ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Nº 7 (127) июль 2015

Издается с января 2005 г.

Главный редактор

д.т.н., проф Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

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

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф. В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

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

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.

А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.

С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.

С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.

Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.

Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф. Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.

В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:

и.н. мымрина Т.В. ПАРАЙСКАЯ

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

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

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о

регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ	
Микаева С.А., Микаева А.С., Петренко Ю.П. Отражающее покрытие	3
Табаков В.П., Власов С.Н., Сизов С.В., Чихранов А.В. Работоспособность режущего инструмента с покрытиями при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов	
МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА	
Волков Д.И., Толкачёв А.В. Упрочняющий эффект виброполировальной обработки	10
ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ	
Ким В.А., Кочетков М.С. Структурные превращения при лазерной обработке армкожелеза	
Селезнев А.Е., Шеин А.А. Разработка и исследование вакуумно-плазменных покрытий для повышения работоспособности разделительных штампов	
Слюдеев К.А., Ляпин А.А., Клименко Г.К. Исследование коррозионных свойств образцов из стали Ст3 с покрытием из диоксида циркония	
ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	
Шматов А.А. Компьютерное проектирование процесса получения твердосмазочного SiC-покрытия на твердом сплаве	
ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ	
Тамаркин М.А., Вяликов И.Л., Тищенко Э.Э. Исследование и разработка нового высокоэффективного метода виброабразивной ультразвуковой обработки	
ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ	
Щедрин А.В., Кострюков А.А. Перспективные инструменты для реализации методов комбинированной охватывающей обработки	

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

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

Nº 7 (127) 2015

Since 2005, January

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

Chair of Editorial Council

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

Editorial Assistant

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

Chairman Assistants:

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

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV 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.A. SHULOV V.P. SMOLENTSEV A.M. SMYSLOV G.A. SUHOCHEV V.P. TABAKOV M.L. KHEIFETS

Edition:

I.N. MYMRINA T.V. PARAYSKAYA

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

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

CONTENTS

	GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING
	likaeva S.A., Mikaeva A.S., Petrenko Yu.P. Reflective coating
	abakov V.P., Vlasov S.N., Sizov S.V., Chihranov A.V. The performance of cutting tool oated with the processing of the workpieces from the difficult materials
	MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING
′(plkov D.I., Tolkachev A.V. Hardening effect of vibropolishing treatment10
	PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY
	Cim V.A., Kochetkov M.S. Struktural transformations at laser processing of armko-iron 13
	rease of shearing dies operability19
	Slyudeev K.A., Liapin A.A., Klimenko G.K. Research of the corrosion resistance of the teel St3 samples coated with zirconium dioxide
	CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING
	Shmatov A.A. Computer design of process for obtaining SiC solid-film lubricant on hard lloy
	PROCESSING BY COMBINED METHODS
	amarkin M.A., Vjalikov I.L., Tishchenko E.E. Research and development of the new ighly effective method of vibroabrasive ultrasonic processing
	PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS
	chchedrin A.V., Kostryukov A.A. Promising tools for the implementation of combined coveng processing methods

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



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

УЛК 681.2

С.А. Микаева, А.С. Микаева, Ю.П. Петренко

(Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ)) E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

Отражающее покрытие

Представлены составы отражающих покрытий для газоразрядных источников света различных типов исполнения и технологий производства. Приведены экспериментальные результаты исследований и составы экспериментально подобранных покрытий.

Ключевые слова: состав, прототип, вес, тип, лампа, горелка, эксперимент.

The article presents the compositions reflecting coatings for gas-discharge light sources of different types of performance and production technologies. Experimental research results and the compositions of experimentally selected coatings are given.

Keywords: composition, prototype, weight, style, lamp, burner, experiment.

Отражающие покрытия используются в электровакуумной, электронной и электроламповой промышленности, в частности в металлогалогенных (МГЛ) или серных сверхвысокочастотных (СВЧ) лампах.

Известны источники излучения, например металлогалогенные лампы общего назначения, на концы кварцевых горелок которых наносятся специальные отражающие экраны, выравнивающие температуру по поверхности разрядной оболочки, но эти покрытия должны подбираться специальным образом под конкретный тип ламп — по спектру излучения, рабочей температуре, типу кварцевого стекла и т.д. [1]. Горелки, а соответственно и покрытия, работают во внешней колбе, наполненной инертным газом, азотом или вакууммированной, т.е. создается своего рода дополнительная защитная система.

Наиболее близким к предлагаемому авторами отражающему покрытию (ОП) является ОП для заэлектродных зон металлогалогенных ламп, состоящее из диоксида кремния и термостойкого красителя, представляющего собой оксид хрома (ТСК) (а. с. № 892528 СССР кл НО1У61/35 и НО1У65/18, 1980). Этот состав применялся в 1980-х гг. в лампах типа ДРТСф (Полтавский завод газоразрядных ламп), предназначенных для подводного освещения. Термостойким красителем был оксид хрома (зеленого цвета), который, отражая синезеленое излучение разряда, поглощал остальные длины волн и тем самым не только повышал температуру

"холодной зоны" лампы, выравнивал температуру по поверхности кварцевой горелки, но еще и минимизировал потери сине-зеленого излучения.

Современное поколение источников света, например типа МГЛ и других высокоинтенсивных источников, работает при больших электрических, а следовательно, и температурных нагрузках. И в этих случаях с подобными ОП начинаются проблемы — на воздухе (а в настоящее время много типов ламп, например СВЧ-лампы, лампы типа ДРГТ, ДРТГ, ДРТ и многие другие, работают без защитных оболочек, в окислительной среде, т.е. на воздухе) они темнеют (т.е. вместо отражения падающего излучения разряда они начинают его поглощать), покрываются микротрещинами и начинают осыпаться. Работоспособность таких составов весьма низкая, и зачастую именно они являются причиной выхода всей облучательной системы из строя.

Предлагаемый состав ОП

Анализ и опыт работы с ОП показал, что основой покрытия должен быть диоксид кремния. Термостойкий краситель, представляющий собой оксид хрома, выполняет прежнюю роль, селективно отражая излучение разряда. Остальные составляющие должны удовлетворять следующим требованиям:

быть устойчивыми при высоких температурах; быть инертными в окислительной среде (на воздухе);

Рабочая температура t , °С	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3	Прототип
600	Устойчиво	Устойчиво	Устойчиво	Почернение и последующее осыпание
800	Устойчиво	Устойчиво	1. Незначительное потемнение. 2. Устойчиво	Осыпание
1000	1. Микротрещины. 2. Устойчиво	Устойчиво	Потемнение всех образцов	_

Состояние испытываемых отражающих покрытий в различных условиях

обладать высокой адгезией:

иметь близкие коэффициенты линейного термического расширения;

иметь возможность образования эвтектики.

Целью настоящего исследования является повышение адгезионной способности ОП при высокой температуре в окислительной среде. Для достижения указанной цели предлагается дополнительно ввести следующие компоненты, удовлетворяющие приведенным выше требованиям:

оксид циркония;

оксид бериллия;

оксид иттрия;

оксид магния.

Оксид магния ответственен совместно с другими оксидами при подготовке состава ОП за создание эвтектики, т.е. обеспечивает соответствующую технологичность, остальные же оксиды при определенной технологической обработке обеспечивают требуемую работоспособность ОП.

Теоретически рассчитать состав ОП невозможно, процентное содержание компонентов определялось экспериментально. Для определения состава ОП были проведены испытания стандартных кварцевых горелок ламп ДРИ-250.

После нанесения на заэлектродные зоны покрытия, горелки включались в электрическую схему с дросселями 250, 400 и 700 Вт (для создания различных температур: 600, 800 и 1000 °С на поверхности ОП) и зажигающим устройством. Площадь ОП составляла около 2,5 см², термостойким красителем являлся оксид хрома. Усредненная по поверхности температура покрытия измерялась термопарой ХА в одном и том же месте заэлектродной области. Состояние испытываемых ОП в различных условиях среды представлено в таблице. Испытывались три состава — по двадцать два образца для каждого типа:

состав № 1, % мас.: оксиды кремния — 40, циркония — 15, бериллия — 10, иттрия — 10, магния — 10, ТСК — 15;

состав № 2, % мас.: оксиды кремния — 55, циркония — 13, бериллия — 7, иттрия — 8, магния — 5, ТСК — 12;

состав № 3, % мас.: оксиды кремния — 65, циркония — 10, бериллия — 7, иттрия — 3, магния — 5, ТСК — 10, а также покрытие-прототип, % мас.: оксиды алюминия — 10, кремния — 10, ТСК — остальное (80).

Горелки испытывались на воздухе (в окислительной среде) в течение 50 ч. Результаты приведены в таблице. Видно, что ОП № 1 может работать до 800 °С включительно, что, например, соответствует рабочим температурам и срокам службы ламп типа ДРШ. Состав № 3 ограничен температурой до 600 °С — лампы ДРТ, ДРП и т.п., источники света с умеренной электрической нагрузкой. Состав № 2 может устойчиво работать при температуре 1000 °С достаточно долго (свыше 50 ч и при температуре больше 1000 °С) и может быть использован, например, в серных СВЧ-лампах или лампах сверхвысокого давления.

Как указывалось, целью настоящего исследования является повышение работоспособности ОП, т.е. повышение адгезионной способности при высоких температурах в окислительной среде. Эта цель достигается тем, что ОП имеет следующий состав, % мас.:

Оксид кремния
Оксид циркония
Оксид бериллия
Оксид иттрия
Оксид магния
TCK

Данный состав ОП позволяет повысить его рабочую температуру при высокой адгезии в окружающей среде до $600...10\,000\,^{\circ}\text{C}$ в зависимости от состава.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Рохлин Г.Н.** Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991. 720 с.
- 2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Технология производства для нанесения покрытия на компактные люминесцентные лампы // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 11. С. 24—29.

УДК 621.9.025

¹В.П. Табаков, ²С.Н. Власов, ¹С.В. Сизов, ³А.В. Чихранов (¹ Ульяновский государственный технический университет, ² Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", г. Москва, ³ Технологический институт — филиал Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии им. П.А. Столыпина, г. Димитровград) Е-mail: vpt1947@yandex.ru

Работоспособность режущего инструмента с покрытиями при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов*

Представлены результаты исследований работоспособности режущего инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов путем использования различных технологических приемов формирования свойств износостойких покрытий. Показана эффективность режущего инструмента с покрытиями, полученными различными технологическими приемами.

Ключевые слова: работоспособность, режущий инструмент, износостойкое покрытие, труднообрабатываемые материалы, свойства.

The article presents the results of research performance of cutting tools in the processing of hard materials by using different technological methods of forming properties of wear-resistant coatings. The efficiency of the cutting tool with coatings obtained by different technological methods.

Keywords: efficiency, cutting tools, wear resistant coating, difficult materials, properties.

Введение

Повышение работоспособности режущего инструмента, интенсификация режимов резания являются важнейшими резервами повышения эффективности механической обработки [1-5]. Из большого многообразия методов повышения работоспособности режущих инструментов следует выделить методы нанесения износостойких покрытий, которые в последние годы находят все более широкое применение. Как показывают многочисленные исследования, эффективность режущего инструмента с износостойкими покрытиями существенно зависит от материала обрабатываемых заготовок и заметно снижается при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов [1, 2]. Как показано в работе [2], при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов разрушение покрытия происходит уже на стадии приработочного износа. Однако и после разрушения покрытия контактные поверхности долго сопротивляются изнашиванию благодаря сохранению его на участке, примыкающем к режущей кромке, и в виде отдельных "островков" на участке скольжения стружки по передней поверхности. Поэтому для повышения эффективности покрытий при обработке труднообрабатываемых материалов следует уделять внимание повышению их механических свойств и прочности адгезии с инструментальной основой. Последнее может быть достигнуто путем изменения состава покрытий, дополнительного энергетического воздействия на покрытие, созданием переходных адгезионных слоев между покрытием и инструментальной основой, а также применением многослойной архитектуры покрытий.

Цель работы

Целью работы является повышение работоспособности режущего инструмента при обработке заготовок из труднообрабатываемых сталей путем направленного формирования механических свойств износостойких покрытий.

Методика исследований

В исследованиях использовали неперетачиваемые твердосплавные пластины формы 031 11-120408 (ГОСТ 19049—80) из сплавов ВК6, Т5К10 и МК8 и пластины из быстрорежущей стали P6M5K5. Однослойные износостойкие покрытия TiN, TiZrN и TiZrCrN и двухслойные покрытия на основе TiN, TiCN, TiZrN, а также покрытия с переходными адгезионными слоями на основе TiN и TiZrN наносили на установке "Булат-6". Использовали катоды из титана (сплав ВТ1-0)

^{*} Работа выполнена при поддержке МОиН РФ (госзадание № 2014/232).

и составные катоды из титана со вставками из циркония и хрома. Толщина покрытий составляла 6 мкм. Лазерную обработку покрытий проводили на импульсной лазерной установке "Квант-15" при плотности мощности лазерного луча $q = 1,4\cdot10^4...2,6\cdot10^4$ Вт/см², длительности импульса излучения $\tau_{\rm u} = 4$ мс, диаметре пятна лазерного излучения d = 1 мм. Параметры структуры покрытий (период кристаллической решетки а, полуширину рентгеновской дифракционной линии β_{111}) и остаточные напряжения σ_0 исследовали на дифрактометре ДРОН-3М, относительную микродеформацию кристаллической решетки $\Delta a/a$ и размеры блоков областей когерентного рассеивания (ОКР) D рассчитывали по методике работы [6]. Микротвердость $H_{\rm u}$, модуль упругости первого рода E, предел текучести $\sigma_{\scriptscriptstyle \rm T}$ и вязкость разрушения $K_{\rm IC\Pi}$ покрытий определяли по методикам, изложенным в работе [7]. Адгезионную прочность покрытий оценивали по значению коэффициента отслоения K_0 , определяемого согласно методике работы [1] на твердомере ТК-2М (снижение коэффициента отслоения свидетельствовало о повышении прочности адгезии). Работоспособность режущего инструмента исследовали при токарной обработке и торцовом фрезеровании заготовок из стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ22.

Результаты исследований и их обсуждение

Влияние состава покрытия на параметры структуры и механические свойства представлено в табл. 1 и 2.

Таблица 1
Влияние состава износостойких покрытий,
нанесенных на пластины МК8, на структурные параметры
и остаточные напряжения

Покрытие	а, нм	β ₁₁₁ , °	<i>D</i> , нм	$\Delta a/a \cdot 10^{-3}$	σ ₀ , ΜΠα
TiN	0,4235	0,49	20,45	5,9	–775
TiZrN	0,4293	0,55	17,89	6,9	-1256
TiZrCrN	0,4279	0,63	15,41	8,0	-1422

Таблица 2

Влияние состава износостойких покрытий, нанесенных на пластины МК8, на механические свойства

Покрытие	H_{μ} , ГПа	K _o	Е, ГПа	$σ_{\scriptscriptstyle \rm T}$, ΓΠ a	$K_{\rm IC\Pi}$, МПа·м ^{1/2}
TiN	26,5	1,07	307	9,53	12,29
TiZrN	36,6	1,32	379	12,38	14,44
TiZrCrN	42,2	1,57	405	14,18	14,35

Анализ данных, представленных в табл. 1 и 2, показывает, что переход от одноэлементных к двух- и трехэлементным покрытиям сопровождается увеличением параметра кристаллической решетки a и ширины рентеновской линии β_{111} , что свидетельствует о деформации кристаллической решетки покрытий. Подтверждением этому являются данные по относительной микродеформации $\Delta a/a$, которая увеличивается при переходе от покрытия TiN к TiZrCrN. Для многоэлементных покрытий TiZrN, TiZrCrN по сравнению с покрытием TiN характерны снижение размеров блоков ОКР D соответственно на 12,5 и 24,6 % и большие значения сжимающих остаточных напряжений.

Повышение относительной микродеформации кристаллической решетки и уменьшение размера блоков ОКР при переходе от одноэлементных к двух- и трехэлементным покрытиям вызывают рост механических свойств покрытий. Для многоэлементных покрытий характерны более высокие значения микротвердости (в 1,4...1,6 раза), модуля Юнга (в 1,2...1,3 раза), предела текучести (в 1,3...1,5 раза) и вязкости разрушения (в 1,2 раза) по сравнению с покрытием TiN. В то же время данные покрытия имеют меньшую прочность адгезии по сравнению с покрытием TiN, о чем свидетельствуют большие значения коэффициента отслоения.

Влияние состава покрытий на работоспособность режущего инструмента представлено на рис. 1.

Применение одно-, двух- и трехэлементных покрытий приводит к существенному увеличению периода стойкости режущего инструмента, что видно из графи-

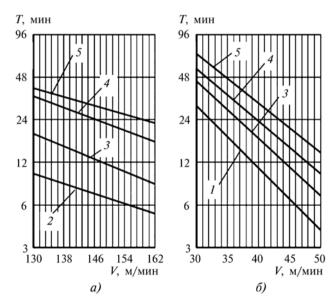


Рис. 1. Влияние скорости резания V при токарной обработке заготовок из стали 12X18H10T (a) и титанового сплава BT22 (b) на период стойкости T режущих пластин из сплавов BK6 и MK8 без покрытий и с покрытиями:

1 - BK6; 2 - MK8; 3 - TiN; 4 - TiZrN; 5 - TiZrCrN; a - S = 0.3 mm/o6; t = 0.75 mm; 6 - S = 0.15 mm/o6; t = 0.5 mm

Таблица З

Покрытие	а, нм	β ₁₁₁ , °	σ ₀ ,ΜΠа	H_{μ} , ГПа	K _o
TiN	0,42477/0,42413	0,383/0,467	-870/-560	27/30,92	1,2/0,9
TiZrN	0,42707/0,4262	0,46/0,502	-3053/-2175	28/31,4	1,32/1,07
TiZrCN	0,42862/0,42632	0,506/0,586	-2747/-2333	28,9/32,24	1,486/1,1

Влияние импульсного лазерного излучения на структурные параметры и механические свойства покрытий

Примечание. В числителе приведены данные до, в знаменателе — после импульсной лазерной обработки при плотности мощности $q = 32 \text{ кВт/см}^2$, толщине покрытия $h_{\pi} = 5 \text{ мкм}$.

ков, представленных на рис. 1. Так, при резании заготовок из стали 12X18H10T период стойкости инструмента с покрытиями TiN, TiZrN и TiZrCrN по сравнению с инструментом без покрытия увеличился в 1,6...1,9, в 3,2...3,5 и 4...4,4 раза соответственно в зависимости от скорости резания *V*. При обработке заготовок из сплава ВТ22 инструментом с покрытием TiN увеличение периода стойкости составило 1,5...1,8 раз по сравнению с инструментом без покрытия, для инструмента с покрытием TiZrN — 1,8...2,5 раза, с порытием TiZrCrN — 2,3...3,5 раза. Более высокая эффективность инструмента с многоэлементными покрытиями объясняется их более высокими значениями микротвердости, трещиностойкости и вязкости разрушения по сравнению с покрытием TiN.

Влияние импульсного лазерного излучения в качестве дополнительного энергетического воздействия на структурные параметры и механические свойства покрытий показано в табл. 3.

Исследованиями установлено, что применение импульсного лазерного излучения приводит к снижению в покрытиях остаточных напряжений, периода кристаллической решетки и повышению ширины рентгеновской линии. Применение импульсного лазерного излучения увеличивает микротвердость покрытия и прочность адгезии с инструментальной основой. Наибольшее влияние на структурные параметры и механические свойства износостойкого покрытия оказывают плотность мощности лазерного излучения и состав покрытий; влияние толщины покрытий сказывается в меньшей степени.

При обработке твердых износостойких покрытий лазерным излучением наблюдается уменьшение параметра кристаллической решетки. Более значительное снижение периода решетки наблюдается у одно-элементного покрытия TiN и менее значительное — у многоэлементных покрытий. Увеличение полуширины рентгеновской линии связано с изменением структуры покрытия, обусловленным воздействием лазерного излучения, и составило 20, 15 и 12 % для покрытий TiN, TiZrN и TiZrCN соответственно (см. табл. 3).

Меньшее увеличение полуширины рентгеновской линии для многоэлементных покрытий обусловлено тем, что данные покрытия имеют более высокие исходные значения величины β_{111} по сравнению с покрытием TiN. Рост полуширины рентгеновской линии связан с дроблением зерен материала покрытия под действием лазерного излучения. Обработка покрытий лазерным излучением приводит к снижению сжимающих остаточных напряжений (до 25 %), что объясняется их релаксацией на границе покрытия с инструментальной основой (см. табл. 3). При обработке лазерным излучением с плотностью мощности $q \approx 3.2 \cdot 10^4 \text{ Bt/cm}^2$ наблюдается уменьшение сжимающих остаточных напряжений σ с -870 до -560 МПа для покрытия TiN, c - 3053 до - 2175 МПа для покрытия TiZrN, c - 2747 до -2333 МПа для покрытия TiZrCN. Причем более существенное снижение остаточных напряжений отмечено у многоэлементных покрытий. При плотности мощности $q > 4.10^4$ Вт/см² интенсивность снижения остаточных напряжений существенно уменьшается, что связано с образованием микротрещин в материале основы при лазерной обработке композиции и, как следствие, формированием растягивающих напряжений в поверхностном слое твердого сплава. В целом импульсная лазерная обработка повышает прочность адгезии и микротвердость покрытий, что приводит к повышению режущих свойств инструмента.

