

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 3 (111)

март

2014

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:

Л.П. ШЕСТОПАЛОВА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" 85159, "Пресса России" 39269, "Почта России" 60252) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.
Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

➔	ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ	
	Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Плешакова Е.С. Сравнительный анализ характеристик твердости инструментальных материалов	3
➔	МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА	
	Щедрин А.В., Козлов А.Ю. Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией	8
➔	ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ	
	Сайфуллин Р.Н., Фархшатов М.Н., Левин Э.Л., Нафиков М.З., Наталенко В.С., Исламов Л.Ф., Юферов К.В. Свойства покрытий, полученных электроконтактной приваркой присадочных материалов из стальных лент	13
➔	ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	
	Асланян И.Р., Шустер Л.Ш. Влияние упрочняющих добавок SiC на изнашивание электролитических NiP-покрытий в условиях фреттинг-коррозии	17
	Омигов Б.И., Смоленцев В.П., Юхневич С.С., Бобров Е.С. Электрохимическое удаление концентраторов напряжений в силовых и резьбовых соединениях	21
➔	ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ	
	Федотов Г.Д., Морозов А.В., Табаков В.П., Анников А.И. Повышение эффективности отделочно-упрочняющей электромеханической обработки применением инструментальных материалов из безвольфрамовых твердых сплавов	24
	Халимов Р.Ш. Электромеханическая обработка с образованием регулярного рельефа поверхностей деталей из серого чугуна	31
	Чудинова Е.А., Губанов В.Ф., Шишкина С.В., Марфицын В.В. Инструменты для комбинированной отделочно-упрочняющей обработки	33
➔	КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ	
	Дручинина О.А., Харченко В.А. Определение методом динамического механического анализа модуля упругости системы стальная подложка – покрытие нитрида титана	36
➔	ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ	
	Михальченков А.М., Бутарева Е.В., Михальченкова М.А. Изнашивание локально упрочненных деталей при свободном перемещении в абразивной среде (на примере плужного лемеха)	39
	Перепечкин А.А., Демидов Д.В., Опальницкий А.И. Особенности износа алмазосодержащего инструмента при ультразвуковом фрезеровании пазов	44
<hr/> <p>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.</p> <hr/> <p>Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней</p>		

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 3 (111)
March
2014

Since 2005, January

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

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

Editorial Assistants
Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

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

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

Edition:
L.P. SHESTOPALOVA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription,
which can be issued in any post office
(index on the catalogues: "Rospechat"
85159, "Pressa Rossii" 39269, "Pochta
Rossii" 60252) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00,
268-40-77. Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

CONTENTS

➔	GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING	
	Brzhozovsky B.M., Zinina E.P., Martynov V.V., Pleshakova E.S. Comparative analysis of characteristics tool material hardness	3
➔	MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING	
	Schedrin A.V., Kozlov A.Yu. Improving the use of technology metalplating lubricants covering methods of surface plastic deformation tool with regular microgeometry	8
➔	PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY	
	Saifullin R.N., Farkhshatov M.N., Levin E.L., Nafikov M.Z., Natalenko V.S., Islamov L.F., Yuferov K.V. Properties of coatings obtained electrocontact welding filler materials from steel strips	13
➔	CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING	
	Aslanyan I.R., Shuster L.Sh. The effect of the reinforcing SiC additives on the wear of electrolytic NiP coatings under fretting-corrosion	17
	Omigov B.I., Smolentsev V.P., Youhnevich S.S., Bobrov E.S. Electrochemical removal of tension concentrators in power threaded connections	21
➔	PROCESSING BY COMBINED METHODS	
	Fedotov G.D., Morozov A.V., Tabakov V.P., Anikeev A.I. Improvement of finishing strengthening electromechanical treatment by using instrument materials made of non-wolframium hardmetal	24
	Halimov R. Sh. Electromechanical processing with education regular relief of surfaces of details from grey cast iron	31
	Chudinova E.A., Gubanov V.F., Shishkina S.V., Marfityzn V.V. The tools for the strengthening processing combined	33
➔	QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING	
	Druchinina O.A., Kharchenko V.A. The use of dynamic mechanical analysis for the determination of elastic modulus of a "steel substrate – titanium nitride coating" system	36
➔	INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE	
	Michalchenkov A.M., Butareva E.V., Michalchenkova M.A. Wear process of local hardened details by free movement in abrasive sfera (by example of ploughshare)	39
	Perepechkin A.A., Demidov D.V., Opalnitsky A.I. Features of wear of diamond tool at ultrasonic milling grooves	44

Reprint is possible only with the reference to the journal
"Strengthening technologies and coatings".

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses



УДК 621.9.048.7:621.9.025.01

Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова
(ВПО "Саратовский государственный технический университет имени Ю.А.Гагарина")
E-mail: bmb sar85@mail.ru

Сравнительный анализ характеристик твердости инструментальных материалов

Представлены результаты статистического анализа характеристик твердости инструментальных материалов с целью создания базы знаний для оптимизации процесса их плазменной модификации.

Ключевые слова: инструментальные материалы, механические свойства, микротвердость, разведочный анализ, алгоритм.

Presents the results statistical analysis of the characteristics of hardness tools materials in order to create a knowledge warehouse to optimize their plasma modification.

Keywords: tools material, mechanical characteristics, micro-hardness, reconnaissance, strategy.

Результаты опытно-промышленной эксплуатации металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы [1], показали, что его износостойкость зависит от степени изменения начальных механических свойств, определяющей повышение прочности, и, как следствие, устойчивости к процессу образования и воздействия дефектов на рабочие поверхности и режущие кромки. В связи с этим целесообразно создание специального программно-математического обеспечения (ПМО), позволяющего анализировать данные о свойствах инструментальных материалов с целью получения информации и создания базы знаний, необходимой для оптимизации процесса плазменного воздействия.

Разработка ПМО базируется на использовании как традиционных методов математической статистики, связанных с построением диаграмм, гистограмм и вычислением различных вероятностных характеристик, так и специальных методов, в частности разведочного анализа и непараметрических методов [2]. Методы позволяют решать различные зада-

чи, при этом их асимптотическая эффективность может быть сколь угодно большой, что делает процедуру оценки надежной, а получаемые результаты – достоверными.

В качестве примера рассмотрим данные по механическим свойствам некоторых инструментальных материалов, представленных на рис. 1, усредненных по глубине поверхностного слоя значениями микротвердости по Виккерсу.

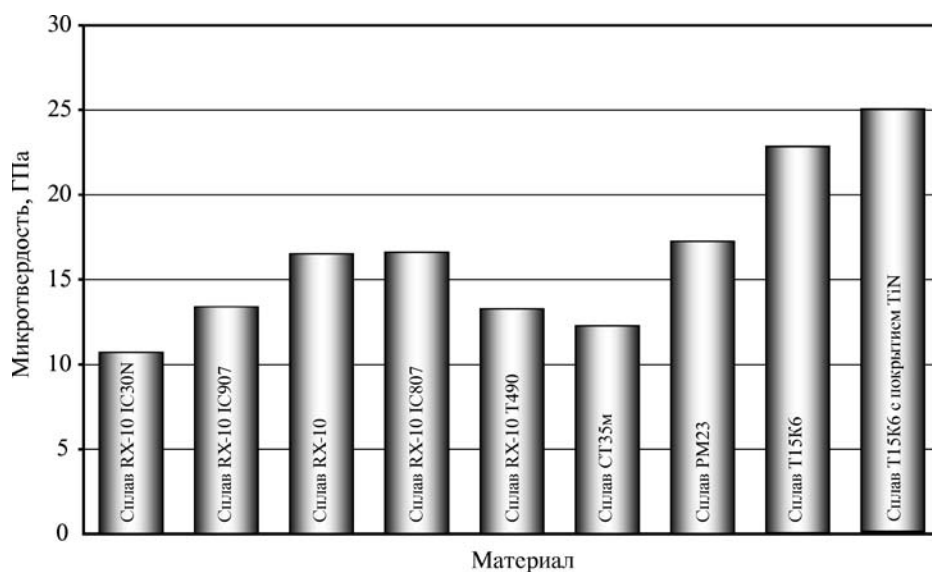


Рис. 1. Средние значения микротвердости поверхностного слоя материалов

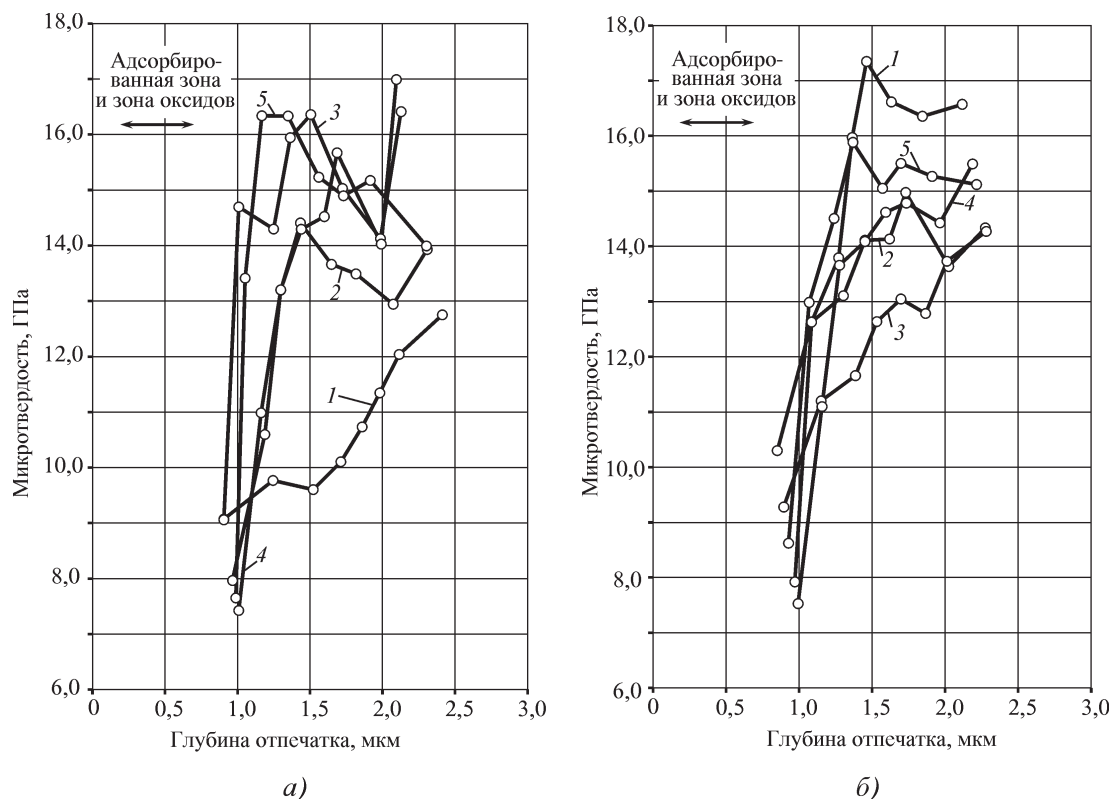


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя пяти пластин из сплава RX-10: а – первые вершины; б – вторые вершины; 1–5 – номера пластин

Отличительной особенностью этих сплавов является различное распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя, связанное с особенностями его формирования в процессе изготовления. Так, у сплава RX-10 наименее твердой является часть поверхностного слоя, расположенная непосредствен-

но под адсорбированной зоной и зоной оксидов (рис. 2). Это связано с тем, что после изготовления он подвергался операции абразивной обработки для формирования требуемой геометрии рабочей части изготовленного из него инструмента. В результате упругопластическое деформирование и нагрев вызвали необратимые структурные и фазовые изменения в поверхностном слое.

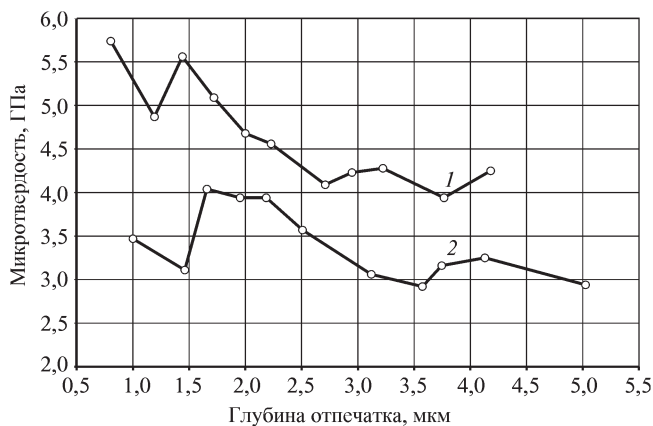


Рис. 3. Распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя образца из стали Р6М5 после строгания (1) и плоского шлифования строганой поверхности (2)

Для подтверждения достоверности данного положения на рис. 3 показано распределение микротвердости образцов из стали Р6М5 после строгания и плоского шлифования по строганой поверхности.

В процессе строгания сформировалась первичная структура поверхностного слоя, упрочненная на глубину до 1,5 мкм и оказавшая влияние на его твердость. При последующем шлифовании происходило контактное взаимодействие в касательном направлении абразивного инструмента с микровыступами поверхности образца, сформированными в процессе строгания, и возникали множественные очаги теплового воздействия на его поверхностный слой. В совокупности с контактными взаимодействиями это привело к растягиванию поверхностного слоя примерно на 1 мкм и, как следствие, снижению микротвердости

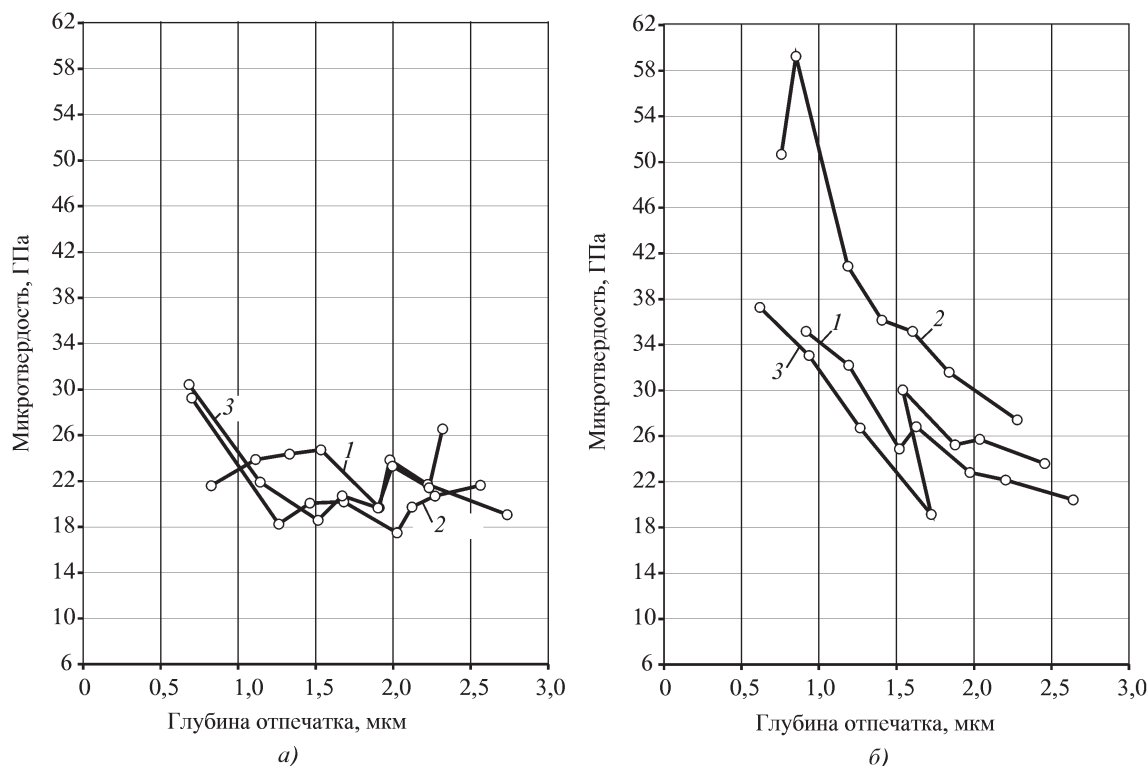


Рис. 4. Распределение микротвердости трехгранных пластин из сплава Т15К6 без покрытия (а) и с покрытием TiN (б) по глубине поверхностного слоя:

1–3 – вершины граней

на 1,5...1,8 ГПа. При этом характер распределения микротвердости сохранился.

Инструмент из сплава Т15К6, изготовленный методом прессования и последующего спекания, механической и абразивной обработке не подвергался, поэтому его поверхностный слой структурных и фазовых изменений не претерпел (рис. 4). В результате микротвердость данного сплава превышает микротвердость сплавов RX-10 (IC30N, IC907, T490) и СТ в 1,34 раза, а сплавов IC807, РМ – в 1,85 раза.

Изложенное означает, что физико-механические свойства поверхностного слоя материалов в процессе изготовления режущего инструмента претерпевают изменения в соответствии с закономерностями технологического наследования, в связи с чем отличаются не только на качественном, но и на количественном уровне, поэтому имеется возможность статистического сравнения свойств материалов по результатам измерения их микротвердости. Проиллюстрируем ее на примере одного из методов разведочного анализа, основной задачей которого является оценка однородности данных [2].

