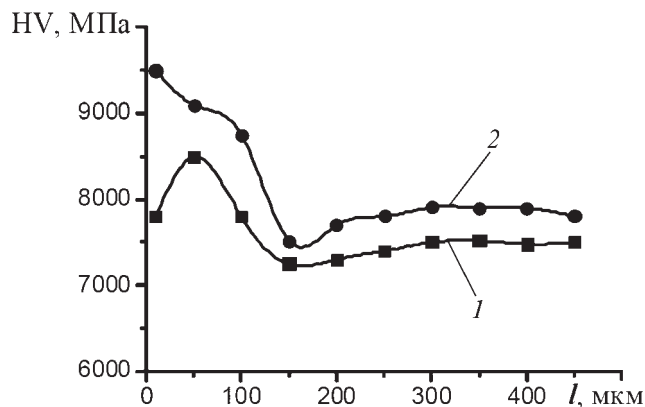


Рис. 5. Распределение микротвердости наплавленной быстрорежущей стали Р2М8 в ЗЛВ:
1 – ГЛР; 2 – ГЛР и обработка холодом

дости связано с процессами, протекающими при распаде мартенсита, коагуляции карбидов и интерметаллидов в результате нагрева ниже A_{c1} .

Повышенное количество остаточного аустенита в ЗЛВ существенно снижает эффект лазерного упрочнения и требует поиска решений по уменьшению его содержания в упрочненном металле. Остаточный аустенит быстрорежущих сталей из-за высокой легированности очень устойчив и превращается лишь в результате отпуска при температуре выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13]. В данном случае объемный высокотемпературный отпуск выполнять нежелательно, так как нагрев выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведет к дальнейшему разупрочнению зоны отпуска (участок 3, см. рис. 2). Остаточный аустенит можно перевести в мартенсит, используя обработку холодом. Известно, что обработка холодом представляет дальнейшее продолжение закалки и возобновляет мартенситное превращение остаточного аустенита [14]. На рис. 5 представлено распределение микротвердости наплавленной быстрорежущей стали Р2М8 от поверхности газолазерного реза. Кривая 1 показывает изменение микротвердости образцов после ГЛР, 2 – после ГЛР и обработки холодом.

Сравнивая полученные зависимости, можно сделать вывод, что максимальный прирост микротвердости наблюдается в зоне закалки из жидкой фазы. Именно в этой зоне содержится максимальное количество остаточного аустенита. Эффект от обработки холодом значителен и вне ЗЛВ. Наплавленная быстрорежущая сталь после низкотемпературного отпуска содержит до 30...40 % остаточного аустенита, поэтому в наплавленном металле после обработки холодом происходит увеличение микротвердости на $HV = 500\text{...}700$ МПа. Следовательно, для наплавленной быстрорежущей стали обработка холодом возобновила мартенситное превращение не только в ЗЛВ, но и по всему объему материала. После обработки холодом рекомендуется выполнить

низкотемпературный отпуск для снижения уровня остаточных напряжений.

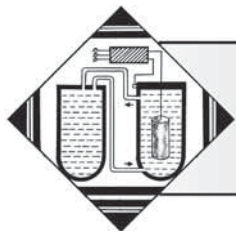
Заклучение

Выполненные исследования показали, что в процессе газолазерной резки наплавленной быстрорежущей стали образуется закаленный слой глубиной 100...120 мкм. Он имеет градиентное слоистое строение и распределение микротвердости. Обработка холодом в жидком азоте позволяет повысить микротвердость стали во всем объеме наплавленного металла, особенно значительно в зоне закалки из жидкой фазы, до 9500 МПа. Следовательно, для повышения эксплуатационных свойств биметаллических инструментов после ГЛР рекомендуется выполнять обработку холодом и низкотемпературный отпуск. ГЛР может успешно применяться как разделительная и упрочняющая обработка при изготовлении биметаллических инструментов, повышая энерго- и ресурсоэффективность технологии.

Авторы статьи благодарны профессору Н.С. Зубкову за полезные консультации и помощь в работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Э.В., Глезер А.М., Громов В.Е. Градиентные структурно-фазовые состояния в твердых телах // Известия АН. Сер. физическая. 2003. Т. 67. № 10. С. 1374.
2. Иванов Ю.Ф., Юрьев А.Б., Морозов М.М. и др. Многоуровневая градиентная структура в стержне низкоуглеродистой стали малого диаметра, термоупрочненной с горячего проката // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. № 2. С. 61–68.
3. Шнейдер Е.А. Оптимизация технологического процесса изготовления наплавленного металлорежущего инструмента // СТИН. 2009. № 7. С. 24–26.
4. Зубкова Е.Н., Булкин Д.В., Золотов А.А. Наплавленная инструментальная штамповая сталь повышенной износостойкости // Вестник Тверского государственного технического университета. 2004. Вып. 5. С. 44–48.
5. Переплетчиков Е.Ф., Рябцев И.А. Плазменно-порошковая наплавка режущего инструмента // Сварочное производство. 2008. № 11. С. 28–31.
6. Афанасьева Л.Е., Водопьянова В.П., Зубков Н.С. и др. Увеличение ресурса разделительных штампов с применением наплавки // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 4. С. 15–17.
7. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Зубков Н.С. и др. Технологическая прочность наплавленной быстрорежущей стали при газолазерной резке // МИТОМ. 2009. № 7. С. 36–38.
8. Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Зоренко П.О. и др. Особенности поверхности инструментальной стали после газолазерной резки // Металлургия машиностроения. 2011. № 6. С. 36–38.
9. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ, 2006. 664 с.
10. Karatas C., Yilbas B.S., Aleemb A., Ahsan M. Laser treatment of cemented carbide cutting tool // J. Mater. Processing Techn. 2007. V. 183. P. 234–240.
11. Bonek M., Dobrzanski L.A., Hajduczek E., Klimpel A. Structure and properties of laser alloyed surface layers on the hot-work tool steel // J. Materials Processing Technology. 2006. № 175. P. 45–54.
12. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 2. М.: Металлургия, 1966.
13. Геллер А.Ю. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1983. 527 с.
14. Солоненко В.Г. Криогенная обработка режущих инструментов // Технология металлов. 2009. № 4. С. 7–14.



УДК 621.785.5

В.И. Колмыков, В.В. Горожанкин, Д.Н. Романенко
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)
E-mail: svarka-kstu@mail.ru

К вопросу об использовании химико-термической обработки для повышения стойкости бурового инструмента и деталей горных машин

Показано, что нитроцементация сталей, легированных небольшим количеством хрома, в высокоактивной пастообразной среде обеспечивает получение диффузионных слоев, насыщенных большим количеством твердых карбонитридных включений. Такие слои имеют очень высокую абразивную износостойкость и могут быть использованы для упрочнения изделий, работающих в природных абразивных массах.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, нитроцементация, карбонитриды.

It is shown that the nitro cementation of steels, alloyed by a small amount of chrome, in the highly active pastelike environment provides receiving the diffusive layers sated with a large number of firm karbonitridny inclusions. Such layers have very high abrasive wear resistance and can be used for hardening of the products working in natural abrasive masses.

Keywords: abrasive wear, nitro cementation, carbonitrides.

Ведущим видом износа буровых инструментов и деталей машин, работающих в контакте с горными породами, а также с другими минеральными средами, является абразивный износ. Износостойкость материалов этих изделий зависит главным образом от их твердости. При этом наивысшая износостойкость реализуется при твердости материала, близкой к твердости абразивных частиц. Известно [1], что основным компонентом многих горных пород, различных грунтов и других природных абразивных сред является кварц, твердость которого, в зависимости от имеющихся в его составе примесей, составляет 1000...1200 НВ. Следовательно, для эффективного сопротивления воздействию этого природного абразива материал должен иметь твердость, приближающуюся к этим значениям.

Традиционными методами получения высокой твердости изделий, работающих в контакте с абразивными массами, являются наплавка или армирование рабочих поверхностей твердыми сплавами [2, 3]. Высокая твердость, а следовательно, и высокая абразивная износостойкость этих материалов обуславливается наличием в их структуре большого количества твердофазных включений (карбидных, боридных, нитридных и др.). Наплавка и армирование (твердосплавными вставками) бурового инструмента весьма эффективны для повышения его стойкости, но

дороги из-за высокой стоимости твердых сплавов и большой трудоемкости технологических процессов упрочнения.

Между тем существуют гораздо более дешевые методы химико-термической обработки (ХТО) стали, позволяющие получать поверхностные диффузионные слои, насыщенные твердыми фазами. Одним из таких методов является высокотемпературная нитроцементация в высокоактивных средах. При этом нитроцементуемая сталь должна быть легирована карбидообразующими элементами, главным образом хромом [4]. В результате насыщения поверхности стали большим количеством углерода и азота, достаточным для обеспечения предельной концентрации твердого раствора и для образования и роста карбонитридов, образуются диффузионные слои со структурой, идентичной структуре металлокерамических твердых сплавов.

Многочисленными экспериментами было установлено, что наилучшие результаты (максимальное количество карбонитридов в диффузионном слое) получаются при использовании для нитроцементации стали, легированной 1,3...3,0 % Cr, 1...2 % Mn и небольшим количеством 0,1...0,2 % Ti или V для предотвращения роста зерна в процессе упрочняющей обработки. Нитроцементующая среда состоит из мелкодисперсной газовой сажи (ДГ-100) с добавлением 20 % азотсодержа-

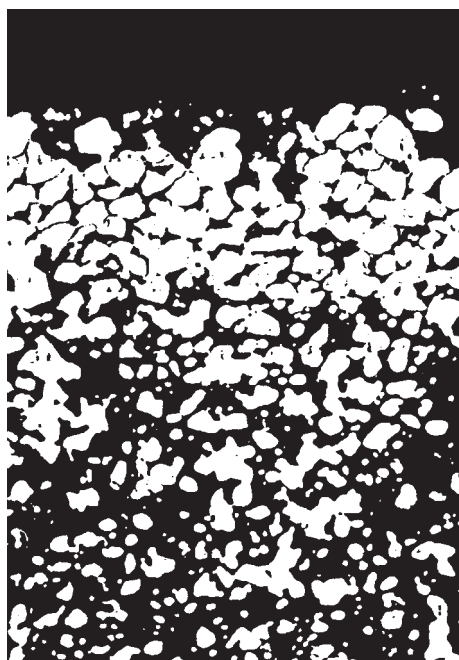


Рис. 1. Микроструктура нитроцементованного слоя на стали 35X3Г2Ф (экспериментальная), $\times 200$. Температура нитроцементации 880 °С, длительность 6 ч

шего компонента – железосинеродистого калия $K_4Fe(CN)_6$. Сухие компоненты тщательно перемешиваются и разводятся пастообразной жидкостью – нитроцеллюлозным лаком НЦ-222. Полученная паста наносится на упрочняемые поверхности стальных деталей слоем 1,5...2,0 мм и высушивается. После чего детали с нитроцементующими покрытиями загружаются в печь, разогретую до температуры нитроцементации – 820...880 °С.

Нитроцементация может проводиться в печи с герметичной ретортой (типа "Ц" или "США"), в которую подается инертная атмосфера, либо в герметизированном контейнере с инертным наполнителем. Закалку после нитроцементации можно проводить непосредственно из нитроцементационной печи либо с повторного нагрева. Отпуск после закалки можно проводить при повышенных температурах, что благоприятно скажется на ударной вязкости стали. Твердость нитроцементованной поверхности при этом практически не снизится, так как она обеспечивается наличием большого количества твердых карбонитридных частиц в диффузионном слое.

Количество карбонитридной фазы в нитроцементованных слоях хромомарганцевых сталей, в зависимости от режимов обработки, может быть различным, вплоть до 100 % (сплошная карбонитридная корка), глубина таких слоев достигает 1,5...2,0 мм и более (рис. 1).

Основным типом твердой фазы, образующейся при такой нитроцементации, являются, как показывают результаты рентгеноструктурного анализа, изоморфные карбонитриды с цементитом, в состав которых входит азот (<0,3 % N), а также легирующие элементы, содержащиеся в стали. Микротвердость таких карбонитридов 1200...1400 HV, что выше твердости кварца.

Диффузионные слои с такой структурой обладают очень высокой абразивной износостойкостью. В зависимости от содержания карбонитридов в структуре их износостойкость может быть в 2–10 раз выше износостойкости аналогичных сталей без нитроцементации (рис. 2).

Таким образом, выбирая соответствующие стали и назначая оптимальные режимы нитроцементации, можно получить высокий упрочняющий эффект для конкретных изделий. Получая нитроцементованные слои с содержанием карбонитридной фазы более 60 % и закаливая матрицу (твердый раствор углерода и азота в железе) между карбонитридными включениями на мартенсит, можно добиться очень высокой твердости поверхности. При этом абразивное воздействие на такие поверхности прекратится и нитроце-

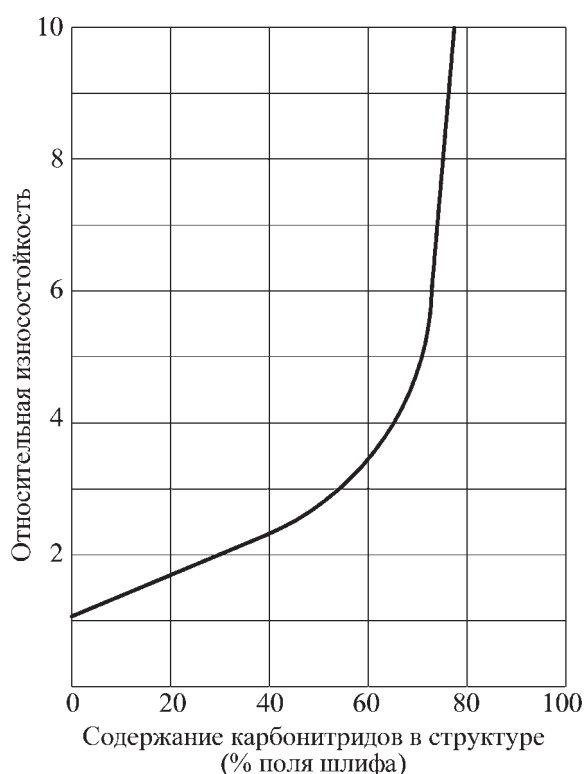


Рис. 2. Экспериментальная зависимость относительной износостойкости нитроцементованной стали 35X3Г2Ф от содержания карбонитридов в диффузионных слоях. Эталон – та же сталь после закалки и низкого отпуска

ментованные изделия будут иметь чрезвычайно высокую износостойкость. Снижая количество карбонитридов в диффузионных слоях до 30...40 % и производя их закалку на аустенит (с высоких температур), можно получать изделия, сочетающие высокую износостойкость и повышенную ударную вязкость, что благоприятно при ударно-абразивном изнашивании.

Разработанный метод ХТО можно рекомендовать для упрочнения различных изделий, работающих в самых тяжелых условиях изнашивания: буровых долот, почвообрабатывающих орудий, деталей машин и оборудования, работающих в контакте с абразивными массами. Во всех случаях предлагаемая нитроцементация может успешно соперничать с износостойкой наплавкой, широко используемой для этих целей. При этом нитроцементация имеет то преимущество, что в упрочненных слоях возникают внутренние напряжения сжатия, которые повышают усталостную прочность нитроцементованных изделий. В наплавленных покрытиях, напротив, имеются значительные напряжения растяжения, которые вызывают снижение усталостной прочности наплавленных изделий.

Нитроцементация стальных изделий (инструментов и деталей) значительно дешевле, чем традиционные способы повышения абразивной износостойкости таких же изделий — наплавка и армирование. Нитроцементация может быть реализована как в условиях единичного и мелкосерийного производства, так и в условиях массового производства, причем с увеличением программы нитроцементации она зна-

чительно удешевляется (не более 2 % от общей себестоимости изготовления детали).

Наконец, нитроцементация с образованием в диффузионных слоях карбонитридов цементитного типа практически не ухудшает обрабатываемости нитроцементованных деталей абразивными инструментами на финишных операциях (шлифование, хонингование и т.п.). Это происходит потому, что твердость цементита — основной упрочняющей фазы в нитроцементованных слоях — в 1,5–2 раза ниже твердости абразивных материалов, используемых для изготовления шлифовальных кругов и других инструментов (электрокорунда, карборунда и др.). С этой точки зрения поверхностное упрочнение стальных изделий карбонитридами цементитного типа предпочтительнее упрочнению более твердыми фазами, например боридами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ермолов В.А., Ларичев Л.Н., Мосейкин В.В. Основы геологии. М.: МГУ, 2008. 632 с.
2. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. М.: Машиностроение, 1980. 120 с.
3. Лившиц Л.С. Наплавочные материалы и технология наплавки для повышения износостойкости и восстановления деталей машин // Сварочное производство. 1990. № 1. С. 15–17.
4. Переверзев В.М., Колмыков В.И. Влияние легирующих элементов на карбидообразование в железе и стали в процессе цементации // Металловедение и термическая обработка металлов. 1981. № 8. С. 24–25.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Ю.И. Головин

2012 г. Объем 656 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-662-8 Цена 800 р.



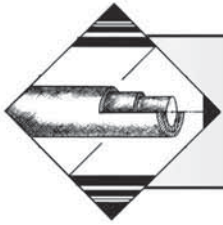
Изложены физико-химические основы нанотехнологии. Особое внимание уделено размерным эффектам различной природы и путям их практического использования в различных наноструктурах и изделиях. Рассмотрены современные методы получения, исследования и определение свойств наноматериалов. Систематизированы и описаны основные направления развития нанотехнологий и нанотехники: физическое наноматериаловедение и наномеханика, наноэлектроника и нанобиотехнологии.

Наряду с общими положениями приведено большое число примеров конкретных разработок, доведенных до промышленного производства. Автор использовал как литературные, так и собственные данные. Книга содержит обширный ссыльный аппарат, включающий зарубежные и отечественные источники.