Влияние импульсной лазерной обработки (ИЛО) на работоспособность режущего инструмента с покрытиями представлено на рис. 2. При токарной обработке заготовок из стали 12X18H10T повышение периода стойкости режущих пластин из МК8 после лазерной обработки составило для пластин с покрытием TiN 1,5...1,8 раза, а с покрытиями TiZrN и TiZrCN 2,6...3,2 раза. При токарной обработке заготовок из титанового сплава ВТ22 эффективность ИЛО снижается из-за более тяжелых условий резания данного материала. Повышение периода стойкости пластин из МК8 с покрытиями после лазерной обработки составило 1,2...1,4 раза в зависимости от состава покрытия, а по сравнению с пластинами без покрытия — 2...3 раза.

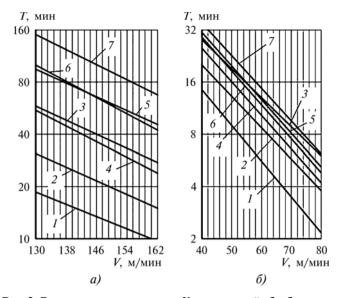


Рис. 2. Влияние скорости резания V при токарной обработке заготовок из стали 12X18H10T (a) и титанового сплава BT22 (δ) на период стойкости T режущих пластин из сплава МК8 без покрытия и с покрытиями без ИЛО и с ИЛО:

I - MK8; 2 - TiN; 3 - TiN + ИЛО; 4 - TiZrN; 5 - TiZrN + ИЛО; 6 - TiZrCN; 7 - TiZrCN + ИЛО; <math>S = 0.15 мм/of; t = 0.5 мм

Высокие остаточные сжимающие напряжения в покрытиях способствуют снижению интенсивности процессов их разрушения в процессе резания. С другой стороны, наличие перепада напряжений на границе покрытия с инструментальной основой отрицательно сказывается на прочности адгезии покрытия. Снизить перепад напряжений и, следовательно, повысить прочность адгезии износостойкого покрытия с основой инструмента можно за счет нанесения между ними переходных адгезионных слоев, в состав которых входят элементы покрытия и инструментальной основы.

Нанесение переходных адгезионных слоев практически не оказывает влияния на период кристаллической решетки и ширину рентгеновской линии, но существенно влияет на остаточные напряжения и прочность адгезии покрытия с инструментальной основой. Как следует из табл. 4, нанесение между покрытиями

Таблица 4

Влияние переходного адгезионного слоя на остаточные напряжения и механические свойства покрытий

Покрытие	σ ₀ , ΜΠα	H_{μ} , ГПа	K _o
TiN	-1810	19,6	0,26
(Ti-Fe)-TiFeN-TiN	-1085	21,8	0,11
TiZrN	-3620	28,0	0,86
(Ti-Zr-Fe)-TiZrFeN-TiZrN	-1955	30,1	0,35

TiN и TiZrN и инструментальной основой из P6M5K5 переходных адгезионных слоев из чистых металлов (соответственно Ti—Fe и Ti—Zr—Fe) и их нитридов (соответственно TiFeN и TiZrFeN) снижает остаточные сжимающие напряжения на 40 и 46 % соответственно и повышает их прочность адгезии, о чем свидетельствует снижение коэффициента отслоения K_0 на 57...59 % в зависимости от состава покрытия. Кроме того, наличие переходных адгезионных слоев на основе нитридов приводит к небольшому повышению микротвердости покрытий (на 7,5...11 %).

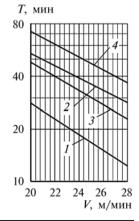
Повышение прочности адгезии покрытий с инструментальной основой и микротвердости при нанесении переходных адгезионных слоев позволяет повысить период стойкости пластин из быстрорежущей стали P6M5K5 при токарной обработке заготовок из стали 12X18H10T в 1,5...2,4 раза в зависимости от конструкции покрытия и условий резания (рис. 3).

В многослойных покрытиях, которые находят все большее применение, каждый слой имеет свое функциональное назначение. Нижний слой, непосредственно примыкающий к инструментальной основе, обеспечивает прочную адгезионную связь между многослойным покрытием и инструментальной основой. Промежуточные слои могут выполнять различные функции, например, имея повышенную трещиностойкость, сдерживать интенсивность процессов трещинообразования. Важнейшую функцию выполняет наружный слой, непосредственно контактирующий с обрабатываемым материалом, свойства которого оказывают существенное влияние на процессы, протекающие на контактных площадках режущего инструмента. В частности, наружный слой должен максимально блокировать процессы, приводящие к разрушению покрытия при резании, и одновременно снижать интенсивность этих процессов. Изменяя архитектуру многослойного покрытия путем выбора числа слоев, их механических свойств, можно влиять на работоспособность режущего инструмента.

Рассмотрим возможность повышения работоспособности режущего инструмента путем изменения архитектуры многослойного покрытия на примере по-

Рис. 3. Влияние скорости резания V при токарной обработке заготовок из стали 12X18H10T на период стойкости T режущих пластин из P6M5K5 с покрытиями:

 $1-{
m TiN};\ 2-{
m TiZrN};\ 3-{
m (Ti-Fe)}-{
m TiFeN-TiN};\ 4-{
m (Ti-Zr-Fe)}-{
m TiZrFeN-TiZrN};\ S=0,3$ мм/об; t=0,5 мм; СОЖ — эмульсия "Укринол-1"



 $\label{eq:2.2} {\it Таблица}\ 5$ Механические свойства многослойных покрытий

Покрытие	H_{μ} , ГПа	K _o	K_{rp}
TiCN—TiN	34,1	1,16	0,39
TiN—TiCN—TiN	34,6	0,98	0,33
TiN—TiZrN—TiN	37,9	0,99	0,31

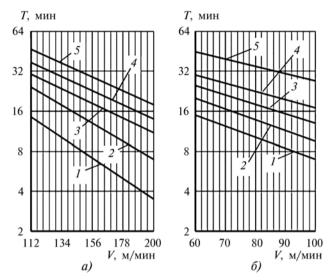


Рис. 4. Влияние скорости резания V при фрезеровании заготовок из стали 12X18H10T (a) и титанового сплава BT22 (δ) на период стойкости T режущих пластин из BK6 без покрытия и с покрытиями:

I- BK6; 2- TiN; 3- TiCN—TiN; 4- TiN—TiCN—TiN; 5- TiN—TiZrN—TiN; $a-S_z=0,2$ мм/зуб; t=0,5 мм; B=15 мм; $6-S_z=0,2$ мм/зуб; t=1,0 мм; B=15 мм

крытия TiCN—TiN, предназначенного для фрезерования (табл. 5).

Для повышения прочности адгезии двухслойного покрытия TiCN-TiN с инструментальной основой можно дополнительно нанести слой TiN (покрытие TiN-TiCN-TiN), который по сравнению со слоем TiCN обеспечивает бо́льшую прочность адгезии (коэффициент отслоения K_0 для покрытия TiN-TiCN-TiN на 20 % меньше, чем для покрытия TiCN-TiN). Нанесение промежуточного слоя TiZrN, имеющего мультислойную структуру, вместо TiCN (покрытие TiN-TiZrN-TiN) обеспечивает повышение трещиностойкости многослойного покрытия, о чем свидетельствует снижение коэффициента трещиностойкости K_{Tp} с 0,39 для покрытия TiCN-TiN до 0,31 для покрытия TiN-TiZrN-TiN.

Как видно из рис. 4, такое изменение архитектуры многослойного покрытия отражается на работоспособности режущего инструмента. Так, повышение прочности адгезии покрытия TiCN—TiN за счет нанесе-

ния дополнительного слоя TiN и трещиностойкости покрытия за счет замены слоя TiCN на TiZrN привело к повышению периода стойкости пластин из BK6 с покрытиями TiN—TiCN—TiN и TiN—TiZrN—TiN в 1,2...2,1 раза при фрезеровании заготовок из титанового сплава BT22 и в 1,2...1,6 раза при фрезеровании заготовок из стали 12X18H10T в зависимости от архитектуры многослойного покрытия.

Выводы

- 1. Эффективность режущего инструмента при обработке заготовок из труднообрабатываемых материалов может быть обеспечена путем изменения состава покрытий, дополнительного энергетического воздействия на покрытие, созданием переходных адгезионных слоев между покрытием и инструментальной основой, а также применением многослойной архитектуры покрытий.
- 2. Применение перечисленных выше технологических приемов позволяет повысить работоспособность режущих пластин в 1,2...3,5 раза по сравнению с инструментом с покрытием TiN в зависимости от типа инструментального и обрабатываемого материалов, типа покрытия и режимов резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Табаков В.П.** Формирование износостойких ионноплазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
- 2. **Табаков В.П., Верещака А.С., Григорьев С.Н.** Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями. Ульяновск, УлГТУ, 2012. 172 с.
- 3. **Tabakov V.P.** The Influence of Machining Condition Forming Multilayer Coatings for Cutting Tools // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. Vol. 496. 2012. P. 80—85.
- 4. **Tabakov V.P., Vereschaka A.S.** Development of technological means for formation of multilayer composite coatings, providing increased wear resistance of carbide tools, for different machining condition // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. Vol. 581. 2014. P. 55—61.
- 5. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 18—39.
- 6. **Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.** Рентгеноструктурный и электронно-оптический анализ металлов. М.: Металлургиздат, 1970. 366 с.
- 7. **Табаков В.П., Чихранов А.В.** Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Изв. Самарского научного центра РАН. Т. 12. 2010. № 4. С. 292—297.



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯОБРАБОТКА

УДК 621.923

Д.И. Волков (Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева"), **А.В. Толкачёв** (ОАО "НПО "Сатурн", г. Рыбинск) E-mail: aleksandr.tolkachev@npo-saturn.ru

Упрочняющий эффект виброполировальной обработки

Показана возможность замены операции упрочнения поверхностным пластическим деформированием на виброполировальную обработку.

Ключевые слова: виброполировальная обработка, шероховатость поверхности, упрочнение, сжимающие напряжения.

Possibility of replacement of operation of hardening by a superficial flowage on vibropolishing treatment is presented.

Keywords: vibropolishing treatment, surface roughness, hardening, compressive stresses.

В современном машиностроении, и в частности в авиационном двигателестроении, важную роль играют надежность и долговечность деталей машины, так как выход из строя одной детали может привести к поломке всей машины [1].

Нагрузки, воспринимаемые деталями авиационного двигателя, носят циклический характер. Наиболее опасной является нагрузка, приводящая к растягивающим напряжениям в поверхностном слое детали. В результате циклического воздействия растягивающих напряжений в поверхностном слое детали возникают трещины, которые приводят к ее разрушению. В целях компенсации воздействия растягивающих напряжений используют технологические методы обработки, позволяющие создать в поверхностных слоях сжимающие напряжения. Большое распространение получил метод упрочнения поверхностным пластическим деформированием. Данный метод фактически сводится к пластической деформации поверхностного слоя материала детали. При этом лежащие под поверхностью упругодеформированные слои, пытаясь вернуться в исходное состояние, сжимают пластически деформированную поверхность. Пластическая деформация поверхности может быть произведена различными способами: выглаживанием, раскаткой, дробеструйной обработкой и т.д.

При исследовании процессов вибрационной обработки [2] было выявлено, что при виброполировальной обработке также формируются сжимающие остаточные напряжения. Данный эффект был использован для сокращения технологического цикла изготовления моноколес. По существующей базовой технологии межлопаточные каналы моноколес фрезеровались, затем требуемая шероховатость достигалась с помощью ручной полировальной обработки, после чего производилось упрочнение поверхностей колеса с использованием виброгалтовки в среде стальных шариков либо дробеструйной обработки. Существенным недостатком такой технологии является наличие ручной операции полирования. Ручная полировальная обработка моноколес характеризуется высокими затратами труда и низкой стабильностью получаемого результата.

В целях исключения влияния человеческого фактора на результат обработки и повышения производительности процесса вместо ручной полировальной обработки была внедрена виброполировальная обработка. Данный процесс позволил обеспечить улучшение шероховатости проточной части с Ra=1,6 мкм, которая была сформирована фрезерной обработкой, до Ra=0,8 мкм. На рис. 1 представлена зависимость изменения шероховатости проточной части от времени обработки.

В результате виброполировальной обработки кроме улучшения шероховатости были скруглены все острые кромки. Особенно данный эффект полезен на входной и выходной кромках, где требуется сформировать радиус.

Съем материала на кромках выше, чем на спинке и корыте. На спинке и корыте съем материала находится в пределах исходной шероховатости. На кромках он значительно больше. На рис. 2 представлены зависимости съема материала от времени обработки.

Различие значений съема материала на кромке и поверхности пера объясняется тем, что кромка подвергается более интенсивному воздействию абразивных

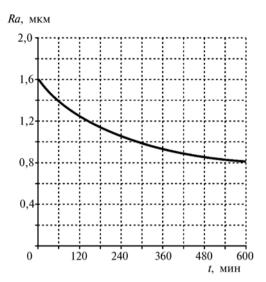


Рис. 1. Зависимость изменения шероховатости $\it Ra$ проточной части от времени обработки $\it t$

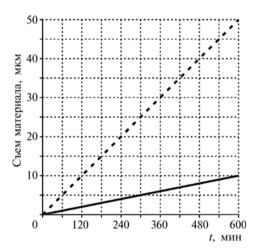


Рис. 2. Зависимости съема материала от времени обработки *t*: ---- съем на кромке; — съем на пере

гранул, так как вероятность воздействия абразивной гранулы на единичный участок поверхности зависит от площади, которую занимает абразивная гранула при контакте с деталью. На рис. 3 показано, что на спинке или на корыте абразивные гранулы занимают большую площадь, чем на кромке, по этой причине интенсивность воздействия абразивных гранул на единичный участок площади на кромке выше. Описанная зависимость выражается следующей формулой:

$$Q_{\Pi\Pi} = \frac{2Q_{\rm K}c}{d_1 + d_2},\tag{1}$$

где $Q_{\rm пл}$ — съем материала со спинки или корыта, м; $Q_{\rm K}$ — съем материала с кромки, м; c — толщина кромки, м; d_1, d_2 — габариты абразивной гранулы, м.

Таким образом, виброполировальная обработка может заменить ручную полировальную обработку про-

точной части и слесарную обработку, производимую в целях скругления кромок.

Представленная в статье работа была проведена на торовой виброполировальной установке с шириной рабочей камеры 400 мм. Моноколесо обрабатывалось в закрепленном состоянии, как показано на рис. 4. Стрелками показано направление потока абразивных гранул. Использовались абразивные гранулы на керамической связке в виде скошенного цилиндра Ø3 мм, длинной 5 мм. Обрабатывалось моноколесо Ø300 мм из материала ВТ3.

После достижения положительных результатов по шероховатости поверхности были выполнены исследования по определению остаточных напряжений. Напряжения замерялись на приборе ПИОН на прямоугольных образцах, вырезанных из детали. На рис. 5 представлена эпюра напряжений, сформированных после виброполировалной обработки.

Как показано на эпюре, примененный технологический процесс позволяет сформировать в поверхностном слое сжимающие напряжения величиной 125 МПа на поверхности. Наличие сжимающих напряжений

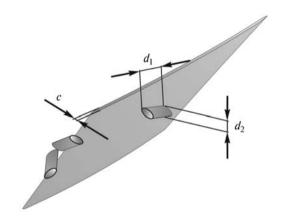


Рис. 3. Расположение абразивных гранул на кромке и на поверхности пера



Рис. 4. Моноколесо, закрепленное в виброполировальной установке

указанной величины позволило начать работу по отказу от проведения виброгалтовки. Для подтверждения возможности замены виброгалтовки на виброполировальную обработку был произведен замер напряжений, сформированных после виброгалтовки. Эпюра напряжений представлена на рис. 6.

Как видно на эпюрах, представленных на рис. 5 и 6, виброполировальная обработка позволяет сформи-

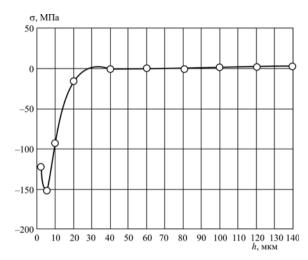


Рис. 5. Эпюра напряжений σ , сформированных после виброполировальной обработки:

h — глубина залегания остаточных напряжений

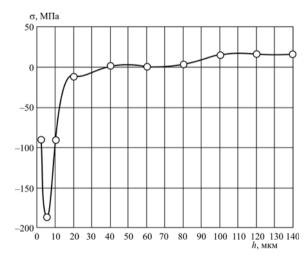


Рис. 6. Эпюра напряжений \sigma, сформированных после виброгалтовки: h — глубина залегания остаточных напряжений

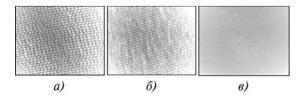


Рис. 7. Состояние поверхности на различных этапах виброполировальной обработки:

a — перед обработкой; б — после 20 % времени обработки; в — после 100 % времени обработки

ровать напряжения, сопоставимые с напряжениями, сформировавшимися после виброгалтовки. Полученный результат позволил отказаться от операции виброгалтовки, а следовательно, значительно сократить технологический процесс.

Наличие пластически деформированного слоя объясняется тем, что при виброполировальной обработке резание материала производится значительно притупленными абразивными зернами. В этих условиях глубина подминаемого слоя достигает нескольких микрометров и во многих случаях резания с отделением стружки не происходит, а происходит только подмятие материала. В целях подтверждения наличия следов абразивных гранул на всей обработанной поверхности несколько участков детали были изучены с помощью микроскопа, фотографии представлены на рис. 7. На фотографиях видно, что перед виброполировальной обработкой на поверхности имеется рельеф, характерный для фрезерной обработки; после 20 % от общего времени обработки поверх фрезерного рельефа присутствуют следы от воздействия абразивных гранул; после 100 % времени обработки фрезерный рельеф сглажен и представляет собой волнистость. При 100 % времени обработки вся поверхность покрыта следами от воздействия абразивных гранул, что косвенно подтверждает распространение сжимающих остаточных напряжений на всей обработанной поверхности.

Скорость резания при виброполировальной обработке не превышает 0,4 м/с. По этой причине деталь в зоне резания не получает достаточного для образования прижогов количества тепловой энергии. Отсутствие риска образования прижогов также является преимуществом виброполировального метода обработки по сравнению с ручной полировкой и позволяет отказаться от операции, отвечающей за проверку наличия прижогов.

Выводы

Внедрение виброполировальной обработки на деталях типа моноколесо позволяет:

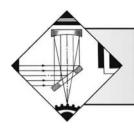
значительно сократить цикл изготовления детали и ликвидировать применение ручного труда;

повысить стабильность получаемого результата по формированию шероховатости обработанной поверхности;

обеспечить равномерное формирование сжимающих остаточных напряжений на всей обработанной поверхности моноколеса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Макеев Р.И., Толкачёв А.В.** Виброполировальная обработка в современном технологическом процессе // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 4. С. 49—50.
- 2. **Бабичев А.П.** Вибрационная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1974. 134 с.



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УЛК 621.375.826

В.А. Ким, М.С. Кочетков

(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет) E-mail: kmtnm@knastu.ru

Структурные превращения при лазерной обработке армко-железа

Предложена методика цветовой сегментации как алгоритма программной обработки изображения структуры, позволяющая разделять микроструктурные объекты по активности их химического взаимодействия с реактивом при травлении металлографического шлифа. Выполнен структурный анализ упрочнения армко-железа при лазерной обработке с использованием компьютерной металлографии и показана связь между количественными показателями структурной организации сформированной поверхностной структуры с ее микротвердостью.

Ключевые слова: структура, дефекты кристаллического строения, компьютерная металлография, цветовая сегментация, плотность микроструктурных объектов, удельная плотность границ, твердость.

The technique of color segmentation as algorithm of program processing of the image of structure, allowing to share microstructural objects on activity of their chemical interaction with a reactant when etching a metallographic shlif is offered. The structural analysis of hardening of armko-iron at laser processing with use of a computer metallography is made, and communication between quantitative indices of the structural organization of the created superficial structure with its microhardness is shown.

Keywords: structure, defects of a crystal structure, computer metallography, color segmentation, density of microstructural objects, specific density of borders, hardness.

Ввеление

Лазерное упрочнение углеродистых и легированных сталей представляет собой комплексный процесс структурных изменений, включающий генерацию дефектов кристаллического строения, образование химических соединений и фазово-структурные превращения. При исследовании структурных превращений в сплавах на основе железа, инициированных различными энергетическими воздействиями, в качестве эталонного обрабатываемого материала часто используют армко-железо, отличающееся пониженным содержанием легирующих элементов и примесей и не образующее закалочных мартенситных структур. Это позволяет исследовать в чистом виде многие структурные механизмы, уточняющие и развивающие теоретические представления упрочнения [1—4].