Определяем медиану, нижнюю и верхнюю квартили, а также межквартильный размах упорядоченных по возрастанию значений микротвердости материалов. Нижняя квартиль (C_1) – медиана от первого значения до медианы всего ряда включительно, верхняя квартиль (C_2) – медиана от медианы всего ряда до максимального значения включительно. Расстояние от нижней квартили до верхней равно межквартильному размаху (ΔC).

Далее определяем следующие величины:

1. Межквартильный размах $\Delta C = C_2 - C_1$.
2. Шаг $\Delta C^* = 1,5 \Delta C$.
3. Внутренние барьеры: $\delta_1 = C_1 - \Delta C^*$; $\delta_2 = C_2 + \Delta C^*$.
4. Наружные барьеры: $B_1 = C_1 - 2 \Delta C^*$; $B_2 = C_2 + 2 \Delta C^*$.

Если значения микротвердости выходят за границы наружных барьеров, то они называются неправдоподобными или отскакивающими. Значения между внутренними и внешними барьерами называются внешними. Значения, находящиеся внутри ближе других к внутренним барьерам, называются при-

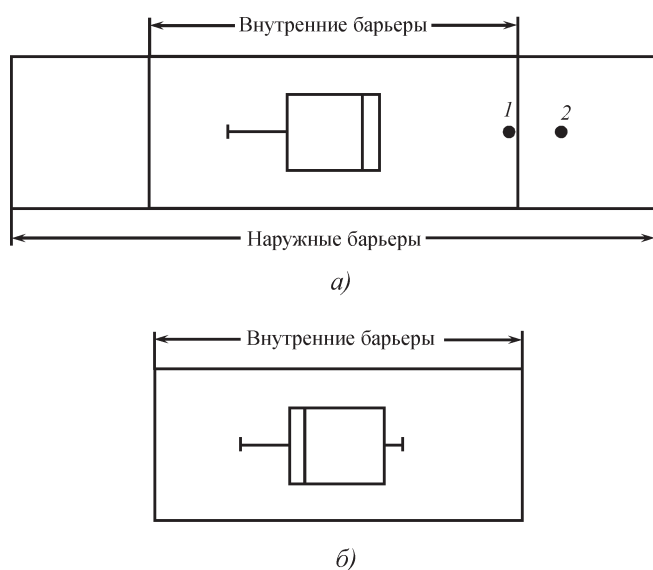


Рис. 5. Диаграммы "ящик с усами" по значениям микротвердости всех материалов (а) и без учета значений микротвердости сплавов Т15К6 (б):

1, 2 – примыкающее и внешнее значения

мыкающими. Эти значения и будут определять материалы, механические свойства которых значительно отличаются от механических свойств остальных материалов.

Результаты расчетов можно представить в виде диаграммы, которая называется "ящик с усами". Для ее построения вычерчивается прямоугольник ("ящик"), торцы которого соответствуют нижней (левой) и верхней (правой) квартилям. Внутри ящика параллельно торцам проводится поперечная линия, положение которой соответствует медиане. Затем рисуются "усы" – прямые линии от каждого торца до крайних значений, которые равны минимальному и максимальному значениям микротвердости, если они находятся внутри внутренних барьеров. Примыкающие, внешние и неправдоподобные значения изображаются отдельными точками. В результате построения этой диаграммы можно получить ясную картину числовой сводки, позволяющую судить не только об однородности данных, но и о некоторых качественных характеристиках их распределения, в частности о направлении и степени его асимметрии.

Диаграмма, построенная по данным рис. 1, представлена на рис. 5, а. Анализ диаграммы показывает, что, во-первых, данные содержат одно примыкающее

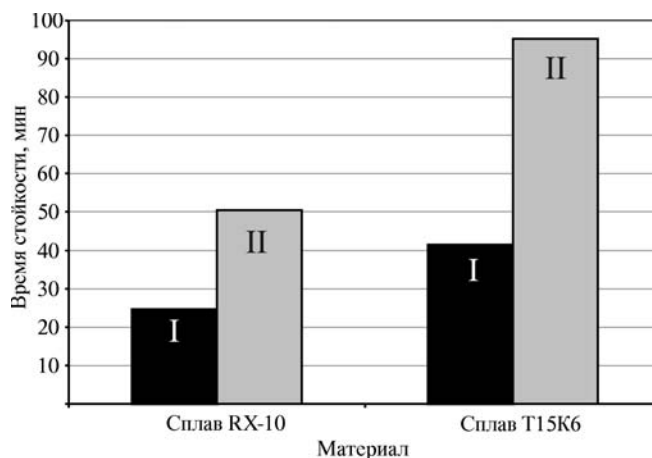


Рис. 6. Средние значения времени стойкости инструментов из сплавов RX-10 и Т15К6:

I – без модификации; II – после модификации

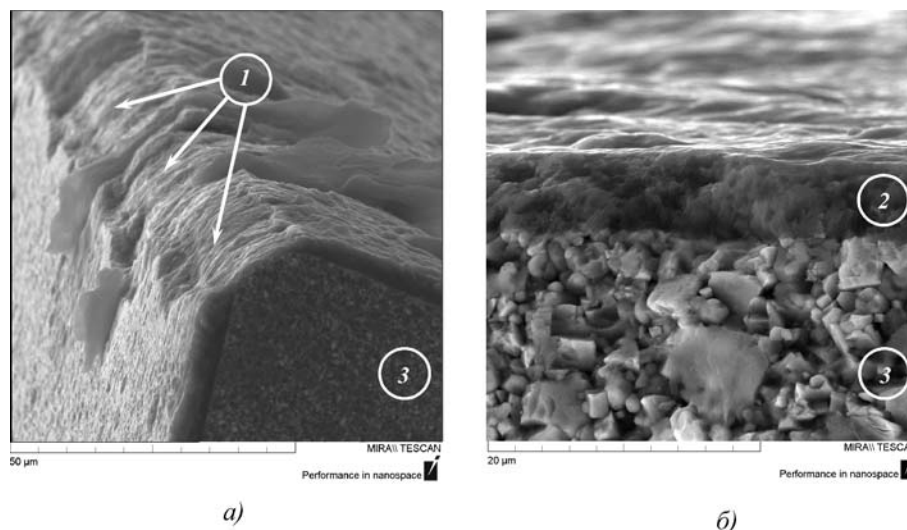
(относящиеся к сплаву Т15К6) и одно внешнее (относящееся к сплаву Т15К6 с покрытием TiN) значения микротвердости, во-вторых, на диаграмме отсутствует правый ус. Это означает, что данные являются неоднородными, а механические свойства материалов – различными. С целью подтверждения достоверности этого вывода на рис. 5, б представлена диаграмма "ящик с усами", построенная без учета значений микротвердости сплавов Т15К6, которая отображает однородность оставшихся значений, поскольку примыкающие и внешние значения на ней отсутствуют. Положение медианы и соотношение длин усов свидетельствуют об отрицательной (левосторонней) асимметрии распределения микротвердости.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при помощи статистического анализа можно извлечь из данных информацию, отображающую свойства материалов, непосредственно влияющие на показатели эксплуатационной надежности изготовленных из них изделий. В качестве примера на рис. 6 представлены диаграммы среднего времени стойкости режущих инструментов из рассмотренных материалов (черные прямоугольники), которые показывают, что даже работая в условиях, определяемых соответствующими сочетаниями параметров технологического режима как близких к оптимальным, механические свойства сплава RX-10 обеспечивают меньшую (в среднем в 1,68 раза) сопротивляемость нагрузкам при резании.

Таким образом, различные исходные механические свойства материалов обуславливают их различное изменение по результатам плазменной модификации и, как следствие, различное повышение времени стойкости инструментов (серые прямоугольники

Рис. 7. Поверхности сплавов RX-10 (а) и T15K6 (б):

1 – деформированный модифицированный слой; 2 – цельный модифицированный слой; 3 – инструментальная основа (матрица)



на рис. 6). В среднем, по результатам эксплуатации оно составило: у сплавов RX-10 – 2 раза, у сплавов T15K6 – 2,3 раза. Кроме этого, у сплава RX-10 имела место деформация модифицированного слоя (рис. 7, а), в то время как у сплава T15K6 он сохранился практически в неизменном состоянии (рис. 7, б). Повышение степени сопротивляемости сплава T15K6 нагрузкам при резании составило 1,89 раза.

Материалы выполненных исследований определили структуру алгоритма анализа характеристик твердости инструментальных материалов на основе метода "ящик с усами" (рис. 8). Алгоритм может быть реализован в виде компьютерной программы, при этом все его шаги, включая принятие решений, выполняются автоматически, что исключает возможность получения ошибочных результатов или их неверной интерпретации. С помощью данного алгоритма могут быть проанализированы и другие характеристики материалов (в частности, параметры дефектов, химический состав, размеры элементов зеренной структуры), также необходимые для оптимизации процесса плазменного воздействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ результатов эксплуатации металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, В.О. Стариннова // Научное издание в машиностроении. 2013. № 8. С. 35–39.
2. Каримов Р.Н. Обработка экспериментальной информации. Ч.1. Разведочный анализ. Анализ качественных данных: учебное пособие. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2002. 112 с.

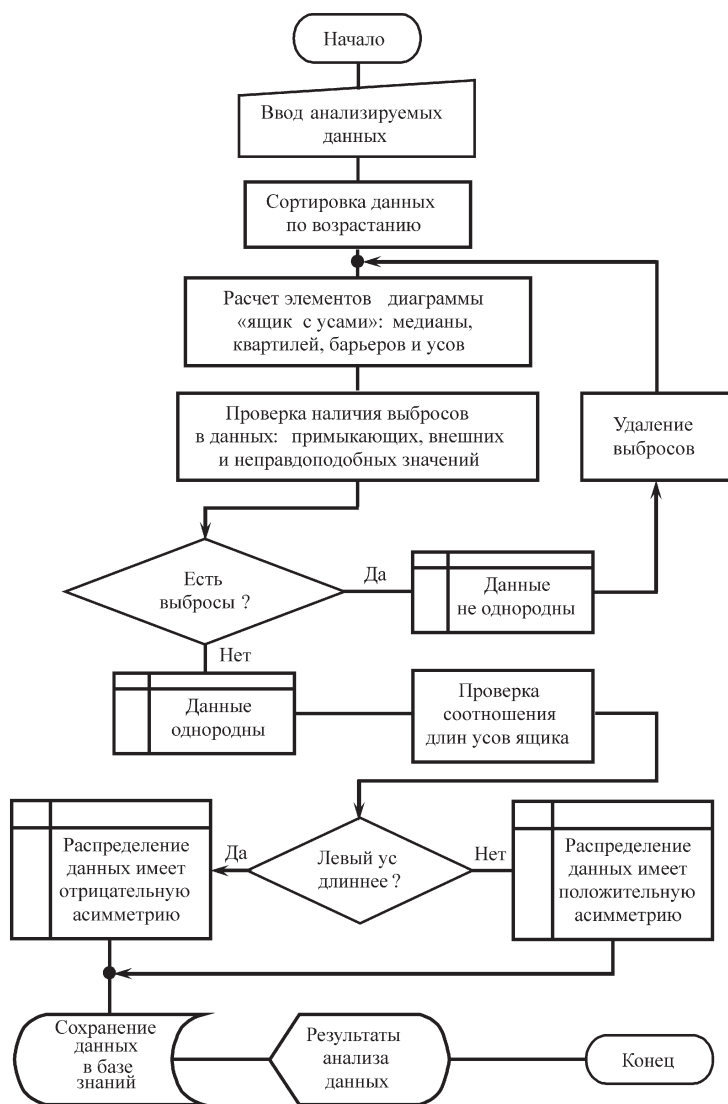
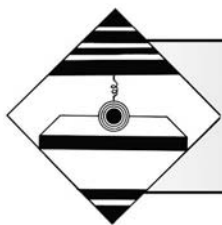


Рис. 8. Алгоритм анализа характеристик инструментальных материалов



УДК 620.179

А.В. Щедрин¹, А.Ю. Козлов²

(¹Технологический институт Московского государственного университета машиностроения "МАМИ",

²ООО МЗ "ТОНАР", г. Орехово-Зуево)

E-mail: t-5511@yandex.ru

Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией

Показана высокая эффективность применения инструмента с регулярной микрогеометрией поверхности и использования противодавления металлоплакирующей смазки. Получена дополнительная информация для параметрического синтеза перспективных методов комбинированного редуцирования.

Ключевые слова: охватывающая обработка, комбинированный инструмент, металлоплакирующая смазка, усилие обработки, качество обработки.

In article the analysis of use of the tool with regular microgeometry of a surface is considered, using the counter-pressure of the metalplating greasing realizing a discovery "Effect of a bezyznosnost at friction". High efficiency of application of this method of processing is shown. As a result of the executed researches additional important information for parametrical synthesis of perspective methods of the combined reduction is received.

Keywords: covering processing, the combined tool, metalplating greasing, effort of processing, quality of processing.

Как показывает системный анализ технологических объектов [1], применение инструмента с регулярным микрорельефом и современных металлоплакирующих смазочных материалов позволяет синтезировать инновационные методы охватывающего поверхностного пластического деформирования (волочение, редуцирование, калибрование и др.) [2, 3].

В работе [4] представлены результаты поисковых экспериментальных исследований метода *охватывающего поверхностного пластического деформирования* (ОППД) в условиях самовозбуждаемого противодавления металлоплакирующих смазочных материалов по канавкам регулярного микрорельефа рабочей поверхности инструмента.

Для получения дополнительной информации проведены комплексные исследования.

На рис. 1 представлена конструкция приспособления для ОППД в условиях противодавления металлоплакирующих смазок, которое состоит из толстостенного цилиндра 1, имеющего полость 2 для *смазочно-охлаждающей технологической среды* (СОТС).

В верхней части цилиндра 1 установлена деформирующая фильера 3, рабочий канал которой упрочнен регулярным микрорельефом (на рис. 1 не показан), представляющий собой систему канавок и выступов правильной геометрической формы. При проталкивании через фильеру 3 заготовки 4 в полости цилиндра создается необходимое давление СОТС, в результате чего она течет по канавкам регулярного микрорельефа рабочего канала фильеры.

В качестве образцов-заготовок использовали цилиндрические штоки 4 (см. рис. 1) из стали 40Х (223НВ) с номинальной длиной обрабатываемого участка 20 и 60 мм. Заготовки обрабатывали шлифованием с точностью размера до 0,02 мм, получая шероховатость поверхности $Ra_3 = 0,329...0,714$ мкм.

В качестве обрабатываемого инструмента (аналогично работам [2, 4]) для сопоставимости результатов применяли деформирующие фильеры из инструментальной стали 9ХС (58...61 НРС) с параметрами: диаметр рабочего канала $20^{+0,03}$ мм; ширина калибрующей ленточки 5 мм; углы рабочего и обратного конусов 5°. Рабочий канал инструмента упрочнялся

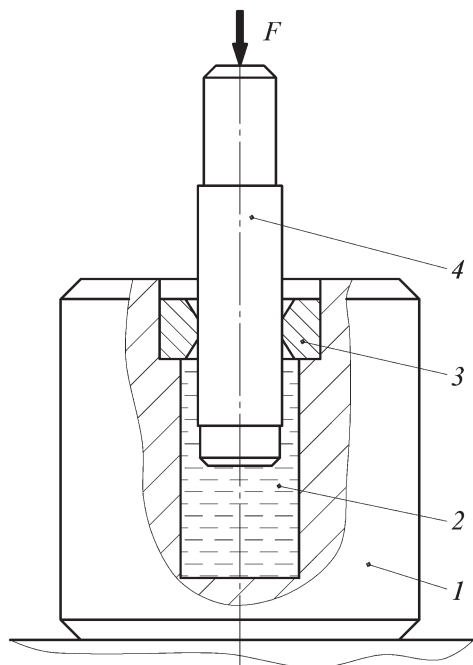


Рис. 1. Приспособление для ОППД в условиях самовозбуждаемого противодействия СОТС

регулярным микрорельефом в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм с шагом 0,5 мм, с глубиной Γ_k на участке калибрующей ленточки 6,5 и 10 мкм. Продольная профилограмма калибрующей ленточки фильеры ($\Gamma_k = 6,5$ мкм) представлена на рис. 2. Регулярный микрорельеф (РМР) выполняли на токарном станке, используя алмазный выглаживатель.

В качестве смазочного материала использовали минеральное масло И-40 с добавлением металлоплакирующей медьсодержащей присадки "Валена", которая реализует "эффект безызносности при трении Гаркунова–Крагельского" [5, 6].

Содержание присадки по объему C варьировали от 0 до 50 %. Номинальную абсолютную деформацию i_n заготовки на диаметр варьировали от 0,05 до 0,25 мм с шагом 0,05 мм. Скорость ОППД составляла 0,05 м/мин.

На рис. 3 представлена общая графическая зависимость удельного усилия обработки q_d от фактиче-

ской абсолютной деформации i_ϕ и содержания присадки без противодействия СОТС. При этом для обработки без присадки ($C = 0$ %) использовали фильеру с РМР, у которой глубина канавок составляла 10 мкм, при содержании присадки 10, 20 и 50 % использовали фильеру с глубиной канавок РМР 6,5 мкм. Дополнительно при обработке без присадки наблюдалась интенсивная адгезия обрабатываемого материала на поверхностях рабочего канала фильеры, что приводило к резкому увеличению усилия обработки.