Для инженерно-технических работников, осваивающих и использующих нанотехнологические процессы, а также может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в этой области.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.793

П.Е. Демин, Л.Г. Петрова, В.А. Александров

(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ))

E-mail: petrova_madi@mail.ru

Повышение коррозионной стойкости стальных заглушек на двигателях способами комбинированной металлизации алюминием и титаном

Рассмотрен способ комбинированной химико-термической обработки углеродистой стали, заключающийся в диффузионной металлизации из суспензий в низкотемпературной плазме азотосодержащего электролита в целях получения антикоррозионного нехрупкого покрытия.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, металлизация, углеродистая сталь, низкотемпературная плазма, электролит.

Method of combined thermo-chemical treatment of carbon steels is considered, consisting in metallization from suspensions in low-temperature plasma of nitrogen-containing electrolyte for forming of corrosion-resistant non-brittle coating.

Keywords: thermo-chemical treatment, metallization, carbon steel, low-temperature plasma, electrolyte.

Введение

Развитие современной промышленности диктует повышенные требования к ресурсу машин и механизмов. С одной стороны, от детали требуется высокий ресурс, который обеспечивает снижение трудоемкости работ при плановом техническом обслуживании или текущем ремонте, с другой стороны – низкая цена, которая обеспечит экономию по сравнению с дорогостоящей деталью из высоколегированной стали.

Проблемы снижения ресурса работы (наработки на отказ) в процессе эксплуатации автотранспортных средств нередко возникают вследствие неверного конструкторского решения. Например, на низкопольных автобусах ПАЗ 3237 на литых блоках дизельных двигателей установлены стальные заглушки. В процессе эксплуатации заглушки подвергаются сквозной коррозии, что сопровождается течью технологической жидкости. Основная причина коррозии стальных заглушек в том, что их поверхность не защищена от воздействия агрессивных сред, которые не оказывают разрушающего воздействия на сам литой блок, изготовленный из алюминиевых сплавов.

Одним из способов решения данной проблемы мог бы быть дополнительный защитный кожух, устанавливаемый на стальной заглушке. Однако такой

кожух будет иметь сложную геометрическую форму, что не даст возможности герметичного исполнения. Попадание агрессивных сред в это негерметичное пространство с повышенным притоком тепла от работающего двигателя только ускорит коррозию.

Альтернативное решение проблемы повышения стойкости заглушки заключается в нанесении защитного слоя на ее поверхность. Подобный защитный слой должен обеспечивать необходимую коррозионную стойкость при повышенных температурах работающего дизельного двигателя. Кроме того, нанесенное покрытие должно обладать стойкостью к вибрациям, возникающим от детонации рабочей смеси, а также к вибрациям транспортного средства при движении.

Эти требования могут быть реализованы при получении защитного поверхностного слоя методами диффузионного насыщения. Диффузионный слой практически не изменяет геометрию детали и может обеспечить необходимую коррозионную стойкость при достижении определенных концентраций таких элементов, как хром, титан, алюминий, кремний.

В работе изучена возможность получения антикоррозионного слоя на углеродистой стали путем диффузионной металлизации методом химико-термической обработки (ХТО).

На сегодняшний день ХТО имеет хорошие перспективы развития. Многообразие видов и вариантов ХТО дает возможность подбирать оптимальный способ упрочнения исходя из экономических и эксплуатационных задач. А при комбинировании технологий ХТО позволяет получать такие свойства рабочей поверхности деталей, которые невозможно получить при использовании только одного способа ХТО [1–3]. При разработке эффективных технологий ХТО сталей следует учитывать не только необходимость обеспечения заданных свойств поверхности, но и возможность экономии дорогих и редких легирующих элементов.

Для упрочнения поверхностного слоя легированных сталей широко применяют процессы азотирования. Эффективное азотирование более дешевой углеродистой стали возможно при наличии на ее поверхности высоколегированного слоя, полученного путем металлизации (поверхностного легирования).

Методика проведения исследований

Процесс диффузионной металлизации стали 40 проводили из обмазки с использованием низкотемпературной плазмы, генерируемой в жидком электролите [4, 5]. Обмазка (шликер) представляет собой суспензию, состоящую из порошка металла, графита и хлористого аммония (30, 50, 20 % соответственно, связующее вещество — цапонлак). В качестве легирующих элементов были выбраны Al и Ti, которые обеспечивают необходимый комплекс — хорошие антикоррозионные свойства в сочетании с малой хрупкостью [6]. Исследовали как процессы раздельного насыщения алюминием или титаном, так и совместного насыщения Al+Ti.

Обмазку наносили на предварительно очищенную деталь тонким слоем (2 мм), после чего ее подвергали гидроплазменной обработке в электролите, состоящем из водного раствора хлористого аммония (NH_4Cl) с добавлением мелкодробленого графита. Продолжительность процесса 3 мин.

Для эффективного диффузионного насыщения железной матрицы металлами необходима высокая температура, которая может быть достигнута путем уменьшения отвода тепла от поверхности детали, а также путем увеличения силы тока, проходящего через электролит. Уменьшение теплопроводности электролита обеспечивается при повышении его густоты путем добавления графита. Графит, имеющий высокую электропроводность, дает возможность также увеличить силу тока, кроме того, углерод препятствует окислению поверхности образца.

Оптимальными параметрами процесса, обеспечивающими эффективный нагрев детали без оплавления,

являются: напряжение $U = 35...40$ В, сила тока $I = 13...15$ А. Наличие в плазме ионов азота и хлора, образующихся как из электролита, так и из обмазки, дает возможность комплексной металлизации и азотирования. Ионы хлора способствуют транспортировке легирующего элемента (металла) к поверхности обрабатываемого изделия. Наличие графита приводит к диффузии углерода в металл. Следовательно, происходит одновременное насыщение стали легирующим металлом, азотом и углеродом, поэтому такая комбинированная обработка может быть классифицирована как *металлокарбонитрирование*.

Исследования структуры и фазового состава проводили на сканирующем микроскопе "НИТАСНИ S-800" с рентгеноспектральным микроанализатором "INCAx-act". Микротвердость измеряли на ПМТ-3. Коррозионную стойкость оценивали по уменьшению массы с единицы поверхности после испытаний образцов в открытых сосудах с агрессивной средой по стандартной методике. В качестве эталонов для сравнения использовали образцы из соответствующих материалов без покрытия и коррозионно-стойкой стали 12X18H9T.

Результаты исследований и их обсуждение

Строение модифицированного слоя. В результате шликерной металлизации углеродистых сталей в гидроэлектролитной плазме в присутствии графита и хлористого аммония, как источника азота, происходит комплексное насыщение поверхности изделия металлом, углеродом и азотом с образованием диффузионных слоев сложного фазового состава. Диффузионные слои выявляются при травлении микрошлифов и отличаются повышенной микротвердостью по сравнению с сердцевиной образца. Толщина слоя, выявляемая по микроструктуре, соответствует толщине слоя с повышенной микротвердостью. В модифицированном слое присутствуют, как правило, нитриды, карбиды (карбонитриды) легирующего элемента, интерметаллидные фазы, в некоторых случаях нитриды (карбонитриды) железа, выделившиеся в легированном азотом и металлом твердом растворе: $\text{Fe}_x\text{Me}_y + \text{Me}_z(\text{C}, \text{N}) + \alpha(\text{Me}, \text{N})$.

Так, при *титанокрбонитрировании* образуется поверхностный модифицированный слой толщиной до 120 мкм с повышенной концентрацией титана и азота (рис. 1). Фазовый анализ показал наличие в слое выделений карбонитридов $\text{Ti}(\text{N}, \text{C})$ и интерметаллидов Fe_2Ti в легированном твердом растворе $\alpha(\text{Ti}, \text{N})$. Формирование карбонитридов закономерно, так как титан обладает сильным средством (активностью) как к азоту, так и к углероду. Таким образом, диффузионный слой имеет характерное строение зоны внутреннего азотирования 2-го рода (рис. 2, а).

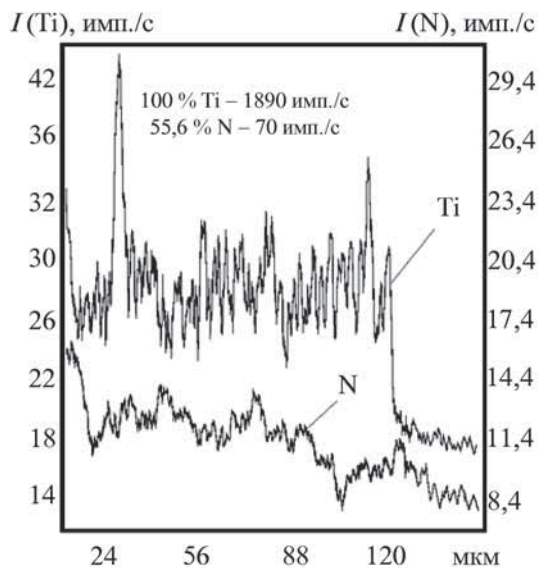


Рис. 1. Распределения титана и азота по толщине диффузионного слоя стали 40 после титанокарбонитрирования

Строение модифицированного слоя на стали 40 после *алюмокарбонитрирования* имеет специфические особенности (рис. 2, б). На поверхности наблюдается пленка оксида Al_2O_3 толщиной 25 мкм, далее — переходный диффузионный слой толщиной около 70 мкм с повышенной концентрацией алюминия, углерода и азота $\alpha(\text{Al}, \text{C}, \text{N})$ с выделениями легированной алюминием γ' -фазы $(\text{Fe}, \text{Al})_4\text{N}$, а далее вглубь формируется характерная заэвтектоидная структура с карбидной сеткой по границам зерен, внутри которых видны иглы мартенсита: $\alpha'(\text{Al}, \text{C}, \text{N})$ —мартенсит+ Fe_3C . Общая

толщина упрочненного слоя составляет около 150 мкм.

Титаноалюмокарбонитрированные слои имеют характерную для исходной стали 40 феррито-перлитную структуру (рис. 2, в), что говорит о слабой диффузии углерода из графитного компонента шликера. Упрочненный слой толщиной 60 мкм состоит из поверхностного оксидного слоя Al_2O_3 толщиной не более 10 мкм и зоны внутреннего азотирования с выделениями нитридов титана TiN и легированной алюминием γ' -фазы $(\text{Fe}, \text{Al})_4\text{N}$ в легированном твердом растворе $\alpha(\text{Al}, \text{Ti}, \text{N})$.

Свойства модифицированных слоев после комбинированной обработки. В результате металлокарбонитрирования в гидроэлектролитной плазме наблюдается повышение микротвердости модифицированных слоев: при использовании в качестве легирующего элемента титана — до 5300 МПа, алюминия — до 15 000 МПа. Такая максимальная твердость наблюдается на поверхности алюмокарбонитрированного слоя и соответствует зоне образования оксида алюминия (рис. 3). Далее твердость резко понижается до значения 8000 МПа в зоне внутреннего азотирования, затем происходит плавное снижение твердости к сердцевине (до 2000 МПа). Повышение твердости зон внутреннего азотирования есть следствие, главным образом, дисперсионного упрочнения, уровень которого определяется объемной долей когерентных частиц (нитридов, карбонитридов, интерметаллидов) [7]. Более высокая твердость алюмокарбонитрированного слоя по сравнению с титанокарбонитрированным объясняется образованием мартенсита. Резкий перепад твердости на кривой ее распределения на глубине от 20 до 40 мкм и наличие цементитной сетки являются предпосылками повышенной хрупкости алюмокарбонитрированного слоя, особенно в условиях вибраций при эксплуатации изделия.

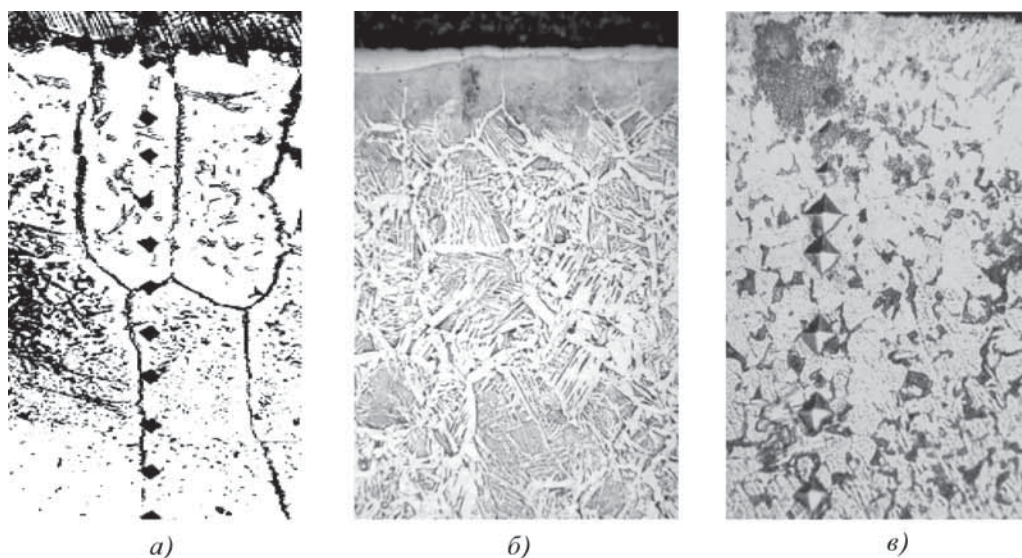


Рис. 2. Микроструктуры модифицированных слоев на стали 40 после титанокарбонитрирования (а), алюмокарбонитрирования (б), титаноалюмокарбонитрирования (в), $\times 200$

Снижение хрупкости можно обеспечить путем достижения плавного профиля изменения микротвердости по всей толщине слоя. Эксперименты показали, что получить достаточно высокую твердость в сочетании с ее плавным изменением по толщине слоя можно путем совместного насыщения алюминием и титаном. Твердость титано-

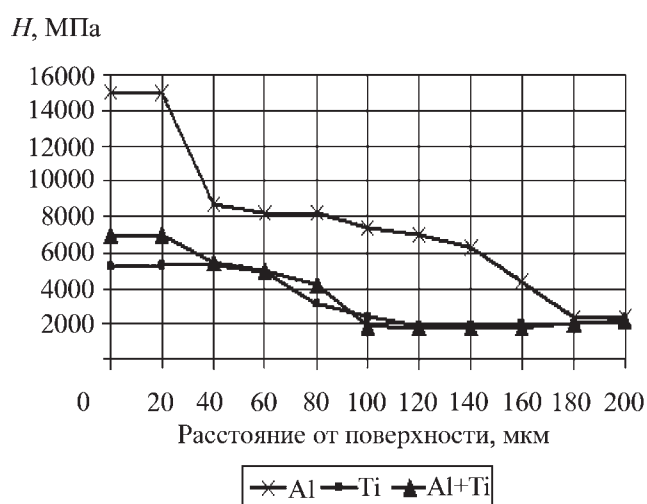


Рис. 3. Распределения микротвердости по толщине диффузионного слоя после металлокарбонитрирования: Al, Ti, Al+Ti

алюмокарбонитрированного слоя (около 7000 МПа) выше, чем при легировании одним титаном. Это объясняется выделением помимо нитридов титана легированной алюминием γ' -фазы. При этом микротвердость имеет равномерный профиль (рис. 3), что предполагает благоприятное распределение внутренних напряжений, способствует снижению хрупкости и увеличению стойкости к виброударным нагрузкам.

Проведенные испытания модифицированных слоев на коррозию показали, что алюмокарбонитрированные образцы отличаются повышенной стойкостью в различных кислотных средах: в 50%-й уксусной кислоте (в 1,5 раза выше по сравнению с образцом без покрытия), 40%-м растворе H_3PO_4 (в 2 раза выше по сравнению с образцом без покрытия) и 10%-м растворе H_2SO_4 (в 7 раз выше по сравнению с

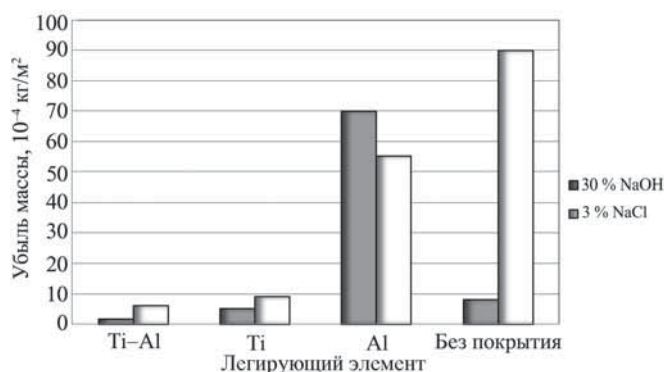


Рис. 4. Коррозионная стойкость металлокарбонитрированных слоев на стали 40 в различных средах по сравнению со стойкостью образцов без покрытий

образцом без покрытия, т.е. стойкость на уровне коррозионно-стойкой стали).

Титанокарбонитрированные и титаноалюмокарбонитрированные слои обладают повышенной стойкостью в солевых и щелочных средах (рис. 4). Так, убыль массы Ti-Al-N-C слоя в 30%-м растворе NaOH в 5 раз ниже по сравнению с образцом без покрытия, а в 3%-м растворе NaCl – в 15 раз. Кроме того, Ti-Al-N-C слои повышают стойкость стали в 10%-й азотной кислоте и 5%-й лимонной кислоте. Как уже было отмечено, эти слои имеют достаточно высокую твердость и благоприятное ее распределение, что позволяет предотвратить скалывание и растрескивание слоя в процессе эксплуатации изделий.