Изображение микроструктуры является срезом объемного строения материала в плоскости металлографического шлифа, с формальной точки зрения представляющим собой набор плоских геометрических фигур,

которые могут быть математически преобразованы в числовые множества. Полученные значения являются базами для расчета различных количественных показателей структурной организации материала [5—8].

Современные универсальные компьютерные программы обработки изображений позволяют анализировать биологические, геологические, машиностроительные и другие объекты. Большинство программных продуктов включает в себя специальные алгоритмы обработки изображений микроструктуры материалов, позволяющие вычислять количественные геометрические характеристики ее отдельных составляющих. К таким характеристикам, в частности, относят периметр P_i , площадь F_i и линейные размеры d_i каждого микроструктурного объекта, фрактальную размерность границ раздела D_i и др. Используя полученные значения, можно рассчитывать комплексные количественные показатели структурной организации для описания кинетики структурных превращений и прогнозирования физико-механических свойств материала при обработке и эксплуатации [9—12].

Большие возможности изучения строения материалов заложены в анализе цветности микроструктурных составляющих. Алгоритм цветовой сегментации, заложенный во многие программы обработки изображений, позволяет косвенно оценивать степень неравновесности и характер распределения микроструктурных составляющих по их структурно-энергетическим показателям.

В статье раскрывается методика цветовой сегментации и результаты ее практического применения при исследовании структурных изменений при лазерной обработке армко-железа.

Методика цветовой сегментации

Идентификация различных микроструктурных составляющих материала осуществляется путем химического или электрохимического травления поверхности металлографического шлифа. В результате на поверхности шлифа в виде микролокальных участков в границах каждого микроструктурного объекта образуются пленочные химические соединения определенных цвета и глубины оттенка или формируется сложный рельеф за счет растворения или осаждения продуктов реакции. Это приводит к изменению оптических свойств исходной зеркальной поверхности шлифа, которое фиксируется оптической микроскопией [13].

Активность протекания химической реакции при травлении шлифа определяется изменением свободной энергии или химическим потенциалом структурной составляющей. При правильном подборе способа и режима травления активность протекания химической реакции микроструктурного объекта с реактивом будет возрастать пропорционально величине его химического потенциала. В результате увеличивается масса продуктов реакции и формируется поверхность травления с более развитым рельефом. В светлом поле металлографического микроскопа за счет наложения тени и полутеней такая микроструктура отличается более глубоким темно-серым оттенком. Высокий химический потенциал характерен для микроструктур с повышенной плотностью дефектов кристаллического строения. К таким структурам в первую очередь можно отнести границы зерен, области матрицы, примыкающие к дисперсным частицам второй фазы, поля упругих напряжений вокруг микромасштабных концентраторов напряжений. На фотографиях микроструктур они отличаются более темным серым цветом [14].

Высокое значение химического потенциала не всегда гарантирует химическую активность микроструктурного образования. Другим фактором, влияющим на химическую активность, является электронное строение. Большинство дисперсных частиц, обладая высоким химическим потенциалом, может быть химически инертным из-за особенности их электронного

строения [15]. В окружающей дисперсную частицу матрице всегда формируется поле упругих напряжений, насыщенное различными дефектами кристаллического строения, по характеру травления которого можно идентифицировать саму дисперсную частицу.

Большинство программ обработки изображений содержит алгоритмы цветовой сегментации, позволяющие производить сортировку объектов изображения по цветам и глубине их оттенка. Для идентификации микроструктур по глубине темно-серого оттенка используется следующая градация. Простому черному цвету присваивается пиксель со значением 0, а белому -1. Для описания уровня серого цвета в 8-разрядном полутоновом изображении принято, что простой черный имеет суммарное значение 0 пикселей, а простой белый — 256. Различная глубина серого оттенка обеспечивается сочетанием черных и белых цветов (сочетаний 0 и 1 в пределах 256 пикселей). Для более точного ранжирования по глубине серого цвета можно использовать разложение изображения на цветовые каналы (красный, зеленый, синий) с последующей обработкой каждого полученного изображения по алгоритму полутоновой сегментации. В результате цветовой сегментации исходная цифровая фотография микроструктуры раскладывается на несколько изображений с разной глубиной темно-серого оттенка [16].

Методика исследования

Исследовались структурные изменения армкожелеза при импульсном лазерном воздействии. Упрочнение осуществлялось на импульсно-периодической лазерной установке LRS-300, создающей излучение с длиной волны 1064 нм. Плотность мощности B и удельная энергия E излучения рассчитывались по следующим формулам:

$$B = \frac{4W}{\pi d^2 \tau_{_{\mathrm{II}}}};$$
$$E = \frac{4W}{\pi d^2};$$

где W, $\tau_{\rm u}$ — энергия и длительность лазерного импульса соответственно; d — диаметр пятна воздействия.

Режимы лазерной обработки приведены в табл. 1.

Металлографические шлифы изготовлялись по традиционной методике на автоматическом станке AutoMet 250. Травление осуществлялось 4,0 %-м раствором азотной кислоты в спирте. Микроструктура фиксировалась с помощью металлографического микроскопа Nikon MA200 при 1000-кратном увеличении, а обработка изображений осуществлялась программой Image. Pro. Plus. 5.1. Микротвердость определялась с помощью микротвердомера HMV-2.

Таблица 1

Режимы лазерной обработки

№ п/п	<i>W</i> , Дж	<i>d</i> , м	τ _и , с	<i>E</i> ·10 ⁶ , Дж/м ²	<i>В</i> ·10 ⁹ , Вт/м ²
1	6,0	0,002	0,001	1,91	1,91
2	9,0	0,002	0,002	2,87	1,43
3	13,0	0,002	0,002	4,14	2,08
4	19,0	0,002	0,003	6,05	2,02
5	25,0	0,002	0,004	7,96	1,99

Таблица 2

Границы участков темно-серых оттенков и среднее значение каждого диапазона в пикселях

Диапазон	1	2	3	4	5
Границы диапазона	0/50	51/100	101/150	150/201	201/255
Среднее значение диапазона	25	75	125	175	225
Коэффициент темно-серого оттенка	0,902	0,707	0,511	0,316	0,121

Исследуемые изображения микроструктур предварительно подвергались корректировке резкости и пространственной калибровке. Цветовая сегментация проводилась без разложения цветовых каналов. Вся шкала глубин серого цвета была разделена на 5 интервалов, равных 50 пикселям. Коэффициент темно-серого оттенка вычислялся по формуле

$$K_{\rm rco}=1-\frac{A_{\rm cp}}{256}\,,$$

где $A_{\rm cp}$ — среднее значение диапазона темно-серого оттенка в пикселях.

Границы интервалов и их средние значения в пикселях приведены в табл. 2.

В каждом интервале темно-серых оттенков фиксировалось изображение, в результате чего контрастная маска исходного изображения раскладывалась на 5 контрастных масок с разной степенью темно-серых оттенков. Контрастные маски с высокими значениями $K_{\rm rco}$ фиксировали микроструктурные объекты, которые в результате травления приобретали более глубокие темные тона, т.е. обладали более высоким исходным химическим потенциалом.

По изображениям контрастных масок вычисляли число N всех микрообъектов, зафиксированных на определенном участке фотографии, площадь F_i и периметр P_i каждого из них. Полученные значения исполь-

зовались для расчета плотности микроструктурных объектов n и удельной длины границ микроструктурных объектов $f_{\rm vn}$:

$$n=rac{N}{F_{\Phi}}\,;$$

$$f_{
m y, I}=rac{\sum\limits_{N}P_{i}}{F_{\Phi}}\,,$$

где F_{Φ} — площадь участка на фотографии микроструктуры, в пределах которого осуществлялось вычисление геометрических характеристик микроструктурных объектов.

Полученные результаты и их анализ

На рис. 1 приведены микроструктуры армко-железа в исходном состоянии и после лазерной обработки (ЛО) на различных режимах (см. табл. 1).

В зависимости от режимов лазерного воздействия структурные изменения в обрабатываемом материале происходят при разных температурах, градиентах термических напряжений, скоростях нагрева и охлажде-

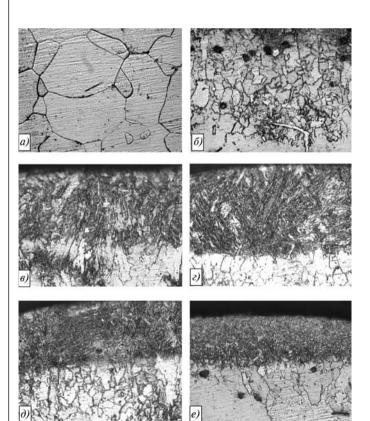


Рис. 1. Микроструктуры армко-железа после лазерной обработки: a — исходная; δ — 3TB (1-й режим ЛО); ϵ — 3P (2-й режим ЛО); ϵ — 3P (3-й режим ЛО); δ — 3P (4-й режим ЛО); ϵ — 3P (5-й режим ЛО)

ния. Упрочнение армко-железа, в котором углерод и легирующие элементы присутствуют в незначительной концентрации, происходит главным образом за счет развития вакансий, дислокаций и границ зерен и субзерен, инициированного тепловым импульсом. Основную роль в упрочнении поликристаллических материалов при импульсном тепловом воздействии играют дислокации, возникающие на границах зерен при их миграции вблизи концентраторов напряжений разных масштабных уровней. В твердофазной области развитие упрочненных структур определяется процессами полиморфных превращений и рекристаллизации, а в жидкофазной — соотношением скоростей образования центров кристаллизации и роста зерен. На эти процессы сильное влияние оказывает температура перегрева, положение изотерм полиморфных и фазовых превращений, которые при лазерном воздействии носят активный динамический характер [17, 18].

Микроструктура в зоне термического влияния (ЗТВ) характеризуется мелкими зернами неравноосной формы, ориентированными вдоль вектора градиента температур. Структуры, сформированные в зоне расплава (ЗР), преимущественно состоят из дендритов первого порядка, ориентированных вдоль вектора градиента температуры. При высокой температуре перегрева скорость роста центров кристаллизации достигает максимальных значений и формируется ультрадисперсная микроструктура, состоящая из равноосных зерен. При высоких скоростях нагрева и охлаждения граница между твердофазной и жидкофазной областями принимает более четкие очертания.

На рис. 2 приведены контрастные маски изображения микроструктуры армко-железа в исходном состо-

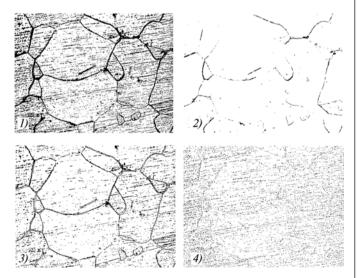


Рис. 2. Контрастная маска изображения исходной микроструктуры армко-железа (I) и ее разложения по глубине серого оттенка ($2-K_{\rm rco}=0.902;\,3-K_{\rm rco}=0.707;\,4-K_{\rm rco}=0.511$)

янии, разложенные по глубине темно-серого оттенка. На рис. 3 и 4 в качестве примеров приведены контрастные маски микроструктур ЗТВ и ЗР, полученные в результате разложения исходного изображения по методу цветовой сегментации.

Анализ результатов обработки контрастных масок показывает, что все микроструктурные объекты представляют вариации из точечных элементов, средний размер которых составляет 100...200 нм. Если такие точечные элементы условно отнести к нольмерным микроструктурам, то линейные микроструктуры представляют их упорядоченные комбинации. Тогда плот-

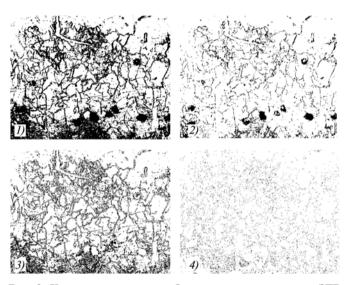


Рис. 3. Контрастная маска изображения микроструктуры ЗТВ (1-й режим ЛО) армко-железа (*I*) и ее разложения по глубине темно-серого оттенка ($2-K_{\rm rco}=0.902; 3-K_{\rm rco}=0.707; 4-K_{\rm rco}=511$)

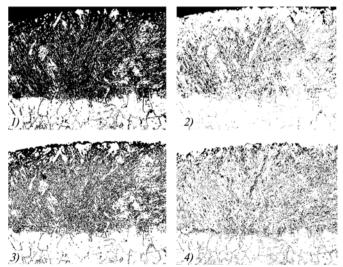


Рис. 4. Контрастная маска изображения микроструктуры 3Р (3-й режим ЛО) армко-железа (1) и ее разложения по глубине серого оттенка (2 — $K_{\rm rco}$ = 0,902; 3 — $K_{\rm rco}$ = 0,707; 4 — $K_{\rm rco}$ = 0,511)

ность микроструктурных объектов по сути представляет собой число нольмерных объектов, отнесенное к единичной площади поверхности (или 1 мкм²).

Напомним, что структурная организация материала является пространственно распределенной, поэтому мерность реального микроструктурного объекта, как правило, на единицу больше его отображения в плоскости металлографического шлифа. Точечные образования на изображениях микроструктур в реальности чаще всего являются линейными объектами, но могут также быть микролокальными полями упругих напряжений матрицы вокруг дисперсных частиц второй фазы, т.е. в реальности представлять собой нольмерные объекты [19]. Учитывая, что в структуре армко-железа нет достаточно большого числа дисперсных частиц второй фазы, можно с высокой степенью вероятности отнести точечные элементы на изображениях контрастных масок к пересечениям двухмерных структурных вариаций с плоскостью металлографического шлифа.

На рис. 5 и 6 представлены распределения микроструктурных объектов с разными коэффициентами темно-серого оттенка, где в качестве меры приняты плотность микроструктурных объектов n и удельная длина границ $f_{\rm уд}$. Указанные показатели отображают микроструктурные составляющие, ответственные за упрочнение поликристаллических материалов. Так, плотность микроструктурных объектов является аналогом плотности дислокаций, а удельная длина границ — степени развитости зеренных и субзеренных границ.

В общем случае лазерная обработка всегда приводит к повышению плотности микроструктурных объектов и удельной длины границ, но наибольшие значения характерны для структур, которые образуются в ЗР. Зависимости n и f_{yg} от удельной энергии и плотности теплового потока лазерного излучения носят экстремальный характер, при этом максимальные значения имеют место при коэффициенте темно-серого оттенка $K_{\text{тсо}} = 0,707$.

Сравнительный анализ распределений микроструктурных показателей подтверждает, что более эффективным барьером для торможения скользящих дислокаций и, соответственно, упрочнения являются границы зерен. Межзеренные границы при лазерном воздействии подвержены более сильному изменению по сравнению с другими дефектами кристаллического строения. При этом корреляционная зависимость "удельная длина границ — микротвердость" является более тесной по сравнению с зависимостью "плотность микроструктурных объектов — микротвердость".

Режимы лазерной обработки, обеспечивающие максимальную микротвердость (рис. 7), не совпадают с условиями, соответствующими экстремумам n и $f_{yд}$. Это указывает на то, что образование упрочненных структур представляет более сложный механизм, чем разви-

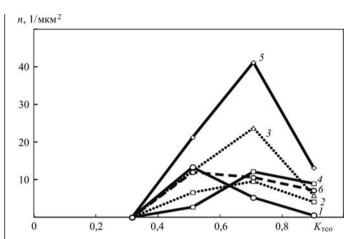


Рис. 5. Распределение плотности микроструктурных объектов по коэффициенту темно-серого оттенка:

I — исходная структура; 2 — 3ТВ (1-й режим ЛО); 3 — 3Р (2-й режим ЛО); 4 — 3Р (3-й режим ЛО); 5 — 3Р (4-й режим ЛО); 6 — 3Р (5-й режим ЛО)

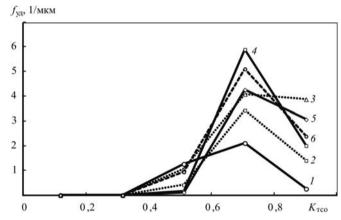


Рис. 6. Распределение удельной длины границ зерен по коэффициенту темно-серого оттенка:

I — исходная структура; 2 — 3ТВ (1-й режим ЛО); 3 — 3Р (2-й режим ЛО); 4 — 3Р (3-й режим ЛО); 5 — 3Р (4-й режим ЛО); 6 — 3Р (5-й режим ЛО)

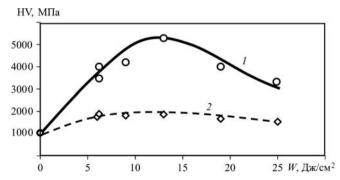


Рис. 7. Влияние плотности энергии лазерного излучения на твердость поверхностной структуры армко-железа:

1 - 30; 2 - 3TB

тие дислокаций, границ зерен и субзерен. Тем не менее предлагаемые количественные показатели структурной организации материала и методика цветовой сегментации позволяют глубже понять физические стороны процесса лазерного упрочнения и дают дополнительные показатели структурной организации материала, определяемые методом компьютерной металлографии.

Заключение

- 1. Применение армко-железа как эталонного материала при исследовании лазерного упрочнения позволяет в более чистом виде выявлять особенности развития дефектов кристаллического строения, инициированного мощными тепловыми импульсами.
- 2. Методика цветовой сегментации изображений микроструктур в совокупности с количественными показателями структурной организации материала открывает новые возможности компьютерной металлографии и позволяет ранжировать микроструктурные объекты по величине их химического потенциала.
- 3. Для сплавов, не подверженных дисперсионному твердению, цветовую сегментацию можно использовать как метод декорирования линейных дефектов кристаллического строения.
- 4. Лазерная обработка повышает плотность микроструктурных объектов и удельную длину границ, при этом с их ростом проявляется тенденция увеличения микротвердости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Данильченко В.Е., Польчук Б.Б.** Лазерное упрочнение технического железа // Физика металлов и металловедение. 1998. Т. 86. № 4. С. 124—128.
- 2. Пинахин И.А., Ядмуров М.А., Пинахин А.И. Повышение физико-механических свойств конструкционных сталей методом объемного импульсного лазерного упрочнения / Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2012. № 4. С. 58-61.
- 3. Огородников В.А., Боровкова Е.Ю., Ерунов С.В. Прочность некоторых марок стали и армко-железа при ударно-волновом сжатии и разгрузке в области давлений 2—200 МПа // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 5. С. 109-117.
- 4. **Особенности** локализации и стадийности пластической деформации субкристаллического армко-железа с полосовой

- фрагментированной субструктурой / А.В. Панин, А.А. Сон, Ю.Ф. Иванов, В.И. Копылов // Физическая мезомеханика. Т. 7. № 3. 2004. С. 5—16.
- 5. **Синергетика** и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. М.: Наука, 1994. 382 с.
- 6. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Москва—Ижевск: Научно-издательский центр "Регулярная и хаотическая динамика", 2001. 116 с.
- 7. **Мартюшев Н.В., Егоров Ю.П., Утьев О.М.** Компьютерный анализ структуры материалов // Обработка металлов. 2003. № 3. С. 32—34.
- 8. **Автоматизация** анализа металлографических структур / С.В. Литовченко, Т.В. Малыхина, О.Л. Шпагина, В.О. Шпагина // Вестник Харьковского национального университета. 2011. № 960. С. 215—223.
- 9. **Quantitative** Structure-and-Energy Analysis of Heat Treatment of Structural Steel / Kim V.A., Petrov V.V., Butin A.V. et al. // Metal Science and Heat Treatment. Vol. 52. № 3—84. 2010. P. 163—165.
- 10. **Kim V.A., Belova I.V., Boutin A.V.** Kinetics of structural of hardened steel 15H5M during tempering // Modern materials and technologies. 2013. № 1. P. 126—131.
- 11. **Башков О.В., Ким В.А., Попкова А.А.** Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 79. № 10. 2013. С. 34—40.
- 12. Статистическая оценка количественной металлографии / В.А. Ким, Р.В. Евдокимова, С.В. Золоторева и др. // Ученые записки КнАГТУ. 2013. № II—1 (14). С. 76—82.
- 13. **Беккерт М., Клемм Х.** Способы металлографического травления: Справ. изд.: Пер. с нем. М.: Металлургия, 1988. 400 с.
- 14. **Брандон Д., Каплан У.** Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
- 15. Верхотуров А.Д., Шпилев А.М. Введение в материалогию. Владивосток: Дальнаука, 2010. 780 с.
- 16. **Претт У.** Цифровая обработка изображений / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 480 с.
- 17. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение, 1975. 296 с.
- 18. **Взаимодействие** лазерного излучения с металлами / А.М. Прохоров, В.И. Конов, И. Урсу, И.Н. Михэилеску. М.: Наука, 1988. 537 с.
- 19. **Князев А.Г.** О моделировании необратимых процессов в материалах с большим числом внутренних поверхностей // Физическая мезомеханика. Т. 6. № 5. 2003. С. 11—27.