Как следует из сопоставления графических силовых зависимостей, по мере увеличения содержания присадки усилие обработки уменьшается, при этом полностью отсутствует образование адгезионного налета на рабочих поверхностях инструмента. Такой эффект, по аналогии с работами [2, 3], объясняется образованием на рабочих поверхностях инструмента слоя сервовитной медной пленки, обладающей феноменальными физическими свойствами: полное исключение прямого контакта заготовки и инструмента; пластифицирование поверхностного слоя заготовки (эффект Ребиндера); снижение коэффициента граничного трения до условий жидкостного трения.

Данные частные графические зависимости можно представить в аналитическом виде (Н/мм):

$$\begin{cases} q_d (C = 0 \%, \Gamma_k = 10 \text{ мкм}) = -35 + 4624,39 i_\phi; \\ q_d (C = 10 \%, \Gamma_k = 6,5 \text{ мкм}) = 119,81 + 2713,5 i_\phi; \\ q_d (C = 20 \%, \Gamma_k = 6,5 \text{ мкм}) = 104,6 + 2747,55 i_\phi; \\ q_d (C = 50 \%, \Gamma_k = 6,5 \text{ мкм}) = 100,6 + 2482,49 i_\phi. \end{cases} \quad (1)$$

Совместный анализ графических (см. рис. 3) и аналитических зависимостей (система (1)) показывает, что при содержании присадки 10 и 20 % эффект по снижению усилия обработки примерно одинаков и в диапазоне $i_\phi = 0,1 \dots 0,2$ мм составляет в среднем от 9 до 26 % соответственно, а при содержании присадки $C = 50$ % в этом же диапазоне i_ϕ усилие обработки снижается на 18...32 %. При этом порядок цифр энергосилового эффекта говорит о новом феномене – его существенном росте по мере увеличения степени деформации обрабатываемой заготовки. Это связано с наблюдаемым изначально увеличением толщины

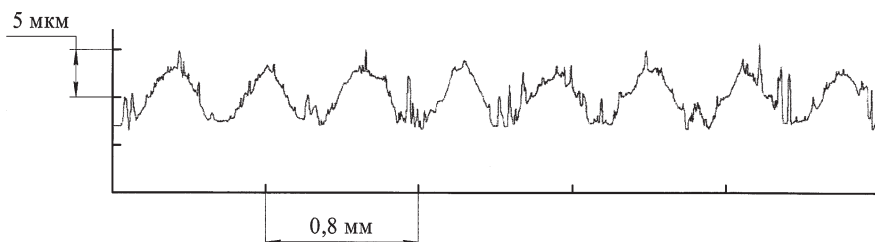


Рис. 2. Продольная профилограмма калибрующей ленточки фильеры, упрочненной регулярным микрорельефом

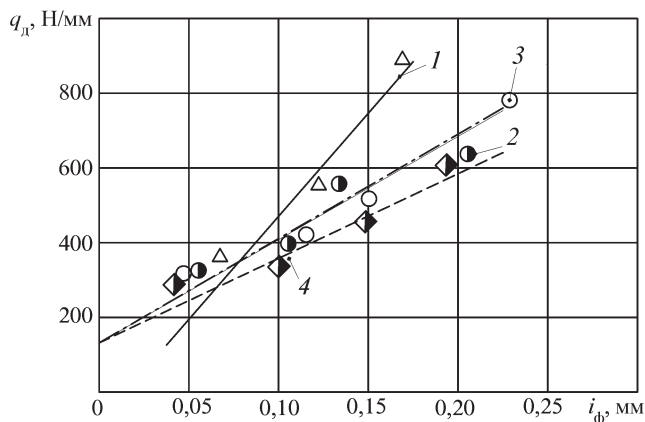


Рис. 3. Зависимость удельного усилия ОППД от абсолютной фактической деформации и содержания присадки (обработка без противодействия СОТС):
1 – C = 0 %; 2 – C = 10 %; 3 – C = 20 %; 4 – C = 50 %

медной сервовитной пленки на поверхности рабочего канала фильеры по мере увеличения содержания металлоплакирующей присадки в базовом масле.

На следующем этапе исследований производилось ОППД в условиях самовозбуждаемого противодействия металлоплакирующей СОТС.

На рис. 4 показана общая графическая зависимость удельного усилия обработки q_d от абсолютной фактической деформации i_ϕ , содержания присадки "Валена" и технологии применения смазочного материала.

Данные частные зависимости аналогично аналитическим имеют вид

$$\begin{cases} q_d (C = 10 \%, \Gamma_k = 6,5 \text{ мкм}) = 328,77 + 1447,7 i_\phi; \\ q_d (C = 20 \%, \Gamma_k = 6,5 \text{ мкм}) = 134,05 + 2848,39 i_\phi. \end{cases} \quad (2)$$

Как показал совместный анализ аналитических зависимостей (1) и (2), по сравнению с ОППД без присадки и противодействия обработка в условиях противодействия металлоплакирующих СОТС позволяет в диапазоне $i_\phi = 0,125 \dots 0,2$ мм в среднем уменьшить удельное усилие на 8,8...23,9 %. При этом наиболее оптимальной обработкой является вариант с противодействием при содержании присадки 10 %. Это объясняется минимальным коэффициентом регрессии при величине абсолютной деформации i_ϕ (первое выражение системы (2)).

Дополнительно, как и в предыдущем случае, на рабочем канале фильеры образовалась медная сервовитная пленка.

На рис. 5 приведены зависимости параметра шероховатости Ra_d обработанной поверхности от i_ϕ , анализ которых показал, что ОППД в условиях противодействия металлоплакирующих смазок исключает адгезию, повышает качество обработки. Еще более убедительно это подтверждают зависимости коэффициента уточнения по параметру шероховатости $K_y (Ra) = (Ra_3 / Ra_d)$ (рис. 6) [2, 3] от фактической абсолютной деформации i_ϕ , где Ra_3 и Ra_d – параметры шероховатости поверхностей заготовки и полученной

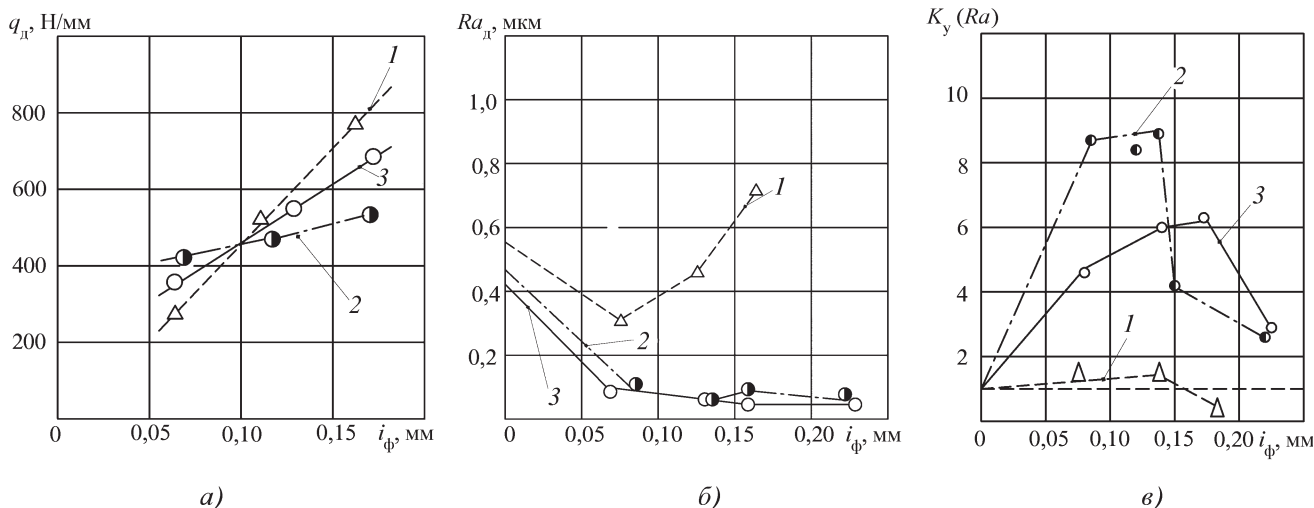


Рис. 4. Зависимость удельного усилия ОППД (а), параметра шероховатости обработанной поверхности (б), коэффициента уточнения по параметру шероховатости обработанной поверхности (в) от абсолютной фактической деформации, содержания присадки и технологии применения СОТС:

1 – обработка без противодействия СОТС, C = 0 %; 2 – обработка с противодействием СОТС, C = 10 %; 3 – обработка с противодействием СОТС, C = 20 %

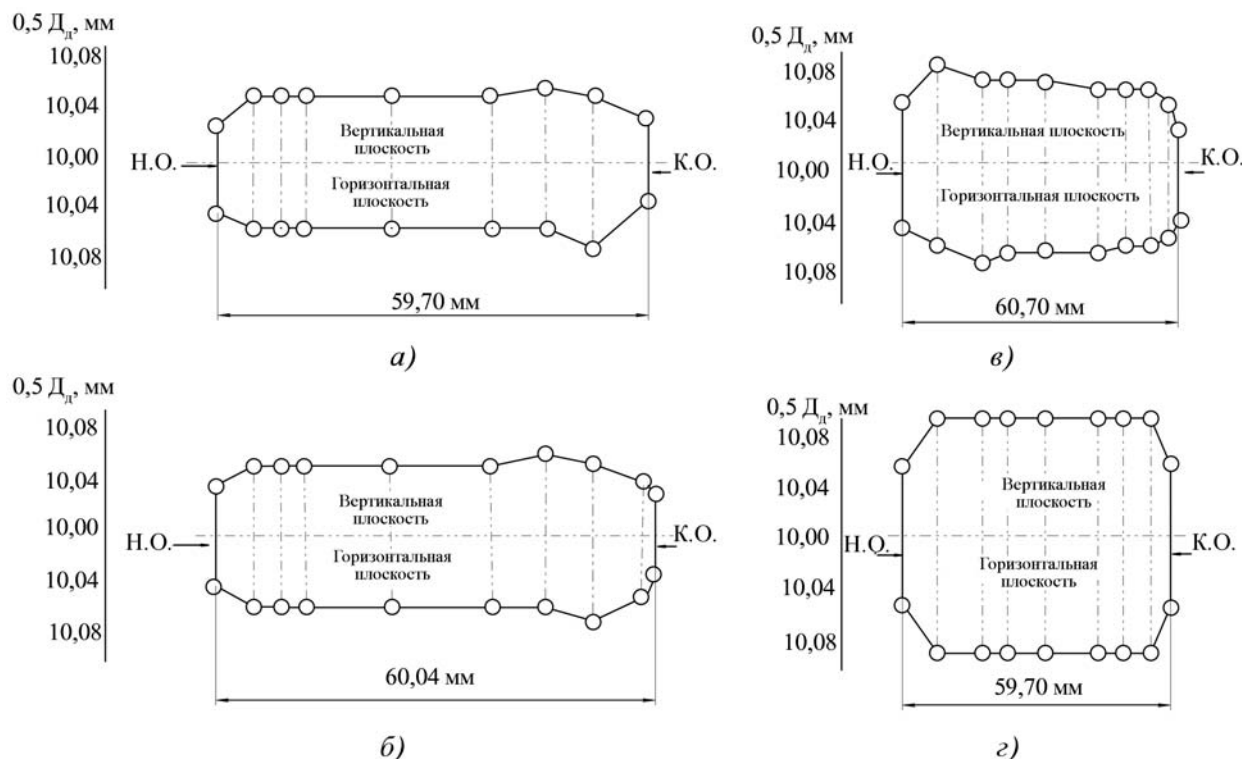


Рис. 5. Характерные профили образцов деталей (ОППД с противодавлением СОТС, $C = 10\%$):
 $a - i_{\phi} = 0,091$ мм; $б - i_{\phi} = 0,132$ мм; $в - i_{\phi} = 0,148$ мм; $з - i_{\phi} = 0,223$ мм

в результате ОППД детали соответственно. Анализ данной зависимости показывает следующее: при обработке с противодавлением СОТС с 10 % присадки исходная шероховатость поверхности уменьшается до 9 раз; при обработке с противодавлением СОТС с 10 и 20 % присадки наибольшее значение $K_y(Ra)$ наблюдается в диапазоне $i_{\phi} = 0,1...0,13$ мм, а дальнейшее уменьшение $K_y(Ra)$ связано с передеформированием, наличием сервовитной пленки определенной толщины, локализирующей часть деформации и интенсификации "эффекта Ребиндера".

После построения объемных профилей образцов деталей (рис. 5), полученных ОППД, можно сделать анализ размерной геометрической точности и остаточных деформаций.

Как следует из сравнения формы профилей и зависимостей (рис. 6, $a-v$), размерная точность ΔD_d [2,3] (рис. 6, a) в большей мере зависит от отклонения профиля продольного сечения (рис. 6, $в$), чем от овальности (рис. 6, $б$). В свою очередь, отклонение профиля продольного сечения определяется крайними эффектами в начале (Н.О.) и конце обработки (К.О.) в виде фаски смятия переднего торца образца-заготовки и упругого волнообразного восстановления заднего торца.

Из зависимости на рис. 6, a видно, что при $i_{\phi} > 0,15$ мм за счет противодействия металлоплакирующей СОТС можно на 10...20 % повысить размерную точность получаемых изделий. Это связано как с отсутствием адгезии, так и с меньшими деформационными искажениями исходных заготовок в результате меньших усилий ОППД.

Определив с помощью профилей образцов деталей (см. рис. 5) их средний диаметр и сравнив его с диаметром рабочего канала фильеры по калибрующей ленточке, получим общую зависимость средней остаточной диаметральной деформации Δ_0 (рис. 6, $з$).

Анализ этой зависимости показывает, что средняя остаточная деформация наружной поверхности образцов деталей имеет положительный знак, т.е. средний диаметр получаемых изделий больше диаметра рабочего канала фильеры.

Дополнительно ОППД в условиях противодействия металлоплакирующих СОТС по сравнению с обработкой без присадки и противодействия обеспечивает меньшие осевые деформации.

Таким образом, выполненные исследования расширяют информационную базу для системного

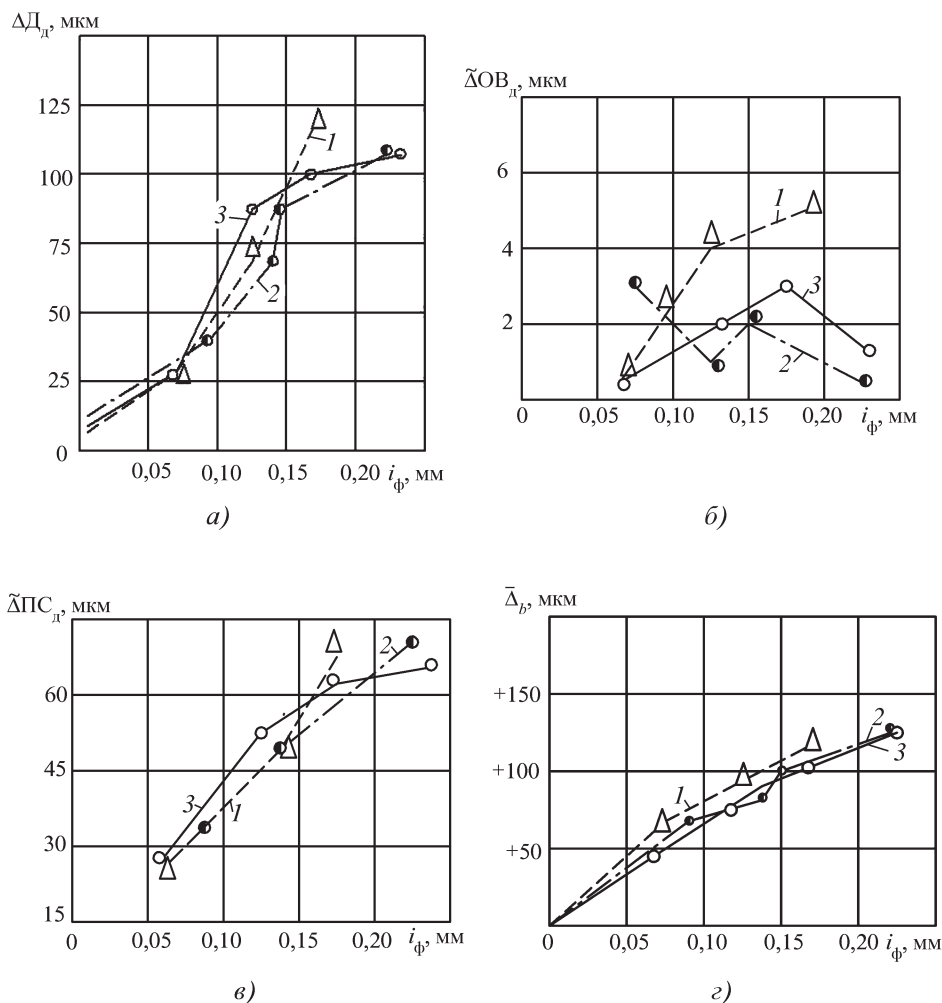


Рис. 6. Зависимости поля рассеяния диаметра образцов деталей ΔD_d (а), средней овальности (б) и среднего отклонения профиля продольного сечения (в) образцов деталей, средней остаточной диаметральной деформации образцов-деталей (г) от абсолютной фактической деформации их заготовок, содержания присадки и технологии применения СОТС:

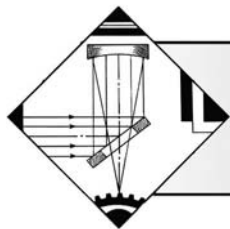
1 – обработка без противодействия СОТС, $C = 0\%$; 2 – обработка с противодействием СОТС, $C = 10\%$; 3 – обработка с противодействием СОТС, $C = 20\%$

проектирования инновационных методов ОППД [4, 7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Щедрин А.В. и др. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15–20.
- Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Ерохин В.В. и др. Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 8. С. 21–25.
- 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.