Заключение

Существующая проблема коррозии стальных заглушек, установленных на литых двигателях низкопольных автобусов ПАЗ 3237, решается в результате формирования на поверхности изделий антикоррозионного покрытия путем комбинированной технологии ХТО. Оптимальная обработка заключается в одновременном кратковременном насыщении поверхности титаном, алюминием, азотом и углеродом из низкотемпературной плазмы, возбуждаемой в жидком азотсодержащем электролите. Такой способ позволяет получать диффузионные слои, обладающие необходимыми свойствами: коррозионной стойкостью, которая увеличит ресурс стальной заглушки, установленной на блоках двигателей, и достаточным запасом пластичности для их надежной работы в условиях вибраций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров В.А. Комбинированный технологический способ ХТО для поверхностного упрочнения сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 5. С. 27–31.
2. Чудина О.В., Александров В.А., Брежнев А.А. Разработка двухстадийной технологии металлизации конструкционных сталей с использованием лазерного и печного нагрева // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012. № 6. С. 32–36.
3. Шестопалова Л.П. Исследование модифицированного слоя легированных сталей после химико-термической обработки в разделенных атмосферах аммиака и воздуха // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2012. № 6. С. 42–45.
4. Словецкий Д.И., Терентьев С.Д., Плеханов В.Г. Механизм плазменно-электролитного нагрева металлов // *Теплофизика высоких температур*. 1986. Т. 24. № 2. С. 353–363.
5. Пат. 2362831 РФ, МПК C23C 8/38, 1/06. Способ азотирования стальных изделий / Л.Г. Петрова, П.Е. Демин, В.А. Александров, И.В. Котенко; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский автомобильно-дорожный институт (государственный технический университет).
6. Петрова Л.Г., Александров В.А., Демин П.Е. Комбинированная технология диффузионного насыщения металлами, совмещенная с процессами гидроплазменного азотирования углеродистых сталей // *Вестник МАДИ*. 2011. Вып. 54. С. 52–59.
7. Приходько В.М., Петрова Л.Г., Чудина О.В. *Металлофизические основы разработки упрочняющих технологий*. М.: Машиностроение, 2003. 384 с.



УДК 621.785

И.В. Родионов, А.А. Фомин, А.Н. Ромахин
(Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина)
E-mail: iv.rodionov@mail.ru

Газотермическое оборудование для получения упрочняющих оксидных покрытий на металлах и сплавах различного назначения*

Разработаны конструкции цилиндрических электродов сопротивления и индукционного нагрева для упрочняющей термической обработки металлических изделий различного назначения. Электроды позволяют проводить упрочняющую термообработку поверхностей металлов и сплавов в реакционных технологических средах, представляющих собой воздух, перегретый водяной пар, смеси инертных и окисляющих газов с формированием металлооксидных покрытий, обладающих повышенными показателями твердости, износостойкости и коррозионной устойчивости.

Ключевые слова: электрод, газотермическое оксидирование, упрочняющая термообработка, индукционно-термическая обработка, металлооксидные покрытия.

Cylindrical electrical resistance and induction heating furnace constructions for strengthening heat treatment of metal items for various purposes have been developed. Electrical furnaces enable strengthening heat treatment of metal and alloy coatings in reacting technological medium, such as air, overheated water vapor, mixed inert and oxidizing gases with the formation of metal oxide coatings characterized by increased hardness, wear resistance and corrosion resistance.

Keywords: electrical furnace, gas thermal oxidation, strengthening heat treatment, metal oxide coatings.

Введение

Одним из перспективных направлений создания высококачественных машиностроительных металлоизделий и продукции металлургического производства является применение ресурсосберегающих и малоотходных упрочняющих технологий. К числу таких технологий относится газотермическое оксидирование, позволяющее без использования дополнительных материалов, сложного оборудования и оснастки получать на поверхности металлических изделий механически прочные и коррозионно-устойчивые металлооксидные покрытия, которые существенно повышают надежность и ресурс работы ответственных элементов различных деталей приборо- и машиностроения, качественные показатели изделий прокатного производства и т.п.

Использование металлооксидных покрытий на стальных кольцах подшипников представляет боль-

шой практический интерес [1]. Данные покрытия упрочняют стальную поверхность, придают ей повышенную твердость и износостойкость, обеспечивают высокую коррозионную устойчивость при взаимодействии с химически агрессивными средами в условиях трения. Морфологическая структура некоторых типов металлооксидных покрытий способствует удержанию на поверхности изделия тонкой пленки смазочного материала, что существенно улучшает работоспособность подшипников и повышает их стойкость к изнашиванию.

В большинстве случаев оксидные покрытия формируют на стальных изделиях с целью повышения защитных свойств и механических характеристик поверхности, основное влияние на которые оказывают толщина и фазово-структурное состояние создаваемых металлооксидных слоев. В условиях прокатного производства такие оксидные слои могут формироваться на поверхности изделий, представляющих собой трубы различного диаметра и формы поперечного сечения, арматуру и т.д. При этом наносимое технологическое покрытие на основе металлооксидных соединений позволяет не только в лучшей степени удерживать на металлоизделиях слой смазки, но и су-

* Научные исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг., соглашение № 14.В37.21.0571.

щественно повышать их долговечность и функциональную надежность, что достигается за счет придания поверхности термически модифицированного состояния с комплексом необходимых структурно-морфологических, прочностных и антикоррозионных характеристик [2–4].

Наиболее широкое распространение в создании функциональных оксидных покрытий на металлоизделиях получили способы воздушно-термического и паротермического оксидирования, а также оксидирования в смесях инертных и реакционных газов, характеризующиеся высокой технико-экономической эффективностью. При этом активно разрабатываются и совершенствуются уже известные методы газотермического оксидирования в направлении интенсификации протекания реакций окисления, например за счет использования токов высокой частоты и концентрированных потоков энергии, в частности лазерного излучения [5, 6]. Данные технологические способы позволяют варьировать параметры режимов и показатели физико-химических и механических свойств покрытий в широком диапазоне, придавать оксидированной поверхности необходимый комплекс эксплуатационных характеристик.

Методы оксидирования и их основные характеристики

Воздушно-термическое оксидирование (ВТО) изделий характеризуется образованием покрытий за счет физико-химического взаимодействия металлической основы с кислородом воздуха, в результате чего на поверхности возникают собственные металлооксидные соединения. ВТО металлоизделий осуществляется в нагревательных устройствах, представляющих собой электропечи сопротивления со свободным доступом воздуха в рабочий объем печи (рис. 1).

При таком способе оксидирования происходит термоупрочнение модифицированных поверхностных слоев изделия при сохранении химического состава и свойств основной металлической основы. За счет термохимических процессов фазообразования осуществляется формирование на поверхности воздушно-термического металлооксидного покрытия без использования дополнительных материалов для получения покрытия.

Паротермическое оксидирование (ПТО) предполагает обработку металлической поверхности в кислородно-обедненной среде, представляющей собой перегретый водяной пар, что позволяет избежать либо минимизировать образование в составе покрытия нежелательных фаз, например нитридов, оказывающих негативное влияние на коррозионные и механические свойства оксидированных изделий.

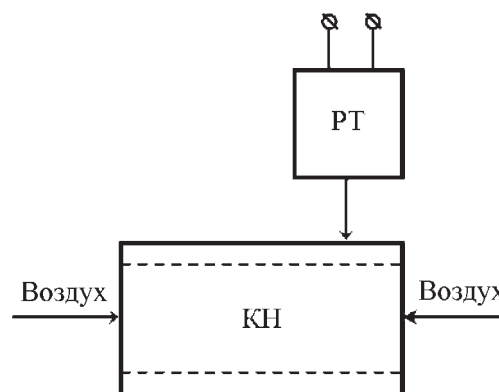


Рис. 1. Блок-схема электропечи для ВТО металлов и сплавов: КН – камера нагрева печи; РТ – регулятор температуры

ПТО реализуется в более сложных электронагревательных устройствах, оснащенных парогенератором (технологическим блоком для получения и подачи перегретого водяного пара) и блоком питания и управления процессом обработки (рис. 2). Паровая реакционная среда подается в камеру оксидирования печи под определенным давлением, которое поддерживается на протяжении всего цикла оксидирования.

Получение термооксидного покрытия происходит в условиях взаимодействия металлической поверхности с реакционными компонентами парогазовой среды, в результате чего формируются поверхностные металлооксидные системы определенной толщины и структуры [7]. При этом путем изменения толщины покрытия изменяются его свойства и морфология. Так, по мере роста покрытия в толщину возрастают его пористость, степень шероховатости и морфологической гетерогенности поверхности, что приводит к ухудшению механической прочности и снижению коррозионной устойчивости металлооксидов. Поэтому для создания оксидных покрытий с высокой твердостью и защитной способностью необходимо формировать тонкослойные металлооксидные системы с минимальной пористостью и шероховатостью, а

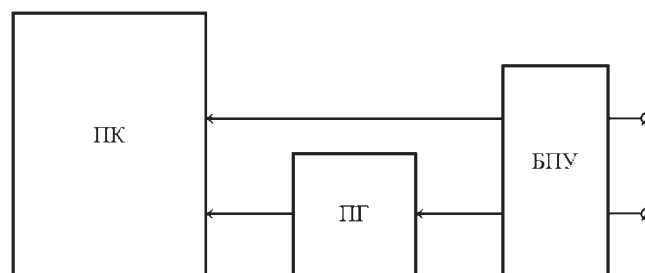


Рис. 2. Блок-схема установки ПТО: ПК – печь камерная; ПГ – парогенератор; БПУ – блок питания и управления

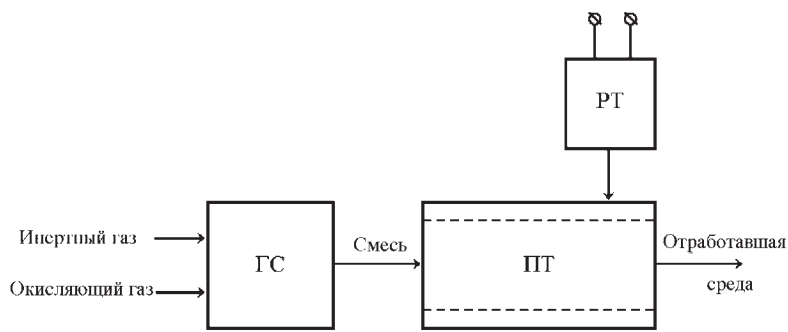


Рис. 3. Блок-схема электропечи для оксидирования металлоизделий в газовых смесях:

ГС – газовый смеситель; ПТ – печь трубчатая; РТ – регулятор температуры

также морфологической однородностью поверхности.

Оксидирование в инертно-реакционных контролируемых средах (ОИРКС) предполагает использование смеси инертных (Ar, Ne, He) и окисляющих (O₂, CO₂) газов. Для создания упрочняющих покрытий двухкомпонентная газовая смесь подается проточным способом в электропечь сопротивления (рис. 3). При этом сначала осуществляется заданный нагрев печи с помощью регулятора температуры, затем через нее пропускается газовая смесь, образующаяся в газовом смесителе, подсоединенном резиновыми шлангами к редукторам соответствующих газовых баллонов.

Формирование функциональных термооксидных покрытий на металлоизделиях осуществляется в специализированных промышленных нагревательных устройствах с применением различных реакционных окислительных сред. В зависимости от применяемого металлического материала изделий выбирается тип технологической среды оксидирования, режимы обработки и физико-технические параметры применяемого электронагревательного оборудования.

Для высокоэффективной термической обработки изделий, выполняемых из различных металлических материалов, разработано специализированное электропечное оборудование, позволяющее проводить групповое поверхностное упрочнение металлоизделий при использовании различных газов и их смесей в качестве рабочих реакционных сред.

Для получения упрочняющих термооксидных покрытий способом ВТО разработана однокамерная цилиндрическая электропечь сопротивления, конструкция которой предусматривает свободный доступ воздуха в ее рабочий объем (рис. 4).

Такая электропечь состоит из цилиндрической камеры 1, открытой с одной стороны для поступления воздушной среды в рабочий объем и закрытой с противоположной стороны крышкой 2 с помощью защелки 3. Внутри камеры 1 расположена термопара 4, а снаружи на корпусе – система нагрева в виде нагревательного элемента 5, соединенного с токоизолированными электрическими выводами 6 источника питания и закрытого с внешней стороны кожухом 7 с прокладками из теплоизолирующего материала, а также система охлаждения в виде двух охлаждающих контуров 8 со штуцерами для обеспечения циркуляции жидкой среды. Выполнение камеры оксидирования открытой с одной стороны и закрытой крышкой с другой создает возможность заполнения всего объема камеры воздушной окислительной средой, необходимой для осуществления процесса оксидирования изделий.

Снабжение крышки 2 защелкой 3 дает возможность открывать камеру 1 с другой стороны и при открытом с двух противоположных сторон положении камеры проводить требуемую техническую подготовку всей ее внутренней поверхности путем удаления со стенок образуемого нагара.

При использовании данной электропечи сначала производят загрузку обрабатываемых изделий в цилиндрическую камеру 1 через открытую, не имеющую крышки часть, и включают нагревательный элемент 5 для обеспечения заданной температуры в камере 1, используя при этом термопару 4. При достижении определенной температуры в камере с воздушной окисли-

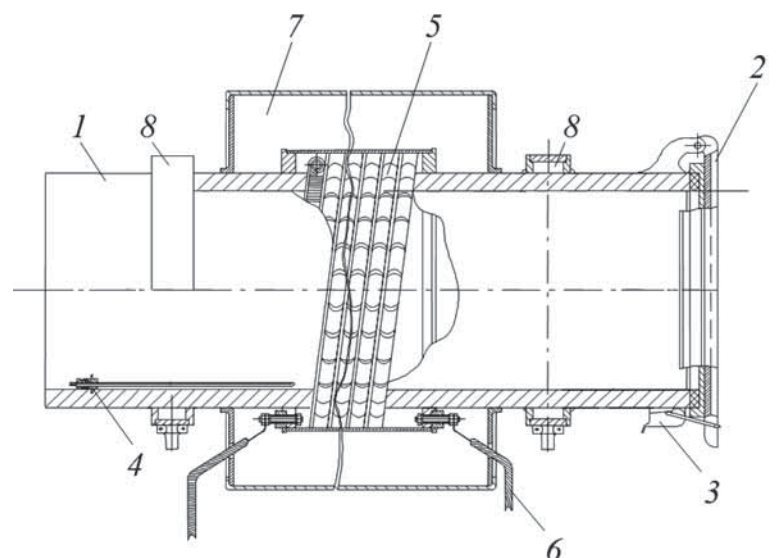


Рис. 4. Цилиндрическая однокамерная электропечь для ВТО металлоизделий

тельной средой осуществляют процесс оксидирования в течение требуемой продолжительности обработки. По окончании ВТО нагревательный элемент 5 отключают от источника питания, включают прокачку жидкости через контуры 8 и производят одновременное охлаждение камеры 1 с обработанными изделиями. После завершения охлаждения камеры и оксидированных изделий их извлекают из устройства.

Разработанная печь для ВТО характеризуется простотой конструкции, надежностью эксплуатации и технической эффективностью применения, а формируемые металлооксидные покрытия отличаются повышенными показателями функциональных качеств. В зависимости от вида и типоразмера обрабатываемых изделий габарит электропечи может изменяться в широком диапазоне.

Физико-технические характеристики цилиндрических электропечей сопротивления для термического оксидирования на воздухе и в среде перегретого водяного пара приведены ниже.

Напряжение питания, В	220...230
Род тока	Переменный
Частота тока питания, Гц	50
Продолжительность ВТО, ч	8,5...9,0
Охлаждающая среда	Вода
Диапазон температур нагрева, °С	50...1100
Габаритные размеры камеры, мм:	
длина	1000...3000
диаметр	300...700

Кроме термооксидирования в воздушной атмосфере в современном промышленном производстве широко применяется способ оксидирования в среде перегретого водяного пара, который получил большое распространение при создании износостойких, защитных, электроизоляционных, декоративных и других видов оксидных покрытий [3, 4]. Данный способ оксидирования может с высокой эффективностью использоваться при получении упрочняющих и коррозионно-стойких функциональных покрытий, например на стальных кольцах подшипников, изделиях прокатного производства.

Для осуществления процесса ПТО разработана электропечь (рис. 5), конструкция которой состоит из цилиндрической камеры 1, закрытой с двух сторон крышками 2 и 3, которая снабжена терморпарой 4 и системой нагрева в виде расположенного на корпусе нагревательного элемента 5, соединенного с токоизолированными электрическими выводами 6 источника

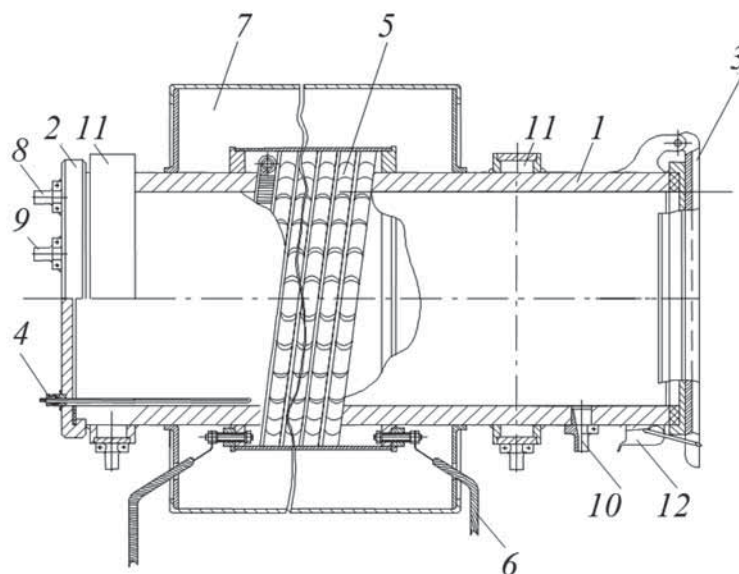


Рис. 5. Цилиндрическая однокамерная электропечь для ПТО металлоизделий

питания. С внешней стороны нагревательный элемент 5 закрыт кожухом 7 с прокладками из теплоизолирующего материала. В крышку 2 вмонтирован штуцер 8 подачи перегретого водяного пара с парогенератором для осуществления процесса оксидирования и штуцер 9 подачи охлаждающего газа для ускоренного охлаждения обработанных металлоизделий. Для отвода отработавших газов после оксидирования и охлаждения изделий в корпус камеры 1 вмонтирован газоотводящий штуцер 10. При этом данная электропечь имеет систему охлаждения камеры 1 в виде охлаждающих контуров 11 со штуцерами, обеспечивающими циркуляцию жидкой среды. Охлаждающие контуры 11 расположены на корпусе камеры 1 с двух сторон нагревательного элемента 5 на равном от него расстоянии. Крышки 2 и 3 снабжены уплотнительными кольцами, кроме того, крышка 3 снабжена защелкой 12 для открывания и закрывания камеры 1.