УДК 621.793.74

А.Е. Селезнев, А.А. Шеин

(Московский государственный технологический университет "СТАНКИН") E-mail: science@stankin.ru

Разработка и исследование вакуумно-плазменных покрытий для повышения работоспособности разделительных штампов*

Предложены технологические принципы низкотемпературного нанесения многослойных вакуумно-плазменных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами на различные типы штамповых сталей в режиме ассистирования пучком ускоренных молекул аргона. Рассмотрены четыре типовых варианта архитектуры вакуумно-плазменных покрытий: Ti/(Ti, Zr)N, Cr/CrN, TiN/TiCN/(Ti, Cr)N и Ti/(Ti, Al)N. Показано, что нанесение при оптимальных режимах вакуумно-плазменных покрытий предложенных составов значительно снижает интенсивность изнашивания разделительных штампов, в результате чего в несколько раз повышается качество штампованных изделий.

Ключевые слова: штампы, вырубка, износ, низкоуглеродистая сталь, алюминиевый сплав, коррозионно-стойкая сталь, углеродистая сталь.

The technological principles of low-temperature deposition of multilayer vacuum-plasma coatings with the increased operational properties on various types of die steels with the assistance of accelerated argon molecules beam are offered in the article. Four standard architecture of vacuum-plasma coatings: Ti/(Ti, Zr) N, Cr/CrN, TiN/TiCN/(Ti, Cr) N and Ti/(Ti, Al) N are considered. It is shown that deposition of vacuum-plasma coatings of the listed structures at the optimum modes considerably reduces intensity of wear of shearing dies therefore quality of shaped products several times increases.

Keywords: dies, cutting-out, wear, low-carbon steel, aluminum alloy, corrosion-resistant steel, carbon steel.

Введение

Практика показывает, что интенсивный износ рабочих поверхностей разделительных штампов существенно снижает показатели качества штампуемых деталей. При этом увеличение сопротивления разделению может составить до 20 %, а общей работы разделения — до 40 % по сравнению с эксплуатацией инструмента с острозаточенными режущими кромками [1—4]. Поэтому поиск и исследование технологических решений, направленных на повышение работоспособности разделительных штампов при различном характере их нагружения и улучшение качества штампуемых деталей, является важной задачей.

Распространенным промышленным способом снижения интенсивности изнашивания металлообрабатывающих инструментов является нанесение на их рабочие поверхности различных покрытий [5—7]. В листоштамповочном производстве технологии нанесения покрытий не нашли очень широкого применения. В первую очередь, это связано со сложными динамическими нагрузками, которым подвергаются рабочие поверхности инструментов в процессе штамповки,

что делает неэффективным применение традиционных для других областей металлообработки покрытий типа TiN, TiCN и др.

Особенности изнашивания разделительных штампов и функции покрытий

В зависимости от технологических условий процесса разделительной штамповки и действующих нагрузок могут наблюдаться различные механизмы разрушения и причины отказов пуансона и матрицы: адгезионное и абразивное изнашивание, выкрашивание рабочих поверхностей, отпуск тонкого поверхностного слоя и интенсивное налипание на рабочие поверхности инструмента деформируемого материала. На практике может иметь место различное сочетание указанных механизмов изнашивания разделительных штампов [8—11].

Как показали эксперименты, проведенные в ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", реализация различных механизмов изнашивания рабочих поверхностей разделительных штампов ведет к ухудшению того или иного показателя качества штампуемых деталей [10, 11]. Например, налипание деформируемого материала на инструмент в процессе штамповки ведет к образованию на поверхности разделения штампуемой детали кратеров, а интенсивное адгезионное изнашивание способствует образованию заусенцев на торцевых поверхностях детали.

^{*} Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН" в сфере научной деятельности.

Несмотря на разнообразие причин потери работоспособности инструмента ее повышение во всех случаях может быть достигнуто за счет улучшения того или иного свойства поверхности и поверхностного слоя: снижения коэффициента трения, повышения твердости, теплостойкости и сопротивления хрупкому разрушению. Такие изменения свойств поверхности и поверхностного слоя разделительных штампов в полной мере могут быть достигнуты нанесением различных по конструкции и составу покрытий [7, 10, 12].

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований показывает, что в зависимости от условий процесса разделительной штамповки износостойкие покрытия, наносимые на рабочие поверхности инструмента, должны выполнять функции:

высокотвердого поверхностного слоя, препятствующего абразивному изнашиванию рабочих поверхностей инструмента в процессе штамповки;

промежуточной среды, обладающей низким сродством с деформируемым материалом и препятствующей интенсивному схватыванию в условиях адгезионного изнашивания;

антифрикционной твердой смазки, минимизирующей налипание деформируемого материала на инструмент в процессе штамповки;

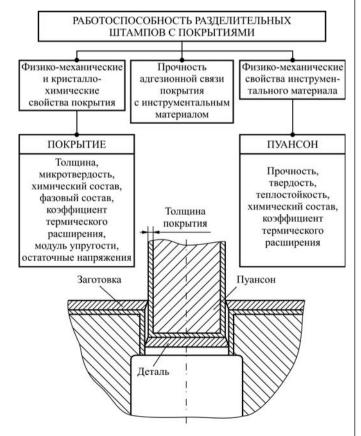


Рис. 1. Принципиальная схема разделительного штампа с покрытием и факторы, влияющие на его работоспособность

барьерного слоя, препятствующего отпуску поверхностного слоя инструмента в результате воздействия повышенных термических нагрузок;

барьерного слоя, способного тормозить или останавливать распространение сетки усталостных трещин, приводящей к макровыкрашиванию рабочих кромок.

На рис. 1 представлены упрощенная схема разделительного штампа с покрытием и некоторые факторы, влияющие на его работоспособность. Разработка технологии нанесения и состава покрытия, которое в комплексе с основным инструментальным материалом обеспечивало бы высокую работоспособность инструмента, является чрезвычайно сложной задачей. Практика показывает, что выбор неоптимальных по составу покрытия и режимов его нанесения может не только не повысить работоспособность инструмента, но в ряде случаев даже снизить ее. Во избежание этого в первую очередь необходимо учитывать теплосиловые нагрузки, которым подвергаются рабочие поверхности инструмента в процессе эксплуатации.

Для борьбы с адгезионным износом целесообразно использовать покрытия, которые будут противодействовать установлению адгезионной связи на атомном уровне по контактной поверхности инструмента и протеканию взаимной диффузии инструментального и обрабатываемого материалов. Для борьбы с усталостным изнашиванием, связанным с накоплением дефектов, приводящих в процессе штамповки к образованию микротрещин, разрушению и отделению микрообъемов материалов инструмента, целесообразно использовать такие покрытия, технология нанесения которых предусматривает создание на поверхности сжимающих остаточных напряжений.

Технология нанесения вакуумно-плазменных покрытий на разделительные штампы

Метод вакуумно-дугового (вакуумно-плазменного) испарения нашел широкое промышленное распространение благодаря высоким производительности нанесения (до 40 мкм/ч) и степени ионизации осаждаемого потока частиц (до 90 %), хорошей прочности адгезионной связи покрытия с матрицей, возможности управления процессом нанесения и формирования композиционных покрытий с требуемым комплексом свойств.

На рис. 2 представлена блок-схема процесса нанесения покрытий на инструментальные материалы вакуумно-дуговым испарением.

В целях обеспечения необходимых очистки и активации поверхности процесс нанесения покрытий предусматривает ионный нагрев инструмента до температур 500 °С и выше при подаче на инструмент высокого отрицательного потенциала. Поскольку рабочие элементы разделительных штампов в зависимости от се-

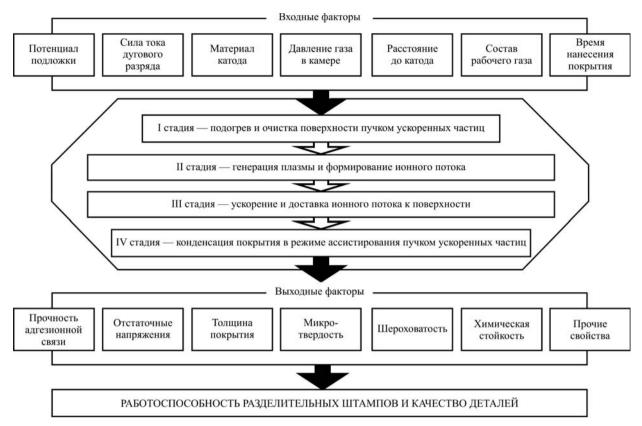


Рис. 2. Блок-схема процесса нанесения покрытий вакуумно-дуговым испарением

рийности и других условий организации производства изготовляются из нетеплостойких (220...250 °C) сталей типа У10А, ХВГ и полутеплостойких (490...510 °C) инструментальных сталей Х12М и Х12Ф4М, применение к ним традиционных технологических приемов вакуумно-плазменного нанесения покрытий нецелесообразно. Даже незначительное превышение температуры нанесения покрытий относительно уровня, допустимого теплостойкостью инструментального материала, неизбежно ведет к отпуску рабочих кромок и потере работоспособности инструмента.

В то же время недостаточные очистка и активация поверхности зачастую приводят к отслоению покрытий уже в первые минуты работы инструмента, что является следствием низкой прочности адгезионной связи покрытия с поверхностями инструмента.

Для решения проблемы снижения температуры в процессе нанесения на штамповые стали вакуумноплазменных покрытий было использовано инновационное устройство, разработанное в ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН", генерирующее пучок ускоренных нейтральных молекул различных газов (например, аргона), обеспечивающих требуемый нагрев и очистку поверхности за счет своей кинетической энергии. В данном случае даже при существенном снижении значения отрицательного потенциала или вообще без его подачи возможны необходимые очистка и актива-

ция поверхности. При этом температура нагрева поверхности образцов не превышает 180 °C, что обеспечивает возможность длительного травления поверхности субстрата без отпуска или коробления рабочей кромки инструмента.

Использование описанного технологического решения позволяет устранить еще один существенный недостаток, характерный для традиционной технологии вакуумно-плазменного осаждения. Дело в том, что при очистке и активации поверхности инструмента сложного профиля распределение плазмы, состоящей из потока заряженных частиц, имеет специфические особенности — наибольшая концентрация заряженных частиц наблюдается на острых кромках инструмента, а в углубления плазма практически не проникает. Высокая плотность ионного тока на острых кромках часто приводит к их затуплению, а недостаточная очистка в пазах и углублениях не позволяет обеспечивать высокую прочность адгезионной связи покрытия по всей рабочей поверхности инструмента. Как показывает практика, именно с этих мест и начинается отслоение покрытий в процессе эксплуатации инструмента.

Плазма, состоящая из нейтральных молекул различных газов, однородно распределяется по поверхности инструмента любой геометрической формы и обеспечивает равномерную очистку в пределах прямой видимости всех сложнопрофильных поверхностей.

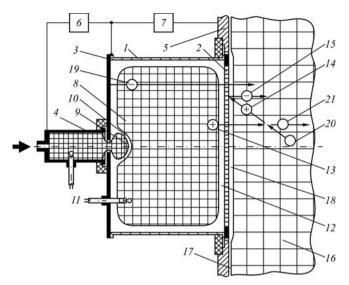


Рис. 3. Конструкция источника пучка быстрых нейтральных молекул:

1— полый катод; 2— сетка; 3— диск; 4— полый анод; 5— фланец вакуумной камеры; 6— источник питания разряда; 7— источник напряжения смещения; 8— катодная плазма; 9— анодная плазма; 10— двойной электростатический слой; 11— термозонды; 12, 17, 18— слои положительного объемного заряда; 13, 14— ионы; 15, 19— электроны; 16— синтезированная плазма; 20— молекула газа; 21— быстрая нейтральная молекула

На рис. 3 представлена схема устройства. Оно содержит цилиндрический полый катод 1 диаметром 12 см и длиной 8 см, перекрытый с одной стороны сеткой 2в виде диска толщиной 2 мм с 1224 отверстиями диаметром 2 мм, а с другой стороны — диском 3 с центральным отверстием диаметром 8 мм. Через это отверстие катодная полость сообщается с полым анодом 4 диаметром 2 см и длиной 4 мм. Полый катод 1 установлен в центре торцевого фланца 5 вакуумной камеры диаметром 26 см и длиной 30 см, откачиваемой диффузионным насосом с азотной ловушкой. Газ подается в полый анод 4, через отверстие диаметром 8 мм он перетекает в полый катод 1 и далее через катодную сетку 2 поступает в вакуумную камеру. При достаточной скорости протока газа давление внутри полого анода 4 на порядок превышает давление в полом катоде 1 и камере. Катод 1, анод 4 и камера изготовлены из немагнитной нержавеющей стали и изолированы друг от друга.

Разряд между анодом и катодом поддерживается выпрямителем 6 с напряжением до 1,5 кВ, а источник 7 позволяет изменять потенциал ϕ катода относительно камеры от -1 до +1 кВ. Два соленоида, охватывающие торцевые фланцы камеры, создают однородное во всем объеме полого катода и камеры аксиальное магнитное поле напряженностью до 500 Э, а оптическое окошко в центре противоположного фланца камеры позволяет наблюдать через сетку свечение разряда внутри катода.

При зажигании разряда катод 1 заполняется достаточно однородным свечением плазмы 8, а в области его центрального отверстия наблюдается более яркое свечение анодной плазмы 9 двойного электростатического слоя 10, проникающей в катод 1 из полого анода 4.

В отличие от разрядных устройств здесь анодная плазма слоя не распадается при давлении аргона ~ 0.1 Па, так как благодаря перепаду давлений плотность нейтральных молекул в анодной полости превышает при этом пороговую плотность атомов аргона $n_c \approx 0.75 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$. Измеренное с помощью термозондов II падение потенциала на двойном слое составляет 10...40 В, что в десятки раз меньше разрядного напряжения U. Поэтому почти все разрядное напряжение сосредоточено в слое 12 между катодной плазмой 8 и катодом I с сеткой 2 и диском 3.

Часть ускоряемых в слое 12 ионов 13 через отверстия сетки 2 поступает в камеру, и это приводит к повышению потенциала пространства внутри нее. В результате взаимодействия ионов 13 и 14 со стенками камеры и сеткой 2 появляются вторичные электроны 15. Они захватываются в электростатическую ловушку пространственного заряда ионов и компенсируют этот заряд, совершая в ловушке многократные осцилляции. Так происходит синтез квазинейтральной плазмы 16, отделенной от стенки 5 камеры слоем положительного объемного заряда 17.

На рис. 4 представлен общий вид экспериментальной установки, оснащенной описанным выше источником пучка быстрых нейтральных молекул, которая использовалась для нанесения покрытий на разделительные штампы.



Рис. 4. Общий вид экспериментальной установки для нанесения на инструмент износостойких покрытий вакуумно-дуговым испарением

Технические характеристики экспериментальной установки

Размер рабочей камеры, мм:
диаметр вписанной окружности800
высота
Число токоподводящих электродов
(испарителей) Не более 6
Максимальная нагрузка на шпиндель (вал), Н1100
Максимальная допустимая нагрузка
на ось сателлита механизма вращения, Н
Диапазон плавного регулирования частоты
вращения стола (в обе стороны), ГцОт 5 до 50
Длительность цикла упрочнения
инструмента, ч
Скорость осаждения покрытия
(нитрида титана), мкм/чОт 5 до 40
Номинальная сила тока источника
напряжения смещения, А
Диапазон плавного регулирования
напряжения смещения, В От 0 до 1200
Потребляемая мощность, кВт85
Напряжение питающей сети, В
Число фаз
Частота тока, Гц50
Входное давление сжатого воздуха, атм
Остаточное давление в камере, $\Pi a \dots O t 6,65 \cdot 10^{-3}$
до $6,65\cdot10^{-1}$
Расход охлаждающей воды, м 3 /ч Не более 2
Масса установки, т

На основе исследования свойств существующих перспективных тонкопленочных покрытий и опыта их применения были предложены четыре различных варианта износостойких покрытий, обеспечивающих повышение работоспособности рабочих элементов разделительных штампов и качества штампуемых деталей при различном характере действующих нагрузок и механизмов изнашивания:

- 1. Покрытие Ti/(Ti, Zr)N для повышения работоспособности инструмента в условиях одновременного протекания адгезионного и абразивного изнашивания. Наружный слой на основе нитрида (Ti, Zr)N повышает микротвердость рабочих поверхностей инструмента (до 28 ГПа) и обладает повышенной стойкостью к молекулярному схватыванию с большинством обрабатываемых материалов. Введение подслоя из титана обеспечивает повышение прочности адгезионной связи наружного слоя и инструментального материала за счет снижения разницы в их физико-механических и теплофизических свойствах, приводящей к образованию в покрытии больших остаточных напряжений.
- 2. Покрытие Cr/CrN для повышения работоспособности инструмента в условиях адгезионного изнашивания и интенсивного налипания материала заготовки на рабочие поверхности инструмента. Наружный слой на основе нитрида CrN одновременно с повышением антифрикционных свойств (снижением коэффи-

циента трения до 2 раз) увеличивает микротвердость рабочих поверхностей инструмента до 14 ГПа.

- 3. Покрытие TiN/TiCN/(Ti, Cr)N для повышения работоспособности инструмента в условиях хрупкого разрушения (выкрашивания) рабочих кромок и абразивного изнашивания. Данное покрытие эффективно тормозит развитие трещин, так как состоит из чередующихся трех слоев переменной твердости, существенно повышает трещиностойкость и вязкость разрушения композиции "покрытие—инструмент". Наружный слой покрытия, состоящий из нитрида (Тi, Cr)N, повышает микротвердость рабочих поверхностей инструмента до 24 ГПа.
- 4. Покрытие Ti/(Ti, Al)N для повышения работоспособности инструмента в условиях частого перегрева рабочих кромок и/или интенсивного абразивного изнашивания. Отличительными особенностями нитрида (Ti, Al)N помимо его повышенной микротвердости (до $37\ \Gamma\Pi a$) являются высокая термостойкость и образование при нагреве на его поверхности плотного аморфного слоя Al_2O_3 , служащего своеобразным тепловым барьером, защищающим поверхностные слои инструмента от воздействия термических нагрузок, часто име-

Режимы нанесения различных вариантов покрытий на инструмент из полутеплостойкой стали

Состав покрытия		Режим нанесения			
		<i>P</i> , Па	Т, мин	U, B	I, A
(Ti,Zr)N	Ti	0,25	8	160	90
Ti	(Ti, Zr)N	0,4	45	130	100
X12M					
CrN	Cr	0,25	10	170	80
Cr	CrN	0,35	40	170	80
X12M					
(Ti,Cr)N	TiN	0,4	20	160	90
TiCN	TiCN	0,45	40	150	90
X12M	(TiCr)N	0,4	35	170	80
(Ti,Al)N	Ti	0,25	8	160	90
Ti	(Ti, Al)N	0,45	50	190	60
X12M					

ющих место при штамповке коррозионно-стойких сталей и других труднодеформируемых материалов.

В таблице представлены сводные данные о рекомендуемых режимах нанесения покрытий на инструмент из стали типа X12M — давлении газа в камере P, времени нанесения покрытия T, потенциалах подложки U и силе тока дугового разряда I.

Влияние вакуумно-плазменных покрытий на работоспособность разделительных штампов

При проведении экспериментов моделировались различные механизмы изнашивания, характерные для реальных условий эксплуатации разделительных штампов. Для этого были изготовлены четыре группы различных по форме и размерам образцов пуансонов и матриц из стали X165CrMoV12 по стандарту DIN 17350 (российский аналог — сталь X12M), на которые в соответствии с разработанными технологическими принципами были нанесены вакуумно-плазменные покрытия различного состава.

На рис. 5 представлена конструкция штампа и оснастки, используемых при проведении экспериментальных исследований.

Испытания штампового инструмента с покрытиями, нанесенными при различных технологических режимах, проводились при вырубке-пробивке изделий различных типоразмеров:

с покрытием Ti/(Ti, Zr)N — при пробивке отверстий в листовом материале из низкоуглеродистой стали 08Ю толщиной 4 мм в условиях одновременного протекания адгезионного и абразивного изнашивания;

с покрытием Cr/CrN — при вырубке наружного контура детали типа "рычаг" в листовом материале из алюми-



Рис. 5. Конструкция штампа и оснастки, используемых при проведении эксплуатационных испытаний инструментов с вакуумно-плазменными покрытиями

ниевого сплава АМг6 толщиной 4 мм в условиях адгезионного изнашивания и интенсивного налипания материала заготовки на рабочие поверхности инструмента;

с покрытием TiN/TiCN/(Ti, Cr)N — при вырубке наружного контура детали типа "звездочка" в листовом материале из высокоуглеродистой стали У8 толщиной 4 мм в условиях интенсивного выкрашивания и абразивного изнашивания рабочих поверхностей инструмента;

с покрытием Ti/(Ti, Al)N — при пробивке отверстий в листовом материале из коррозионно-стойкой стали 12X18H9T толщиной 4 мм в условиях частого перегрева и, как следствие, отпуска рабочих кромок.

Проведенные эксперименты показали, что нанесение покрытий предложенных составов при оптимальных режимах вносит заметный вклад в снижение интенсивности изнашивания разделительных штампов и улучшение показателей качества выпускаемой продукции.

Нанесение покрытий более чем 2,5 раза увеличивает протяженность зоны замедленного изнашивания, не изменяя при этом расположение очагов износа на инструменте. Это справедливо для всех рассматриваемых групп обрабатываемых материалов. В качестве примера на рис. 6 представлены фрагменты результатов экспериментальных исследований зависимости износа пуансона с различными покрытиями от числа отштампованных деталей из стали 08Ю.