- Гаврилов С.А., Щедрин А.В. Совершенствование технологии применения металлоплакирующего кондиционера в методах комбинированной обработки // Вестник машиностроения. 2012. № 6. С. 75–78.
- Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В. Эффект избирательного переноса при трении (эффект безызносности) // диплом № 41. Открытия в СССР 1957–1967 гг. М.: ЦНИИПИ, 1968. С. 52–53.
- Пат. 2277579 РФ. МПК С10М141/06. Металлосодержащая маслорастворимая композиция для смазочных материалов / В.Г. Бабель, Д.Н. Гаркунов, С.Ю. Мамыкин, П.И. Корник. Опубл. 10.06.2006. Бюл. № 16.
- Гаврилов С.А., Зинин М.А. Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 2. С. 29–33.



УДК 621.515

Р.Н. Сайфуллин¹, М.Н. Фархшатов², Э.Л. Левин²,
М.З. Нафиков², В.С. Наталенко¹, Л.Ф. Исламов², К.В. Юферов²
(¹ ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии, г. Москва;
² ФГБОУ ВПО "Башкирский ГАУ", г. Уфа)
E-mail: riledin@mail.ru

Свойства покрытий, полученных электроконтактной приваркой присадочных материалов из стальных лент

Описаны физико-механические свойства покрытий, полученных электроконтактной приваркой стальных лент. Приведены примеры использования таких покрытий на деталях машин.

Ключевые слова: покрытия, электроконтактная приварка.

We describe the physical and mechanical properties of the coatings obtained by electrocontact welding steel tapes. We give the examples of such use coatings for machine parts.

Keywords: cover, electrocontact welding.

В области восстановления изношенных деталей машин способ *электроконтактной приварки* (ЭКП) стальных лент нашел большее практическое применение в силу удобства применения и отсутствия недостатков, присущих способам наплавки и ЭКП проволоки и металлических порошков. Стальная лента технологична, возможна ее закалка в процессе приварки и, конечно, доступна для производителей. Именно использование технологичной стальной ленты в качестве присадочного материала для ЭКП явилось одной из причин широкого распространения метода в 1980-х гг. Серийно выпускались более 20 моделей установок для ЭКП стальной ленты, разработанных ГОСНИТИ и ВНИИТУВИД "Ремдеталь" [1]. На всех установках для осуществления ЭКП присадочных материалов использовались стандартные узлы оборудования точечной или шовной сварки.

В 1970–1990-х гг. были проведены большие работы по внедрению этого прогрессивного способа восстановления в сельскохозяйственное ремонтное производство. Разработаны и внедрены в производство целые линии для восстановления изношенных автотракторных деталей, причем восстанавливались не только наружные цилиндрические поверхности, но и шлицевые, а также внутренние цилиндрические поверхности.

Для приварки в качестве присадочного материала применяют ленты толщиной 0,25...1,0 мм из углеро-

дистых, легированных и инструментальных сталей. При использовании ленты толщиной более 0,8 мм или ленты из высокоуглеродистых и пружинных сталей рекомендуется предварительно свернуть ее с помощью вальцов. Производительность процесса до 0,6 дм²/мин. Для восстановления изношенных шеек валов, работающих в условиях трения скольжения со смазкой, используются стальные ленты марок 40 и 45. При их ЭКП за счет одновременного охлаждения зоны соединения происходит закалка покрытия с достигаемой твердостью поверхности 50...55 HRC, причем твердость на поверхности неоднородная, что объясняется следующим. При восстановлении деталей типа "вал" приварка производится по винтовой линии взаимно перекрывающимися точками и валиками (рис. 1). В итоге при повторном нагреве уже закаленного участка происходит отпуск металла. Именно вследствие этого поверхность деталей, восстановленных ЭКП присадочных материалов, характеризуется значительной структурной неоднородностью, проявляющейся в колебании значений твердости. Нагретый мощными импульсами сварочного тока небольшой участок металла (металл ленты и поверхностный слой детали) быстро охлаждается вследствие теплоотвода в деталь и роликовый электрод, которые интенсивно охлаждаются струей воды и закаливаются на высокую твердость. Следующий сварочный импульс нагревает близлежащий участок металла, что приво-

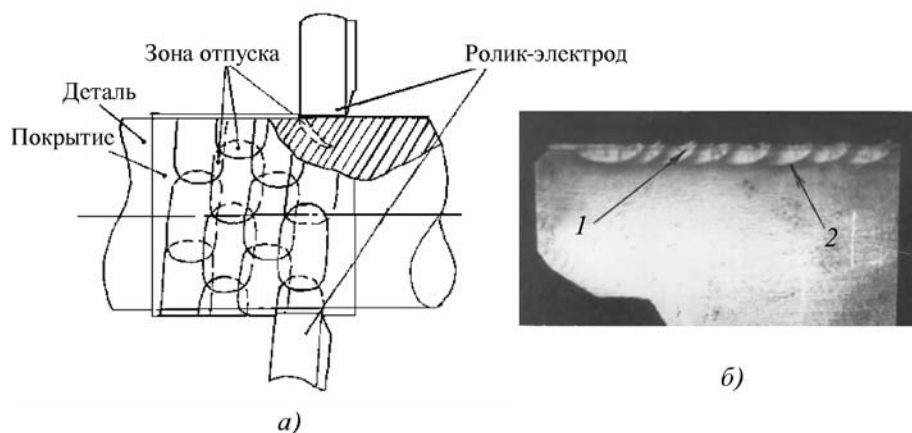


Рис. 1. Электроконтактная приварка:
a – схема образования зон закалки, отпуска; *b* – микроструктура детали с приваренной лентой из стали 45; 1 – граница сварного соединения ленты с основным металлом; 2 – зона термического влияния

дит к частичному отпуску первого участка с закаленной структурой. При спиральном перемещении контактного ролика с величиной, равной шагу продольной подачи, некоторая часть ранее закаленного участка детали повторно нагревается импульсами сварочного тока и также отпускается. Вследствие этого в металле приваренной ленты и в слое основного металла образуются чередующиеся участки закалки и отпуска. Физико-механические и эксплуатационные свойства деталей машин, восстановленных ЭКП, зависят от структуры металла на этих участках, их размеров и взаимного расположения относительно друг друга. На рис. 1 показана макроструктура детали с приваренной лентой (в поперечном сечении). Хорошо видны чередующиеся участки закалки и отпуска (светлые и темные участки).

Изменение статистических характеристик в зависимости от процентного содержания углерода в стальной приваренной ленте показана на рис. 2. Как видно из рисунка, с повышением содержания углеро-

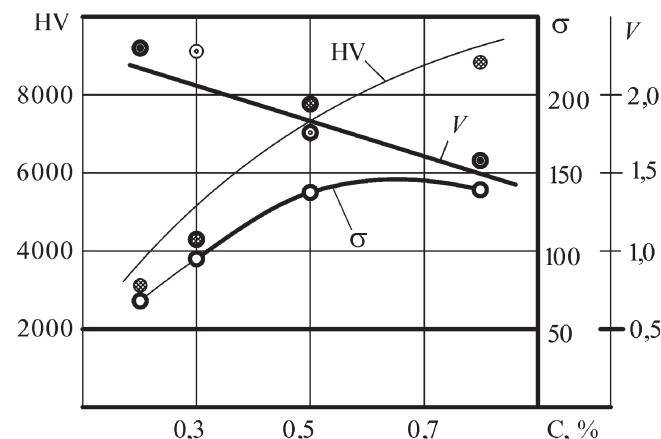


Рис. 2. Изменение статистических характеристик твердости в зависимости от содержания углерода в стальной ленте:
 HV – средняя твердость; σ – основное отклонение; *V* – коэффициент вариации

да в приваренной стальной ленте величина средней твердости HV и основное отклонение ее значений существенно увеличиваются при изменении содержания углерода от 0,20 до 0,50 %.

При дальнейшем увеличении содержания углерода (от 0,5 до 0,8 %) прирост значений твердости и основного отклонения незначителен, что согласуется с теоретическими положениями и практическими данными термической обработки стали.

Увеличение средней твердости при повышении содержания углерода объясняется увеличением объема мартенситной составляющей в структуре, а увеличение значений основного отклонения – повышением структурной неоднородности стали, в которой образуется весь спектр структур термической обработки – от сорбита с твердостью 4300...4800 HV до мартенсита с твердостью 8000...9500 HV. Коэффициент вариации *V*, являющийся отношением основного отклонения к средней твердости, понижается при повышении содержания углерода в приваренной ленте вследствие существенного повышения средней твердости. Статистические характеристики твердости покрытия из приваренной ленты толщиной 0,4 мм из легированной стали марок 65Г и 70С2ХА хорошо согласуются с аналогичными данными для рассмотренной выше углеродистой стали, табл. 1.

Меньшая твердость покрытия из легированной стали по сравнению с углеродистой сталью марок 50 и У8 объясняется следующим. Легированные стали более склонны к образованию трещин при закалке, и попадание алмазной пирамиды твердомера в трещины, приводит к резкому снижению величины измеренного значения твердости. Другим фактором, вызывающим снижение твердости при закалке легированной стали, является повышение количества остаточного аустенита в металле ленты после приварки вследствие заметного снижения точек начала и конца мартенситного превращения.

Таблица 1

Статистические характеристики твердости поверхности после приварки металлической ленты

Статистические характеристики твердости	Марки стали по ГОСТ 14959–78	
	65Г	70С2ХА
Средняя арифметическая твердость HV, МПа	5454	5513
Дисперсия σ^2	5391	9636
Среднеквадратическое отклонение σ	73,4	98,2
Коэффициент вариации V	1,35	1,78

При восстановлении изношенных деталей из коррозионно-стойких сталей (плунжеры гомогенизаторов и эксцентриковые валы молочного производства, рис. 3) используются стальные ленты марок 20Х13, 12Х13, 15Х28, 12Х18Н10Т, 12Х17, 20Х13Н4Г9.

Результаты измерения твердости покрытий, полученных ЭКП лент из коррозионно-стойких сталей, приведены в табл. 2. Измерения проводили на образцах из сталей марок 20Х13 и 12Х13Н4Г9 после приварки ленты толщиной 0,5 мм из коррозионно-стойких сталей марок 20Х13, 12Х13, 15Х28, 12Х18Н10Т, 12Х17, 20Х13Н4Г9.

Увеличение средней твердости при повышении содержания углерода объясняется увеличением объема мартенситной составляющей в структуре.

Покрытия, полученные из сталей аустенитного класса, имеют более однородную структуру, так как они не подвергаются закалке в процессе приварки. Об этом свидетельствуют и статистические характеристики твердости.

Микроструктура зоны термического влияния и покрытия после ЭКП ленты из стали 65Г на цилиндрические образцы \varnothing 35 мм из стали 45 (режим приварки: сила тока 8...9 кА, продолжительность импуль-

Таблица 2

Твердость ленты из коррозионно-стойких сталей после ЭКП

Марка стали	Класс стали	Средняя твердость после приварки HV, МПа
20Х13	Мартенситный	5020
12Х13	Мартенситно-ферритный	4120
15Х28	Ферритный	2930
12Х17	Мартенситно-ферритный	2720
12Х18Н10Т	Аустенитный	2010
20Х12Н4Г9	Хромомарганцевоникелевый	2720

сов тока 0,08 с, продолжительность пауз 0,16 с, расход охлаждающей воды 2,5 л/мин) представлены на рис. 4.

По глубине покрытия можно отметить наличие приваренной высокоуглеродистой стальной ленты, структура которой на поверхности – мартенсит закалки, а ближе к основному металлу – перлит и вторичный цементит; сварочный шов с прерывистыми участками неполного расплавления; зона термического влияния, нагреваемая до температуры выше критической точки A_{c1} . Из-за особенностей первичной кристаллизации металл шва имеет более мелкозернистую структуру, а участок неполной закалки имеет структуру мартенсита и феррита в виде сетки. Переходной участок состоит из троостита.

Прочность сцепления покрытий из стальных лент с основным металлом детали незначительно уступает прочности сцепления покрытий из проволоки и порошков [2–4] и зависит от химического состава лент и режимов приварки. Однако достигаемая прочность сцепления в зависимости от режимов электроконтактной приварки в 100...300 МПа при испытании на срез является достаточной для работоспособности в сопряжениях, работающих при трении скольжении и

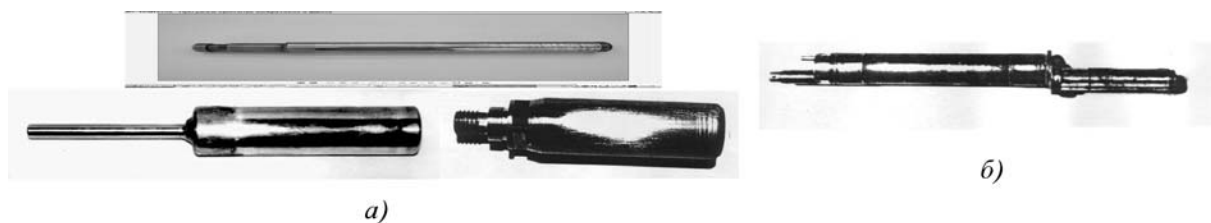


Рис. 3. Детали из коррозионно-стойких сталей, восстановленные электроконтактной приваркой стальной ленты из коррозионно-стойкой стали 20Х13:

а – плунжеры от молочных гомогенизаторов; б – эксцентриковый вал линии по изготовлению бумажных пакетов

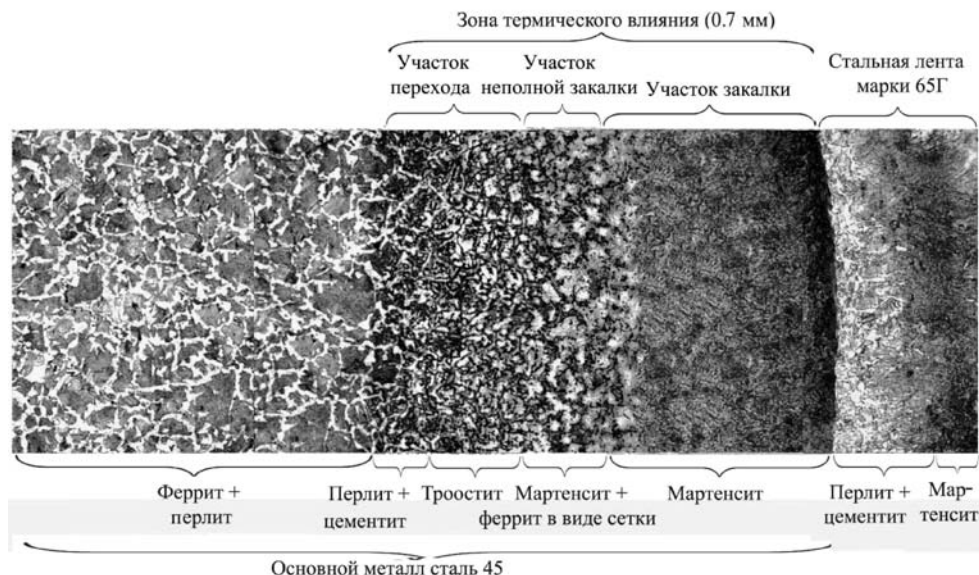


Рис. 4. Микроструктура по глубине зоны термического влияния при приварке стальной ленты марки 65Г, $\times 200$

для неподвижных посадок. Поэтому по критерию прочности сцепления с основным металлом детали покрытия, полученные ЭКП стальных лент, могут использоваться при восстановлении таких деталей и поверхностей, как шейки коленчатого вала, плунжеры насосов, шейки валов под шарикоподшипники, штоки гидроцилиндров, опорные шейки валов КПП и многих других деталей.