Технологический процесс обработки в электропечи начинается при открытой крышке 3, когда в камеру 1 производят загрузку группы обрабатываемых изделий. Закрыв крышку 3 с помощью защелки 12, включают электропитание нагревательного элемента 5 для обеспечения заданной температуры в камере 1, используя при этом терморпару 4. Через газоподводящий штуцер 8 подают в камеру 1 перегретый водяной пар и осуществляют процесс оксидирования изделий. После завершения ПТО прекращают подачу пара, нагревательный элемент 5 отключают от источника питания и обработанные изделия охлаждают в камере 1 при проточной подаче охлаждающего инертного газа

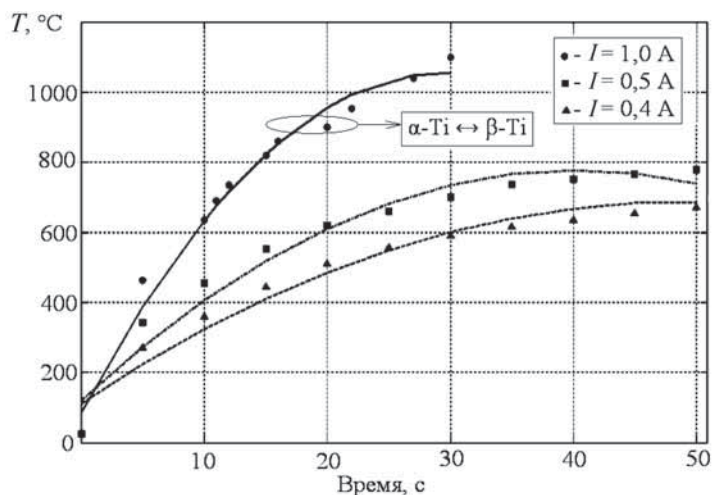


Рис. 6. Нагрев титановых изделий при различной силе тока I (сплошная линия соответствует аппроксимирующей функции)

(Ar, Ne, He) через штуцеры 9 и 10. Одновременно с этим осуществляют охлаждение камеры оксидирования 1 до нормальной температуры, включив при этом циркуляцию охлаждающей жидкой среды через контуры 11. После завершения охлаждения термооксидированных изделий, открыв крышку 3, их извлекают из камеры 1. Оксидированные металлоизделия возможно охлаждать в камере 1 при прекращенной подаче пара и выключенном нагреве печи (инерционное охлаждение).

Присутствие в конструкции камеры оксидирования системы охлаждения в виде циркуляционных контуров 11 с охлаждающей жидкой средой обеспечивает ускоренное снижение температуры в камере до необходимого уровня для загрузки и оксидирования очередной партии тех или иных изделий.

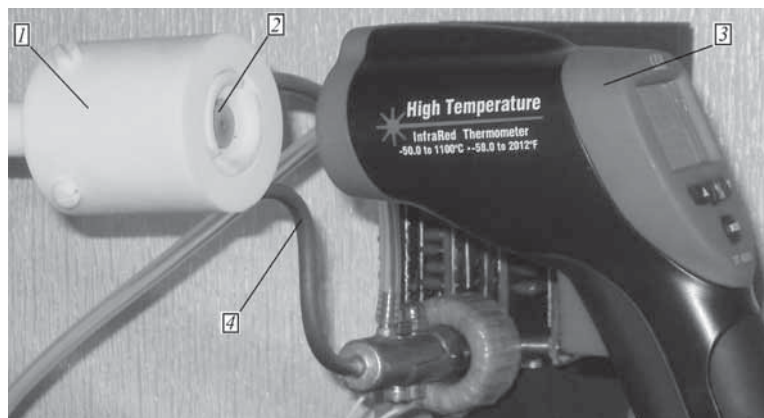


Рис. 7. Оборудование для измерения температуры образцов бесконтактным методом:

1 – кожух алюмооксидного индуктора 4 с образцом 2; 3 – ИК-пирометр

Разработанное устройство для ПТО характеризуется простотой конструктивного исполнения и эксплуатационной надежностью, а получаемые термооксидные покрытия упрочняют металлическую поверхность изделий, придают ей повышенные показатели твердости, износостойкости, коррозионной устойчивости.

Индукционно-термическое оксидирование (ИТО) представляет собой модернизированный процесс ВТО металлической основы, который осуществляется в керамическом или кварцевом муфеле [8]. Температура и скорость нагрева изделия при индукционном нагреве определяются величиной электропотребления, которая не превышает 300 Вт (рис. 6). Параметры нагрева были получены с применением бесконтактного метода измерения температуры при использовании инфракрасного (ИК) пирометра DT-8828 с пределом измерения от -50 до $+1100$ °C, погрешностью $\pm 0,1$ °C (рис. 7).

Разработанное устройство ИТО состоит из блока питания основного (БПО), генераторного блока (ГБ) и вспомогательного блока (ВБ) (рис. 8). БПО обеспечивает функционирование ГБ, питающего индуктор переменным током. Драйвер ГБ питается стабилизированным напряжением $+15$ В от БПО, выходной каскад, выполненный на схеме полумостового типа, – постоянным напряжением $+300$ В от БПО. ВБ обеспечивает напряжение $+12$ В для питания вентилятора М1 принудительного охлаждения ГБ, насоса М2 и вентилятора М3 системы водяного охлаждения индуктора. Конструктивные решения БПО и ВБ соответствуют имеющимся нормативным требованиям ГОСТ 12.2.007.0–75.

Результаты РЭМ поверхности образцов показали наличие металлооксидных тонких покрытий (рис. 9) [5]. Микроструктура поверхности представляет собой рельеф исходной металлической основы после пескоструйной обработки (рис. 9, а, б). Более детальное исследование в субмикрометровом масштабе позволяет выявить тонкую структуру, представленную округлыми зернами и мельчайшими порами (рис. 9, в, г). При температуре ИТО, равной 800 °C, и выдержке 3 мин на выступах формируются зерна, средний размер которых $180...450$ нм, а во впадинах – $80...150$ нм. При температуре 1200 °C и выдержке от 2 до 5 мин образуются металлооксидные покрытия, характеризующиеся более рыхлой и шероховатой структурой.

Методом энергодисперсионного рентгенфлуоресцентного анализа (ЭДРФА) выявлен химический состав образцов, полученных на оптимальных режимах: основными компонентами сформированного металлооксидного тонко-

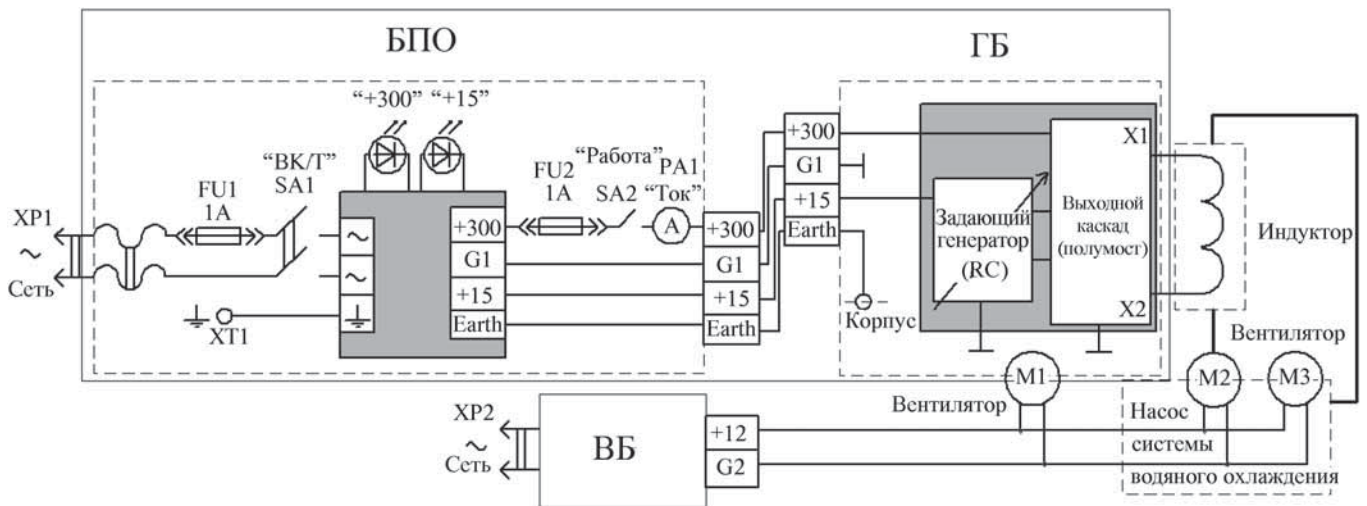


Рис. 8. Принципиальная схема устройства индукционного нагрева

слоистого покрытия являются никель (42...67 %), хром (29...37 %) и кислород (18...19 %). Присутствуют также примеси марганца (1,2...3,4 %), железа (0,52...0,95 %) и следы титана, кремния, алюминия, общее содержание которых составляет менее 1,5 %.

Твердость в нанометровом масштабе исследования характеризуется двукратным возрастанием до $(9,55 \pm 4,45)$ ГПа (температура ИТО 800°C , продолжительность 3 мин) по сравнению с показателями для металлической основы после пескоструйной обработки, составляющими величину $(4,07 \pm 2,03)$ ГПа. Модуль упругости образцов покрытий также возрастает вдвое, до $(201,63 \pm 37,68)$ ГПа в сравнении со сталью 12Х18Н10Т – $E = (112,90 \pm 29,03)$ ГПа.

Выводы

1. Созданы оригинальные конструкции цилиндрических электропечей сопротивления, позволяющие получать упрочняющие термические покрытия на различных металлоизделиях в условиях их обработки (оксидирования) в реакционных окислительных средах.

2. Приведены характеристики конструктивных элементов и технологических параметров электропечей сопротивления, показана возможность проведения группового газотермического оксидирования изделий и их последующего охлаждения в инертных газах в одной рабочей камере цилиндрической электропечи.

3. Разработанное устройство ИТО малогабаритных изделий различного назначения обеспечивает ускоренное модифицирование их поверхностного слоя металлооксидными соединениями. Достижение заданной температуры $600...1200^\circ\text{C}$ обеспечивается за промежуток времени, характеризуемый интервалом от 10 до 30 с соответственно. Изменяя величину потребляемой мощности, можно управлять величиной и скоростью нагрева, контролировать процесс выдержки при заданной температуре,

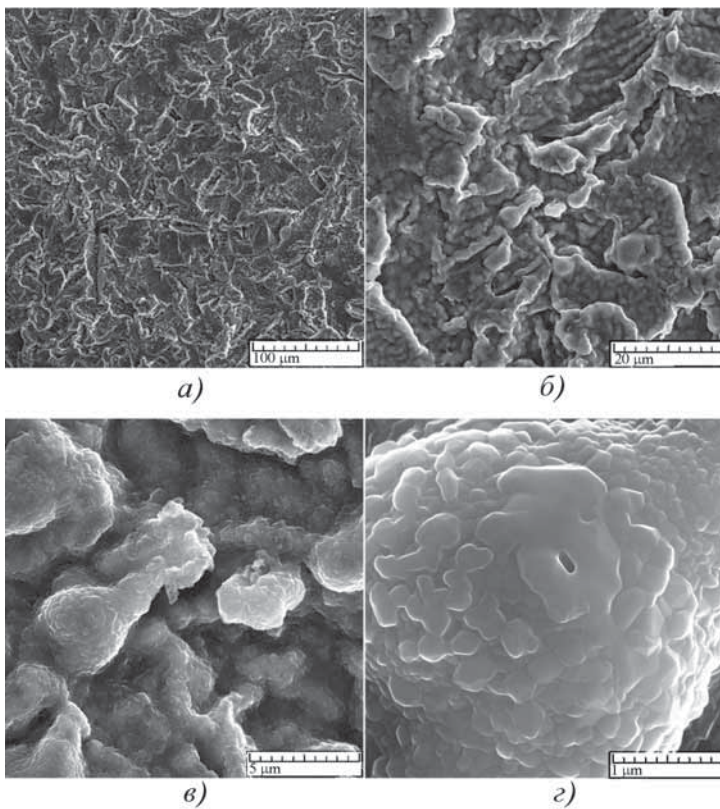


Рис. 9. Морфология металлооксидного покрытия, полученного при температуре ИТО, равной 800°C , и продолжительности 3 мин

задавать необходимый вид термического цикла, а также скорость охлаждения. Результаты исследования и анализ влияния режимов ИТО на морфологическую гетерогенность микро- и наноструктуры служат основанием для разработки технологических рекомендаций по модификации поверхности медико-технических изделий из медицинской нержавеющей стали, например эндопротезов. Установлено, что тонкослойное металлооксидное покрытие с субмикрометровой и нанокристаллической структурой, формируемое при нагреве до 800...1000 °С и выдержке не менее 3 мин, характеризуется развитой морфологической гетерогенностью поверхностного слоя, а также высокой твердостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Родионов И.В., Мудрова А.Л. Разработка электроннагревательного оборудования для получения функциональных термооксидных покрытий на стальных кольцах подшипников // Инновационная деятельность предприятий по исследованию, обработке и получению современных материалов и сплавов: сб. материалов II Междунар. науч. конф. Орск, Орский гуманитарно-технологический институт. В 2 т. Т. 2. М.: Машиностроение, 2012. С. 117–122.
2. Биркс Н., Майер Дж. Введение в высокотемпературное окисление металлов. М.: Metallurgia, 1987. 183 с.
3. Окисление и обезуглероживание стали / под ред. А.И. Вашенко. М.: Metallurgia, 1972. 336 с.
4. Гладкова Е.Н. Теоретические основы и технология паротермического оксидирования. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. 99 с.
5. Модификация металлооксидными соединениями поверхности медицинских изделий из стали 12Х18Н10Т при воздействии токов высокой частоты / А.А. Фомин, И.В. Родионов, Н.В. Петрова, А.М. Захаревич // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 3 (58). Вып. 2. С. 314–317.
6. Фомин А.А., Телегин С.В., Коломиец И.А. Наноструктурная модификация поверхности титана лазерным излучением // Научно-технические проблемы нанотехнологий и интеллектуальные системы в нанотехнологии: сб. материалов Всерос. мол. конф. (21–22 мая 2012 г.). Саратов: ООО "Издательство Научная книга", 2012. С. 128–130.
7. Гладкова Е.Н. Основы теории получения защитных пленок термической обработкой в атмосфере пара // Материалы 23-й науч.-техн. конф. СПИ. Саратов: Изд-во СПИ, 1970. С. 35–43.
8. Фомин А.А., Штейнгауз А.Б., Лясников В.Н. Оборудование и технология индукционно-термической обработки малогабаритных металлических изделий с биосовместимыми покрытиями // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 2 (56). Вып. 2. С. 186–193.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ГУММИРОВАННЫЕ ДЕТАЛИ МАШИН

Н.С. Пенкин, В.Г. Копченков, В.М. Сербин, А.Н. Пенкин

2013 г. Объем 245 с. Формат 60x88 1/16 Обложка ISBN 978-5-94275-701-4 Цена 500 р.



Освещены вопросы исследования, конструирования, производства, испытания и эффективности применения гуммированных деталей машин и оборудования. С учетом основных критериев работоспособности разработана структурная классификация гуммированных деталей, а на основе полученного энергетического критерия – плотность поглощенной энергии при динамическом воздействии на резину абразивных частиц.

Рассмотрены вопросы износостойкости эластомеров в различных абразивных средах (гидро- и газоабразивной, абразивной массе, абразивной прослойке, при кавитации и др.) и возможные механизмы изнашивания. Показана высокая эффективность гуммированных деталей по сравнению с металлическими при работе в абразивных средах (в 3–10 раз выше по износостойкости).

Второе издание (1-е изд. 1977 г.) переработано и дополнено новыми материалами по работоспособности широкого круга гуммированных деталей с учетом новых данных исследований, большого опыта по конструированию и технологии изготовления и длительной эксплуатации оригинальных крупногабаритных со сложной конфигурацией и большой резиноемкостью деталей.

Для конструкторов, технологов машиностроительных предприятий, специалистов, занимающихся эксплуатацией и ремонтом машин с гуммированными деталями, может быть использована преподавателями и студентами технических вузов и техникумов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромывский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 620.22:004.891.3

Л.П. Шестопалова, В.А. Александров

(Московский автомобильно-дорожный государственный университет (МАДИ))

E-mail: ntibr@mail.ru

Методика определения размера наночастиц

Предложена методика, позволяющая определить размер частиц мелкодисперсного порошка по измерению скорости его осаждения из суспензии порошка в воде.

Ключевые слова: закон Стокса, тонкодисперсный порошок, скорость оседания частиц.

Method allowing to determine the particle size of the fine powder to measure its rate of deposition of the powder in water suspension.

Keywords: Stokes' law, fine powder, rate of subsidence particle.

Научный интерес к наноматериалам в дисперсном или компактном виде связан с ожиданием возможного влияния размера частиц порошка и зерен объемного материала или покрытия на их свойства и свойства материала в целом. Имеются убедительные доказательства существенного влияния дисперсности вещества на характер протекания физических и химических процессов, физические и механические свойства материалов.