Результаты экспериментов, проведенных на образцах из стали 08Ю и алюминиевого сплава АМг6, отличающихся наиболее интенсивным заусенцеобразованием, также показали заметный эффект от использования предложенных покрытий. В частности, после вырубки-пробивки 50 тыс. деталей было отмечено снижение высоты заусенца в 2 раза при деформировании

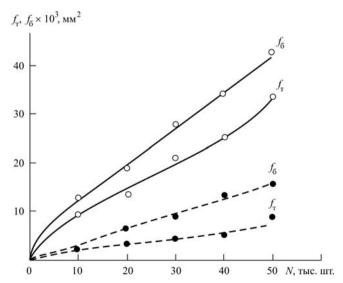


Рис. 6. Зависимость торцевого $f_{\rm T}$ и бокового $f_{\rm 6}$ износов пуансона при пробивке отверстий в образце толщиной 4 мм из стали 08Ю от числа отштампованных ранее деталей N:

-0- — без покрытия; -•- — с покрытием Ti(Ti, Zr)N

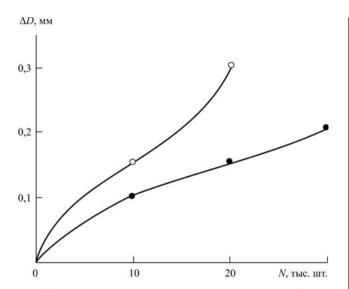


Рис. 7. Зависимость изменения размера отверстия, пробиваемого в материале толщиной 4 мм из стали 12X18H9T, от числа отштампованных ранее деталей N:

-0- — без покрытия; -•- — с покрытием Ti(Ti, Al)N

низкоуглеродистой стали и в 3 раза при деформировании алюминиевого сплава.

Аналогичные результаты были получены при исследовании влияния вакуумно-плазменных покрытий на изменение размеров штампуемых деталей. Рисунок 7 показывает изменение размера отверстия, пробиваемого в стали 12X18Н9Т, в зависимости от числа отштампованных ранее деталей. Видно, что нанесение предложенного покрытия позволяет в 2 раза уменьшить отклонение размера отверстия после пробивки 20 тыс. отверстий.

Заключение

Для обеспечения возможности нанесения высококачественных покрытий на нетеплостойкие стали типа У10А, ХВГ и полутеплостойкие инструментальные стали типа Х12М и Х12Ф4М могут быть использованы предложенные в работе технологические принципы низкотемпературного нанесения многослойных вакуумно-плазменных покрытий с повышенными эксплуатационными свойствами на различные типы штамповых сталей в режиме ассистирования пучком ускоренных молекул аргона. Предлагается использовать четыре типовых варианта архитектуры вакуумно-плазменных покрытий: Ti/(Ti, Zr)N, Cr/CrN, TiN/TiCN/(Ti, Cr)N и Ti/(Ti, Al)N.

На основе обработки результатов эксплуатационных испытаний установлено, что нанесение при оптимальных режимах вакуумно-плазменных покрытий предложенных составов снижает интенсивность изнашивания разделительных штампов более чем в 2,5 раза, в результате чего высота заусенца, формируемого на торцевой поверхности детали, уменьшается до 3 раз, а отклонение размеров деталей — в 2 раза.

Таким образом, комплекс проведенных исследований демонстрирует, что нанесение вакуумно-плазменных покрытий при рационально подобранных архитектуре и технологических условиях является эффективным способом улучшения качества штампуемых деталей и повышения работоспособности разделительных штампов в условиях действия широкого спектра эксплуатационных нагрузок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Вишневский И.О., Константинов В.Ф.** Повышение стойкости разделительных штампов. М.: Машиностроение, 1984. 120 с.
- 2. **Сосенушкин Е.Н.** Развитие систем пластического деформирования // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2010. № 1. С. 30—38.
- 3. **Сосенушкин Е.Н., Овечкин Л.М., Сосенушкин А.Е.** Совершенствование процессов интенсивной пластической деформации // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2012. Т. 1. № 1. С. 21—29.
- 4. **Артес А.Э.** Развитие кузнечно-прессового производства в отечественном машиностроении // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2010. № 2. С. 6—12.
- 5. **Волосова М.А.** Вакуумно-плазменные технологии: получение наноструктурных покрытий триботехнического и инструментального назначения // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2010. № 4. С. 66—73.
- 6. **Григорьев С.Н., Метель А.С., Федоров С.В.** Модификация структуры и свойств быстрорежущей стали путем комбинированной вакуумно-плазменной обработки // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 1. С. 9—14.
- 7. **Вакуумно-дуговые** многослойные наноструктурные TiN/Ti покрытия: структура, напряженное состояние, свойства / О.В. Соболь, А.А. Андреев, С.Н. Григорьев и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 1. С. 28—33.
- 8. **Шеин А.А.** Технологическое обеспечение качества деталей в процессах разделительной штамповки путем нанесения на инструмент вакуумно-плазменных покрытий: Дис. ... канд. техн. наук / МГТУ "СТАНКИН". М., 2005. 156 с.
- 9. **Практическое** использование изменения механических характеристик конструкционных углеродистых сталей при холодной объемной штамповке / А.М. Дмитриев, Ф.В. Гречников, Н.В. Коробова, Н.С. Толмачев // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2014. № 4 (31). С. 41—44.
- 10. **Исследование** механизма и кинетики изнашивания разделительных штампов из полутеплостойких сталей в процессе обработки изделий из различных конструкционных материалов / Н.Ю. Черкасова, А.А. Шеин, Г.В. Антоненкова, Е.С. Сотова // Трение и износ. Т. 34. № 3. 2013. С. 284—292.
- 11. **Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Толмачев Н.С.** Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования напряжений на элементе деформирующего инструмента // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2014. № 2 (29). С. 44—49.
- 12. **Вакуумно-дуговые** наноструктурные TiN покрытия / A.A. Андреев, С.Н. Григорьев, В.Ф. Горбань и др. // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2010. № 3. С. 14—17.

УДК 621. 793.74

К.А. Слюдеев, А.А. Ляпин, Г.К. Клименко

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана) E-mail: skaz 1989@mail.ru

Исследование коррозионных свойств образцов из стали Ст3 с покрытием из диоксида циркония

Приводятся результаты исследований коррозионной стойкости образцов из стали Cm3 с покрытиями из диоксида циркония. Покрытия получены методом плазменного атмосферного напыления. Испытания проводились при комнатных условиях в 5%-ном водном растворе NaCl, имитирующем морскую воду. Наблюдалось значительное уменьшение глубины проникновения сплошной коррозии и питтинга.

Ключевые слова: плазменное атмосферное напыление, диоксид циркония, морская среда, коррозионная стой-кость, общая коррозия, питтинг, коррозиметр.

The article is devoted to the results corrosion resistance tests of the steel St3 samples coated with zirconium dioxide. The coatings were produced by atmospheric plasma spraying. The tests were conducted upon indoor conditions in a 5 % aqueous solution of NaCl which is simulated seawater. Tests showed a significant reduction in the depth of general corrosion and pitting corrosion.

Keywords: atmospheric plasma spraying, zirconium dioxide, marine environment, corrosion resistance, general corrosion, pitting corrosion, corrosion tester.

Введение

Коррозия стальных конструкций является проблемой для многих отраслей промышленности. Ежегодно коррозия приводит к выходу из строя большого количества оборудования. Одним из видов коррозии является морская коррозия, которой подвержены плавательные средства, морские сооружения, нефте- и газопроводы и др.

Особенностями морской коррозии металлов являются:

- 1) большая агрессивность морской воды и морской атмосферы;
- 2) наличие дополнительного механического фактора (эрозии и кавитации);
- 3) сильное проявление контактной коррозии металлов;
- 4) значительное влияние биологического фактора (обрастания подводной части металлических конструкций морскими растительными и животными организмами).

Целью описываемых в данной статье исследований было определение коррозионных эффектов (интегральных показателей) сплошной коррозии и питтинговой коррозии образцов из Ст3 с покрытиями на основе диоксида циркония в морской среде.

Сплошной (общей) коррозией называют коррозию, охватывающую всю поверхность металла, находящуюся под воздействием коррозионной среды [1]. Питтинговой (точечной) коррозией называют отдельные точечные поражения [1]. В качестве коррозионных эффектов для общей и питтинговой коррозии оценивались их глубина и время проникновения [2].

Плазменное атмосферное напыление покрытий из диоксида циркония

В качестве способа защиты стали Ст3 от морской коррозии предлагается использовать покрытия из диоксида циркония, созданные методом плазменного атмосферного напыления. Напыление покрытий осуществлялось с помощью трехэлектродного плазматрона ПУН-1М с одиночной металлической вставкой. Максимальная мощность плазматрона 36 кВт. В процессе напыления напряжение разряда составляло 200 В, ток разряда — 180 А, расход плазмообразующего воздуха — 6 м³/ч при нормальных условиях. Охлаждение водяное, расход воды на охлаждение составил 0,8 м³/ч.

Перед напылением поверхность образцов была подвержена пескоструйной обработке. Время между пескоструйной обработкой и напылением составляло менее двух часов. При напылении образцы устанавливались на расстоянии 120 мм от среза плазматрона. Порошок диоксида циркония подавался на срез плазматрона. Плазматрон перемещался относительно образцов со скоростью 56 мм/с. При напылении использовался порошок различного фракционного состава.

Методика определения коррозионных эффектов

Для определения эффектов сплошной коррозии и питтинга образцов с покрытием была проведена серия экспериментов при комнатных условиях в среде 5 %-ного водного раствора NaCl, имитирующего морскую среду.

Измерения проводились с помощью универсального автоматического коррозиметра "Эксперт-004" (ООО "Эконикс-Эксперт" — ИФХЭ РАН).

Для определения глубины и времени проникновения общей коррозии использовался высокочувствительный усовершенствованный метод поляризационного сопротивления с автоматической компенсаций начальной разности потенциалов электродов. Для определения глубины и времени проникновения питтинга использовался метод амперометрии нулевого сопротивления [3].

Подготовка и проведение эксперимента

Для проведения эксперимента были подготовлены образцы из Ст3 (рис. 1, *a*). Покрытия наносились на торцевую поверхность образцов. Как указывалось выше, перед напылением торцевая поверхность образцов подвергалась пескоструйной обработке. Для напыления использовались порошки фракции 63 и 40...50 мкм. Толщина покрытий для образцов с покрытием из порошка 63 мкм составила 75 мкм; для образцов с покрытием из порошка 40...50 мкм — 130 мкм. В качестве образцов для сравнения были использованы аналогичные по размерам образцы из Ст3 (рис. 1, *a*).

Образцы воспроизводят основные качества будущего изделия, получаемого методом плазменного атмосферного напыления: материалы и их контакты; технологию изготовления; состояние поверхности; вид, толщину и технологию получения покрытий.

Подготовка и проведение исследования и обработка результатов проводились в соответствии с ГОСТом.

В целях изоляции металлической поверхности от раствора на боковые поверхности образцов, кромки и частично торцы (рис. $1, \delta$) был на-

несен универсальный эпоксидный клей марки ЭДП ТУ 2385-024-75678843—2010. Подготовка клея проводилась согласно инструкции. Для того чтобы не загрязнить торцевую поверхность, на нее была нанесена маска из клейкой ленты. Через 24 ч эпоксидный клей полностью отвердел, и маска была удалена.

Ввиду того что образцы фактически имеют разные покрытия, а также различный материал (образцы с покрытием и образцы сравнения), испытания проводились в трех разных емкостях (рис. 1, в и г). Емкости представляли собой сосуды из пластика для хранения питьевой воды. Объем воды в каждой емкости составлял 380...450 мл. Образцы погружались на глубину 20 мм для ограничения кислородного насыщения поверхности. Расстояние между образцами составляло более 20 мм.

Ввод исходных данных в коррозиметр выполнялся согласно инструкции [4]. Испытания проводились с промежуточным контролем, для чего осуществлялись выемки образцов из раствора.

Первая выемка образцов была произведена через 1 ч после начала эксперимента. Следующие три выемки производились примерно через 24 ч. Следующие две — примерно через 48 ч. Общее время эксперимента составило 172 ч. После каждой выемки записывались результаты измерений, фиксировались внешние наружные изменения в состоянии поверхностей. Вода заменялась на вновь приготовленную.

Результаты экспериментов

Были зафиксированы внешние изменения на поверхностях образцов в ходе экспериментов, получены зависимости глубины проникновения общей коррозии и питтинга от времени (рис. 2 и 3) и вычислены средние значения глубины проникновения общей коррозии и питтинга за исследуемый промежуток времени (табл. 1).

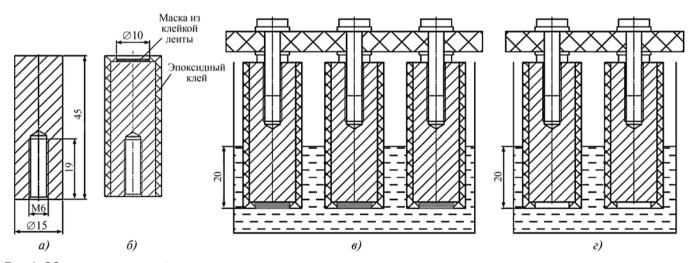


Рис. 1. Образцы для испытаний:

a — эскиз испытываемых образцов; δ — нанесение защитной маски на образец; ϵ — размещение образцов с покрытиями в емкости; ϵ — размещение образцов без покрытия в емкости

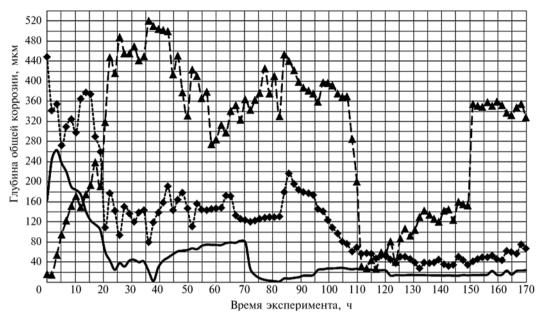


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения общей коррозии от времени:

— образец с покрытием на основе порошка диоксида циркония с фракцией 63 мкм; -◆- образец с покрытием на основе порошка диоксида циркония с фракцией 40 мкм; -▲- образец без покрытия

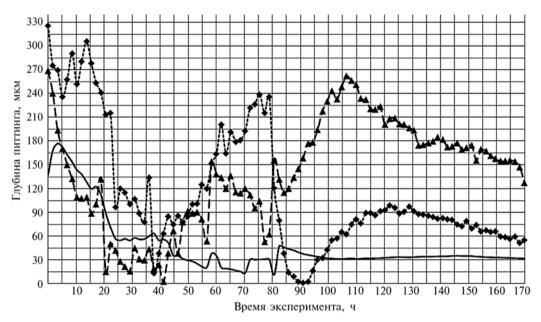


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения питтинга от времени:

— образец с покрытием на основе порошка диоксида циркония с фракцией 63 мкм; -◆- образец с покрытием на основе порошка диоксида циркония с фракцией 40 мкм; -▲- образец без покрытия

Из приведенных графиков следует, что глубины проникновения общей коррозии и питтинга для образцов с покрытиями через определенный промежуток времени становятся постоянными и принимают значения ниже среднего. Однако стоит отметить, что в начальный период времени разброс интегральных показателей достаточно большой и наблюдается как на образцах сравнения, так и на образцах с покрытиями. Причин у колебаний может быть несколько:

образование пленок на поверхностях образцов, разрушаемых в процессе эксперимента;

разрушение защитного слоя эпоксидной смолы и корродирование боковых поверхностей образцов.

Как видно из табл. 2, на поверхностях образцов с покрытием из диоксида циркония с течением времени появляется ржавчина. В процессе эксперимента в емкостях с образцами без покрытия выпадал осадок гидратированного оксида железа и вода окрашивалась в

Таблица 1 Значения интегральных показателей коррозий

Общая коррозия, Питтинг. мкм/год мкм/год Образец Макси-Макси-Среднее Срелнее мальное мальное значение значение значение вначение 289 520 141 269 Без покрытия 48 263 50 117 С покрытием

448

116

Таблица 2

326

Фотографии поверхностей испытываемых образцов под микроскопом МПСУ-1 с кратностью увеличения 55

130

из порошка 63 мкм

из порошка 40...50 мкм

Спокрытием

Образец	До начала испытания	Через 172 ч после начала испытания
Без покрытия		
С покрытием из порошка 63 мкм		
С покрытием из порошка 4050 мкм		

ржавый цвет. В свою очередь, в емкостях с образцами с покрытиями осадок не выпадал, и вода оставалась прозрачной. Можно предположить, что в образцах с покрытиями гидратированный оксид железа оседает на поверхности, запирая и забивая имеющиеся поры и трещины в покрытии. Поэтому с течением времени коррозия на образцах с покрытиями уменьшается.

Вероятно, происходит не только механическое запирание пор покрытия, но и пассивация железа. Пассивностью металлов называют состояние относительно высокой коррозионной стойкости, вызванное торможением анодного процесса электрохимической коррозии [1].

В качестве количественной характеристики степени пассивности корродирующего металла может быть

использован коэффициент пассивности π , пропорциональный отношению анодной поляризации к катодной. Высокое значение данного коэффициента соответствует пассивности металла. При этом степень пассивного состояния металла уменьшается в следующем порядке: $Zr \to Ti \to Ta \to Nb \to Al \to Cr \to Be \to Mo \to Mg \to Ni \to Co \to Fe \to Mn \to Zn \to Cd \to Sn \to Pb \to Cu [5]. Как видим, Zr имеет наибольший коэффициент пассивности.$

Выволы

Проведены исследования по определению зависимости глубины проникновения сплошной коррозии и питтинга для образцов с покрытиями из диоксида циркония, полученных методом плазменного атмосферного напыления, и образцов сравнения из стали 3.

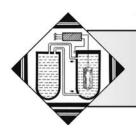
Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что покрытия на основе порошка диоксида циркония с фракцией 63 мкм с течением времени уменьшают глубину проникновения сплошной коррозии в 6 раз и глубину проникновения питтинга в 2,2 раза. Покрытия из порошка диоксида циркония с фракцией 40...50 мкм уменьшают глубину проникновения сплошной коррозии в 2,2 раза и глубину проникновения питтинга в 1,2 раза. При этом следует отметить, что толщина покрытий для образцов с покрытием из порошка 63 мкм составляла 75 мкм, а для образцов с покрытием из порошка 40...50 мкм — 130 мкм. Можно предположить, что коррозионные свойства покрытий определяются в большей степени качеством покрытий.

На основании наблюдаемых эффектов (отсутствие осадка в емкостях с образцами с покрытиями, ржавый цвет покрытий по окончании эксперимента) можно предположить, что образуемый в ходе эксперимента гидратированный оксид железа оседает на покрытии, заполняя и закупоривая поры и трещины в покрытии.

Вопрос о пассивации железа при создании покрытий из диоксида циркония методом плазменного атмосферного напыления остается открытым и требует более глубокого изучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Жук Н.П.** Курс теории коррозии и защиты металлов: Учеб. пособие для вузов. М.: ООО ТИД "Альянс", 2006. 472 с.
- 2. **ГОСТ 9.908—85.** Единая система защиты от коррозиии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.
- 3. **Новицкий В.С., Писчик Л.М.** Коррозионный контроль технологического оборудования. Киев: Наук. думка, 2001. 171 с.
- 4. **Универсальный** автоматический коррозиметр "Эксперт-004" (v.1.19—8.10) для измерения контактных токов. Руководство по эксплуатации. М., НПП "Эксперт", 2012.



ЖИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

УЛК 621.78.01 + 621.793.18

А.А. Шматов (Белорусский национальный технический университет, г. Минск) E-mail: shmatov@cosmostv.by

Компьютерное проектирование процесса получения твердосмазочного SiC-покрытия на твердом сплаве

Приведены результаты исследования триботехнических свойств твердосмазочных покрытий, полученных на твердом сплаве BK6 (94 % WC + 6 % Co) при термогидрохимической обработке (TIXO). Выполнена оптимизация состава вододисперсной среды на основе SiC и температурно-временных параметров процесса TIXO по коэффициенту трения полученных покрытий. С использованием математических моделей построены диаграммы "параметры процесса — свойство". Обработка по оптимальному режиму TIXO позволяет в условиях отсутствия смазки снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в 3,2 раза по сравнению с необработанной.

Ключевые слова: твердый сплав, инструмент, упрочнение, твердосмазочное SiC-покрытие.

The results examination of the frictional properties of solid-film lubricant, obtained by thermo-hydrochemical treatment of hard alloy BK6 (94 % WC + 6 % Co), are presented. Optimization of the SiC suspension composition and temperature-time parameters of the process was performed for the friction coefficient of the films. The diagrams "property vs. process parameters" were plotted using the obtained mathematical expressions. Treatment with optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the hard alloy surface in 3.2 as compared with untreated.

Keywords: hard alloy, tool, strengthening, SiC solid-lubricant coating.