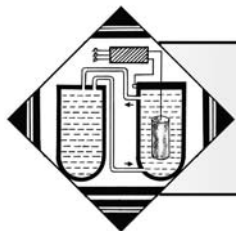
Износостойкость покрытий из стальных лент в основном зависит от химического состава лент. В работе [4, 5] приводятся некоторые данные по износостойкости данных покрытий. Так износостойкость эталонного образца из стали 45 (закалка до 48...55 HRC) имеет бóльший износ, чем покрытие из стальной ленты той же стали. Это можно объяснить тем, что колебания твердости покрытий, о которых написано выше, приводят к неравномерной изнашиваемости поверхности с образованием локальных участков с увеличенным износом, которые могут удерживать дополнительную смазку и соответственно уменьшать коэффициент трения. Но, с другой стороны, данная неоднородность приводит к появлению структурных концентраторов напряжений, которые могут уменьшать предел выносливости материала. Кроме того, при восстановлении валов ЭКП стальной ленты в формируемом металлопокрытии образуются неблагоприятные растягивающие напряжения, часто достигающие предела текучести присадочного материала. Это является, по мнению автора работы

[6], одной из главных причин снижения циклической прочности восстановленных валов и ограничивают применение контактной приварки ленты для деталей, работающих при значительных знакопеременных нагрузках.

Несмотря на вышеупомянутые недостатки, стальная лента наиболее технологична и часто используемая при восстановлении валов ЭКП, по сравнению со стальной проволокой и металлическими порошками. Это подтверждается опытом работы научно-производственного участка кафедры технологии металлов и ремонта машин ФГБОУ ВПО "Башкирский ГАУ" [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайфуллин Р.Н., Фархшатов М.Н., Наталенко В.С. Оборудование для восстановления и упрочнения деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 12. С. 40–47.
2. Сайфуллин Р.Н., Павлов А.П., Наталенко В.С. Прочность сцепления покрытий, полученных электроконтактной приваркой стальных сеток // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 2. С. 39–41.
3. Наталенко В.С. Восстановление изношенных деталей машин электроконтактной приваркой армированных спеченных лент: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Уфа, 2009.
4. Латыпов Р. Выбор компактных и порошковых металлических материалов и управление качеством покрытий при упрочнении и восстановлении деталей электроконтактной приваркой: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: М., 2006.
5. Фархшатов М.Н. Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственной техники и оборудования электроконтактной приваркой коррозионно-стойких и износостойких материалов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: Уфа, 2007.
6. Нафиков М.З., Загиров И.И., Игнатъев А.Г. Остаточные напряжения в металлопокрытии, нанесенном электроконтактной наплавкой // Технология металлов. 2008. № 9. С. 29–33.
7. Сайфуллин Р.Н., Левин Э.Л., Фархшатов М.Н. и др. Восстановление изношенных деталей машин электроконтактной приваркой // Ремонт, восстановление, модернизация. 2008. № 11. С. 28–30.



Влияние упрочняющих добавок SiC на изнашивание электролитических NiP-покрытий в условиях фреттинг-коррозии

Исследовано влияние добавок упрочняющих субмикронных карбидов кремния и термической обработки на фреттинг-коррозию в растворе NaCl никель-фосфорных (NiP) покрытий, полученных электролитическим осаждением. Испытания были проведены при амплитуде 100 и 500 мкм. Трибологические испытания выявили абразивный характер изнашивания всех исследованных покрытий. С увеличением нагрузки фреттинг-коррозия возрастает, а коэффициент трения при этом в большинстве случаев уменьшается.

Ключевые слова: покрытия, трение, изнашивание, фреттинг-коррозия, оксиды.

Effect of reinforcing SiC particles and heat treatment on fretting-corrosion in NaCl solution of NiP coatings and composite NiP-SiC coatings were investigated. All tests were done under gross slip (500 μm) and small slip (100 μm) conditions. Abrasive wear was noticed for all coatings investigated. Addition of reinforcing SiC particles leads to increasing of pitting on fretting-corrosion. In NiP coatings pitting are distributed uniformly. With increasing load fretting-corrosion increases, although the coefficient of friction decreases in most cases.

Keywords: coatings, friction, wear, oxides, fretting-corrosion.

Введение

Фреттинг-коррозия часто возникает в болтовых, заклепочных, шпоночных, шлицевых и шарнирных соединениях, преимущественно в конструкциях летательных аппаратов. В процессе работы эти соединения совершают повторные относительные перемещения, в результате чего происходят механические разрушения поверхностных оксидных пленок. Соприкасающиеся поверхности при фреттинге, как правило, длительное время не разъединяются и, следовательно, продукты изнашивания не имеют выхода из зоны контакта. Это усиливает коррозию и изнашивание деталей машин. Фреттинг-коррозия представляет собой сложный процесс, в котором в основном действуют механическая и химическая составляющие изнашивания, т.е. происходит процесс образования и удаления пленок оксидов на трущихся поверхностях. Обе составляющие действуют одновременно и влияют друг на друга.

Одним из способов борьбы с фреттинг-коррозией является нанесение защитных покрытий. В ранее выполненных исследованиях [1, 2] фреттинг-изнашивания электролитических NiP-покрытий на воздухе установлена зависимость интенсивности их изнашивания

от наличия карбидов кремния и кристаллической фазы Ni₃P, выделившейся в процессе отжига образцов. Карбиды кремния, хотя и увеличивают твердость композиционных NiP-SiC-покрытий, однако повышенная неоднородность приповерхностных слоев приводит к повышению интенсивности фреттинг-изнашивания. Выделение кристаллической фазы Ni₃P в результате термической обработки приводит к увеличению твердости покрытий и снижению интенсивности их изнашивания. Наименьшее фреттинг-изнашивание обеспечивает NiP-покрытие без добавок после термической обработки.

Цель работы – исследование влияния добавок субмикронных карбидов кремния на фреттинг-коррозию композиционных NiP-SiC-покрытий в растворе NaCl.

Методика проведения исследований

NiP-покрытия осаждали на стальную подложку в электролитической ванне. Использовали электролит Уоттса, содержащий 20 г/л фосфористой кислоты H₃PO₃ и суспензию карбидов кремния в количестве 0, 80 и 200 г/л со средним диаметром частиц 600 нм.

Часть образцов отжигали при температуре 420 °С в течение 1 ч.

Трибологические испытания проводили по схеме шар–диск при нормальном нагружении 1, 5 и 10 Н, частоте колебаний 2 Гц и тангенциальном смещении (амплитуде) 100 и 500 мкм. Количество циклов испытаний для всех образцов составляло 20 000. В качестве контртела использовали корундовые шары (фирма "Ceratech", Нидерланды) диаметром 10 мм с шероховатостью поверхности $Ra = 0,2$ мкм. Испытания проводили в растворе NaCl (pH = 5,5) при температуре 22 °С. Постоянно в процессе испытаний записывали коэффициент трения. Результаты трибологических испытаний представляли как усредненное значение, полученное по трем измерениям для каждого типа покрытия. Трибологические характеристики покрытий характеризовались объемными потерями материала при изнашивании и коэффициентом трения.

Морфологию поверхности покрытий и поверхностей трения изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа "SEM-Philips 515". Химический анализ был выполнен с помощью установки "EDAX" при увеличении ускоряющего напряжения от 10 до 20 кВ.

Микротвердость измеряли на поверхности трения образцов при нагрузке 0,05 Н. Интенсивность изнашивания определяли как углубление Δ в мкм в поверхности образцов с помощью оптической трехмерной профилирующей системы "Wyko NT Series".

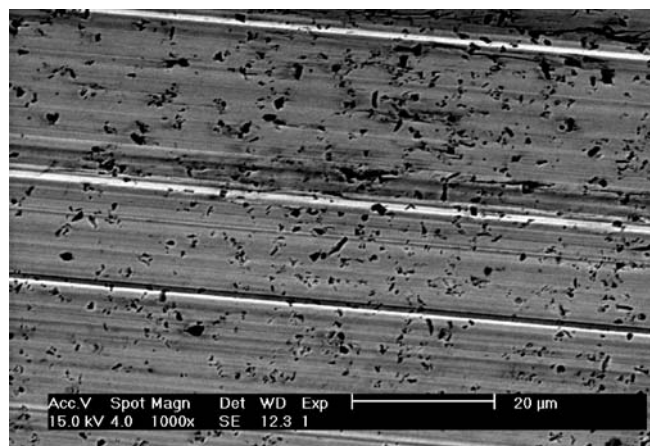
Результаты исследований и их обсуждение

Структура NiP- и NiP–SiC-покрытий была представлена в работе [1]. Микроструктура NiP-покрытий имеет гладкую поверхность с характерным металлическим блеском. Микроструктура композиционных NiP–SiC-покрытий представляет собой однородную глобулярную структуру серого цвета с внедренными карбидами кремния SiC в виде светлых включений.

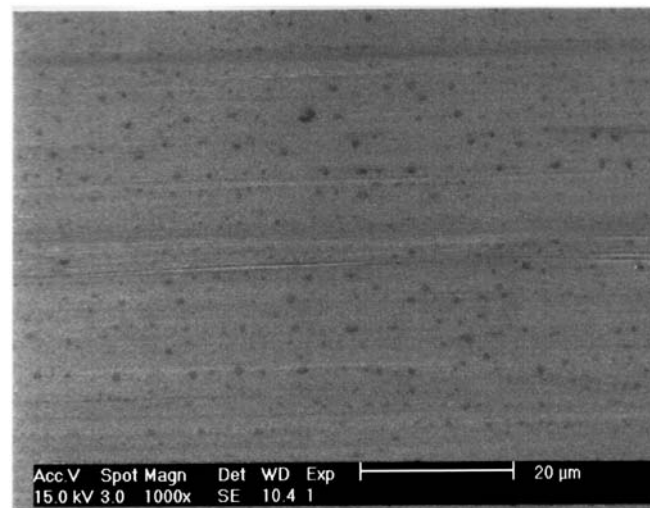
Поверхность трения NiP–SiC-покрытий при фреттинг-коррозии в растворе NaCl имеет характерные для всех покрытий борозды, параллельные направлению движения (рис. 1, а). Такие борозды характерны для абразивного изнашивания. При фреттинг-коррозии абразивный характер износа был замечен для всех исследованных покрытий. При этом края поверхностей трения имели ровные границы, тогда как при фреттинг-изнашивании на воздухе границы поверхностей трения всех исследованных покрытий были покрыты оксидными пленками [2]. Продукты изнашивания при фреттинг-коррозии вымываются из зоны трения, оседают в растворах и не оказывают заметного влияния на процесс изнашивания.

На рис. 1, б представлена поверхность трения NiP-покрытий. На поверхности трения NiP-покрытий были замечены борозды, параллельные направлению фреттинг-коррозии, а также темные точки – места развития коррозии или питтинги, характерные для этого вида изнашивания. Несмотря на их множественный характер, трещины или дальнейшее разрушение поверхности замечены не были. Такой вид поверхности трения характерен для всех исследованных NiP-покрытий, независимо от изменения приложенной нагрузки или амплитуды.

Полученные значения коэффициентов трения и величин износа для всех исследованных покрытий представлены в таблице. По сравнению с коэффициентом трения покрытий при фреттинг-изнашивании на воздухе [2] коэффициент трения покрытий при



а)



б)

Рис. 1. Микроструктура поверхности трения отожженных покрытий:

а – NiP–SiC (80 г/л); б – NiP

фреттинг-коррозии в растворе NaCl был меньше для всех исследованных покрытий. С введением карбидов кремния и увеличением их концентрации коэффициент трения покрытий увеличивается, а после проведения термической обработки с выделением кристаллической фазы Ni₃P и увеличением твердости покрытий коэффициент трения уменьшается. То же самое наблюдалось при фреттинг-изнашивании покрытий на воздухе [2].

Из таблицы видно, что на фреттинг-коррозию исследуемых покрытий в растворе NaCl оказывают влияние их состав и термообработка, а также нагрузка и амплитуда сдвига при фреттинге. Для анализа полученных результатов рассмотрим механические и хи-

мические факторы изнашивания при фреттинг-коррозии.

Как было показано в работе [1], при отжиге покрытий при температуре 420 °С происходит выделение твердой кристаллической фазы Ni₃P, которая существенно (в 1,5–2 раза) повышает микротвердость покрытий. Кроме того, как видно из таблицы, добавка упрочняющих субмикронных карбидов кремния тоже повышает микротвердость покрытий, но не столь значительно, как термообработка. Причем, чем выше концентрация включений SiC, тем выше микротвердость покрытий. Эти факторы способствуют снижению интенсивности изнашивания при фреттинг-коррозии. В то же время известно [3], что термообработка

Результаты испытаний на фреттинг-коррозию при амплитуде 100 и 500 мкм

Состав покрытия	Нагрузка, Н	Исходное состояние			После отжига		
		Микротвердость HV	Коэффициент трения <i>f</i>	Высота изношенного слоя Δ, мкм	Микротвердость HV	Коэффициент трения <i>f</i>	Высота изношенного слоя Δ, мкм
Амплитуда A = 100 мкм							
NiP	1	591	–	1,12	1076	0,23	1,09
	5	–	0,19	1,94	–	0,16	1,78
NiP–SiC (80 г/л SiC)	1	699	–	1,93	1123	0,30	2,50
	5	–	0,20	2,10	–	0,17	3,40
NiP–SiC (200 г/л SiC)	1	727	–	2,14	1454	0,22	2,16
	5	–	0,23	2,60	–	0,19	2,90
Амплитуда A = 500 мкм							
NiP	1	591	–	1,07	1076	0,12	0,92
	5	–	–	2,60	–	0,18	2,20
	10	–	0,20	4,08	–	0,16	2,81
NiP–SiC (80 г/л SiC)	1	699	–	1,50	1123	0,21	1,47
	5	–	–	2,70	–	0,19	2,27
	10	–	0,21	3,08	–	0,18	3,76
NiP–SiC (200 г/л SiC)	1	727	–	1,50	1454	0,28	1,48
	5	–	–	2,36	–	0,22	2,85
	10	–	0,23	3,67	–	0,19	3,80

NiP-покрытий повышает их структурную неоднородность, вызванную выделением кристаллической фазы Ni₃P. Повышает структурную неоднородность покрытий также введение субмикронных добавок карбидов кремния. Указанные факторы способствуют повышению изнашивания при фреттинг-коррозии.

Известно [4], что нагрузка увеличивает абразивное изнашивание подвижного фрикционного контакта. Одновременно с увеличением нагрузки увеличиваются плотность контакта и предварительное смещение при фреттинге, что уменьшает вероятность попадания химически активной среды в зону контакта и снижает величину химической составляющей фреттинг-коррозии.

Амплитуда сдвига фрикционного контакта, очевидно, также оказывает неоднозначное влияние на фреттинг-коррозию. Если величина амплитуды сопоставима с предварительным смещением, то, с одной стороны, уменьшается вероятность попадания химически активной среды в зону трения, что снижает величину химической составляющей фреттинг-коррозии, а с другой – заблокированные в зоне трения твердые продукты изнашивания увеличивают механическую составляющую фреттинг-коррозии.

При величине амплитуды больше предварительного смещения улучшаются условия для попадания химически активной среды в зону трения, способствующие увеличению химической составляющей изнашивания. В то же время улучшаются условия для удаления (вымывания раствором) продуктов изнашивания из зоны трения, что уменьшает механическую составляющую фреттинг-коррозии.

Суммарное воздействие указанных выше факторов оказывает неоднозначное влияние на фреттинг-коррозию NiP-покрытий.

Выводы

Установлено, что:

– независимо от состава NiP-покрытий, их термообработки и амплитуды сдвига с увеличением нагрузки фреттинг-коррозия возрастает, коэффициент трения при этом в большинстве случаев уменьшается;

– при различных составах NiP-покрытий и величинах амплитуды сдвига фреттинг-коррозия (в сопоставимых условиях нагружения) практически не зависит от термообработки (за исключением NiP–SiC-покрытий с содержанием SiC 80 г/л при амплитуде $A = 100$ мкм);

– добавки SiC в NiP-покрытия (независимо от их концентрации в исследованном диапазоне) увеличивают в 1,5 раза фреттинг-коррозию при малых нагрузках; при больших нагрузках наличие и концентрация SiC не оказывает заметного влияния на фреттинг-коррозию;

– степень влияния амплитуды сдвига на фреттинг-коррозию зависит в основном от величины нагрузки: при малой нагрузке с увеличением амплитуды (независимо от состава и термообработки) интенсивность фреттинг-коррозии уменьшается; при более высоких нагрузках фреттинг-коррозия практически не зависит от амплитуды сдвига.

В NiP–SiC-покрытиях с содержанием SiC 80 г/л при амплитуде $A = 100$ мкм исключительное влияние добавок SiC, повышающих фреттинг-коррозию термообработанного покрытия, объясняется неблагоприятным сочетанием состава покрытия и условий трения, увеличивающих механическую составляющую изнашивания при фреттинг-коррозии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асланян И.Р., Селис Ж.П., Шустер Л.Ш. Влияние добавок карбидов кремния SiC на изнашивание электролитических NiP-покрытий // Трение и износ. 2010. № 5 (31). С. 353–361.
2. Асланян И.Р., Селис Ж.П., Шустер Л.Ш. Влияние добавок карбидов кремния SiC на фреттинг-изнашивание электролитических NiP-покрытий // Трение и износ. 2011. № 2 (32). С. 30–35.
3. Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. Долгопрудный: Интеллект, 2010. 672 с.
4. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

УДК 621.9.47

Б.И. Омигов¹, В.П. Смоленцев², С.С. Юхневич¹, Е.С. Бобров²

(¹ Воронежский механический завод,

² Воронежский государственный технический университет)

E-mail: fqipvmz@mail.ru

Электрохимическое удаление концентраторов напряжений в силовых и резьбовых соединениях

Рассмотрен способ повышения качества и надежности резьбовых соединений, работающих в силовых элементах конструкции, с использованием электрохимического метода бесконтактного скругления профиля на величину стандартного допуска на изделие. Показана возможность устранения (или заметного снижения) влияния концентраторов напряжений на переходных участках на усталостную прочность изделий, что позволяет повысить эксплуатационные показатели сопряжения.