В последнее десятилетие интерес к методам получения сверхмелкозернистых объемных и дисперсных материалов существенно вырос, так как обнаружилось (в первую очередь, на металлах), что уменьшение размера структурных элементов (частиц, кристаллитов, зерен) ниже некоторой пороговой величины может приводить к заметному изменению свойств [1–5]. Исследования сверхмелкозернистых материалов показали, что уменьшение размера кристаллитов ниже некоторой пороговой величины может приводить к значительному изменению свойств.

Размерные эффекты появляются, когда средний размер кристаллических зерен не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зерен менее 10 нм. Изучение свойств сверхмелкозернистых материалов требует учета не только их состава и структуры, но и дисперсности.

Таким образом, размер частиц является одним из наиболее важных параметров, определяющих

специфику свойств и область применения наноматериала.

Так как в нанокристаллических объемных и дисперсных материалах наблюдается зависимость свойств от размера структурного элемента (частицы, зерна), то определение размера частичек тонкодисперсных порошков, получаемых различными способами, является одной из основных.

Для определения дисперсности порошка разработан метод, использующий закон Стокса, согласно которому порошки с разной дисперсностью падают с разной скоростью. Предложена методика, позволяющая определить размер частиц мелкодисперсного порошка по измерению скорости его осаждения из суспензии порошка в воде.

В работе определяли размер частиц ϵ -фазы, полученной в процессе азотирования, представляющих суспензию порошка в жидкости.

Основа метода – определение массы осадка. Принцип устройства для определения размера частиц порошка (рис. 1) заключается в следующем: чашку электронных весов погружают во взвесь (суспензию порошка в воде), порошок постепенно оседает на чашке весов, при этом возрастает ток соленида, который удерживает чашку в неподвижном состоянии. Текущее время и изменение тока соленида записываются автоматически. Для более корректного определения размера частиц порошка чашка электронных весов должна находиться ближе ко дну.

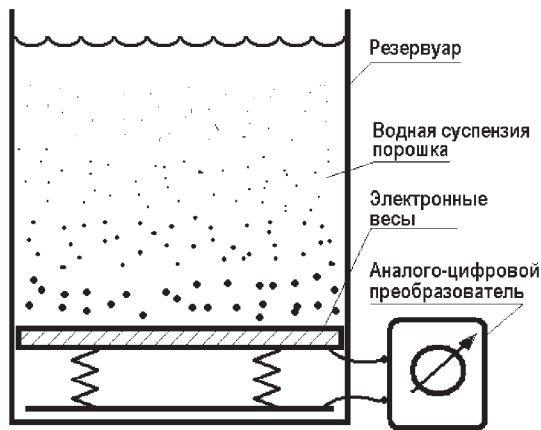


Рис. 1. Схема устройства для определения размера частиц порошка

Известна формула, вытекающая из закона Стокса, связывающая скорость оседания частицы суспензии с ее радиусом:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta h}{2 \Delta d g}} \sqrt{\frac{l}{t}} = k \sqrt{\frac{l}{t}},$$

- где r – радиус частицы;
- η – вязкость жидкости;
- Δd – разность плотностей частицы и жидкости;
- h – высота, с которой оседает частица;
- l – расстояние, которое проходит частица за время t ;
- g – ускорение свободного падения;
- k – постоянная для данной системы и прибора величина.

Во время оседания мелкодисперсного порошка из нитридов было сделано 6 взвешиваний, после чего весь порошок осел на чашке и вес чашки стал постоянным. Было учтено, что на первых стадиях вес меняется быстрее, чем в конце процесса оседания. Исследуемый мелкодисперсный порошок ϵ -фазы, снятый с поверхности азотированного слоя, состоял из частиц

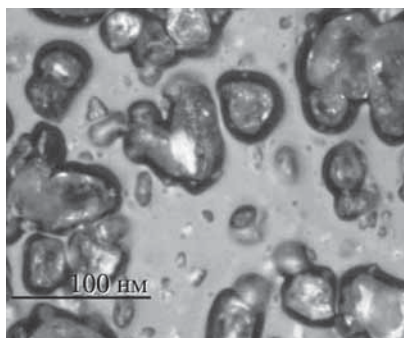


Рис. 2. Порошок ϵ -фазы, снятый с поверхности азотированного слоя

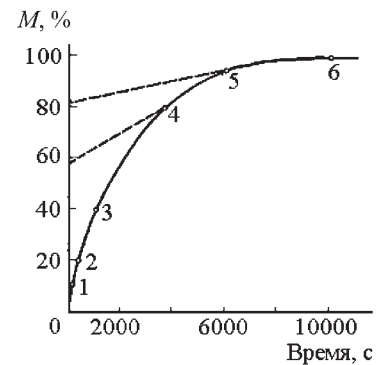


Рис. 3. Кривые оседания осадка, представляющего смесь частицы любой массы

не одного строго заданного размера, а из нескольких фракций (рис. 2). Состав частиц по радиусам меняется непрерывно в определенных пределах. Поэтому выбранные в данной работе значения времени t в итоге определили границы каких-то условных фракций.

Полученные результаты записывали в таблицу: время в секундах, масса осадка – интеграл по току, масса осадка в процентах, масса данной фракции M в процентах от общей массы осадка, радиус частиц r в метрах. Вычисляя радиус, сначала удобно рассчитать константу k . Примем $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $\eta = 0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\Delta d = d(\text{Fe}_{2-3}\text{N}) - d(\text{вода}) = 3120 - 1000 = 2120 \text{ кг/м}^3$, $h = 0,01 \text{ м}$, тогда $k = 0,00002$.

График, построенный по табличным результатам, показал кривую оседания (рис. 3). Поскольку в смеси огромное количество плавно переходящих друг в друга фракций, то кривая осаждения – это предельный случай ломаной линии при числе фракций, стремящихся к бесконечности. Произвольно делим кривую на шесть участков, отвечающих шести фракциям.

Возьмем самый начальный участок кривой осаждения 0–1, он отвечает осаждению самых крупных частиц. Осаждение этих частиц заканчивается в точке 1 и содержание данной фракции составляет 5%. Этот участок получается, если продолжить линию 1–2 до пересечения с осью ординат. Содержание фракции 1–2 получается, если продлить прямую 2–3 до пересечения с осью ординат и вычесть процент предыдущей фракции. Так можно вычислить относительное содержание всех выбранных нами фракций и построить дифференциальную кривую осаждения. Для этого по оси абсцисс откладывают значения граничных радиусов частиц данной фракции r , а по оси ординат – величины $M / \Delta r$, где M – относительное содержание фракции и Δr – интервал радиусов частиц фракции. Площадь каждого прямоугольника равна массовому содержанию фракции. Соединив средние точки оснований прямоугольников плавной линией, получим

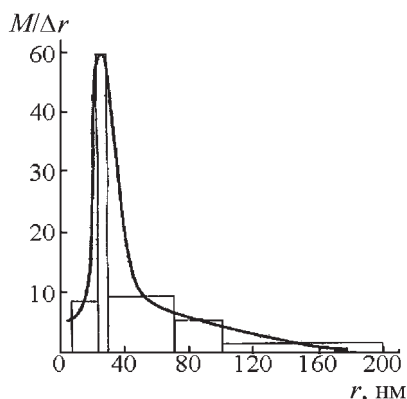


Рис. 4. Дифференциальная кривая распределения частиц тонкодисперсного порошка по фракциям

дифференциальную картину распределения частиц по фракциям (рис. 4).

По полученной кривой распределения частиц можно определить, что основной размер порошка ра-

вен 40...60 нм. Так как в данном случае это порошок нитрида железа, полученного на поверхности детали из стали 40Х13, работающей на износ, то можно предположить, что он будет являться естественной смазкой и тем самым износостойкость изделия повысится.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Наука-Физматлит, 2000. 224 с.
2. Минько Н.И., Нарцев В.М. Методы получения и свойства нанообъектов. Белгород: изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. 105 с.
3. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Получение и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. М.: ЭЛИЗ, 2007. 148 с.
4. Структура и свойства малых металлических частиц / И.Д. Морохов, В.И. Петин, Л.И. Трусов, В.Ф. Петрунин // УФН. 1981. Т. 133. № 4. С. 653–692.
5. Шестопалова Л.П., Александров В.А. Особенности дисперсного упрочнения хромистых сталей при циклическом оксинитрировании // Материалы XV Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г. Горшкова. 2009. Т. 1. С. 163–164.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный и др.

2012. Объем 528 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-619-2 Цена 1500 р.



Изложены наукоёмкие (высокие) технологии в машиностроении по всем технологическим переделам: производство материалов, отливок; получение заготовок обработкой давлением; сварочное производство; обработка заготовок; модификация поверхностных слоев деталей; сборочное производство.

Особое внимание уделено наукоёмким технологиям при обработке заготовок (обработке на станках с ЧПУ и самообучающихся станках с адаптивным управлением), функционально-ориентированным и модульным технологиям, лазерным, электро-физико-химическим и нанотехнологиям.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий. Может быть полезна для студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 621.793.7

В.К. Белов, М.В. Дьякова, П.А. Дьяков, О.С. Железков
(Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова)
E-mail: belovalkon@mail.ru

Влияние режимов ультразвуковой финишной обработки на параметры микротопографии обрабатываемых поверхностей

Показано существенное влияние технологических режимов ультразвуковой финишной обработки (УФО) на параметры и функциональные характеристики шероховатости поверхности. Приведены исследования по одному-временному использованию операции УФО и геомодификаторов трения. Данные исследования позволили подобрать оптимальные режимы УФО для получения микротопографии поверхности, которая будет подвержена меньшему износу.

Ключевые слова: ультразвуковая финишная обработка, шероховатость поверхности, эксплуатационные свойства, износостойкость.

The significant influence of technological modes of ultrasonic finishing processing (UFP) on parameters and functional characteristics of the surface roughness is shown. Researches of combined using of operation UFP and lubricant component additives are given. These researches allowed defining the UFP appropriate modes for receiving the surface microtopography which will be subject to smaller wear.

Keywords: ultrasonic finishing processing, surface roughness, operational properties, wear resistance.

Принципы работы ультразвуковой финишной обработки

Одним из эффективных видов обработки в технологии машиностроения является *ультразвуковая финишная обработка* (УФО), в результате которой формируется шероховатость поверхности и образуется поверхностный наклепанный слой с благоприятными сжимающими остаточными напряжениями [1–4]. Эти характеристики поверхности, определяемые режимами обработки, значительно влияют на работоспособность и износостойкость деталей машин.

Технологическое оборудование для УФО (рис. 1) работает следующим образом. Генератор 4 вырабатывает электрические импульсы с ультразвуковой частотой 20...22 кГц, которые подаются на обмотку магнитострикционного преобразователя 5. Здесь электрические импульсы преобразуются в механические колебания с той же частотой и через волновод 3 передаются на выполненный из твердого материала индентор 2 (сталь ШХ15 твердостью 64 HRC), который совершает колебания и обрабатывает поверхность движущейся с определенной скоростью детали 1.

Для проведения эксперимента были изготовлены диски с наружным диаметром 110 мм и шириной

25 мм. Материал дисков – сталь 50Г, конструкционная легированная сталь, применяемая для изготовления самых разнообразных деталей машин. Диски зажимались в центрах токарного станка и подвергались УФО. При этом варьировались следующие режимы обработки: первоначальная глубина внедрения деформирующего инструмента в материал $p = 0,1...0,3$ мм (измерялось по делениям лимба токарного станка), частота вращения заготовки $\omega =$

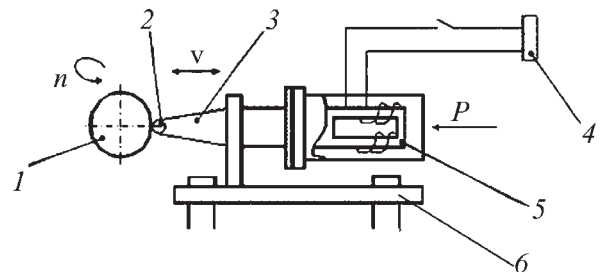


Рис. 1. Технологическое оборудование для УФО:
1 – обрабатываемая деталь; 2 – индентор; 3 – концентратор-волновод; 4 – генератор; 5 – магнитострикционный преобразователь; 6 – направляющие

$= 240...480 \text{ мин}^{-1}$, частота колебаний индентора $\nu = 22 \text{ кГц}$.

Для исключения влияния побочных факторов, например влияния разной степени наклепа, все образцы после обработки были подвергнуты термообработке для снятия остаточных напряжений. Твердость всех образцов осталась неизменной. Для повышения достоверности эксперимента для каждого режима обработки было использовано несколько одинаковых образцов.

Цель работы – исследование влияния режимов ультразвуковой финишной обработки на микротопографию обрабатываемых дисков для определения оптимального режима получения поверхности, подверженной наименьшему износу.

Связь режимов УФО с параметрами микротопографии поверхности

Исследования микротопографии поверхностей, обработанных при различных режимах УФО, осуществлялись с использованием профилометра "Mahr S2" (Германия) в научно-исследовательском центре "Микротопография" ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова". При этом измерялись следующие точечные параметры шероховатости: Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости, Rsk – коэффициент асимметрии профиля шероховатости, Pc – среднее число вершин на 1 см профиля, τ – корреляционная длина.

Все измерения осуществляли по пяти трассам на каждом образце при выделении профилей шероховатости стандартными фильтрами Гаусса с верхней и нижней границами $\lambda_c = 2,5 \text{ мм}$ и $\lambda_s = 0,008 \text{ мм}$ и профилей волнистости с верхней и нижней границами $\lambda_c = 25 \text{ мм}$ и $\lambda_s = 0,08 \text{ мм}$.

Результаты измерений представлены в табл. 1.

На основании анализа полученных результатов установлено:

1. При величине внедрения инструмента $p = 0,15 \text{ мм}$ среднеарифметическое отклонение профиля шероховатости Ra получается максимально высоким, а увеличение частоты вращения заготовки приводит к увеличению параметра Ra . Параметр Ra оказывает существенное влияние на способность поверхности захватывать смазку. Таким образом, увеличение данного параметра приводит к увеличению количества смазки в зонах контакта трущихся деталей, что приводит к снижению коэффициента трения. Однако при слишком высоких значениях параметра Ra фрикционное трение возрастает, что связано с интенсивным взаимодействием пиков контактирующих поверхностей. Для повышения износостойкости трущихся поверхностей параметр Ra должен иметь оптимальное значение.

2. Полученные значения коэффициента асимметрии профиля шероховатости Rsk свидетельствуют о преобладании выступов над впадинами при всех режимах обработки. Увеличение величины внедрения инструмента приводит к увеличению коэффициента асимметрии профиля, при частоте вращения заготовки $\omega = 300 \text{ мин}^{-1}$ коэффициент асимметрии принимает максимальное положительное значение. Параметр Rsk позволяет спрогнозировать загрязненность поверхности образца при его работе, а также определить характер износа поверхности. Чем меньше параметр Rsk , тем больше будет налипать грязи и частиц износа на образец. При этом высокое положительное значение данного параметра приводит к быстрому износу вершин пиков профиля.

3. Среднее число вершин на 1 см профиля Pc приведено в табл. 1 и определяется следующим образом. Задаются два уровня $C1$ и $C2$, превышение которых поочередно профилем шероховатости расценивается

Таблица 1

Зависимость точечных амплитудных и частотных параметров микротопографии поверхности дисков от режимов УФО

Параметр	Режим обработки						
	$p, \text{ мм} (\omega = 240 \text{ мин}^{-1})$				$\omega, \text{ мин}^{-1} (p = 0,1 \text{ мм})$		
	0,10	0,15	0,25	0,30	240	300	480
$Ra, \text{ мкм}$	0,27	0,42	0,39	0,36	0,28	0,25	0,45
Rsk	-0,40	-0,20	0,10	0,45	-0,40	0,20	-0,30
$Pc, 1/\text{см}$	39	25	7	40	39	27	42
$\tau, \text{ мкм}$	20	23	60	70	20	22	60

как один выступ профиля. Параметр R_c определяется числом этих выступов на 1 см.

Данный параметр имеет огромное влияние на износостойкость поверхностей. При малом количестве пиков распределение контактных давлений происходит неравномерно. Отдельные пики подвержены быстрому истиранию. При увеличении параметра R_c давление на отдельный пик резко падает, что приводит к значительному уменьшению его износа и поверхности в целом.

Полученные зависимости числа пиков неровностей R_c , определяемых на уровне $C = \pm 0,5$ мкм, от режимов обработки показывают, что увеличение внедрения инструмента до $p = 0,25$ мм снижает параметр R_c , однако при дальнейшем увеличении p параметр R_c резко возрастает. Режим с частотой вращения заготовки $\omega = 300$ мин⁻¹ не рекомендуется, так как при нем число элементов профиля минимально.

Из табл. 1 следует, что оптимальными режимами обработки являются величины внедрения инструмента $p = 0,1$ и $0,3$ мм и частоты вращения $\omega = 240$ и 480 мин⁻¹.

4. Графики автокорреляционных функций (ACF) показывают "изрезанность" профиля: чем резче спадает ACF , тем профиль имеет большую пространственную частоту. Корреляционная длина τ является точечной оценкой автокорреляционной функции и определяется как пространственный сдвиг, когда $ACF = 1/e \approx 1/2,7$.

Интерес представляют поверхности с малыми корреляционными расстояниями профиля, т.е. с поверхностью, у которой ACF спадает очень резко. Такая поверхность имеет матовый вид и хорошо захватывает смазку.

Экспериментальные данные, приведенные в табл. 1, показывают, что для получения минимального τ следует использовать следующие режимы: внедрение инструмента $p = 0,10...0,15$ мм, частота вращения заготовки – $\omega = 240...300$ мин⁻¹.

5. Огромное влияние на износостойкость поверхности оказывает фактическая площадь контакта микронеровностей. Данная зависимость характеризуется опорной кривой профиля шероховатости поверхности.