Введение

Развитие современной техники характеризуется широким применением сложнолегированных и других труднообрабатываемых сплавов для деталей машин и узлов и требует все большего использования высокопроизводительных твердосплавных инструментов. Однако они имеют недостаточную эксплуатационную стойкость. Существуют различные способы ее повышения. Основной тенденцией развития зарубежных технологий являются разработка и применение процессов получения покрытий из износостойких тугоплавких соединений методами физического осаждения из паровой фазы (PVD), химического осаждения из парогазовой фазы (CVD), напылением, химико-термической обработкой (ХТО) в вакууме, которые активированы нетрадиционными источниками нагрева (плазмой, лазером, электронным лучом и др.). Однако эти способы упрочнения имеют ряд недостатков, главными из которых являются: 1) высокие температуры проведения процессов, приводящие к деформации изделий и разупрочнению исходной матрицы; 2) малая производительность и высокая стоимость применяемого оборудования; 3) большая трудоемкость и энергоемкость процессов; 4) вредное энергетическое воздействие на здоровье человека и др. [1—4]. Поэтому наибольший научный и практический интерес представляет процесс термогидрохимической обработки (ТГХО), поскольку он отличается высокими эффективностью и производительностью, применим для готовых к эксплуатации инструментов, незначительно изменяет их первоначальные размеры, форму и структуру [5—12].

ТГХО используется для химического осаждения на поверхности различных материалов антифрикционных твердосмазочных покрытий, которые обладают резервными возможностями в жестких и катастрофических условиях эксплуатации инструментов и машин [5—12]. Как известно [13—16], покрытия приобретают твердосмазочные свойства в случае, когда: а) созданы из материалов со слоистой поликристаллической структурой (графит, сульфиды и др.); б) сформированы на основе наноструктурированных тугоплавких и сверхтвердых материалов; в) реализуется теория Берналла, согласно которой любое твердое тело приобретает свойства жидкости, если в кристаллической решетке содержится более 10 % вакансий; г) реализуется эффект Ребиндера,

который ведет к пластифицированию поверхностного слоя и созданию положительного градиента механических свойств в зоне трения; д) реализуется эффект Киркиндала, который приводит к селективному растворению из сплава легирующих элементов вследствие различия их электрохимических потенциалов, в результате чего формируется квазижидкая пленка, снижающая коэффициент трения и фрикционный разогрев.

ТГХО является наиболее простым и универсальным методом получения твердосмазочных покрытий. С помощью этого метода можно создавать наноструктурированные покрытия на основе оксидов, сульфидов, карбидов, алмаза, углеродных и других антифрикционных материалов [5—12]. При формировании таких покрытий реализуется эффект Ребиндера за счет введения в вододисперсную среду поверхностно-активных веществ (ПАВ) [15]. Полученные наноструктурированные покрытия обладают сверхпластичностью, они облегчают разрыв адгезионных соединений в зоне трения. В то же время твердость наноматериалов из металлов и тугоплавких соединений возрастает в 2...3 раза [2—4]. Согласно вакансионно-диффузионному и адгезионно-деформационному механизмам трения повышения износостойкости твердого тела можно достичь при сочетании названных выше эффектов: высокой твердости его поверхности и низкой прочности адгезионной связи [13, 14, 16].

Поскольку в результате ТГХО исходная структура материала сохраняется (не разупрочняется), а конечные размеры и форма изделий практически не изменяются, данные покрытия можно наносить на готовые к эксплуатации инструменты и детали машин. С другой стороны, в условиях интенсивной эксплуатации изделий, когда в зоне трения отсутствует смазка или ее подача ограничена, наилучшим способом снижения трения рабочих частей изделий является нанесение на них твердосмазочных покрытий [5—12, 17].

Карбид кремния (SiC) — это универсальный материал будущего: он имеет множество применений в технике благодаря малой стоимости, простоте изготовления, легкости, абразивной износостойкости, высокой коррозионной и жаростойкости, хорошим электрическим свойствам и пр. Поэтому использование карбида кремния позволит получать покрытия и материалы многофункционального назначения [2, 4].

Из изложенного следует, что процесс ТГХО имеет большие перспективы для своего развития, прежде всего для высокопроизводительных инструментов, испытывающих значительные механические и температурные нагрузки. Особое внимание в этом плане следует уделить инструментам из твердых сплавов (марки ВК, ТК, ТТК и др.), которые благодаря их высокой твердости, износостойкости и теплостойкости широко используются для изготовления различных видов режущих и

штамповых инструментов. Однако вопросы, связанные с ТГХО практически всех инструментальных материалов, мало изучены.

Огромную помощь исследователю при трудоемком выборе оптимального варианта проведения процесса ТГХО инструментальных материалов могут оказать математические методы планирования экспериментов, которые позволяют получать максимум информации при минимуме затрат. В материаловедении традиционно решают прямые задачи, когда на основании минимального количества экспериментов, проведенных по заранее заданным температурно-временным режимам (согласно плану экспериментов), определяют свойства материала, затем создают математические модели, описывающие влияние факторов, и с помощью графической интерпретации выбирают оптимальные параметры процесса [18]. Но такой подход не позволяет решить весь комплекс вопросов, возникающих при проектировании технологии, поскольку функционирование любой технологической системы (в данном случае таковой является технология ТГХО твердого сплава в вододисперсной среде на базе SiC) происходит в условиях постоянного случайного изменения значений параметров системы под влиянием различных внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Сами технологические системы как объекты проектирования обладают рядом специфических особенностей: многокритериальностью, многопараметричностью, стохастичностью (рассеивание параметров), наличием нелинейных внутрисистемных связей и т.д. При исследовании, проектировании и освоении таких объектов требуется решение не только прямых, но и обратных задач, когда исследователь заранее задает комплекс необходимых свойств материала и с помощью компьютерного моделирования находит оптимальные температурно-временные параметры процесса. Данный методологический подход, получивший название многомерного проектного синтеза технологической системы, успешно применяется при разработке новых технологий и материалов [5, 6, 11, 19, 20].

В связи с изложенным **целью данной работы** является оптимизация и компьютерное проектирование технологии ТГХО для получения на твердом сплаве ВК6 твердосмазочного SiC-покрытия с применением метода многомерного проектного синтеза технических объектов, материалов и технологий.

Объекты и методика исследований

Термогидрохимической обработке подвергали твердый сплав BK6 (94 % WC + 6 % Co), который широко используется для точения, фрезерования, рассверливания, зенкерования чугунов, жаропрочных и цветных сплавов, неметаллических материалов. Сам процесс

ТГХО осуществляли путем проведения двух операций: а) гидрохимической обработки (ГХО) поверхности твердого сплава при температуре 95...100 °C в течение 10...300 мин в специально приготовленной водной суспензии на базе ультра- и наноразмерных порошков карбида кремния; б) последующей термической обработки (ТО) при нагреве в защитной (безокислительной) среде до температуры 120...1050 °C, выдержки в течение 10...15 мин и охлаждения. Водную суспензию предварительно готовили по специальной технологии при смешивании ультра- и наноразмерного карбида кремния с 4...8 % сульфанола (ПАВ). Готовым считался рабочий состав с кислотностью рН = 7...9, которую устанавливали и поддерживали путем дозированного введения NH₄OH. При проведении ГХО образцы помещали и выдерживали в ванне с готовым рабочим составом, нагретой до температуры процесса. Поверхность образцов предварительно обезжиривали и декапировали в 5...10 %-м растворе серной кислоты в течение 1...2 мин. После каждой операции ГХО образцы промывали в воде.

Тонкую структуру покрытий исследовали на атомно-силовом микроскопе Nanoscope 3D (Veeco, USA). Определение триботехнических свойств поверхности осуществляли на микротрибометре возвратно-поступательного типа (рис. 1) по схеме "подвижный шарик — неподвижная плоскость" при условиях испытаний: нагрузка 1 H; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с; пара трения: упрочненный твердый сплав (плоскость) — сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм) [6]. Показатель относительной стойкости упрочненного твердосплавного инструмента определяли по формуле $K_w = t_2/t_1$, где t_1 —

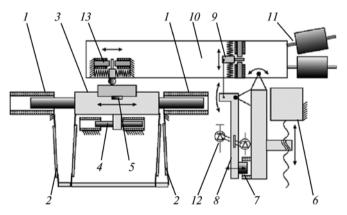


Рис. 1. Микротрибометр возвратно-поступательного типа с максимальной прилагаемой нагрузкой 1 Н (производства ИММС, г. Гомель, Беларусь):

1 — электромагнит привода; 2 — направляющая изгиба; 3 — столик-держатель образца; 4 — датчик положения; 5 — датчик трибоакустической эмиссии; 6 — шаговый привод; 7 — электромагнит системы нагружения; 8 — рычаг; 9 — датчик нагрузки; 10 — головка; 11 — балансировочный груз; 12 — оптопара; 13 — датчик силы трения

время работы (длина рабочего хода) исходного инструмента; t_2 — время работы упрочненного инструмента.

При проектировании технологического процесса ТГХО твердого сплава ВК6 применяли синтез-технологии метода многомерного проектного синтеза технологических объектов, материалов и технологий в виде базовой компьютерной программы "СИНТЕЗ МК" [19, 20]. Предлагаемый метод позволяет оперировать не только математическими, но и техническими критериями оптимальности. Для реализации процедур многомерного проектного синтеза технологической системы при проведении ТГХО твердого сплава ВК6 использован комплекс новых методов, наиболее значимыми из которых являются метод решения обратных многокритериальных задач, метод компьютерного выбора технически оптимального варианта, метод выделения областей устойчивости исследуемой технологической системы в многомерном пространстве технологических параметров и метод построения графического изображения состояний технологической системы.

Метод многомерного проектного синтеза технологической системы в отличие от метода, приведенного в работе [18], позволяет:

выбирать технически оптимальный вариант, обладающий наибольшей устойчивостью к воздействию дестабилизирующих факторов производства;

одновременно решать обратные многокритериальные задачи: выделять в пространстве системы области устойчивости и выбирать технически оптимальный вариант технологической системы в одной из областей устойчивости при обеспечении требуемого уровня воспроизводимости свойств материала;

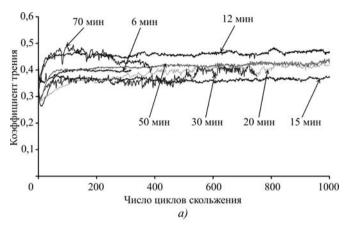
выбирать в пространстве технологических параметров область устойчивого состояния системы, в которой одновременно достигаются и стабильно воспроизводятся заданные свойства материала.

Результаты исследований

При оптимизации и проектировании процесса ТГХО твердый сплав подвергали гидрохимической обработке в вододисперсной среде, содержащей SiC и ПАВ, при нагреве до температуры, близкой к температуре кипения, в течение 14...20 мин, а последующий нагрев осуществляли до температуры 700...750 °С. В таких условиях на твердом сплаве ВК6 формируются твердосмазочные SiC-покрытия с наилучшими антифрикционными свойствами без изменения исходной структуры матрицы (рис. 2). Причем оптимальные параметры процесса ТГХО для стали [11] (время гидрохимической обработки 60...70 мин и температура термообработки 140...155 °С) не обеспечивают максимального снижения коэффициента трения для твердого сплава. Структурный анализ поверхности ТГХ-упрочненного твер-

дого сплава ВК6 [6] свидетельствует о том, что такие твердосмазочные покрытия при сухом трении хорошо пластифицируются (рис. 3).

При оптимизации процесса варьировали температуру и время гидрохимической обработки, долевое содержание основного компонента химически активной среды и температуру термообработки. В табл. 1 пред-



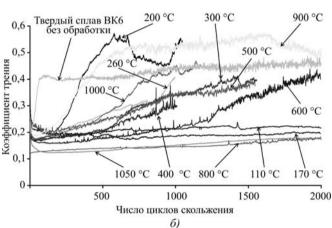


Рис. 2. Влияние параметров процесса ТГХО на коэффициент трения твердого сплава ВК6:

режим ТГХО: состав вододисперсной среды для ГХО на основе SiC + ПАВ: a) ГХО без отпуска при T=100 °C; δ) отпуск после ГХО, T=100 °C, $\tau=15$ мин; при ТО $\tau=0,5$ ч; условия испытаний: сухое трение скольжения (без смазки); пара трения: твердый сплав ВК6 (плоскость) — сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм); нагрузка 1 H; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с

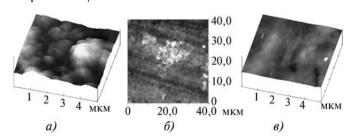


Рис. 3. Морфология поверхности твердого сплава ВК6, подвергнутого ТГХО, до (a, δ) и после (s) испытаний на трение [6]

ставлены результаты триботехнических испытаний ТГХ-упрочненного твердого сплава ВК6, полученные при реализации 11 опытов плана экспериментов [18].

На основании этих данных рассчитаны линейные и нелинейные математические модели, описывающие влияние температурно-временных параметров и состава активной смеси на коэффициент трения ТГХ твердосмазочных SiC-покрытий. Однако адекватными признаны только нелинейные многокритериальные математические модели следующего вида:

$$\begin{split} Y_1 &= -1,18\cdot 10^{-2} + 1,58\cdot 10^{-3}X_2 + 9,60\cdot 10^{-6}X_1^2 + \\ &\quad + 1,18\cdot 10^{-4}X_2^2 + 2,04\cdot 10^{-3}X_3^2 + \\ &\quad + 1,04\cdot 10^{-7}X_4^2 - 2,62\cdot 10^{-4}X_1X_3 + 2,50\cdot 10^{-6}X_2X_4, \end{split}$$

Таблица 1

Результаты исследования коэффициента трения покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе SiC

		-	COCTABC III			
Факторы					Параметры	
Номер опыта	Гидрохимическая Термооб- обработка работка		оптими- зации			
	Темпе- ратура <i>T</i> , °C	Время т, мин	Доля ПАВ в со- ставе, %	Темпе- ратура <i>T</i> , °C	Коэффици- ент трения за 1000 циклов f	
Условное обозначение	<i>X</i> ₁	<i>X</i> ₂	<i>X</i> ₃	<i>X</i> ₄	<i>Y</i> ₁	
Основной уровень (0)	98	17	6	725		
Интервал варьирования	2	3	2	25		
Верхний уровень (+1)	100	20	8	750	_	
Нижний уровень (-1)	96	14	4	700		
1	+	+	+	+	0,168	
2	_	+	+	_	0,152	
3	+	_	+	+	0,146	
4	_	_	+	+	0,148	
5	+	+	_	+	0,175	
6	_	+	_	_	0,147	
7	+	_	_	_	0,135	
8	_	_	_	+	0,146	
9	0	0	0	0	0,147	
10	0	0	0	0	0,142	
11	0	0	0	0	0,144	

Таблица 2

Оптимальные параметры процесса ТГХО твердого сплава ВК6 и поля их рассеяния

Параметр процесса	Номинальное значение	Разрешенные поля рассеяния
Температура гидрохимической обработки, °C	98	2,8
Время гидрохимической обработки, мин	15	2,8
Доля ПАВ в составе, %	6	2,8
Температура отпуска, °С	718	35

Таблица 3

Оптимальный показатель свойства покрытий, полученный на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе SiC, и поле его рассеяния

Наименование оптимального показателя свойств	Номинальное значение	Поле рассеяния
Коэффициент трения f	0,133	0,028

Таблица 4

Заданные границы свойства покрытий, полученных на твердом сплаве ВК6 путем ТГХО в вододисперсном составе на основе SiC

Наименование желаемого показателя свойств	Минимальное значение значение	
Коэффициент трения f	0,120	0,150

Таблица 5

Определение запаса работоспособности технологической системы по входным параметрам

Параметр процесса	Значение пара- метра	-	Поле производ- ственного допуска	Коэф- фициент работоспо- собности
Температура гидрохимической обработки, °C	98	±1	2	1,4
Время гидрохи- мической обработки, мин	15	±1	2	1,4
Доля ПАВ в составе, %	6	±1	2	1,4
Температура отпуска, °С	718	±5	10	3,5

где Y_1 — коэффициент трения; X_1 — температура гидрохимической обработки; X_2 — время гидрохимической обработки; X_3 — доля ПАВ в составе; X_4 — температура отпуска.

Из-за многокритериальности, стохастичности и нелинейности технологической системы "процесс ТГХО твердого сплава ВК6" прогнозирование ее поведения усложняется. У каждого реального объекта значения параметров отличаются от расчетных и случайным образом распределены в поле рассеивания. Вследствие этого нет гарантии полного попадания точек оптимизации реальной системы в область устойчивости, т.е. не всегда можно улучшить свойства материала до заданного уровня. Чтобы такого не произошло, при проектировании технологического процесса предусмотрен определенный запас устойчивости системы, который позволяет избежать ухудшения качества функционирования системы по критерию воспроизводимости свойств материала.

При традиционной методологии оптимизации параметров системы решения задач технологического проектирования системы не совсем корректны, поскольку процессы рассматриваются как детерминированные, т.е. проходящие при соблюдении точных значений параметров технологической системы. В действительности детерминированных систем не существует, так как значения параметров реальных технологических систем всегда являются случайными, а сами системы стохастическими. Выбор технически оптимального варианта ТГХО твердого сплава ВК6 в гидрозоле карбида кремния осуществляли методами компьютерного проектирования технологических систем, которые предназначены для решения нелинейных и стохастических задач при наличии взаимосвязанных, часто противоречивых требований к свойствам материала и показателям качества системы.

Компьютерное проектирование технологии ТГХО твердого сплава ВК6 с помощью программы "СИНТЕЗ МК" осуществляли в несколько этапов. Результаты выбора оптимального варианта изучаемой технологической системы сведены в табл. 2, 3. При решении обратной многокритериальной задачи были заданы желаемые уровни показателей свойств твердосмазочных покрытий, полученных ТГХО твердого сплава ВК6 (табл. 4). Результаты виртуальных испытаний работоспособности системы в условиях влияния дестабилизирующих факторов производства приведены в табл. 5.

Для графической интерпретации результатов, полученных при решении задач исследования и проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсном составе на основе SiC, построены дискретные портреты (рис. 4). Выделение областей устойчивости в многомерном пространстве состояний является важным этапом выбора технически оптимального

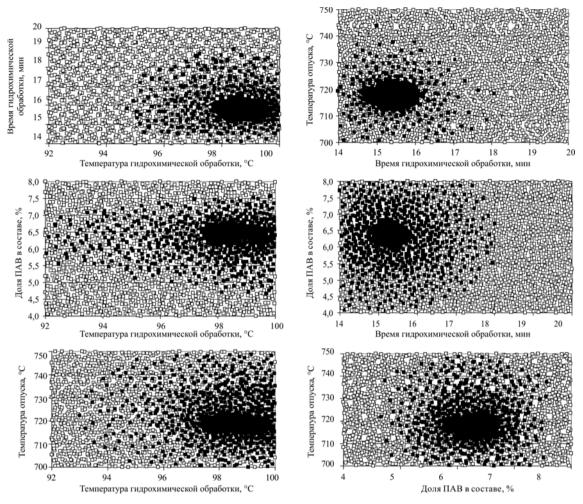


Рис. 4. Дискретные портреты виртуального пространства технологической системы процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсной SiC-среде:

lacktriangle — вариант системы, обеспечивающий заданные свойства твердого сплава BK6; \Diamond — вариант системы, не обеспечивающий заданные свойства твердого сплава BK6

варианта системы. В качестве критерия оптимизации выступает коэффициент трения с желаемым уровнем: 0,120...0,150 (см. табл. 4). На рис. 4 видно, что технология ТГХО твердого сплава ВК6 реализуется с высокими свойствами только тогда, когда система попадает в области устойчивости, отмеченные темными точками. Выход одного или нескольких параметров процесса за пределы областей устойчивости — в области, отмечен-

Таблица 6

Фактический показатель свойства твердого сплава ВК6 после ТГХО и границы его рассеивания по результатам виртуальных испытаний технологической системы

Наименование	Номинальное	Границы р показателе	
показателя свойств	значение	Нижняя	Верхняя
Коэффициент трения f	0,133	0,125	0,141

ные светлыми точками, свидетельствует о том, что материал с заданными свойствами в этом случае не будет получен.

В результате решения задачи проектирования технологии ТГХО твердого сплава ВК6 в вододисперсном составе на основе SiC установлены фактические показатели основного ее триботехнического свойства (табл. 6), 100 %-я воспроизводимость которого достигается при точном соблюдении параметров процесса в пределах производственных допусков (см. табл. 5). Это подтвердили и результаты испытаний (рис. 5).

Для любого инструмента, у которого место контакта с обрабатываемой деталью изменяется со временем [21], важно на протяжении всего периода эксплуатации иметь не только минимальные, но и неизменные значения коэффициента трения. Таким требованиям отвечают термогидрохимические покрытия, и в этом их преимущество перед другими известными твердосмазочными покрытиями [17].