Ключевые слова: напряжение, электрохимическая обработка, сопряжение, скругление, усталостная прочность.

In the paper the way to improve the quality and reliability of threaded connections operating in the power structure elements, using an electrochemical method of contactless rounding profile on the value of the standard tolerance to the product. The possibility of eliminating (or significant reduction) effect of tension concentrators at points of transition on the fatigue strength of the products that can improve operational performance pairing.

Keywords: tension, electrochemical processing, conjugation, rounding, fatigue strength.

Введение

При испытании высоконагруженных изделий транспортной техники выявляются концентраторы напряжений в крепежных элементах конструкции (болтах, шпильках, стяжках и др.), которые могут вызвать разрушение узла, особенно в условиях вибраций. Обычно поломка детали происходит на резьбовом участке, где роль концентратора напряжений выполняет профиль резьбовой канавки. Для метрических резьб стандартами допускается скругление в местах сопряжения поверхностей, что позволяет спрофилировать этот контур с минимальными концентраторами напряжений.

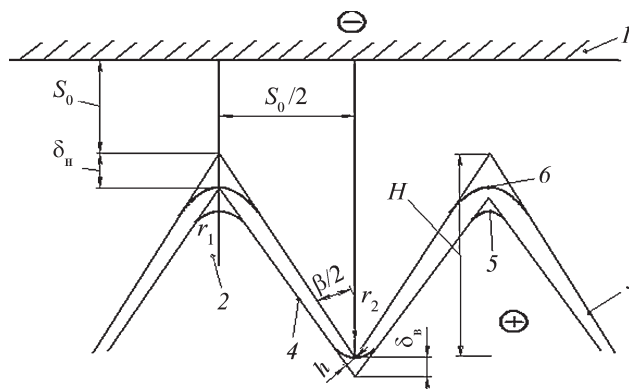
Расчет параметров электрохимической размерной обработки

Использование электрохимической размерной обработки эффективно там, где электрод-инструмент может быть выполнен в форме гладкого цилиндра, устанавливаемого на резьбовую часть детали с зазором S_0 (рисунок).

Под действием тока, протекающего между рабочей частью электрода – инструмента 1 и деталью 2, происходит скругление переходных участков с образованием из исходного профиля 3 нового контура 4 со скруглениями r_1 и r_2 . Изменение профиля возможно в пределах допуска на наружный (δ_n) и внутренний (δ_b) диаметр резьбы.

В качестве граничного условия принято, что изменение наружного и внутреннего диаметра резьбы регламентировано допусками δ_n и δ_b , которые представляют суммарные погрешности профиля.

В соответствии со стандартами на резьбовые соединения время обработки (τ) не может превышать



Формообразование скруглений на метрической резьбе за счет анодного растворения мест сопряжения:

1 – катод-инструмент; 2 – деталь; 3 – исходный профиль; 4 – профиль резьбы после скругления; 5 – фактический радиус скругления; 6 – расчетный профиль наружного контура резьбы; S_0 – начальный межэлектродный зазор; S_p – шаг резьбы; δ_n , δ_b – поля допусков профиля резьбы по наружному и внутреннему диаметру; r_1 , r_2 – радиусы скругления; h – "уширение" внутренней части переходного участка; H – диаметральная высота резьбы; β – угол профиля резьбы

длительности удаления припусков, ограниченных предельными значениями δ_n и δ_b .

Тогда

$$\tau = \frac{(S_0 + \delta_n)^2 - S_0^2}{2\eta \frac{\alpha}{\gamma} \chi (U - \Delta U)}, \quad (1)$$

где η – выход по току; α – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала; γ – плотность материала; χ – удельная проводимость электролита; U – напряжение на электродах, В; ΔU – потери напряжения, В.

Из геометрических построений (см. рисунок)

$$\delta_n = r_1 (1 + \sqrt{2}) \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}}. \quad (2)$$

Откуда

$$\tau = \frac{r_1 (1 + \sqrt{2}) \left[2S_0 + r_1 (1 + \sqrt{2}) \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}} \right] - S_0^2}{2 \cos \frac{\beta}{2} \chi (U - \Delta U)}. \quad (3)$$

За время τ сьем материала на переходном участке внутреннего профиля резьбы составляет h (см. рисунок) и рассчитывается по зависимости [1]

$$h = -\bar{S}_0 + \sqrt{\bar{S}_0^2 - 2 \frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi (U - \Delta U) r}, \quad (4)$$

где

$$\bar{S}_0 = H + S_0. \quad (5)$$

Из рисунка высота резьбы (H) может быть определена через ее шаг (S_p):

$$H = \frac{S_p}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}. \quad (6)$$

Для метрических резьб $H = 0,85 S_p$.

Тогда радиус скругления по внутреннему профилю резьбы составит

$$r_2 = 2 \left(\sqrt{\bar{S}_0^2 - 2 \frac{\alpha}{\gamma} \eta \chi (U - \Delta U) r} \right) - S_0. \quad (7)$$

Величина r_2 ограничена допуском (δ_b). Если учесть изменение радиуса как превалирующую погрешность обработки, то граничное условие примет вид

$$r_2 \leq \frac{\delta_b \cos \frac{\beta}{2}}{\sqrt{2} + 1} \approx 0,36 \delta_b.$$

Незначительные скругления переходных участков можно формировать при гальваническом полировании деталей, но в этом случае наблюдается возрастание внутренних напряжений на этих элементах детали. Наряду со скруглением при ЭХО имеет место снижение показателя шероховатости на профиле резьбы, что также влияет на повышение усталостной прочности деталей.

Повышение долговечности резьбовых соединений после финишной электрохимической размерной обработки

Проведенные исследования показали, что применение финишной обработки резьб более технологичной электрохимической размерной обработкой, кроме снижения высоты неровностей, устраняет концентраторы напряжений и это позволяет достигать высокого уровня усталостной прочности, превышающей в ряде случаев предельные значения, установленные для материалов, испытываемых без надреза образцов (табл. 1).

Испытания проводились на чистый изгиб на стандартных образцах. При традиционных методах обработки наличие резьбы в зоне изгиба заметно снижает усталостную прочность материалов (табл. 2). Влияние треугольного винтового профиля ухудшает этот показатель для сталей до 16 %, сплавов – до 30 %. Характер излома образцов после испытаний подтверждает негативное влияние резьбы на разрушение изделий, так как у всех испытываемых материалов наблюдалось разрушение образцов по резьбе. Особенно заметно влияние резьбового профиля выявляется у жаропрочных сплавов, где при нарезании резьб резцами образуются повышенная шероховатость, что может заметно снизить σ_{-1} .

Для титановых сплавов (см. табл. 1) снижение усталостной прочности меньше по сравнению со сталями, что может быть объяснено увеличением диаметра испытываемого образца (с 5 до 6 мм) и меньшей чувствительностью титановых материалов к надрезам. Электрохимическое скругление позволяет повысить чистоту боковых поверхностей резьб (особенно у жаропрочных и титановых сплавов), что положительно влияет на усталостную прочность материалов. Кроме

Таблица 1

Изменение усталостной прочности (σ_{-1}) стандартных образцов с метрической резьбой

Материал образца	Резьба	Параметр шероховатости резьбового профиля Ra , мкм		База испытаний, 10^7 циклов	Изменение σ_{-1} относительно результатов испытаний гладких образцов ("+" – возрастание, "-" – снижение), %	
		без скругления	после скругления		до скругления	после скругления
Сталь конструкционная	M5	3,2...5,0	0,63...1,20	2	-(12...15)	+(1,5...2,0)
Сталь легированная	M5	3,2...5,0	0,63...1,20	2	-(9...16)	+(0...2)
Жаропрочный сплав	M5	4...5	0,32...0,60	2	-(22...30)	-(0...10)
Титановый сплав	M6	4...5	1,25...2,50	5	-(9...16)	-(2...10)
Алюминиевый сплав	M6	1,6...3,2	0,32...0,60	5	-(6...8)	-(0...2)

того, скругление внутреннего переходного участка резьбы (см. рисунок) способствует снижению концентрации напряжений при многоцикловых нагружениях.

Из табл. 1 видно, что электрохимическая обработка резьбовых участков снижает негативное влияние концентраторов и позволяет достичь равнопрочности конструкций, имеющих крепежные элементы и работающих в условиях многократных силовых воздействий и вибраций. Кроме того, повышение долговечности дает возможность использовать резьбовые конструкции с меньшим диаметром сечения, что снижает массу деталей (см. табл. 2).

Требуемый радиус скругления, приведенный в табл. 2, может быть получен за время обработки путем корректировки межэлектродного зазора (S_0) или режима обработки. Часто в качестве фактора корректировки изменяют состав рабочей среды, напряжение

на электродах [3], что влияет на выбор табличных значений других параметров (в частности, потерь напряжения и выхода по току), а в случае комбинированной обработки – перераспределяет воздействие составляющих процесса на динамику скругления кромок. При самостоятельной операции формирования кромок после предшествующей механической обработки целесообразно радиусы скругления ограничивать (например, по времени скругления) в соответствии с допустимыми значениями по стандартам на резьбу.

Выводы

Расчеты долговечности деталей после скругления кромок и экспериментальное подтверждение величины показателя усталостной прочности для всех исследуемых сплавов показывают заметное повышение этого фактора, что позволяет разработчикам обоснованно выбирать материалы и технологические процессы, расширяющие возможности создания новой конкурентоспособной техники.

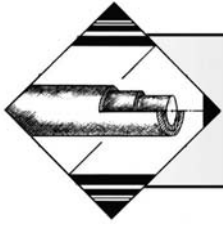
Таблица 2

Повышение долговечности резьбовых соединений после ЭХО и снижение массы крепежных и силовых резьбовых соединений за счет скругления профиля резьбы

Материал	Радиус скругления r_2 , мм	Повышение долговечности, раз	Снижение массы деталей на резьбовых участках деталей, %
Сталь конструкционная	0,2	14...16	до 15
Сталь легированная	0,2	8...25	до 20
Жаропрочный сплав	0,3	13...25	до 25
Титановый сплав	0,2	6...8	до 5
Алюминиевый сплав	0,3	6...7	до 6

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Автоматизация** мелкосерийного машиностроительного производства и качество продукции: под ред. Р.И. Адгамова. М.: Машиностроение, 1983. 280 с.
2. **Наукоёмкие технологии** в машиностроении: под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 560 с.
3. **Расчет** и проектирование инструмента для растрового маркирования / А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, Г.Н. Климова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 6. С. 38–42.



УДК 621.987:669.018.25

Г.Д. Федотов¹, А.В. Морозов¹, В.П. Табаков², А.И. Аникеев³

¹ Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина;

² Ульяновский государственный технический университет;

³ ВНИИТС, г. Москва

E-mail: FedotovGD48@yandex.ru

Повышение эффективности отделочно-упрочняющей электромеханической обработки применением инструментальных материалов из безвольфрамовых твердых сплавов*

Приведены данные по использованию при отделочно-упрочняющей электромеханической обработке (ОУЭМО) в качестве инструмента безвольфрамовых твердых сплавов с изучением механизма изнашивания инструментальных материалов при ОУЭМО.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая электромеханическая обработка, технологические режимы, термофизические характеристики материалов, тепловая активность, износостойкость.

The study presents information about usage of non-wolframium hardmetal in finishing strengthening electromechanical treatment and consequent wear of instrument materials.

Keywords: finishing strengthening electromechanical treatment, technological mode, thermophysical characteristics of materials, thermic activity, durability.

Разрушение деталей при различных видах изнашивания начинается с поверхности. Поверхность детали обладает пониженной прочностью из-за большого числа различных концентраторов напряжений от заготовительных и отделочных операций, а также потому, что является границей металла, нарушающей цельность его кристаллических зерен. Большая роль по закрытию многих дефектов поверхностного слоя отводится отделочной операции.

Поверхность детали при ОУЭМО подвергается высокоскоростному нагреву до температур фазовых превращений конструкционных сталей и одновременному силовому воздействию на металл в аустенитном состоянии твердосплавным инструментом. Придание поверхностному слою обрабатываемой детали, необходимой по условиям эксплуатации микрогеометрии, твердости зависит от технологических режимов ОУЭМО, соотношения термофизических характеристик материала детали и инструмента.

Высокие температуры, влияющие на улучшение всего комплекса физико-механических свойств поверхностного слоя деталей, резко снижают стойкость обрабатывающего инструмента, что влечет за собой снижение качества обрабатываемой поверхности.

В большинстве случаев в качестве инструмента при ОУЭМО использовались твердые сплавы Т15К6 и ВК8, обладающие низкой стойкостью, приводящей к нестабильному качеству поверхности при обработке габаритных деталей. В работе приведены результаты по исследованию механизма изнашивания материала инструмента при ОУЭМО среднеуглеродистых сталей (на примере стали 40Х) и выявления других инструментальных материалов взамен традиционных — Т15К6 и ВК8.

Учитывая, что при ОУЭМО среднеуглеродистых сталей в зоне контакта действуют высокие температуры ($T = 900...1300$ °С) и высокие давления ($p = 100...800$ МПа) для исследований выбраны следующие инструментальные материалы [1–4]:

1. Однокарбидные твердые сплавы ВК6М и ВК8.
2. Двухкарбидные твердые сплавы Т15К6 и Т30К4.
3. Безвольфрамовые твердые сплавы ТН20 и КНТ16.
4. Вольфрамсодержащие и безвольфрамовые твердые сплавы с нанесением на их поверхность различными способами (КИБ, ГТ, ДТ) износостойких покрытий (TiN, TiC, TiCN).

* Результаты работы были получены в рамках государственного задания МОиН РФ № 2014/232.

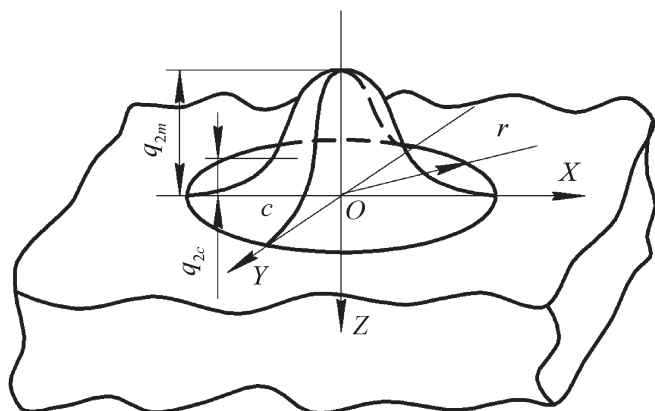


Рис. 1. Схема действия нормально-кругового источника тепла у поверхности полубесконечного тела:

XOY – плоскость касания инструмента и детали; O – центр пятна контакта и источника; q_{2m} – максимальный тепловой поток по центру источника; q_{2c} – тепловой поток на расстоянии c от центра источника

Основным технологическим режимом ОУЭМО, влияющим на показатели качества поверхностного слоя деталей машин, является сила тока, так как около 90 % тепла выделяется в зоне контакта от прохождения электрического тока. Упрочнение при ЭМО – результат одновременного теплового и механического воздействий на поверхностный слой деталей. Учитывая, что фазовые превращения протекают при температурах на 50...100 °С выше температур объемной закалки, то принимаем при ОУЭМО стали 40Х температуру на границе пятна контакта ≈ 900 °С (рис. 1).

Тогда температура в центре пятна при среднем радиусе пятна контакта $r = 1 \cdot 10^{-3}$ м для Т15К6 будет [5]

$$T_{2\max} = T_{2r} e^{E \cdot r^2} = 900 \cdot e^{33,25 \cdot 10^4 \cdot 10^{-6}} = 1255 \text{ °С.} \quad (1)$$

Определим величину теплового потока, вызывающего такую температуру пятна контакта при условии равенства температур [5]:

$$T_{\text{пред}} = T_{2\max} = \frac{q_{\text{ин}}}{2 \lambda} \sqrt{\frac{K}{\pi}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент сосредоточенности источника, м^{-2} ;

$T_{\text{пред}}$ – температура предельного состояния, °С;

$T_{2\max}$ – максимальная температура по центру действия источника, °С;

$q_{\text{ин}}$ – тепловой поток, Дж/с,

$$q_{\text{ин}} = \frac{T_{\text{пред}} 2 \lambda \sqrt{\pi}}{\sqrt{K}} = \frac{1255 \cdot 2 \cdot 27,24 \sqrt{3,14}}{\sqrt{33,25 \cdot 10^4}} = 209,5.$$

Таким образом, для создания упрочняющего (термического) воздействия на поверхностный слой обрабатываемой детали при 900 °С по границе пятна контакта (1255 °С в центре) при ОУЭМО стали 40Х для поддержания теплового равновесия инструмента необходим тепловой поток в 209,5 Дж/с.