Опорная кривая представляет собой сумму длин отрезков l_i в пределах базовой длины λ_c , отсекаемой на всех возможных уровнях Z в материале профиля

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{\lambda_c}$$

линией эквидистантной средней линии:

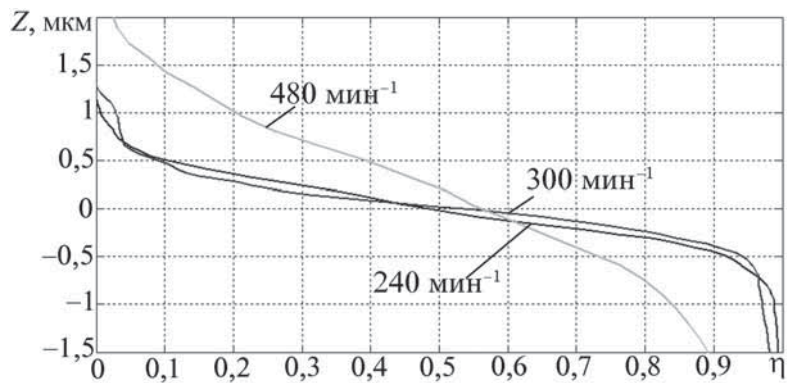


Рис. 2. Опорные кривые профиля шероховатости для разных частот вращения заготовки ω при $p = 0,1$ мм

Для уменьшения погрешности данной характеристики опорная кривая определяется только в интервале $Z = (0,05...0,80)Z_{\max}$, где Z_{\max} – расстояние между самой большой вершиной и самой большой впадиной в пределах оценки.

На рис. 2 представлены опорные кривые профиля для разных частот вращения ω при $p = 0,1$ мм. Вид опорной кривой при малых η характеризует скорость приработки поверхности. Из графиков видно, что у поверхностей, полученных при обработке с частотами 240 и 300 мин⁻¹, быстрее достигается равновесная шероховатость, что снижает износ поверхности в целом.

6. Важным фактором при расчете износостойкости является коэффициент трения, который пропорционален тангенсу углов наклона $\text{tg}\alpha$ единичных микронеровностей поверхности. Наглядно оценить данную характеристику позволяет построение профилей шероховатости дисков в фазовом пространстве.

Для этого профиль задается взаимосвязанными векторами: вектором ординат профиля и вектором производных профиля в этих точках.

Каждая точка фазового портрета одновременно характеризует высоту и угол наклона профиля в данной точке. Такая характеристика позволяет оценить не только среднее значение углов наклона, но и их разброс по высоте.

На рис. 3 представлены фазовые траектории профилей поверхности. Проекция фазовой траектории позволяет получить фазовый портрет профиля шероховатости.

Полученные зависимости показывают, что образец с частотой $\omega = 300$ мин⁻¹ имеет минимальный разброс углов наклона. Такой образец будет изнашиваться равномерно по поверхности.

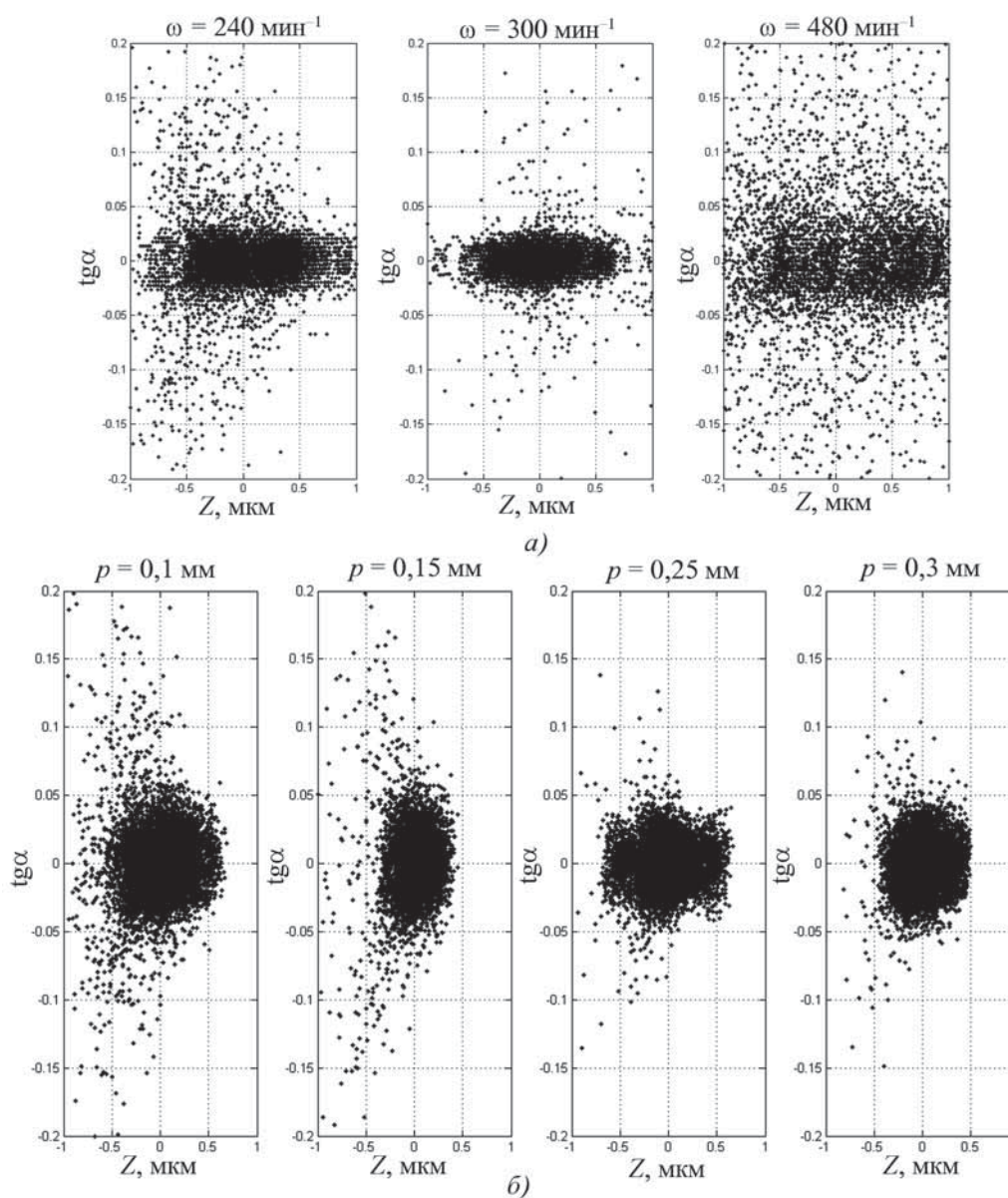


Рис. 3. Фазовые портреты профиля шероховатости для разных частот вращения заготовки (а) и величин внедрения инструмента (б)

Увеличение величины внедрения инструмента приводит к снижению величин углов наклона микрограней, а следовательно, к снижению коэффициента трения.

7. Однако все рассмотренные выше параметры не в полной мере характеризуют топологию микротопографической поверхности. Поэтому в настоящее время введены совершенно новые характеристики, такие как фрактальная размерность D и область самоподобия SRC , которые указывают на самоподобие неровностей в заданном масштабном интервале профиля (рис. 4, а). Их связь с ранее рассмотренными характеристиками до настоящего времени не рассматривалась.

Линейно-шаговая фрактальная размерность D определяется по формуле

$$Dl = 1 - \operatorname{tg} \beta,$$

где β – тангенс угла наклона графика зависимости логарифма относительной длины профиля ε_L от логарифма масштаба длины md , где $m = 1, 2, 3, 4, \dots$; d – шаг дискретизации профиля. Значение рассматриваемого масштаба md , когда ε_L впервые становится равной единице, обозначается как SRC и называется областью самоподобия. Считается, что при шаговых параметрах больших SRC профиль можно считать объектом евклидовой геометрии (рис. 4, б).

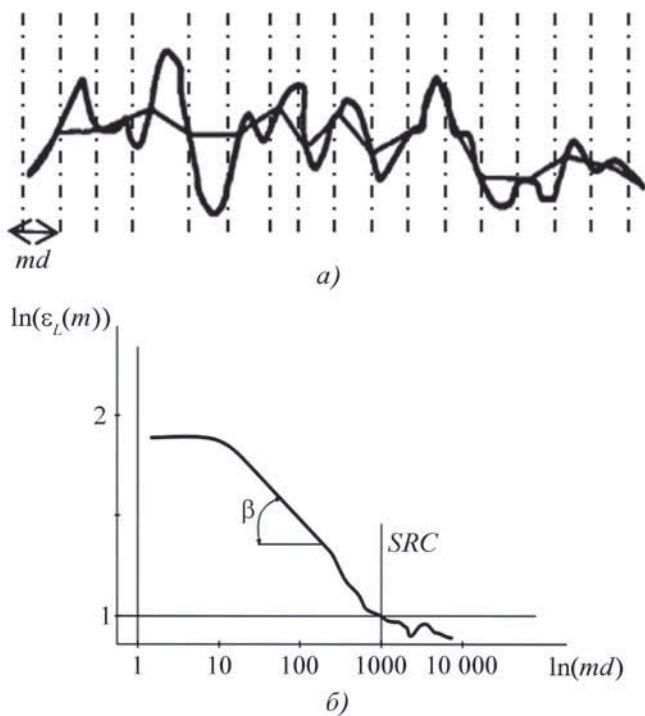


Рис. 4. К определению фрактальных характеристик профиля

D незначительно отличается от единицы и поэтому оценку фрактальной размерности делают с помощью величины, называемой линейно-шаговой фрактальный комплексный параметр – $Lsfc$:

$$Lsfc = 1000 (Dls - 1).$$

Фрактальные характеристики влияют на площадь фактического контакта двух взаимодействующих поверхностей, т.е. при увеличении фрактальной размерности площадь контакта уменьшается.

Данные фрактальных характеристик для образцов с различными режимами обработки представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что наибольшую фрактальную размерность имеют поверхности, полу-

ченные при величине внедрения $p = 0,25$ мм и частоте $\omega = 480$ мин⁻¹. Область самоподобия SRC при увеличении внедрения p уменьшается. Частота вращения заготовки ω на параметр SRC практически не влияет.

Выводы

В работе показано существенное влияние технологических режимов УФО на параметры и функциональные характеристики профиля шероховатости.

Подбор необходимых параметров шероховатости поверхности осуществлен для деталей машин, работающих в условиях граничного трения при недостаточном количестве смазки и больших контактных давлениях. Основными свойствами поверхностей таких деталей является захват смазки неровностями и их контакт между собой.

Для получения шероховатости поверхности с такими параметрами самым оптимальным является режим ультразвуковой обработки с глубиной внедрения деформирующего инструмента в материал $p = 0,15$ мм и частотой вращения заготовки $\omega = 240$ мин⁻¹.

Технологические режимы обработки должны подбираться под каждую конкретную задачу. Все зависит от того, какие характеристики поверхности необходимо получить: будет ли деталь работать со смазкой или при трении без смазочного материала, важны ли декоративные качества поверхности или важнее ее износостойкость. Учитывая зависимости, полученные в данной статье, можно подобрать оптимальный режим обработки для каждого конкретного случая.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. СПб.: ГИТМО (ТУ), 2001. 264 с.
2. Санжаровская М.И. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка поверхности металлов // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. 2008. № 4. С. 1184.
3. Холопов Ю.В. Безабразивная ультразвуковая финишная обработка металлов технология XXI века // Металлообработка. 2001. № 4. С. 16–20.
4. Клименов В.А. Ультразвуковая поверхностная обработка – метод повышения ресурса работы бандажей колес локомотивов // Тяжелое машиностроение. 2009. № 12. С. 24–28.
5. Ковалевская Ж.Г., Жуков А.П., Клименов В.А. Расчет влияния микрорельефа поверхности, создаваемого ультразвуковой обработкой на процесс охлаждения напыленного материала // Известия Томского политехнического университета. 2011. № 2. С. 120–125.
6. Белов В.К. Профили поверхности. 2-е изд. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", 2007. 260 с.
7. Белов В.К. Элетроэрозионная подготовка рабочих валков для дрессировки автолиста // Сталь. 2007. № 3. С. 52–56.
8. Белов В.К., Беглецов Д.О., Горбунов А.В. Сравнительный анализ способов обработки поверхности валков для производства автолиста // Сталь. 2009. № 8. С. 50–53.
9. Белов В.К. Влияние разных способов обработки валков на топографию поверхности холоднокатанных листов // Сталь. 2010. № 1. С. 68–72.

Таблица 2

Фрактальные характеристики профилей шероховатости

Параметр	Режим обработки						
	p , мм ($\omega = 240$ мин ⁻¹)				ω , мин ⁻¹ ($p = 0,1$ мм)		
	0,10	0,15	0,25	0,30	240	300	480
$Lsfc$	1	3	15	8	1	4	9
SRC , мкм	59	34	38	16	36	34	34

УДК 621.9.016

В.И. Муравьев, С.З. Лончаков, В.С. Пицик, А.А. Дебеляк
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)
E-mail: VMuravyev@mail.ru

Эффективность методов защиты от газонасыщения титановых сплавов при нагреве заготовок под штамповку и термообработку

Исследованы технологии, направленные на обеспечение эффективности использования металла при производстве деталей из штампованных заготовок титановых сплавов. Проведено сравнение физико-механических и эксплуатационных свойств готовых деталей в зависимости от способа их изготовления и изыскание эффективных методов малоокислительного и безокислительного нагрева металла под ковку и штамповку. Описаны визуальные и аналитические методы определения физико-химических характеристик и газонасыщения титановых сплавов.

Ключевые слова: титановый сплав, горячая штамповка, порошковая металлургия, литье, газонасыщение.

Researched of technology aimed at ensuring efficiency in the use of metal parts in the production of forged billets of titanium alloys. Comparison of the physical-mechanical and performance properties of finished parts depending on their manufacture and finding effective methods of low-oxidizing and non-oxidizing metal heating, forging and stamping. Describes Visual and analytical methods for the determination of physico-chemical characteristics and gassing of titanium alloys.

Keywords: titanic alloy, hot punching, powder metallurgy, molding, gaz saturation.

Введение

В конструкции современного самолета общая масса деталей, изготавливаемых из *горячештампованных заготовок* (ГШЗ), составляет 15...20 %. Обеспечение эффективности использования металла при производстве деталей из штампованных заготовок является одной из важнейших задач, решаемых технологами и конструкторами.

Анализ номенклатуры ГШЗ деталей позволяет выделить ряд общих для всех изделий конструктивно-технологических групп [1].

Сравнение физико-механических и эксплуатационных свойств готовых деталей в зависимости от способа их изготовления позволяет расположить детали по ухудшению свойств в следующем порядке: изготовленные листовой штамповкой, объемной штамповкой, методом порошковой металлургии и литьем.

Из приведенного анализа видно, что изготовление ответственных деталей из горячештампованных заготовок обусловлено требованием *эксплуатационной надежности* (ЭО) и долговечности конструкций.

Изыскание эффективных методов малоокислительного и безокислительного нагрева металла под ковку, штамповку – одно из важнейших направлений повышения ЭО. Одним из путей решения этой проблемы является применение атмосферы сухого воздуха [2] для нагрева заготовок под штамповку, особенно заготовок из титановых сплавов.

Методы проведения исследований

Исследования проводили на заготовках из сплава ВТ3-1, полученных из пресованных прутков. Перед штамповкой заготовки обтачивали. Температура нагрева заготовок под штамповку в электропечи составляла 950...980 °С. Кроме этого выполняли сравнительные испытания листовых образцов из сплава ВТ20, ОТ4-1 и трубчатых – из сплава ПТ7М. Образцы нагревались вместе с заготовками под штамповку. Из заготовок (сплав ВТ3-1) штамповали арматуру: угольники, тройники, крестовины. Исследовали влияние на физико-механические свойства деталей следующих факторов: предварительного низкотемпературного окисления, защитного стеклоэмалевого покрытия, среды и способа нагрева, видов обработки поверхности после штамповки.

Визуально-оптическим исследованием была установлена различная толщина (0,01...0,13 мм) окисной пленки на поверхности образцов после нагрева в электропечи до 950...980 °С и выдержки 1 ч. Предварительное низкотемпературное окисление заготовок в атмосфере сухого воздуха при 250 °С в течение 2 ч [3, 4] привело при последующем нагреве под штамповку к уменьшению толщины оксидной пленки более чем в 2 раза (ВТ20 – 0,01...0,015 мм; ОТ4-1 – 0,06 мм).

Заготовки, не подвергаемые предварительному низкотемпературному окислению, имели чешуйчатую поверхность, а предварительно окисленные заго-

товки – гладкую поверхность. Кроме того, с поверхности предварительно окисленных ГШЗ наиболее легко удаляется защитное стеклоэмалевое покрытие.

Установлено, что поверхностный слой (окисленный и газонасыщенный) оказывает существенное влияние на механические свойства, особенно на пластичность ГШЗ. Пескоструйная обработка способствует увеличению пластичности. Необходимо отметить, что оксидная пленка, образующаяся на поверхности заготовок, очень хрупкая и легко удаляется пескоструйной обработкой.

Применение стеклоэмалевых покрытий наиболее эффективно вместе с применением предварительного окисления заготовок, поскольку при этом повышается пластичность поверхностного слоя заготовок.

Исследования микроструктуры и микротвердости поверхностного слоя заготовок после нагрева под штамповку показали, что для сплава ОТ4-1 изменение микроструктуры распространяется на глубину до 0,16 мм, микротвердость поверхности на 28...30 % выше микротвердости сердцевины. Для сплавов ВТ20 и ВТ3-1 глубина измененного слоя составляет 0,08 мм, а микротвердость отличается от сердцевины всего на 20...25 %. Предварительное низкотемпературное окисление заготовок на первых стадиях нагрева под штамповку защищает от газонасыщения. По сравнению с заготовками, не подвергавшимися предварительному окислению, практически в два раза уменьшается глубина поверхностного слоя с измененной микроструктурой. На заготовках из сплава ВТ20, ВТ3-1 изменений микроструктуры поверхности не наблюдается, а на заготовках из сплава ОТ4-1 изменение распространяется на глубину до 0,05 мм.