Таблица 7

Результаты испытаний твердосплавных инструментов,	полверснутых ТГХО
т сэультаты испытаний твердосилавных инструментов,	подверинутых тале

Вид инструмента	Материал инструмента	Обрабатываемый материал	Повышение стойкости, K_{w}		
	ПО "БелАЗ"				
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплавТ15К6	Сталь 40X (217 HB)	> 2		
РУП "Кузнечны	й завод тяжелых штампов"	(КЗТШ)	I		
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 20	1,81,9		
АП "Мин	ский подшипниковый заво	д"	I		
Сборные торцевые фрезы	Твердый сплав Т15К6	Конструкционные	2,1		
Галтельные резцы		и инструментальные стали	2		
РУПП "	Автогидроусилитель" (АГУ	7)			
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь 30ХГТ (229 НВ)	2		
РУП "Белорусс	кий металлургический заво,	д" (БМЗ)	I		
Сборные торцевые фрезы	Твердый сплав МК8	Медный сплав М1РО	1,62		
Режущие пластины для черновой токарной обработки	Твердый сплав РТ40	Сталь 20	2,63,3		
Режущие пластины для чистовой токарной обработки	Твердый сплав МР4	Сталь Ст3	1,3		
Волоки	Твердые сплавы	Металлокорд	1,41,8		
ОАО "Минский мотовелозавод" (ММВЗ или "Мотовело")					
Режущие пластины для черновой фрезерной обработки	Твердый сплав Т15К6	Сталь ШХ15 и сталь 4Х5МФС	34		

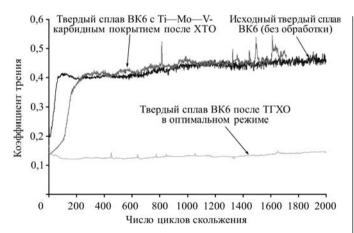


Рис. 5. Сравнительная диаграмма изменения коэффициента трения в зависимости от длительности изнашивания (без смазки) поверхности твердого сплава ВК6 до и после ТГХО в оптимальном режиме:

условия испытаний: сухое трение скольжения; пара трения: твердый сплав ВК6 (плоскость) — сталь ШХ15 (сфера диаметром 4 мм); нагрузка 1 H; длина хода (трека) 3 мм; скорость 4 мм/с

Применение результатов исследований. Результаты производственных испытаний свидетельствуют о том, что ТГХО с использованием разработанных вододисперсных составов позволяет увеличить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению с необработанными (табл. 7).

Анализируя табл. 7, следует отметить, что наивысшие показатели износостойкости твердосплавного режущего инструмента достигнуты при черновой токарной и фрезерной обработке сталей и цветных сплавов. Технология ТГХО внедрена в Беларуси на предприятиях "БелАЗ", "МТЗ", "Мотовело" и др.

Выводы

1. Выполнены математическое моделирование и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 в среде гидрозоля SiC с помощью компьютерных технологий метода многомерного про-

ектного синтеза технических объектов, материалов и технологий. Определены технически оптимальные режимы для реализации процесса в производстве с гарантированным достижением заданных свойств твердосплавных инструментов, подвергнутых ТГХО.

- 2. Обработка твердого сплава ВК6 по оптимальному режиму ТГХО позволяет существенно (в 3,2 раза) снизить коэффициент трения твердосплавной поверхности в условиях сухого трения скольжения.
- 3. Разработан простой безэлектролизный способ ТГХО, который позволяет повысить эксплуатационную стойкость различных видов твердосплавных инструментов в 1,3...4,0 раза по сравнению со стандартными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Хокинг М., Васантасри В., Сидки П.** Металлические и керамические покрытия. М.: Мир, 2000. 518 с.
- 2. **Материаловедение**: Учебник для втузов / Б.Н. Арзамасов и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 648 с.
- 3. **Наноструктурные** покрытия / под. ред. А. Кавалейро, Д. Хоссона. М.: Техносфера, 2011. 752 с.
- 4. **Материаловедение.** Технология конструкционных материалов / под ред. В.С. Чередниченко. М.: Омега-Л, 2008. 752 с.
- 5. **Компьютерное** проектирование процесса ТГХО для формирования твердосмазочных покрытий на инструментальной стали У8 / А.А. Шматов и др. // Вест. Полоц. гос. унта. Сер. В. Промышленность. 2010. № 2. С. 139—146.
- 6. **Исследование** и компьютерное проектирование процесса ТГХО твердого сплава ВК6 / А.А. Шматов и др. // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2010. № 8. С. 125—133.
- 7. **Шматов А.А.** Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 33—40.
- 8. **Шматов А.А., Жавнерко Г.К., Лисовская Ю.О.** Формирование композиционной структуры при термогидрохимической обработке стали // Материаловедение. 2013. № 1. С. 43—50.

- 9. Витязь П.А., Шматов А.А., Девойно О.Г. Упрочнение твердого сплава методом термогидрохимической обработки // Докл. НАН Беларусі. Т. 57. № 1. 2013. С. 113—117.
- 10. **Шматов А.А.** Сопротивляемость изнашиванию стали, упрочненной термогидрохимической обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 7. С. 28—34.
- 11. **Компьютерное** проектирование процесса ТГХО для получения на стали У8 твердосмазочного SiC покрытия / А.А. Шматов и др. // Вест. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. 2014. № 3. С. 53—61.
- 12. **Шматов А.А.** Реализация механизмов упрочнения при ТГХО инструментальных материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 12. С. 37—48.
- 13. **Польцер Г., Майсснер Ф.** Основы трения и изнашивания. М.: Машиностроение, 1984. 264 с.
- 14. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И.** Трение, смазка, износ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 368 с.
- 15. **Фридман Я.Б.** Механические свойства металлов. М.: Машиностроение, 1974. Т. 2. 135 с.
- 16. **Гаркунов Д.Н., Корник П.И.** Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: Изд-во МСХА, 2003. 344 с.
- 17. Витязь П.А. Твердосмазочные покрытия в машиностроении. Минск: Бел. наука, 2007. 170 с.
- 18. **Новик Ф.С.** Математические методы планирования экспериментов в металловедении. Разд. IV. М., МиСИС, 1971. 148 с.
- 19. Витязь П.А., Жилинский О.В., Лактюшина Т.В. Компьютерная методология выбора технически оптимального варианта в многокритериальных задачах проектирования // Физическая мезомеханика. Т. 7. Томск, 2004. С. 3—11.
- 20. **Компьютерные** синтез-технологии исследования и проектирования технических и технологических систем / П.А. Витязь и др. Пятая международная научно-техническая конференция "Информационные технологии в промышленности (ITI*2008)", 22-24 октября 2008 г. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. С. 11-12.
- 21. **Бельский С.Е., Тофпенец Р.Л.** Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. Минск: Наука и техника, 1984. 128 с.



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УЛК 621.9.048

М.А. Тамаркин, И.Л. Вяликов, Э.Э. Тищенко

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону) E-mail: tehn rostov@mail.ru

Исследование и разработка нового высокоэффективного метода виброабразивной ультразвуковой обработки

Представлены результаты исследований высокоэффективного метода виброабразивной ультразвуковой обработки. Проведена оценка скорости кавитационно-абразивного разрушения в ультразвуковом поле. Определено среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности. Приведены схемы расположения ультразвуковых преобразователей. Представлены результаты экспериментальных исследований процесса, подтверждающие адекватность теоретических зависимостей.

Ключевые слова: виброабразивная ультразвуковая обработка, кавитационно-абразивное разрушение, среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности, съем металла, время обработки.

Results of researches of a highly effective method of vibroabrasive ultrasonic processing are presented in article. The assessment of speed of cavitational and abrasive destruction in an ultrasonic field is made. The arithmetic average a surface roughness profile deviation is defined. Schemes of an arrangement of ultrasonic converters are provided. The pilot studies of process confirming adequacy of theoretical dependences are conducted.

Keywords: vibroabrasive ultrasonic processing, cavitational and abrasive destruction, arithmetic average of a surface roughness profile deviation, removal of metal, processing time.

Задача повышения качества продукции связана с совершенствованием известных и разработкой новых, эффективных методов финишной обработки, среди которых ведущее место занимают методы вибрационной обработки (ВиО). Большой интерес исследователей к этому процессу объясняется его широкими технологическими возможностями и существенными техникоэкономическими преимуществами.

Совершенствование процесса ВиО приводит к созданию новых его разновидностей. В настоящее время сформировались два основополагающих направления повышения эффективности ВиО: первое — интенсификация процесса путем конструктивных изменений оборудования и комбинирования кинематических схем, второе — путем комбинирования различных видов энергии. Предпосылкой к их разработке является принцип комбинирования различных схем обработки и воздействия различных видов энергии (тепловой и механической, механической и химической, электрической и химической и др.). Комбинируя существующие методы вибрационной обработки и создавая новые, можно увеличить производительность обработки, улучшить качество выпускаемых изделий, снизить се-

бестоимость их изготовления, так как совмещенные процессы позволяют не только интенсифицировать известные технологические методы, но и реализовать новые физико-химические эффекты при обработке деталей. Поэтому разработка новых комбинированных методов обработки деталей и их технологий является весьма перспективным направлением в развитии науки и создании новой техники.

Одним из перспективных и малоизученных направлений совершенствования процесса ВиО является его интенсификация за счет наложения ультразвукового поля.

Привлекательность использования ультразвука для интенсификации технологических методов обработки деталей объясняется его уникальными особенностями. Так, в ультразвуковом диапазоне можно получить направленное излучение, оно хорошо поддается фокусировке, в результате чего повышается интенсивность ультразвукового поля на ограниченном участке. При распространении в различных средах и твердых телах ультразвук порождает интенсивные явления, многие из которых нашли применение в различных сферах человеческой деятельности, в том числе и в технологических целях. Метод виброабразивной ультразвуковой

обработки (ВиАУЗО) в зависимости от режимов и характеристики рабочей среды может быть применен для изготовления деталей машин и приборов на операциях шлифования, полирования, удаления заусенцев и облоя и т. п.

Целью проводимых исследований является установление закономерностей и разработка комбинированного метода высокоэффективной виброабразивной ультразвуковой обработки на основе комплексных исследований параметров процесса.

Вибрационная обработка в зависимости от характера применяемой рабочей среды представляет собой механический или химико-механический процесс съема мельчайших частиц металла и его окислов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение [1, 2].

Обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру, заполненную рабочей средой требуемой характеристики. Рабочая камера, установленная на упругой подвеске, может колебаться в различных направлениях.

Привод рабочая камера получает от инерционного вибратора с частотой до 50 Гц и амплитудой от 0,5 до 8 мм. В процессе обработки детали и частицы рабочей среды перемещаются относительно друг друга, совершая два вида движений: колебания и медленное вращение всей массы загрузки (циркуляционное движение). От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающим слоям рабочей среды, которые сообщают ее следующим слоям и т. д. В процессе обработки детали занимают различные положения в рабочей среде, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей. Большое количество микроударов, действующих на обрабатываемую деталь одновременно в различных направлениях, в некоторой степени способствует удержанию ее во взвешенном состоянии. В результате циркуляции обработка происходит во всех зонах рабочей камеры, наиболее эффективно около дна камеры, где давление рабочей среды выше.

Рабочая среда оказывает решающее влияние на достигаемое качество поверхности и производительность процесса. Выбор рабочей среды производится в зависимости от назначения выполняемой операции, материала и особенностей конфигурации детали, применяемого способа ведения процесса.

Большинство операций ВиО производится с непрерывной или периодической подачей технологической жидкости (ТЖ). ТЖ обеспечивает удаление продуктов износа (частиц металла и абразива) с поверхности деталей и частиц рабочей среды, смачивает детали и среду, помогает их разделению и равномерному распределению деталей в рабочей среде, способствует охлаждению обрабатываемых деталей.

Особенностью ВиАУЗО является то, что в процессе обработки поверхности деталей одновременно подвергаются динамическому воздействию потоков абразивных гранулированных частиц, движение которых инициируется низкочастотными колебаниями стенок рабочей камеры, и кавитационно-абразивному разрушению, обусловленному ультразвуковым полем, генерируемым ультразвуковым преобразователем. Результатом совмещенного воздействия этих двух процессов является повышение интенсивности процесса съема металла с поверхности обрабатываемых деталей. Ведущим процессом в условиях ВиУЗО является виброабразивный, осуществляющий съем металла и формирование параметров качества поверхностного слоя (шероховатости). Введение ультразвукового поля позволяет облегчить процесс съема металла абразивными гранулами вследствие предварительного разрушения поверхностного слоя обрабатываемых деталей и обеспечить дополнительный съем металла за счет кавитационно-абразивного разрушения [3].

Исследования кавитационно-абразивного разрушения проводились многими исследователями. Явление кавитации возникает при возбуждении и распространении в жидкости ультразвуковых механических колебаний, представляющих собой периодически чередующиеся сжатие и разрежение частиц среды. В полупериод разрежения — полупериод отрицательных давлений в результате разрыва жидкости образуются кавитационные полости или пузырьки. Такие пузырьки образуются обычно в местах, где прочность жидкости ослаблена, где есть мелкие пузырьки нерастворенного газа, частички посторонних примесей, границы раздела жидкость — жидкость, жидкость — твердое тело и другие подобные зародыши кавитации. Кавитационные пузырьки совершают пульсирующие колебания, вокруг них образуются сильные микропотоки, приводящие к возникновению активной локальной турбулентности среды. В следующий полупериод сжатия давление в кавитационной полости резко возрастает, происходит ее схлопывание, которое приводит к излучению микроударной волны, в результате чего возникают локальные мгновенные давления, достигающие сотен и даже нескольких тысяч ньютонов на квадратный сантиметр. Кроме того, при захлопывании кавитационных пузырьков наблюдаются также локальное повышение температуры и электрические разряды.

В момент захлопывания, когда размеры пузырька уменьшаются в несколько сот раз, давление и температура газа внутри пузырьков достигают значительных величин. Сжатая в пузырьке парогазовая смесь порождает своеобразную "отдачу" в виде ударной сферической волны. Распространяясь в жидкости, ударная волна может вызвать специфические эффекты, такие как разрушение твердой поверхности или кавитационная

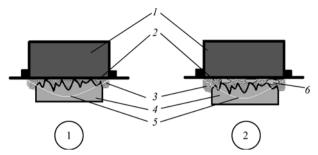


Рис. 1. Схемы, раскрывающие механизм эрозии поверхности детали в ультразвуковом поле:

1 — ультразвуковой преобразователь; 2 — тонкодисперсные частицы; 3 — технологическая жидкость; 4 — деталь; 5 — ультразвуковое поле; 6 — абразивная гранула

эрозия, ускорение некоторых химических реакций, акустические микропотоки и т. д.

Процесс кавитационно-абразивного разрушения поверхности в зоне действия ультразвукового поля может протекать по двум взаимодополняющим схемам, представленным на рис. 1.

Первая схема показывает, что тонкодисперсные частицы, находясь под воздействием ультразвукового поля, перемещаются хаотично со скоростью, сообщаемой им в результате захлопывания кавитационных пузырьков, которые, как свидетельствуют результаты экспериментальных исследований, скапливаются в точках поверхности с наибольшей напряженностью (вершины и впадины микронеровностей). В момент их схлопывания возникает ударная волна, которая сообщает частицам кинетическую энергию. В результате многократного соударения частиц с поверхностью микронеровностей она подвергается упругопластической деформации, повреждается и, как следствие, разрушается на микроуровне.

При второй схеме разрушения поверхности детали предусматривается, что в область между поверхностью ультразвукового преобразователя и поверхностью детали в пределах зоны действия ультразвуковой волны могут попадать абразивные гранулы. В этом случае они, подвергаясь ультразвуковым колебаниям, будут выполнять роль волноводов и тем самым усиливать эффект кавитационно-абразивного разрушения, главным образом, на уровне вершин микронеровностей.

Предложенные схемы, моделирующие механизм кавитационно-абразивного разрушения в условиях ВиАУЗО, базируются на экспериментально установленном факте, что энергетической основой протекания этого процесса являются ударно-волновые явления, активируемые ультразвуковым полем.

В процессе ВиО главную роль играет непосредственное взаимодействие абразивной гранулы и поверхности детали. Мельчайшие тонкодисперсные частицы оказывают небольшое влияние на обработку, так как долго не задерживаются и удаляются с небольшим количеством жидкости.

В процессе ВиАУЗО под воздействием ультразвукового поля тонкодисперсные частицы перемещаются хаотично со скоростью, сообщаемой им в результате захлопывания кавитационных пузырьков. Эти пузырьки скапливаются в точках поверхности с наибольшей напряженностью (вершины и впадины микронеровностей). В момент их схлопывания возникает ударная волна, сообщающая частицам кинетическую энергию.

Разрушение каждого локализованного микрообъема поверхности имеет полидеформационный характер и протекает за время кинетического цикла, включающего упрочнение—разупрочнение—разрушение. При этом при первой стадии накопление носит латентный (скрытый характер). На второй стадии идет процесс отделения частиц от поверхности металла. После удаления частиц начинаются новые накопления повреждаемости и разрушения на новой совокупности микрообъемов.

Зависимость для оценки скорости кавитационно-абразивного разрушения в ультразвуковом поле представим следующим образом:

$$\gamma_{\kappa,p} = \frac{V_d P_p}{\tau_0 \exp\left(\frac{\upsilon_0 - \beta \sigma}{RT}\right)},\tag{1}$$

где V_d — объем материала, разрушаемого в процессе кавитационно-абразивного воздействия; P_p — вероятность реализации фактического ударно-импульсного деформирования микрообъема в единицу времени; $\tau_0 \exp\left(\frac{\upsilon_0 - \beta\sigma}{RT}\right) = t_{\rm II}$ — продолжительность элементарного акта усталостного разрушения; τ_0 — постоянная времени, равная периоду атомных колебаний; υ_0 — энергия активации разрушения материала; β — структурно-чувствительный коэффициент; σ — эквивалентное напряжение; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура.

В целях использования полученной модели в инженерной практике сделаем ряд допущений:

- 1) примем в качестве количественной характеристики металла, накапливающего повреждения, активированный к разрушению микрообъем, равный молярному объему V_m ;
- 2) выражение для оценки вероятности разрушения молярного объема представим следующим образом:

$$P_p = \frac{\rho}{\text{HB}},\tag{2}$$

где р — удельное давление в зоне контакта тонкодисперсных частиц с обрабатываемой поверхностью; HB — твердость материла обрабатываемой детали.

С учетом допущений расчетная модель имеет вид

$$\gamma_{\kappa,p} = \frac{V_m \rho}{HB\tau_0 \exp\left(\frac{\upsilon_0 - \beta\sigma}{RT}\right)}.$$
 (3)

Для оценки скорости весового разрушения выражение (3) будет иметь вид

$$\gamma_{\text{K.p}} = \frac{V_m \rho_m \rho}{\text{HB}\tau_0 \exp\left(\frac{\upsilon_0 - \beta \sigma}{RT}\right)},$$
 (4)

где ρ_m — плотность материала обрабатываемой детали.

Полученные выражения содержат константы (R, τ_0) ; величины внешних факторов, влияющих на процесс усталостного разрушения (T, ρ) ; активационные характеристики материала (υ_0, β) ; геометрические характеристики разрушаемой зоны (V_m) .

В результате обоснования указанных параметров с учетом размерности было получено выражение для определения скорости кавитационно-абразивного разрушения поверхности в ультразвуковом поле

$$\gamma_{K,p} = K_{H} \frac{V_{m} \rho_{m} \rho N P_{K}}{HB \tau_{0} \exp\left(\frac{\Delta H_{Ts} - 0.3 V_{m} \rho}{RT}\right)}, \quad (5)$$

где $K_{\rm u}$ — корректировочный коэффициент интенсивности процесса кавитационно-абразивного разрушения; $P_{\rm k}$ — вероятность того, что за один оборот массы загрузки деталь попадает в зону ультразвукового воздействия и подвергается кавитационно-абразивному разрушению; N — количество молярных объемов, одновременно подвергаемых кавитационно-абразивному разрушению на площади квадрата упаковки при нахождении детали в зоне ультразвукового воздействия; $\Delta H_{Ts} = V_0$ — предельное искажение кристаллической решетки, равное разности теплосодержания (энтальпии) материала в твердом состоянии, при температуре плавления и энтальпии при 293 K; V_m — молярный объем материала, разрушаемого в процессе кавитационно-абразивного воздействия.

Скорость съема металла с поверхности обрабатываемой детали при ВиАУЗО можно представить в виде суммы:

$$\gamma_0 = \gamma_B + \gamma_{K,p},\tag{6}$$

где $\gamma_{\rm B}$ — скорость съема металла в процессе вибрационного воздействия потока абразивных гранул.

Если принять за единичный элемент площадь квадрата упаковки абразивных гранул обрабатывающей среды на поверхности со стороной, равной диаметру описанной окружности радиусом R_r , то зависимость, предложенную в работе [2], для оценки скорости съема металла в процессе вибрационного воздействия потока абразивных гранул можно представить в виде

$$\gamma_0 = P_1 P_2 \omega q + K_{\text{H}} \frac{4\sqrt[3]{V_m} \rho_m \rho R_r^2 P_{\text{K}}}{\text{HB}\tau_0 \exp\left(\frac{\Delta H_{Ts} - 0.3V_m \rho}{RT}\right)}, \quad (7)$$

где q — съем металла за один удар абразивной частицы; ω — частота колебаний рабочей камеры; P_1 — вероятность того, что каждая точка квадрата упаковки частиц на поверхности детали покроется пятном контакта; P_2 — вероятность того, что удар абразивной частицы приведет к микрорезанию.