Для определения суммарного теплового потока и определения технологических режимов ОУЭМО необходимо подсчитать значения тепловых активностей контактируемых тел и величину охлаждающего эффекта [6]:

$$\text{для Т15К6} \quad \varepsilon_{\text{ТК}} = \sqrt{c \gamma \lambda} = \sqrt{238,26 \cdot 11400 \cdot 27,24} = 8601,64;$$

$$\text{для стали 40Х} \quad \varepsilon_{\text{сталь 40}} = \sqrt{501,5 \cdot 7800 \cdot 41,89} = 12800,8,$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С;

C – удельная теплоемкость, Дж/кг·°С;

γ – плотность материала, кг/м³.

Коэффициент, характеризующий тепловую активность инструмента по отношению к обрабатываемой детали,

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{ТК}}}{\varepsilon_{\text{сталь 40}}} = \frac{8601,6}{12800,8} = 0,67015.$$

Величина охлаждающего эффекта (доля тепла, уходящего в деталь)

$$X = 1 / 1 + K_{\varepsilon} = 1 / 1 + 0,67015 = 0,5987.$$

Тогда доля тепла, уходящего из зоны контакта в инструмент для поддержания теплового равновесия, будет

$$1 - x = \frac{K_{\varepsilon}}{1 + K_{\varepsilon}} = \frac{0,67015}{1 + 0,67015} = 0,4013$$

и общий тепловой поток, действующий в зоне контакта,

$$q_{\text{общ}} = \frac{q_{\text{ин}}}{0,4013} = 522,05 \text{ Дж/с.}$$

Известно, что общий тепловой поток определяется по выражению [1]

$$q_{\text{общ}} = q_{\text{ин}} + q_{\text{дет}} = q_{\text{эл.т}} + q_{\text{тр}} = \eta I^2 R + Pf v. \quad (3)$$

Силу и скорость сглаживания определяем из условия получения заданной шероховатости и тогда величина теплового потока от трения ($q_{\text{тр}}$) будет [1]

$$q_{\text{тр}} = Pf v = 400 \cdot 0,6 \cdot 0,16 = 38 \text{ Дж/с.}$$

Тогда на долю электрического тока приходится

$$q_{\text{эл.т}} = q_{\text{общ}} - q_{\text{тр}} = 522,05 - 38 = 484 \text{ Дж/с,}$$

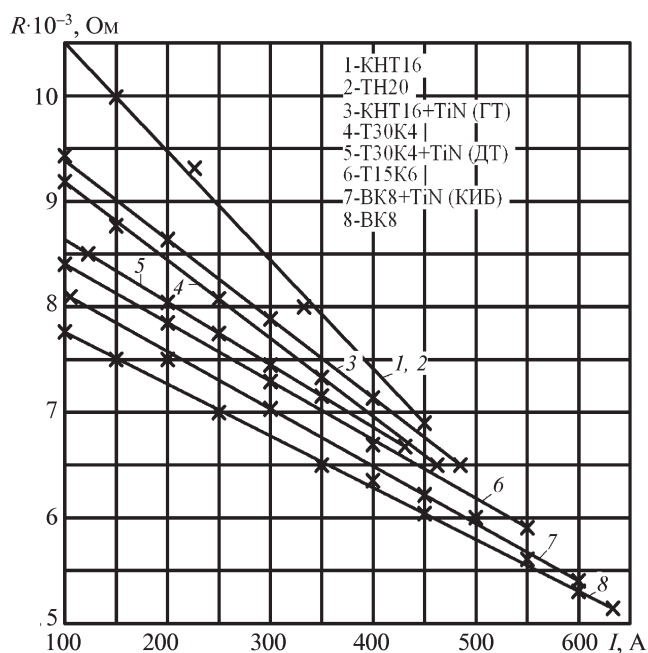


Рис. 2. Влияние силы тока и материала инструмента при ЭМО стали 40Х на сопротивление контакта

или, определяя сопротивление контакта R по рис. 2, получим

$$I = \sqrt{\frac{484}{0,42 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3}}} = 392,7 \text{ А.}$$

Аналогично рассчитываются значения силы тока при ОУЭМО стали 40Х другими инструментальными материалами, теплофизические характеристики которых по отношению к стали 40Х приведены в табл. 1, а значения силы тока, теплового потока, сопротивление контакта – в табл. 2.

Влияние тока на изменение температуры контакта представлено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что сила тока наиболее сильно влияет на температуру контакта при ЭМО инструментом из КНТ16. Поэтому при ОУЭМО этим инструментальным материалом следует строго следить за изменением тока, т.е. незначительное отклонение его от нормы или не дает упрочняющего (термического) воздействия на поверхностный слой, или же вызовет появление прижогов на детали и снижение стойкости инструмента.

Таблица 1

Соотношение теплофизических характеристик исследуемых твердых сплавов

Материал инструмента	Тепловая активность ϵ	Холодящий эффект X	$1 - X$	Критерий тепловой активности K_{ϵ}
Т15К6	8601,6	0,5987	0,4013	0,67015
ВК8	10 940,4	0,5393	0,4607	0,8545
КНТ16	6683,4	0,6570	0,3430	0,5222

Таблица 2

Влияние силы тока и сопротивление контакта при ОУЭМО стали 40Х на температуру пятна контакта

Материал инструмента	Температура пятна контакта, °С		Тепловой поток q , Дж/с	Сила тока I , А	Сопротивление контакта $R \cdot 10^{-3}$, Ом
	T_{2r}	T_{2max}			
Т15К6	897	1251	209,5	393	7,55
	983	1371	229,0	420	7,25
ВК8	906	1264	422,1	620	5,50
	1020	1423	475,2	68	5,20
КНТ16	900	1256	129,1	300	8,90
	1038	1448	148,8	330	8,50

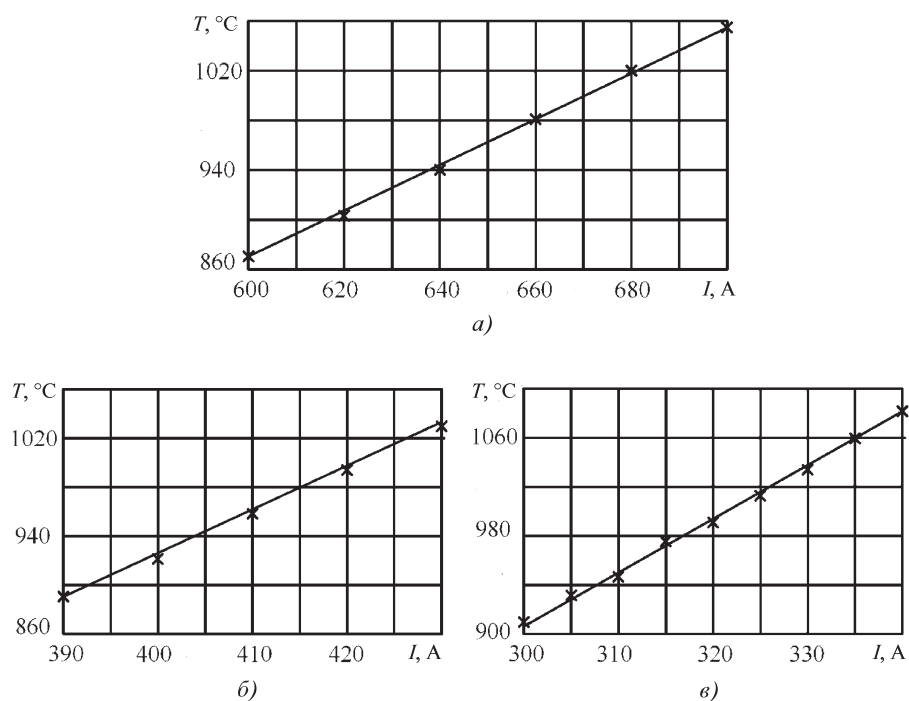


Рис. 3. Влияние тока на температуру границы пятна контакта при ОУЭМО стали 40X инструментом из:
а – BK8; б – T15K6; в – KHT16

Из приведенных табл. 2 и рис. 3 следует, что при изменении температуры пятна контакта от 900 до 1000 °С токи будут изменяться: 390...430; 620...680; 300...330 А для T15K6, BK8, KHT16 соответственно, т.е. даже при прочих равных условиях, применение безвольфрамового твердого сплава KHT16 при ОУЭМО экономически оправдано, так как достигается одинаковый результат с меньшими затратами по расходу электроэнергии, цветных металлов при изготовлении установок.

Температура контакта в предельном состоянии прямо пропорциональна мощности источника тепла и обратно пропорциональна скорости перемещения. Между мощностью источника тепла и основным технологическим режимом процесса ЭМО – силой тока – существует зависимость, близкая к квадратичной. При назначении основных технологических режимов обработки следует учитывать эту взаимосвязь и различие во взаимовлиянии режимов при обработке различными инструментальными материалами.

Повышение эффективности ОУЭМО невозможно без исследования процесса взаимодействия материалов инструмента и обрабатываемой детали, взаимовлияния механических и теплофизических свойств контактируемых материалов, механизма изнашивания инструментальных материалов.

Инструментальный материал при ОУЭМО деталей машин подвергается многократному механическому

воздействию, деформируя и сглаживая микронеровности обрабатываемой детали. Эти циклически повторяющиеся воздействия микронеровностей детали истирают зерна твердого сплава, вызывая сначала наволакивание более пластичной составляющей твердого сплава на поверхность контакта (рис. 4). В первую очередь наволакиванию и истиранию подвергается материал связки, затем изнашиваются более пластичные вкрапления зерен карбидов вольфрама и титана, карбонитридов и нитридов титана. Соединения титана, обладающие более высокими твердостью и температурой плавления, в меньшей мере подвержены расплющиванию и истиранию, так как давление, действующее в зоне контакта, значительно меньше предела текучести карбидов и нитридов твердого сплава.

Температуры, действующие в зоне контакта, недостаточны для разложения карбидов и нитридов твердого сплава, однако приводят

к интенсивному выгоранию связующего компонента и на поверхности инструмента появляются разгарные трещины (рис. 5).

По-видимому, после достаточно глубокого разрушения связующего компонента и пластического отгеснения более крупных зерен происходит вырыв отдельных частиц карбидов из основы (рис. 6). Кроме

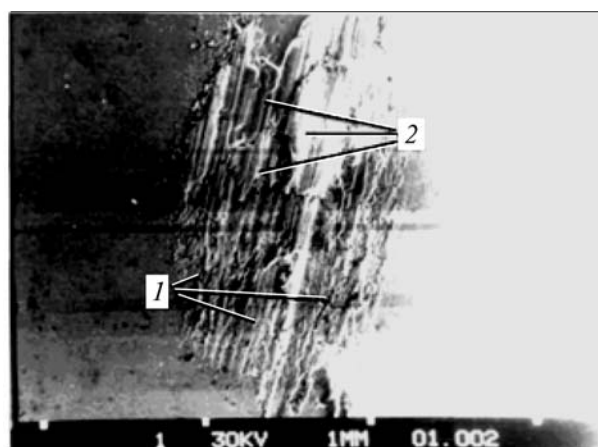


Рис. 4. Пятно контакта на инструменте из KHT16 при ОУЭМО стали 40, $\times 30$:

1 – наволакивание никель-молибденовой связки на поверхность пятна контакта; 2 – налипание материала обрабатываемой детали на материал инструмента

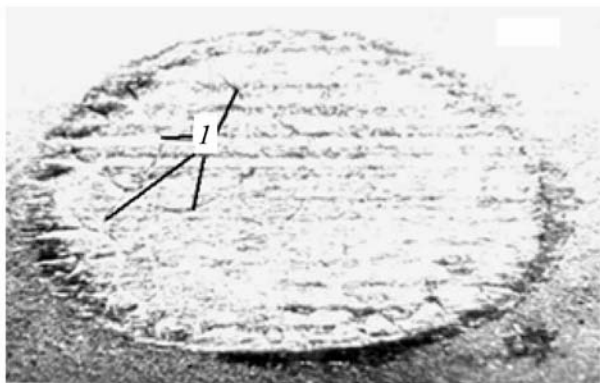


Рис. 5. Разгарные трещины (*I*) на поверхности инструмента из T15K6, $\times 30$

того, в месте контакта инструмента с деталью при ОУЭМО создаются благоприятные условия для адгезионно-диффузионного взаимодействия контактируемых материалов. Участки взаимодействия при относительном перемещении инструмента и детали будут постоянно разрушаться. Твердость поверхностного слоя обрабатываемых деталей из среднеуглеродистых сталей небольшая (220...240 HV). Эффект упрочняемости в этом случае проявляется наиболее сильно. Однако известно [1], чем мягче упрочняемый материал, тем больше он деформируется, тем вероятнее образование адгезионного шва между контактируемыми материалами. Вместе с этим мягкие материалы подвержены упрочнению на большую глубину и, соответственно, разрушаются на большей глубине при нарушении адгезионного шва. При этом происходит налипание материала обрабатываемой детали на материал инструмента (см. рис. 4), который затем активно взаимодействует с материалом обрабатываемой детали. При этом прочность сцепления налипшего материала с материалом обрабатываемой детали в некоторых случаях оказывается больше прочности материала основы твердо-

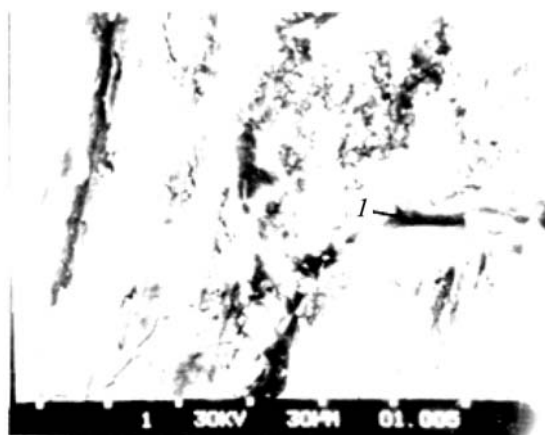


Рис. 6. Выгорание никель-молибденовой связки и образование трещин по границам зерна (*I*) на поверхности инструмента КНТ16 при ОУЭМО стали 40, $\times 500$

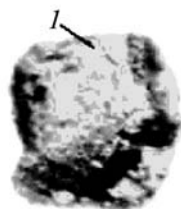


Рис. 7. Вырыв частицы (*I*) твердого сплава ВК8 из основы при схватывании с материалом детали при ЭМО, $\times 50$

го сплава (ослабленного выгоранием связки) и происходит вырыв крупных частиц материала инструмента (рис. 7). Это происходит в большинстве случаев при ОУЭМО однокарбидными твердыми сплавами. Вероятно, это объясняется тем, что металлы с кубической кристаллической решеткой в большей степени подвержены схватыванию (Fe, Nb, Ta, W), а металлы с гексагональной структурой (Mg, Ti, Co, Zn) – в меньшей.

Этим же можно объяснить меньший коэффициент трения и большую износостойкость инструмента при ОУЭМО двухкарбидными вольфрамсодержащими твердыми сплавами и безвольфрамовыми твердыми сплавами на основе карбидов и карбонитридов титана.

Учитывая, что на инструмент при ЭМО налипает материал обрабатываемой детали (в частном случае – железо), внедряясь и в разгарные трещины, можно было предположить замещение вольфрама железом в карбидах твердого сплава. Однако проведенный рентгеноструктурный (фазовый) анализ на установке "ДРОН-0,5" (рис. 8, *a–г*) не подтверждает это предположение. В то же время у твердых сплавов ВК8 и T15K6 отмечается появление окиси вольфрама на поверхности контакта, что свидетельствует о действии в пятне контакта инструмента с деталью при ОУЭМО таких температур и давлений, которые приводят к образованию окислов.

По границам пятна контакта (см. рис. 5) отчетливо видна область электроэрозионного износа инструмента, где отсутствуют следы механического (абразивного) воздействия микронеровностей обрабатываемой детали, но в то же время происходит проискривание между инструментом и деталью, приводящее к выгоранию углерода, распаду карбидов и образованию окислов вольфрама (результаты аналитического расчета и экспериментального определения температур в зоне контакта свидетельствуют о температурах, не достаточных для разрушения карбидов). Проведенный спектральный ("ИСП-30") и рентгеноструктурный ("ДРОН-0,5") анализы подтверждают адгезионно-диффузионное взаимодействие контактируемых тел при ЭМО и взаимный перенос и диффузию материалов (рис. 9).

Возрастание тока (температуры) приводит к интенсивному переносу компонентов твердого сплава в поверхностные слои обрабатываемых изделий. На некоторых образцах отмечается увеличенное (в 3–4 раза) присутствие компонентов твердого сплава. Это происходило, видимо, из-за налипания крупных частиц, вырванных из твердого сплава, на поверхность образца в условиях неустановившегося режима ОУЭМО.