Из рис. 1 видно, что чем больше легирующих элементов в титановом сплаве, тем меньше содержание газовых примесей и тем меньше глубина газонасыщенного слоя. Существенно уменьшается газонасыщенность поверхности образцов в случае предварительного низкотемпературного окисления и применения защитной стеклоэмалевой пленки. Пескоструйная обработка, особенно в сочетании с травлением, способствует удалению газонасыщенного слоя. Для сплавов ВТ20 и ВТ3-1 в исследованном режиме нагрева и выдержки газонасыщение практически не превышает допустимых пределов даже при нагреве образцов без защиты поверхности.

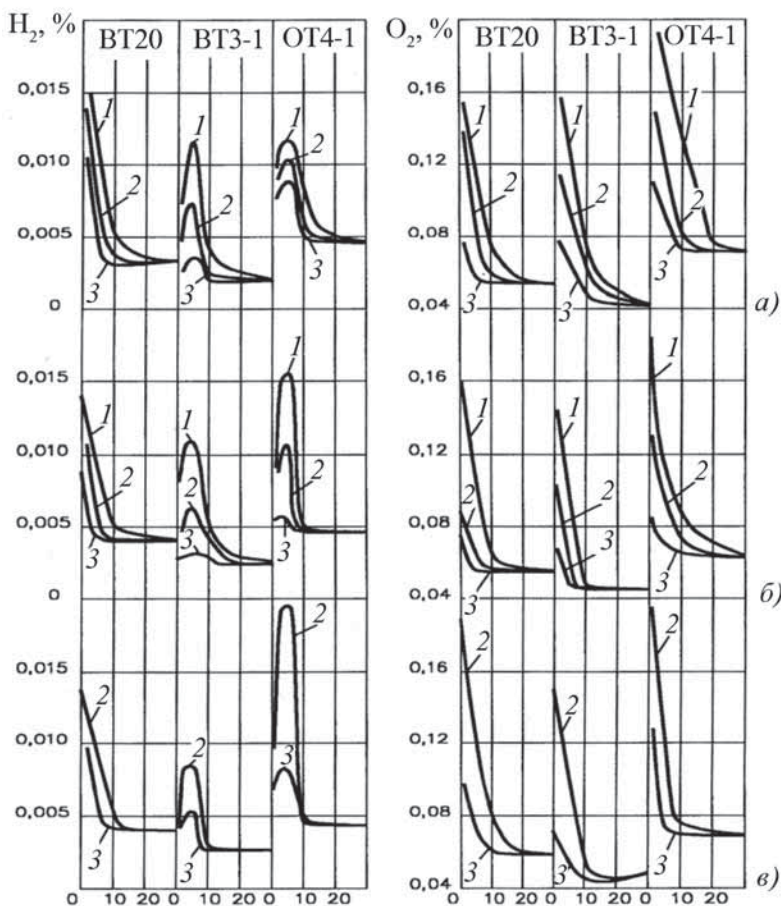


Рис. 1. Кривые изменения содержания газов водорода и кислорода по глубине поверхностного слоя образцов из различных титановых сплавов в зависимости от вида подготовки (а, б, в) поверхности образцов под штамповку и вида обработки (1, 2, 3) поверхности после штамповки:

а – исходная; б – окисление при 250 °С, 2 ч; в – покрытие с защитной стеклоэмалью; 1 – без обработки; 2 – пескоструйная обработка; 3 – пескоструйная обработка и травление

У сплавов ВТ3-1 и ОТ4-1 наблюдается сложный характер распределения содержания водорода в поверхностном слое. Содержание водорода в поверхностном слое вначале увеличивается, достигает максимума, а затем снижается.

Содержание азота в поверхностном слое для всех исследованных сплавов не превышало пределов допуска. При послойном определении содержания азота в образцах сплава ВТ3-1 выявлен неодинаковый характер его распределения в зависимости от способов защиты поверхности (рис. 2).

Если предварительное окисление способствует уменьшению содержания азота при последующем нагреве под штамповку (см. рис. 2, кривая 1), то защитное стеклоэмалевое покрытие, наоборот, способствует увеличению содержания азота в поверхностном слое (см. рис. 2, кривая 2).

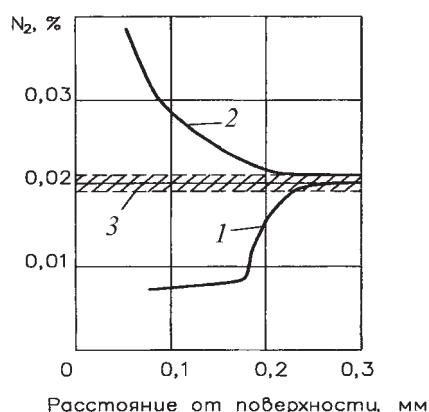


Рис. 2. Кривые изменения содержания азота по глубине поверхностного слоя образцов из сплава ВТЗ-1 в зависимости от вида защиты поверхности при нагреве под штамповку:

1 – окисление при 250 °С, 2 ч; 2 – стеклоэмалевое покрытие; 3 – исходная заготовка

Нанесение на поверхность титановых сплавов нитридных покрытий приводит к резкому увеличению содержания водорода в поверхностном слое при последующем нагреве под штамповку. Так, содержание водорода в поверхностном слое образцов из сплава ВТ20, ВТЗ-1, ОТ4-1, ВТ1-1 с нитридным покрытием после нагрева при 950...980 °С в течение 1 ч составило: 0,0311; 0,0211; 0,0315; 0,0242 % соответственно.

Из приведенных исследований видно, что при нагреве заготовок из титановых сплавов в обычных электропечах при температуре, не превышающей аллотропического превращения, и выдержке в пределах 1 ч происходит незначительное газонасыщение поверхностного слоя, которое легко удаляется обычной пескоструйной обработкой.

Особого внимания заслуживает процесс нагрева заготовок под штамповку в псевдооживленном слое сыпучих материалов [5]. Такой нагрев – самый продуктивный способ интенсификации теплообмена между частицами, газом и поверхностью заготовок. Коэффициент теплоотдачи в псевдооживленном слое сыпучих материалов на полтора порядка выше коэффициента теплоотдачи в печах с принудительной конвекцией и примерно одинаков с коэффициентом теплоотдачи в расплавленных солях.

По сравнению с нагревом в электропечи нагрев титановых заготовок в псевдооживленном слое кварцевого песка в атмосфере сухого воздуха позволяет уменьшить газонасыщение в 2–3 раза. Причем газонасыщенный слой удаляется обычной пескоструйной обработкой, что позволяет значительно уменьшить припуски под обработку заготовок резанием.

Как следует из данных табл. 1, изыскание наиболее рациональных методов нагрева титановых сплавов под пластическую деформацию – актуальная задача.

Таблица 1

Эффективность технологических процессов формообразования деталей из титановых сплавов

Тип детали	Вид полуфабриката для исходной заготовки	Технологический процесс формообразования деталей*	Направления повышения эффективности изготовления
Кронштейны, фитинги и др.	Пруток, штамповка	1	1. Перевод изготовления деталей на штамповку, сварку. 2. Разработка техпроцессов релаксации напряжений, повышения плотности и прочностных свойств металла сварного шва. 3. Разработка интенсификации режимов нагрева под штамповку и термообработку, повышающих точность формообразования, пластичность и прочность металла заготовок.
		3 + 4	
"Вафельные панели"	Плита, лист	1	
		4	
Шпангоуты, лонжероны	Поковка, плита, штамповка	1	
		3 + 4	
Обшивки	Лист	2	
		2 + 4	
Трубопровод	Лист, труба	2	
		2 + 4	

*1 – механическая обработка резанием; 2 – листовая штамповка; 3 – объемная штамповка; 4 – сварка.

Классификация методов нагрева под штамповку

Характеристика	Нагрев заготовки									
	Газопла- менный (ГПН)	Газопла- менный в псевдо- ожоженном слое частиц (ГПН-ПС)	В электро- печах со- противле- ния (ЭПС)	В электро- печах сопротивле- ния (ЭПС-ПС)	В ЭПС в вибро- ожожен- ном слое частиц (ЭПС-ВС)	Индукцион- ный ТВЧ (ИН)	Электро- контактный (ЭКН)	ЭКН-ПС	ЭКН-ВС	Электро- импульс- ный (ЭИ)
Воздействие на заготовку	Тепловое					Электротермическое				Электро- импульс- ное
КПД, %	20...50	74...76	80...90	85...95	90...95	50...70	75...90	80...90	90...95	95...98
Время нагрева равноценных заготовок ¹ , мин	$\frac{15}{46...78}$	—	$\frac{16}{40...75}$	—	—	—	$\frac{40^2}{3...15}$	$\frac{40^2}{3...15}$	$\frac{40^2}{3...15}$	—
Вид возможно- го использо- вания атмосферы ³	СГ	ВХ, ИГ	ВХ, ИГ	ВХ, ИГ	ВХ, ИГ	ВХ, ИГ	ВХ	ВХ, ИГ	ВХ, ИГ	ВХ
Рациональ- ность способа ⁴ для заготовок размерами: $L < 1800$ мм, $\delta \leq 5$ мм $L > 1800$ мм, $\delta \geq 5$ мм	Б В	Б В	А В	А В	Б В	Б В	А А	Б В	Б В	А В

¹ В числителе приведены данные для листовых заготовок толщиной $\delta = 4$ мм, в знаменателе — для заготовок из прутков $\varnothing 50$ и 150 мм.

² Время, с.

³ СГ — сжигаемый газ; ВХ — воздух; ИГ — инертный газ.

⁴ А — способ рационален; Б — имеет невысокие технико-экономические показатели; В — нерационален.

Классификация методов нагрева заготовок под штамповку из титановых заготовок в зависимости от вида энергии воздействия, метода нагрева, габаритных размеров заготовок и вида атмосферы представлена в табл. 2.

Интенсификация традиционных методов нагрева титановых заготовок под штамповку с использованием псевдоожоженного слоя сыпучих материалов показала, что интенсивность нагрева в нем соизмерима с нагревом в расплавах солей. Коэффициент теплоотдачи в оптимальном режиме псевдоожожения углеродистых материалов возрастает более чем на порядок по сравнению с нагревом в неподвижном слое при комнатной температуре и более чем на несколько порядков при повышенных температурах. Использование при нагреве псевдоожоженного слоя сыпучих материалов приводит к значительному уменьшению окисления и газонасыщения поверхности титановых

сплавов. Уменьшение газонасыщения наблюдается у предварительно окисленных образцов и идентично с образцами со стеклоэмалевым защитным покрытием. Нагрев до 1050...1080 °С заготовок из сплава ВТ20 диаметром 50...150 мм в высокотемпературной камерной электропечи занимает 40...75 мин, а нагрев в псевдоожоженном слое кварцевого песка — всего 8...37 мин. Исследования электроконтактного нагрева заготовок размерами 2000×600×1,5 мм из сплава ВТ20 под штамповку на гидропрессе типа ХВЦ-2-250 проводили в интервале температур 900...1000 °С (рис. 3).

Формообразование после скоростного нагрева на воздухе листовых деталей этого сплава приводит к увеличению прочности, пластичности и малоцикло-вой усталости по сравнению с исходным состоянием материала (см. табл. 3 и рис. 4), при этом химический состав и газонасыщение в поверхностной зоне нахо-

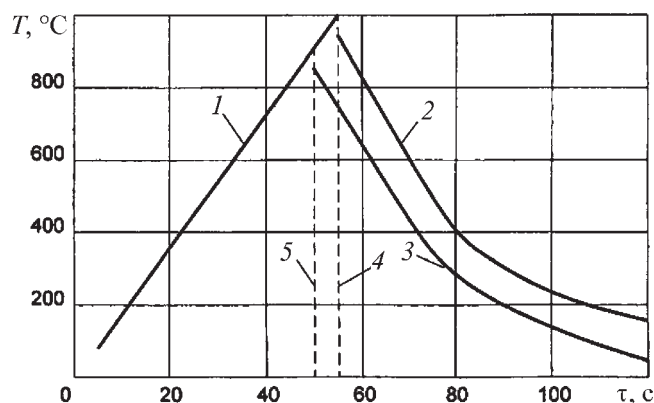


Рис. 3. Кривые изменения температуры листовой заготовки (2000×600×1,5 мм) из сплава ВТ20 в процессе электроконтактного нагрева и формообразования на прессе ХВЦ-2-250: 1 – нагрев до заданной температуры; 2, 3 – охлаждение в процессе формообразования; 4 – формообразование с 1000 °С; 5 – формообразование с 960 °С

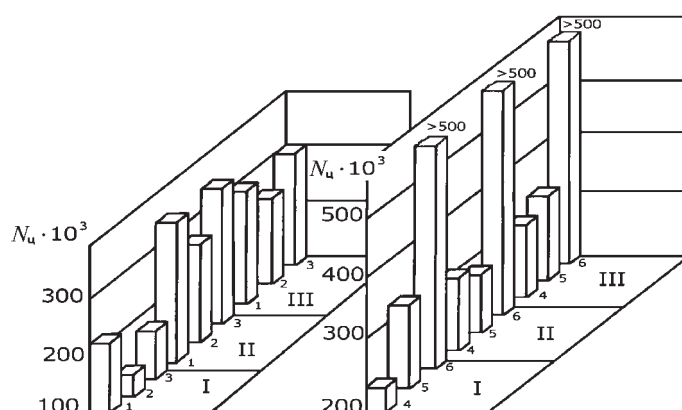


Рис. 4. Гистограммы изменения числа циклов N_c до разрушения при $\sigma_a^{cp} = 118$ МПа образцов из сплава ВТ20 в зависимости от вида подготовки поверхности (I – без удаления оксидов; II – травление; III – пескоструирование) под отжиг при температуре 630 °С в течение 1 ч, среды отжига (1 – на воздухе; 2 – в вакууме; 3 – в аргоне) и вида обработки поверхности после отжига на воздухе (4 – без обработки; 5 – травление; 6 – пескоструирование)

дятся в пределах допуска по ОСТ 190013–81, ОСТ 190034–81, ГОСТ 9853-1–79.

Исследование формообразования деталей из заготовок размерами 500×200×1,5 мм сплава ВТ20 электроимпульсным воздействием проводили на установке, которая включает в себя силовой трансформатор

ТОЭС3-250/40, прерыватель тока РКС611, электромагнитный манометр ЭКМ-25, двухлучевой осциллограф С8-17, пресс НВС160, тиристорные контакторы и позволяет пропускать мощные токи через заготовку в короткое время: $I = 20...30$ кА, $U = 10...80$ В, $W \leq 500$ кВт, $t \leq 0,3$ с.

Таблица 3

Изменение механических свойств сплава ВТ20 в зависимости от режимов формообразования

Режим формообразования	Состояние поверхности после формообразования	σ_B , МПа	δ , %	Угол изгиба, °	
				в сторону пуансона	в сторону матрицы
920 °С, 98 с	Окисленная	1050	16,3	45	42
	Травленная	1040	16,5	48	46
960 °С, 126 с	Окисленная	1230	15,0	45	40
	Травленная	1190	16,0	57	49
995 °С, 176 с	Окисленная	1080	13,0	49	47
	Травленная	1060	13,0	51	45
Исходное состояние	Состояние поставки	1130	11,0	51	
	Химически травленная	1100	10,0	45	
Требования ОСТ 90218	–	1000...1200	≥9	≥30	

Примечание. Даны средние значения механических характеристик по семи образцам.

Выводы

1. Физико-механические свойства штампованных заготовок значительно выше, чем литых и порошковых заготовок.

2. Использование атмосферы сухого воздуха в качестве среды нагрева титановых заготовок под штамповку позволяет свести до минимума припуски на обработку резанием. Целесообразно применение камерных электрических печей для нагрева заготовок диаметром не более 30...40 мм до температуры 950...980 °С с низкотемпературной оксидной пленкой и диаметром заготовок до 80...100 мм со стеклоэмальными покрытиями.

3. Интенсификация процессов нагрева заготовок под штамповку достигается при использовании, например, установок с псевдооживленным слоем сыпучих материалов.

4. Применение печей с псевдооживленным слоем сыпучих материалов позволяет интенсифицировать нагрев, особенно традиционных методов теплового воздействия на заготовку (нагрев газопламенный и в электропечах сопротивления), до уровня индукционного и электроконтактного и тем самым свести к минимуму окисление и газонасыщение титановых заготовок.

5. Метод электроимпульсного воздействия на заготовку из титановых сплавов позволяет снизить температуру пластической деформации до 250...540 °С, не требует никаких методов защиты при формообразовании, но применение его затруднено из-за отсутствия оборудования и малых размеров заготовок.

6. На основе созданной классификации методов нагрева титановых заготовок под штамповку разработан технологический процесс электроконтактного нагрева и формообразования обшивок двойной кривизны из сплава ВТ20 (см. рис. 2, табл. 2), который позволяет:

– на 95 % использовать энергию прямого электроконтактного нагрева;

– осуществлять нагрев и формообразование в воздушной среде, используя защитные свойства плотной оксидной пленки от окисления и газонасыщения;

– проводить формообразование в температурном интервале "предпревращения", обеспечивающего сверхпластичность;

– получать обшивки габаритными размерами 2000×600×1,5 мм и более с высокими показателями прочности, пластичности и малоциклового усталости.

На технологический процесс формообразования обшивок из титановых сплавов получен патент 20221058 RU, В 21D 26/02.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куценко В.Г., Бетлиевский Т.Б., Муравьев В.И. Исследование эксплуатационных свойств деталей из титановых сплавов, полученных методом порошковой металлургии // *Авиационная промышленность*. 1983. № 6. С. 26–27.