При этом формула для продолжительности обработки $t_{\rm n}$ примет вид

$$\tau_{\rm p} = \frac{Q_{\rm K.p}}{\gamma_{\rm 0}},\tag{8}$$

где $Q_{\rm к.p}$ — объем металла, который необходимо удалить с поверхности для решения технологической задачи; γ_0 — скорость разрушения поверхности в процессе обработки.

В качестве предельного съема металла при ВиАУЗО в зависимости от решаемой технологической задачи может быть принята одна из следующих величин:

масса дефектного слоя металла толщиной ΔL , удаляемого с площади квадрата упаковки,

$$Q = 4R_r^2 \Delta L \rho_m; (9)$$

масса металла исходного микропрофиля $Rz_{\text{исх}}$ на площади, ограниченной квадратом упаковки, который необходимо удалить для достижения установившейся шероховатости,

$$W = k_{\rm np} R z_{\rm wcx} R_r^2, \tag{10}$$

где $k_{\rm np}$ — коэффициент, учитывающий вид профиля исходной шероховатости;

масса металла, удаляемого с острых кромок для получения закругления требуемого радиуса,

$$W_{V} = 0.43Rr^{2}. (11)$$

В процессе обработки свободными абразивами, как отмечают многие исследователи, изменение шероховатости поверхности имеет экспоненциальный характер:

$$Ra = (Ra_{\text{ucx}} - Ra_{\text{yct}})\exp(-k_{\text{u}}\tau) + Ra_{\text{yct}}, \qquad (12)$$

где $Ra_{\text{исх}}$ — среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости; $Ra_{\text{уст}}$ — среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости; $k_{\text{и}}$ — коэффициент интенсивности изменения параметров миропрофиля, c^{-1} , зависящий от режимов обработки и характеристик рабочих сред.

Зависимость для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости согласно [2]:

$$Ra_{yct} = 0.09K_{y3}\sqrt{\frac{h_{max}L_{e\pi}}{z_0}},$$
 (13)

где $K_{
m y_3}$ — коэффициент ультразвукового воздействия, который учитывает снижение шероховатости поверхности детали по сравнению с ВиО за счет дополнительного кавитационно-абразивного разрушения при наложении ультразвукового поля; $h_{
m max}$ — максимальная глубина внедрения частицы; $L_{
m e_{
m d}}$ — единичная длина; $z_{
m 0}$ — количество зерен над единицей поверхности связки.

При экспериментальных исследованиях ВиАУЗО необходимо выяснить, каким образом должны быть эффективно приложены ультразвуковые колебания, чтобы обеспечить интенсификацию обработки с точки зрения повышения производительности процесса, улучшения характеристик качества поверхности и эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей.

Для введения ультразвуковых колебаний в рабочую камеру вибрационного станка рационально использовать магнитострикционные ультразвуковые преобразователи. Они предназначены для преобразования электрических колебаний в механические и получают питание от ультразвукового генератора, предназначенного для преобразования электрического тока промышленной частоты в ток высокой частоты.

Для охлаждения магнитострикционных преобразователей необходимо использовать прокачку жидкостью.

Ультразвуковые магнитострикционные преобразователи различаются по своей конструкции. Они бывают прямоугольной формы — типа ПМС6-22 (излучатель—пластина прямоугольной формы 300×300 мм) и цилиндрической формы — типа ЦМС-8 (излучатель—цилиндр, длина 350 мм, диаметр 160 мм).

Для качественной работы ультразвуковых преобразователей необходимо использовать ультразвуковой генератор высокой мощности (не менее 2,5 кВт). Это позволяет стабильно обеспечить требуемые параметры ультразвуковых колебаний.

В целях повышения эффективности ВиО можно реализовывать различные варианты расположения ультразвуковых преобразователей в зоне обработки. При этом они могут быть закреплены как в рабочей камере вибрационного станка и совершать вместе с ней низкочастотные колебания, которые будут передаваться рабочей среде, так и на дополнительном устройстве, установленном неподвижно.

Очевидно, что при этом размещение ультразвукового преобразователя не должно мешать движению рабочей камеры и циркуляции обрабатывающей среды, а также не снижать производительность ВиО в зонах наибольшей интенсивности обработки. Исходя из изложенного можно предложить следующие варианты размещения ультразвуковых преобразователей в зоне вибрационной обработки:

над рабочей камерой с возможностью погружения в обрабатывающую среду;

сбоку рабочей камеры;

вместо задней или передней стенки рабочей камеры; в центральной зоне рабочей камеры;

на дне или вместо дна рабочей камеры.

Из приведенных вариантов было выбрано три:

1. Расположение ультразвукового преобразователя вместо задней стенки рабочей камеры (рис. 2).

При этом варианте ультразвуковой преобразователь не препятствует циркуляции рабочей среды, передает среде как высокочастотные, так и низкочастотные колебания, распространяемые в одном направлении, конструкция камеры сравнительно проста, сохраняется цельность эластичного покрытия рабочей камеры.

Преимуществом рассматриваемой схемы является ее высокая универсальность, так как сохраняется неизменность конструкции и геометрии рабочей камеры, что позволяет при необходимости использовать приспособления для крепления деталей при обработке.

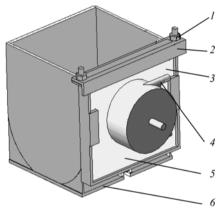


Рис. 2. Конструкция рабочей камеры для ВиАУЗО деталей в свободном состоянии с расположением ультразвукового преобразователя на задней стенке рабочей камеры:

1 — резьбовое соединение; 2 — крепление; 3 — ультразвуковой преобразователь; 4 — штуцер для подачи охлаждающей жидкости; 5 — съемная стенка; 6 — рабочая камера

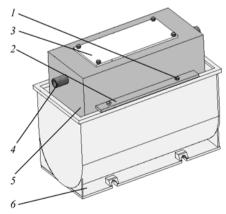


Рис. 3. Конструкция рабочей камеры для ВиАУЗО деталей в свободном состоянии с расположением ультразвукового преобразователя над рабочей камерой:

1 — резьбовое соединение; 2 — крепление; 3 — смотровой люк; 4 — штуцер для подачи охлаждающей жидкости; 5 — ультразвуковой преобразователь; 6 — рабочая камера

- 2. Фиксация ультразвукового преобразователя над камерой на уровне верхнего слоя рабочей среды (рис. 3). При этом обеспечивается ее поджатие на определенную величину, что приводит к увеличению сил соударения частиц между собой и обрабатываемыми деталями в зоне низкого давления и, как следствие, повышению интенсивности обработки.
- 3. Расположение преобразователя в центральной зоне рабочей камеры (рис. 4), что обеспечивает дополнительное введение низкочастотных колебаний в малоэффективной зоне, которые при базовой схеме вибрационной обработки гасятся за счет потери энергии при прохождении многослойной рабочей среды. При этом создается возможность равномерного прохождения слоев рабочей среды относительно источника ультразвуковых колебаний и значительно уменьшается длина их распространения по сечению рабочей камеры, а следовательно, их гашение будет минимальным.

На основании результатов предварительных экспериментальных исследований установлено, что наиболее эффективной является схема с размещением ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей



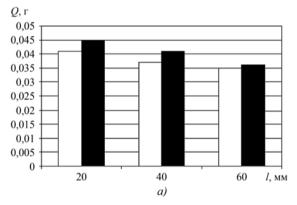
Рис. 4. Конструкция рабочей камеры для ВиАУЗО деталей в свободном состоянии с расположением ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей камеры:

1 — резьбовое соединение; 2 — крепление; 3 — штуцер для подачи охлаждающей жидкости; 4 — ультразвуковой преобразователь; 5 — рабочая камера

камеры. Дальнейшие экспериментальные исследования были выполнены на основе использования этой схемы.

Были проведены исследования влияния распространения ультразвуковых колебаний на съем металла и шероховатость поверхности.

Образцы располагались на разном расстоянии от ультразвукового преобразователя неподвижно в трех фиксированных положениях. В каждом положении образцы подвергались кавитационно-абразивному разрушению в течение 30 мин. После чего образцы извлекались из рабочей камеры, промывались и сушились. За-



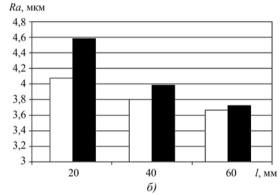
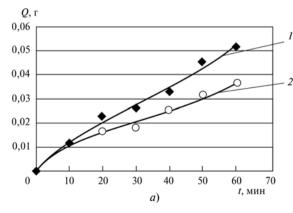


Рис. 5. Результаты исследования влияния распространения ультразвуковых колебаний на съем металла Q(a) и шероховатость поверхности (δ). Материал — Д16Т:

□ — ВиO; ■ — ВиАУЗО; l — расстояние от ультразвукового преобразователя до места закрепления образца



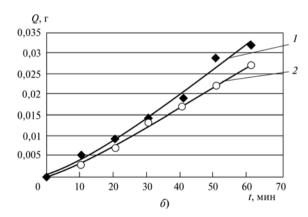
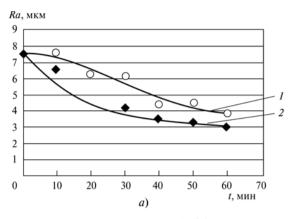


Рис. 6. Влияние продолжительности ВиАУЗО на съем металла при размещении ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей камеры:

a — алюминиевый сплав Д16Т; δ — Ст3; I — ВиАУЗО; 2 — ВиО



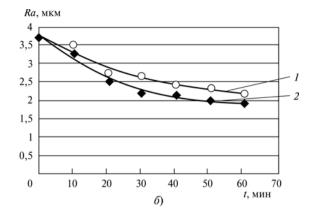


Рис. 7. Влияние продолжительности ВиАУЗО на шероховатость поверхности при размещении ультразвукового преобразователя в центральной зоне рабочей камеры:

a — алюминиевый сплав Д16Т; δ — Ст3; 1 — ВиО; 2 — ВиАУЗО

тем проводились замеры шероховатости поверхности и контрольное взвешивание.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 5.

Также проводились экспериментальные исследования влияния продолжительности ВиАУЗО на величину съема металла и шероховатость поверхности, результаты которых представлены на рис. 6, 7.

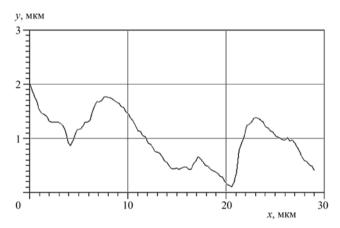


Рис. 8. Профиль обработанной поверхности при ВиО

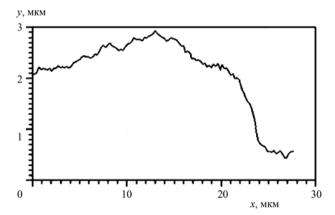


Рис. 9. Профиль обработанной поверхности при ВиАУЗО

Исследование микрорельефа обработанной поверхности осуществлялось на сканирующем зондовом микроскопе Nanoeducator: образцы $15 \times 15 \times 2$ мм, материал Д16Т, после 60 мин обработки. Изменение профиля поверхности в зависимости от метода обработки представлено на рис. 8, 9.

По результатам исследований (рис. 8, 9) установлено, что после ВиАУЗО на поверхности обрабатываемой детали образуется развитый субмикрорельеф, что подтверждает гипотезу о ее кавитационно-абразивном разрушении.

Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований подтвердило правильность теоретических предпосылок. На основании результатов исследований установлены закономерности и разработан высокоэффективный комбинированный метод виброабразивной ультразвуковой обработки. Разработаны образцы лабораторно-промышленного оборудования для ВиАУЗО. Теоретически обосновано повышение эффективности вибрационной обработки при наложении ультразвукового воздействия. Установлены основные закономерности влияния ВиАУЗО на производительность обработки и качество обработанной поверхности. Разработаны методические рекомендации для проектирования эффективных технологических процессов ВиАУЗО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Бабичев А.П., Тамаркин М.А., Вяликов И.Л., Коваль Н.С.** Разработка и исследование технологической схемы виброультразвуковой обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 8.
- 2. Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации обработки деталей в гранулированных рабочих средах // Известия вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2005. Спец. вып.: Проблемы машиностроения (к 75-летию Донского государственного технического университета).
- 3. **Физические** основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. М.: Наука, 1970.



ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

УЛК 621.778

А.В. Щедрин (Транспортно-технологический институт Московского государственного университета машиностроения "МАМИ"), А.А. Кострюков (ОАО "Демиховский машиностроительный завод") Е-mail: kaaoz@bk.ru

Перспективные инструменты для реализации методов комбинированной охватывающей обработки

Предложена конструкция инновационных инструментов с гранулированными рабочими элементами для охватывающей обработки профилей, а также инструмент для формообразования и упрочнения наружных шлицев.

Ключевые слова: охватывающая обработка, гранулированные рабочие инструменты, обработка наружных шлицев.

The design of innovative tools for the treatment of profiles with granular work items, as well as a tool for shaping and strengthening scientific splines were presented.

Keywords: covering processing, granular tools, processing of external splines.

Как свидетельствует статистика, в последнее время бурное развитие получили методы комбинированной охватывающей обработки сплошных и полых профилей различных длины и формы поперечного сечения [1—6].

С использованием алгоритмических процедур "систем искусственного технологического интеллекта" [7—9] были синтезированы перспективные инструменты для реализации инновационных методов комбинированной охватывающей обработки.

На рис. 1 представлена конструкция инструмента с гранулированными рабочими элементами. Инструмент в исполнении 1 состоит из корпуса *1*, крышки *2*, уплотнительного элемента *3*. Внутри корпуса *1* размещаются сферические элементы *4* в вулканитовой связке *5*. Сферические элементы могут изготовляться из инструментальных сталей, спеченных твердых сплавов, инструментальной керамики и металлокерамики, сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор). Дополнительно поверхность сферических элементов может быть упрочнена регулярным микрорельефом [7] (на рисунке не показан).

В результате обработки таким инструментом на поверхности заготовки 6 формируется система канавок, обеспечивающих по аналогии с [1, 2] подачу большого количества технологической смазки в очаг деформации [9] или по аналогии с работой [3] создающих благопри-

ятные условия для стружкообразования при последующем резании. Эффективность данного метода обработки может быть увеличена, если помимо скорости поступательного движения V_{Π} заготовки δ корпусу инструмента I сообщить знакопеременное вращение со скоростью V_{Π} небольшой амплитуды.

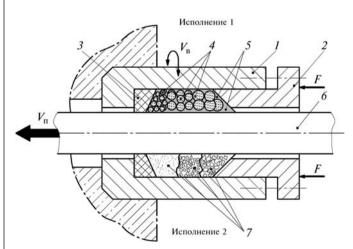


Рис. 1. Конструкция инструмента с гранулированными рабочими элементами

Инструмент в исполнении 2 (рис. 1) в качестве гранулированных рабочих элементов имеет абразивное зерно 7 или порошок из антифрикционных материалов. Это позволяет в первом случае эффективно и экологично удалять слой окалины с поверхности заготовки 6. Во втором случае на зачищенной таким образом поверхности можно создать антифрикционный слой, облегчающий последующее деформирование, по аналогии с исследованиями [1, 2, 4, 9]. Здесь F — усилие сжатия гранулированных элементов.

Инструмент, показанный на рис. 2, включает корпус I и крышку 2. Внутри корпуса I размещены деформирующие фильеры 3 и 4, упрочненные регулярным микрорельефом [1, 2] (на рисунке не показан). Между фильерами 3 и 4 в связке (на рисунке не показана) расположены сферические деформирующие элементы 5. В этом случае в отличие от инструмента, приведенного на рис. 1, силовое воздействие на элементы 5 и заготовку 6 осуществляется за счет усилия обработки на фильере 3, которая работает как своеобразный поршень. При этом аналогично с инструментом, приведенным на рис. 1, в данном инструменте элементы 5 создают на поверхности заготовки 6 маслоемкий

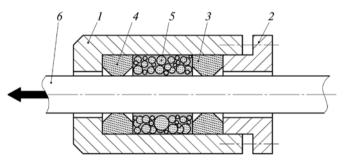


Рис. 2. Конструкция инструмента с гранулированными рабочими элементами и деформирующими фильерами

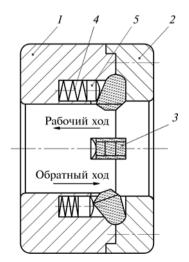


Рис. 3. Шлицевая секция с фильерой

рельеф, облегчающий обработку фильерой 4. В свою очередь, фильера 4 или окончательно формирует параметры качества получаемого изделия, или более интенсивно создает в поверхностном слое благоприятную текстуру под последующую обработку, а также параллельное режущее воздействие [3, 10, 11].

Для формирования шлицев на валах при обработке на станках с ЧПУ можно применить инструмент, по-казанный на рис. 3. Данный инструмент состоит из корпуса 1, крышки 2, деформирующих элементов 3, которые фиксируются пружинами 4 и плунжерами 5. При обратном ходе инструмента для уменьшения своего износа элементы 3 поворачиваются под действием сил трения с заготовкой за счет радиусных окончаний и радиусной формы дна пазов в корпусе 1 и крышке 2.

Эффективность обработки данным инструментом существенно возрастает, если по аналогии с работой [6] применить самовозбуждаемую или принудительную подачу металлоплакирующих смазок в очаг деформации на микро- и макроуровне.

Таким образом, разработанные инновационные инструменты расширяют существующую информационную базу [12] для системного проектирования [7] методов комбинированной охватывающей обработки под конкретные производственные условия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. **Повышение** качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия 2011. № 8. С. 21-28.
- 2. **Гаврилов С.А.** Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 4. С. 33—39.
- 3. **Рациональная** область применения эффекта Баушингера в комбинированных методах волочения / А.В. Щедрин и др. // Автомобильная промышленность. 2012. № 6. С. 35—37.
- 4. **Гаврилов С.А., Зинин М.А.** Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 29—35.
- 5. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А.** Перспективные методы комбинированного волочения сплошных и полых профилей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 6. С. 51—53.
- 6. Щедрин А.В., Козлов А.Ю. Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3. С. 8—12.

- 7. **Трибология** как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15—20.
- 8. **Теоретические** и экспериментальные исследования охватывающего поверхностного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов / В.А. Кузнецов, А.В. Щедрин, С.А. Гаврилов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 2. С. 11—17.
- 9. **Формирование** очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании / А.В. Щедрин, С.А. Гаврилов, И.В. Косарев и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3—7.
- 10. **Влияние** свойств обрабатываемого материала на характеристики комбинированного волочения длинномерных профилей / А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2010. № 11. С. 74—76.
- 11. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Сергеев Е.С.** Исследование технологических возможностей комбинированного инструмента для охватывающей обработки с параллельным сочетанием резания и деформирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 5. С. 40—44.
- 12. **Совершенствование** комбинированных методов редуцирования и прошивания / А.В. Щедрин и др. // Металлург. 2005. \mathbb{N} 10. С. 66—69.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ



Цена 3000 р.

ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ

отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием Справочник (в 2 томах)

onpubo mini (b a roman)

Под общей редакцией А.Г. Суслова

2014 г. Объем 928 с. ISBN 978-5-94275-709-0

Том 1. Приведены общие положения отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием и статические методы ОУО ППД: накатывание, вибронакатывание, алмазное выглаживание, дорнование и калибрование.

Последняя глава посвящена ОУО ППД деталей с закономерным изменением качества поверхностного слоя.

Том 2. Приведены динамические и комбинированные методы отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностным пластическим деформированием. Одна из глав посвящена формообразованию резьб пластическим деформированием, отделочно-упрочняющей и комбинированной обработке резьбовых поверхностей и технологии гладкорезьбовых соединений.

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

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

По факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98 или на сайте WWW.MASHIN.RU

Специалистам в области обработки металлов концентрированными потоками энергии

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА И СМЕЖНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

17—20 ноября 2015 г.

г. Москва

С 17 по 20 ноября 2015 г. на базе Национального исследовательского университета "МЭИ" проводится Международная конференция "Электронно-лучевая сварка и смежные технологии".

Тематика конференции:

- Физические процессы при обработке концентрированными потоками энергии
- > Технологии обработки электронным лучом
- > Оборудование для обработки электронным лучом
- > Сварочное материаловедение, прочность, контроль и диагностика сварных соединений

Контакты: E-mail: OvechnikovSA@mpei.ru, тел. +7 (495) 362 71 18 Секретарь конференции — Сергей Александрович Овечников

ООО "Издательство **Инновационное машиностроение**", 107076, Москва, Колодезный пер., д. 2A, стр. 2. Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19; факс: (499) 269-48-97. Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Беликова Е.И.* Корректор *Сажина Л.И.* Сдано в набор 29.04.2015 г. Подписано в печать 24.06.15 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена. Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49 Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1 Сайт: www.aov.ru