2. Muravyov V.I., Melnichuk A.F. Application of Rarefied Air Atmosphere Heat Treatment and Chemical Heat Treatment of Metals, Steels and Alloys // *Heat Treatment and Technology of Surface Coatings. Proceedings of the 7th international congress*. V.I. Moscow. 1990. P. 31–34.

3. Пат. 2020187 RU, С1. Способ термической обработки деталей из титановых сплавов / В.И. Муравьев, Б.Н. Марьин, В.Н. Войтов и др. Бюл. № 18 от 30.09.94.

4. Муравьев В.И., Марьин Б.Н., Мельничук А.Ф. и др. Влияние режимов высокотемпературной листовой штамповки на физико-механические свойства деталей из сплава ВТ20 // *Авиационная промышленность*. 1993. № 2. С. 31–34.

5. Взаимодействие атмосферы со сталью в печи с кипящим слоем / В.И. Муравьев, В.П. Курбатов, Н.Д. Тютеева, А.А. Говоров // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1971. № 6. С. 20–22.

6. Муравьев В.И., Якимов В.И., Хосен Ри и др. Изготовление литых заготовок в авиастроении. Владивосток: Дальнаука, 2003. 616 с.



УДК 621.9

Ф.Я. Барац (ООО "Научно-исследовательский центр
технического регулирования", г. Саратов);А.В. Кочетков (Пермский национальный исследовательский политехнический университет)
E-mail: soni.81@mail.ru

Оптимизация режимов отделочно-упрочняющей обработки алмазным индентором

Исследованы вопросы оптимизации режимов отделочно-упрочняющей обработки алмазным индентором. Алмазное выглаживание закаленной до высокой твердости быстрорежущей стали позволяет существенно повысить качество обрабатываемой поверхности. Проведено сравнительное исследование износостойкости круглых резцов, обработанных шлифованием и алмазным выглаживанием.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, отделочно-упрочняющая обработка, инструмент, алмазный индентор, шероховатость.

Questions of optimization of modes of strengthening processing are investigated by the diamond tool. Processing by diamond of the fast-cutting steel tempered to high hardness allows to raise quality of a processed surface essentially. Comparative research of wear resistance of round cutters processed by grinding and diamond tool is conducted.

Keywords: superficial plastic deformation, strengthening processing, tool, diamond, roughness.

Введение

На основе данных, полученных при аналитическом исследовании тепловых потоков и экспериментального исследования качества обработки, можно сформировать основные принципы проектирования оптимального режима алмазного выглаживания [1, 2].

Постановка задачи

Так как режим обработки обусловлен кривизной индентора, нормальной силой, скоростью главного движения и величиной подачи, то величины оптимальных значений этих параметров целесообразно вести в два этапа.

Первый этап – определение наиболее целесообразных кривизны индентора и нормальной силы. Высокая степень отделки поверхности и распределение остаточных напряжений достигаются с цилиндрической рабочей поверхностью радиусом 0,8...1,0 мм при обработке быстрорежущих сталей твердостью 62...66 HRC. При этом радиальная сила находится в пределах $P = 200...250$ Н. Определяющим влияние радиальной силы P на составляющую силы в очаге деформации в направлении скорости обработки является P_v .

В самом общем виде оптимальные параметры алмазного выглаживания – кривизна индентора K и радиальная сила при обработке P – определяются областью, техническими ограничениями которой являются требуемая толщина упрочненного слоя Δ , жесткость заготовки f и исходная твердость изделия H .

Целевая функция должна определить наименьшее удельное давление в очаге деформации, которое удовлетворит техническим ограничениям. Такой целевой функцией является отношение радиальной силы и квадрата кривизны индентора (Н/м^2)

$$F_1 = P / K^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Второй этап решения задачи оптимизации процесса сводится к определению оптимальных параметров кинематики процесса – скорости главного движения v и скорости движения подачи S . Эти параметры ограничиваются степенью отделки поверхности Ra , минимальной величиной подачи S , меньше которой происходят перенаклеп и резкое снижение качества обработки, и максимальным значением контактной температуры θ , с которой связаны фазовые превращения в очаге деформации.

Метод решения

Основные технические ограничения кинематики алмазного выглаживания можно представить следующими неравенствами:

$$\begin{aligned} Ra' &\geq Ra(v, S); \\ S'_{\min} &\leq S_{\min}(P, K); \\ S'_{\max} &\geq S_{\max}; \\ v'_{\min} &\leq v_{\min}; \\ v'_{\max} &\geq v_{\max}; \\ \theta'_{\phi} &\geq \theta(v, S), \end{aligned} \quad (2)$$

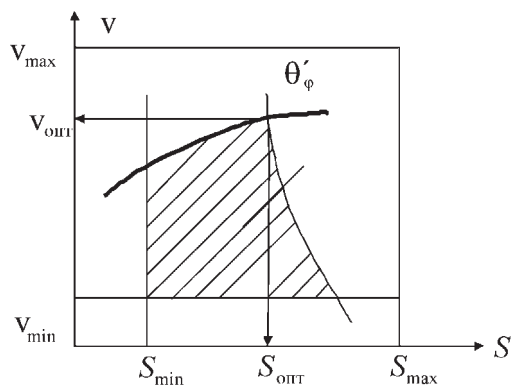


Рис. 1. Геометрическое представление модели оптимального режима алмазного выглаживания

где Ra' ; S'_{min} ; S'_{max} ; v'_{min} ; v'_{max} ; θ'_ϕ – параметры и технологические ограничения с учетом возможностей оборудования и инструмента.

Данная система неравенств определяет область допустимых значений v и S , схема построения которой показана на рис. 1.

Область режима, ограниченная температурой фазовых превращений, предполагает обработку в условиях повышенной пластичности, когда к изделию предъявляются повышенные требования по всем технологическим характеристикам качества.

Опытные данные показывают, что контактная температура в этом случае не должна превышать температуру нагрева при отпуске стали. Для быстрорежущих сталей марок P18, P9, P6M5K5 – это температура в пределах 560...580 °С.

Критерием оптимальности при определении оптимального режима алмазного выглаживания является основное технологическое время, которое должно быть минимальным в области допустимых режимов обработки: $t_m = \frac{L}{nS} \rightarrow \min$, где L – путь, пройденный

инструментом в направлении движения подачи; n – частота вращения заготовки.

Основные параметры обработки круглых фасонных резцов зуборезной головки

Исходные данные. Обрабатываемый материал – быстрорежущая сталь P18, 62...64 HRC. Предел прочности при сжатии 3500...3700 МПа. Теплофизические коэффициенты: температуропроводность $a = 57 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; теплопроводность $\lambda = 27,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$. Радиус рабочей поверхности круглого резца $r = 0,033 \text{ м}$. Инструмент – алмазный индентор: радиус индентора $R_n = 0,1 \text{ см}$, теплофизический коэффициент $\lambda = 146,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$.

Режим обработки: $n = 500 \text{ об}/\text{мин}$; $v = 1,7457 \text{ м}/\text{с}$; $S = 0,0016 \text{ см}/\text{об}$; $P = 200 \text{ Н}$.

По критерию Пекле (при угловой скорости $\omega = 52,36 \text{ с}^{-1}$)

$$P_e = \frac{52,36 \cdot 0,01^2}{65 \cdot 10^{-7}} = 805,5. \quad (3)$$

Процесс тепловыделения в изделии характеризуется быстро движущимся теплоисточником с контактной температурой, рассчитанной по формуле [1]

$$\theta = \frac{Q}{2\pi\lambda v \left(t + \frac{R^2}{4ak} \right)} \exp \left[-\frac{(y - y^1)^2 + (z - z^1)^2}{4a \left(t + \frac{R^2}{4at} \right)} \right], \quad (4)$$

где $\theta = 432^\circ$;

Q – количество выделяемой теплоты, Дж/кг;

t – время изменения теплофизического процесса, с;

v – скорость источника, м/с;

x, y – координаты точки измерения температуры относительно координат мгновенного точечного источника y^1, z^1, m ;

k – коэффициент приведения к единому параметру.

Обсуждение результатов

Проведено сравнительное исследование износостойкости круглых резцов, обработанных шлифованием и алмазным выглаживанием с оптимизацией режима обработки. Исследование износостойкости круглых резцов проверялось на токарном станке модели "16K20". Резцовая головка с двумя диаметрально расположенными резцами закреплялась на шпинделе станка. Для повышения точности сравнительных испытаний один резец в резцовой головке был с шлифованной задней поверхностью, а второй – с выглаженной. Параметры шероховатости поверхности в обоих случаях $Ra = 0,25...0,30 \text{ мкм}$.

В качестве образцов использовались державки токарных резцов из стали 45 сечением 30×30 мм. Величина износа в виде длины задней поверхности W измерялась с помощью инструментального микроскопа. Одновременно с величиной износа измерялась сила резания P_z в направлении скорости главного движения, для чего использовался однокомпонентный динамометр на тензометрических датчиках с упругим элементом в виде плоской пружины, которая воспринимала деформации обрабатываемой заготовки в направлении скорости главного движения.

Результатом исследования величины износа W от пути, пройденного резцом при различных параметрах

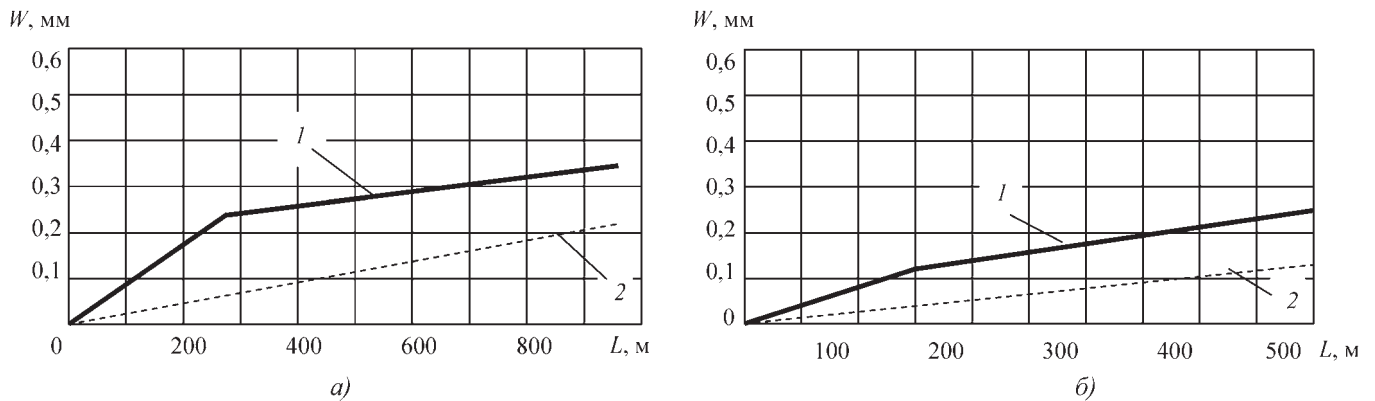


Рис. 2. Износ задней поверхности резца W в зависимости от пути резания L после шлифования (1) и алмазного выглаживания (2) при параметрах обработки:

$a - \gamma = 0^\circ; \beta = 20^\circ; б - \gamma = 20^\circ; \beta = 20^\circ$

обработки, приведены в виде графиков на рис. 2. В результате экспериментов установлено, что величина износа снижается с увеличением угла наклона режущей кромки β . При этом величина износа выглаженных резцов в 1,5–2 раза меньше величины износа шлифовальных резцов. Для упрочненных алмазным выглаживанием резцов изменился и сам характер износа: уменьшился износ приработки и одновременно снизилась интенсивность изнашивания.

На рис. 2, *a* показана зависимость W от L для $\gamma = 0^\circ; \beta = 20^\circ$, а на рис. 2, *б* – для $\gamma = 20^\circ; \beta = 20^\circ$.

При экспериментальном определении зависимости силы P_z от переднего угла γ и угла наклона режущей кромки β круглого резца при резании с размерами среза $\sigma = 9$ мм, $a = 0,1$ мм резцов с углом $\beta = 20^\circ$ в обоих случаях отмечается снижение износа приработки и интенсивности изнашивания (рис. 3).

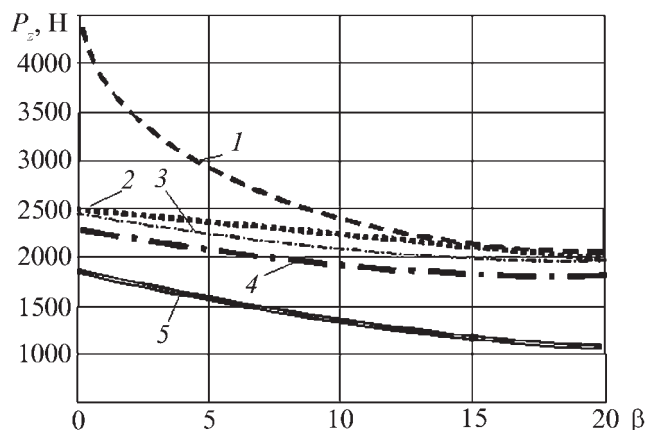


Рис. 3. Зависимость силы P_z от переднего угла γ и угла наклона режущей кромки β круглого резца при резании с размерами среза $\sigma = 9$ мм, $a = 0,1$ мм:

1 – $\gamma = 0^\circ$; 2 – $\gamma = 5^\circ$; 3 – $\gamma = 10^\circ$; 4 – $\gamma = 15^\circ$; 5 – $\gamma = 20^\circ$

Эксперименты по измерению сил резания показали, что при прочих равных условиях значение силы резания практически совпадает с величиной силы P_z при обработке круглым резцом со шлифованной задней поверхностью. Можно сделать вывод, что снижение величины износа упрочненных алмазным выглаживанием круглых резцов определяется, главным образом, улучшением качества обработанной поверхности и поверхности слоя.

При одной и той же высоте микронеровностей для выглаженных резцов характерна округлая форма шероховатостей, поэтому интенсивность износа во время приработки инструмента уменьшается. В дальнейшем при линейном характере изнашивания определяющими являются упрочненный поверхностный слой и остаточные сжимающие напряжения в нем.

Выводы

Выполнено экспериментальное исследование величины износа круглых резцов зуборезных головок с упрочненной и неупрочненной алмазным выглаживанием рабочими поверхностями. Установлено, что износостойкость упрочненных алмазным выглаживанием круглых резцов в 1,5–2 раза выше по сравнению с неупрочненными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маслякова И.А., Барац Ф.Я. Оптимальные параметры и режимы обработки методами поверхностного пластического деформирования. М.: Деп. в ВИНТИ 03.02.99. № 365-899. 1999. 7 с.
2. Барац Я.И., Барац Ф.Я., Аксенов А.А. Новое в зубообработке главной пары заднего моста автомобиля // Промышленность и высшая школа: материалы Междунар. науч.-техн. конф. "100 лет Российскому автомобилю". М.: МАМИ, 1996. С. 2.
3. Барац Ф.Я., Кочетков А.В. Исследование качества отделочно-упрочняющей обработки быстрорежущей стали // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-та, 2005. С. 127–131.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ ЖУРНАЛА

«Упрочняющие технологии и покрытия»

Статьи в журнале публикуются бесплатно.

Журнал входит в Перечень изданий ВАК РФ (см.: <http://vak.ed.gov.ru>).

Объем статьи, предлагаемой к публикации, не должен превышать **20 страниц** машинописного текста, напечатанного на белой бумаге формата А4 на одной стороне листа через два интервала.

В редакцию предоставляются в двух экземплярах:

✓ Текст статьи, подписанный всеми авторами, с указанием даты представления
✓ Иллюстрации, подписанные на обороте карандашом, с указанием номера иллюстрации и названия статьи

✓ Перечень подрисовочных подписей
✓ Аннотация (5–10 строк) – на русском и английском языке
✓ Ключевые слова на русском и английском языке
✓ Фамилия, инициалы авторов и название статьи на английском языке
✓ Сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, ученая степень, место работы, занимаемая должность, домашний и служебный адреса и телефоны, факс и e-mail, также паспортные данные, ИНН, ГПС)

Статьи, набранные на компьютере, желательно представлять как в виде распечатки на принтере, так и в файловом виде на дискете 3,5" или по e-mail. Текст в формате Microsoft Word (Times New Roman, 12-й кегель, два интервала), иллюстрации в виде отдельных файлов – TIFF, BMP, JPEG, CDR с максимально возможным разрешением. В статье рекомендуется указать поставленную цель, задачи, пути их решения и сделать соответствующие выводы. Если предложенная методика, разработка и т.д. имеют практическую ценность, очень желательно это подчеркнуть в статье.

Формулы, буквенные обозначения, цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различными. Сходные по начертанию буквы (прописные и строчные, латинского и греческого алфавита) следует пояснять на полях простым карандашом.

Иллюстрации выполняются с учетом последующего воспроизведения их средствами оперативной полиграфии (с использованием сканера): штриховые (чертежи, схемы, графики, рисунки) – четкое, контрастное изображение на плотной бумаге; тоновые (фотографии) – на матовой бумаге с высокой контрастностью.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом: для книг и сборников – фамилии и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год (не ранее 1980 г.) желательно общее число страниц; для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год, том, номер страниц. Если число авторов более четырех, то необходимо указывать первых трех со словами "и др.". Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются.

Срок публикации статьи с момента получения рукописи – 4–5 месяцев.

107076, Москва, Стромьинский пер., д. 4, ООО "Издательство Машиностроение",

редакция журнала "Упрочняющие технологии и покрытия"

Телефоны: (499) 268-40-77, 269-54-96. Факс: (499) 268-85-26, 269-48-97

E-mail: utp@mashin.ru

ООО "Издательство Машиностроение", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4.

Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru. Web-site: www.mashin.ru.

Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.

Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 04.07.13 г. Подписано в печать 00.00.13 г. Формат 60×88 1/8.

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

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".

Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4