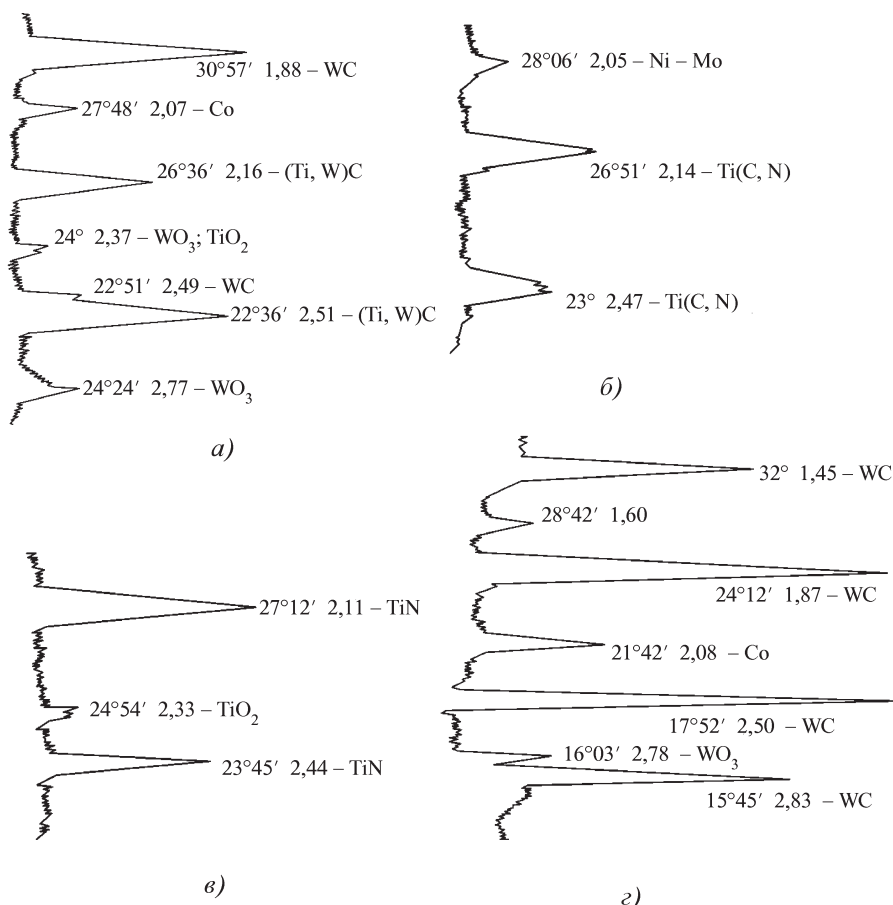


Рис. 8. Фазовый состав пятна контакта при съемке на дифрактометре "ДРОН-0,5" на Си-излучении: Т15К6 (а), КНТ16 (б), ВК8 (в), ВК8+TiN (г) после ОУЭМО деталей из стали 40Х. Режимы съемки: $U = 30$ кВ; $I = 10$ мА; $v = 1$ °/мин

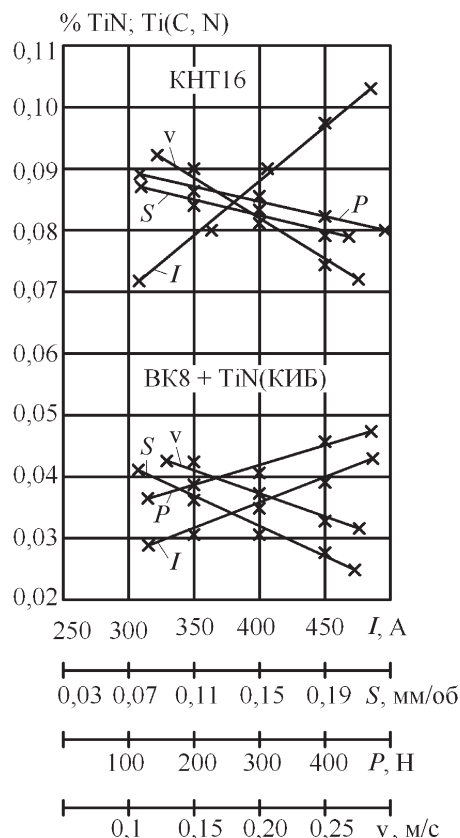
повышением твердости инструмента, повышением температуры плавления материала инструмента, нанесением на инструмент износостойких покрытий, уменьшением шероховатости поверхности инструмента и детали, подбором несхватывающихся пар контактирующих материалов.

На основании исследования по механизму изнашивания материала инструмента и предложенной классификации сделан вывод, что наиболее действенным способом уменьшения износа является значительное повышение твердости, температуры плавления (снижение окалинообразования) компонентов твердого сплава с одновременным уменьшением коэффициента трения обработки и

Увеличение скорости и подачи при ОУЭМО приводит к уменьшению процентного содержания компонентов твердого сплава в поверхностном слое детали, так как при этом уменьшается время контактирования, что влияет на процесс образования и разрушения адгезионного шва. Меньшее содержание компонентов износостойкого покрытия в поверхностном слое образцов объясняется тем, что, во-первых, нитриды титана более стойкие соединения, чем карбиды, и, во-вторых, обладая значительно меньшим коэффициентом трения, нитриды не склонны к молекулярному взаимодействию с материалом обрабатываемой детали.

Результаты экспериментов позволяют: основными видами изнашивания материала инструмента при ОУЭМО считать абразивный, адгезионный, диффузионный и электроэрозионный, указать на способы уменьшения износа инструмента: оптимизацией режимов ЭМО, проведением ОУЭМО в защитной среде, применением смазок и технологических жидкостей,

Рис. 9. Влияние основных технологических режимов ОУЭМО на перенос компонентов твердого сплава в поверхностные слои обрабатываемых деталей



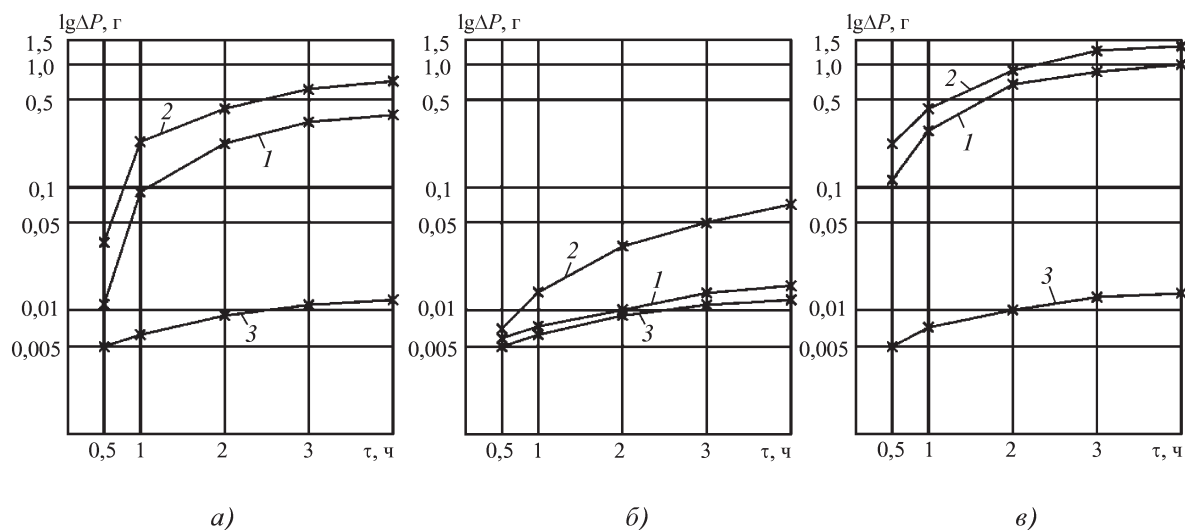


Рис. 10. Влияние температуры (а – 700 °С; б – 800 °С; в – 900 °С) и времени испытания на окалиностойкость различных инструментальных материалов:

1 – Т15К6; 2 – ВК8-8; 3 – КНТ16

подбором пар несхватывающихся материалов. Для отделочных операций следует рекомендовать применение смазок и технологических жидкостей.

Исследования по окалиностойкости приведены на рис. 10. При температуре испытания 700 °С разница в окислении с увеличением времени выдержки сказывается значительно только для однокарбидного твердого сплава ВК8 – с увеличением времени выдержки в 8 раз (0,5 и 4 ч) прирост по весу образца составил 0,095 г (увеличился в 19–20 раз). Для двухкарбидных твердых сплавов (Т15К6) и безвольфрамовых твердых сплавов на основе карбонитридов титана (КНТ16) увеличение в весе составило 0,005 г (в 2 раза). Увеличение температуры испытания на 100° (800 °С) приводит к увеличению интенсивности окисления твердого сплава ВК8 в 8 ($\tau = 0,5$ ч) – 10 ($\tau = 3...4$ ч) раз, а сплава Т15К6 в 2–30 раз соответственно. Однако при большей интенсивности окисления твердого сплава Т15К6, по сравнению с ВК8, абсолютное значение прироста веса образцов у Т15К6 в 1,5–2 раза меньше, чем у ВК8. Окалиностойкость твердого сплава КНТ16 с увеличением температуры до 800 °С не изменилась, но увеличение времени испытания вызывает увеличение по окислению образцов примерно в 1,5–2 раза. Дальнейшее увеличение температуры испытания до 900 °С резко снижает окалиностойкость твердых сплавов ВК8 и Т15К6 и приводит к разрушению образцов.

Внешний вид образцов из КНТ16 после испытаний остался без изменения и прироста по весу по сравнению с температурами 700 и 800 °С не обнаружено. Некоторое увеличение окалиностойкости твердого сплава Т15К6 объясняется присутствием стой-

ких соединений карбидов титана (по сравнению с карбидом вольфрама у однокарбидных твердых сплавов). В составе твердого сплава КНТ16 имеются стойкие к температурным воздействиям соединения карбонитридов титана.

Проведенные исследования и их анализ позволяют рекомендовать твердый сплав КНТ16 в качестве неподвижного инструмента при ОУЭМО сталей как обладающего повышенной износостойкостью, высокой окалиностойкостью и имеющего низкую тепловую активность, что позволяет достигать заданной глубины упрочнения значительно меньшими силами тока (1,3–1,5 и 2,0–2,2 раза меньше по сравнению с Т15К6 и ВК8 соответственно). Твердый сплав Т15К6 можно применять при ЭМО в качестве неподвижного инструмента при мягких режимах. Твердый сплав ВК8 в качестве неподвижного инструмента без охлаждения или смазки применять не следует, так как температуры в 700...900 °С (температуры фазовых превращений среднеуглеродистых сталей) вызывают резкое снижение окалиностойкости (выгорание связки) и долговечности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструментальные материалы для электромеханической обработки / Б.М. Аскинази, Г.Д. Федотов, А.И. Аникеев, В.Я. Логунов // Вестник машиностроения. 1984. № 2. С. 66–68.
2. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
3. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
4. Фальковский В.А., Клячко Л.И. Твердые сплавы. М.: Издат. дом "Руда и металлы", 2005. 415 с.
5. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
6. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.

Р.Ш. Халимов
(Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина)
E-mail: hrasp29@yandex.ru

Электромеханическая обработка с образованием регулярного рельефа поверхности деталей из серого чугуна

Приведены результаты исследования технологии электромеханического упрочнения деталей из серого чугуна, обеспечивающей получение регулярного рельефа на поверхности трения. Представлены металлографические исследования образцов из серого чугуна, упрочненных по предлагаемой технологии, обеспечена возможность назначения рациональных значений элементов режима электромеханического упрочнения.

Ключевые слова: электромеханическое упрочнение, регулярный рельеф, металлорежущий станок, серый чугун.

Results of research of technology of electromechanical hardening of details from the gray cast iron, providing receiving a regular relief are given in a friction surface. Metalgraphic researches of samples from the gray cast iron, strengthened on offered technology are presented, possibility of purpose of rational values of elements of a mode of electromechanical hardening is provided.

Keywords: electromechanical hardening, regular relief, metal-cutting machine, gray cast iron.

С целью экономии энергетических ресурсов и повышения надежности и долговечности деталей используют различные способы упрочнения их поверхностей [1–3 и др.]. Настоящая статья посвящена исследованию эффективности электромеханического упрочнения с образованием регулярного рельефа поверхностей деталей из серого чугуна на примере направляющих станин металлорежущих станков.

Электромеханическая обработка (ЭМО) имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами упрочнения деталей машин: закалкой токами высокой частоты, химико-термической обработкой и др. ЭМО обеспечивает формирование относительно небольших остаточных напряжений в поверхностном слое материала деталей при высоком КПД и локализации теплоты в малом объеме материала. В сравнении с поверхностно-пластическим деформированием ЭМО позволяет получить заданную глубину упрочнения направляющих при меньшем усилии обработки. К тому же известные методы упрочнения не позволяют получить на поверхности детали карманы для удержания смазки и концентрации продуктов износа.

Предлагаемая технология ЭМО направляющих станин и других базовых деталей машин позволяет существенно снизить энергозатраты на выполнение операции упрочнения поверхностей с образованием на них регулярного рельефа, упрочнять только локальные, наиболее быстро изнашиваемые участки поверхности, производить закалку на небольшую глубину, сохраняя тем самым пластичные свойства материала детали [1, 4 – 6]. Таким образом, новая техно-

логия ЭМО дает возможность получить поверхности с заранее запрограммированными параметрами и карманами для смазки, что способствует существенному уменьшению скорости изнашивания направляющих.

При ЭМО плоской поверхности детали или образца, имитирующего фрагмент плоской поверхности направляющих металлорежущего станка (рис. 1), через зону контакта упрочняющего ролика 2 с поверх-

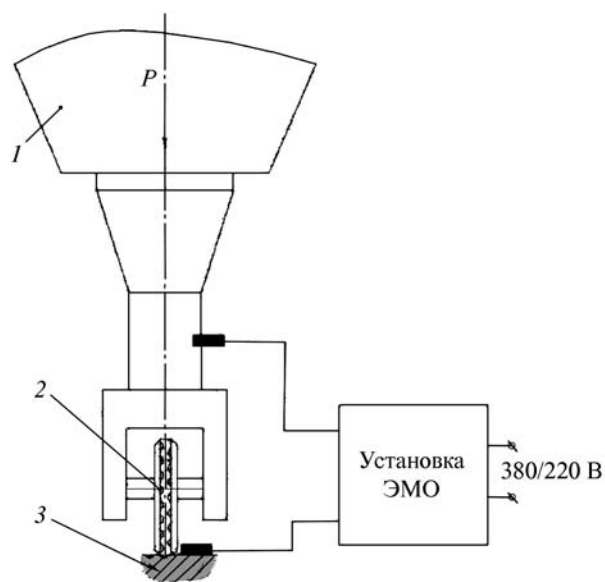


Рис. 1. Схема процесса электромеханического упрочнения плоских поверхностей деталей:

1 – шпиндель вертикально-фрезерного станка; 2 – инструмент (ролик); 3 – обрабатываемая деталь

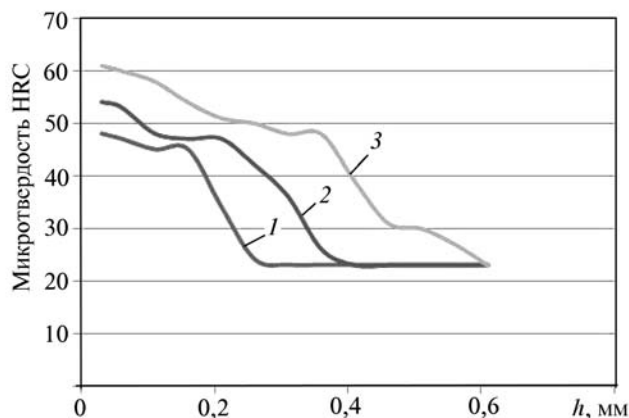


Рис. 3. Распределение микротвердости упрочненного слоя по глубине детали:

1, 2, 3 – сила тока 450, 600, 800 А соответственно

ностью детали 3 проводится ток большой силы (≈ 800 А) и низкого напряжения (до 4 В), что приводит к очень быстрому нагреву поверхностного слоя материала при одновременном механическом воздействии инструмента. Генерируемая в зоне ЭМО теплота отводится в глубь детали.

По этой схеме создана установка для проведения экспериментальных исследований. В качестве источника тока использовали мобильную установку УЭМО-5, в закрытом корпусе которой размещены трансформатор тока, аппаратура регулирования и контроля электрических параметров. В качестве инструмента, формирующего на поверхности направляющих регулярный рельеф, использован упрочняющий ролик из бронзы БрА9Ж4, температура плавления и теплоустойчивость которой выше, чем у серого чугуна, применяемого для изготовления упрочняемых деталей (станины металлорежущих станков) [5]. Ролик (рис. 2, а, см. стр. 2 обложки) имеет форму диска, посадочное отверстие которого предназначено для его установки в инструментальный узел. Торцовые поверхности ролика служат для его фиксации в осевом направлении, а цилиндрическая рабочая поверхность, на которой создан регулярно повторяющийся по длине окружности рельеф, выполнена в форме синусообразной ленточки шириной f_d с амплитудой, равной 2 А (рис. 2, б, см. стр. 2 обложки). Ролик позволяет получить на обработанной поверхности детали регулярный рельеф и требуемую структуру поверхностного слоя. Геометрические параметры ролика: внутренний и наружный диаметры соответственно $D = 20$ мм; $D_p = 60,2$ мм; углы $\alpha = 15^\circ$; $\alpha_v = 45^\circ$; глубина канавки $f = 3$ мм; ширина рабочей поверхности ролика $s = 6$ мм; радиус канавки $R = 2$ мм; ширина синусообразной ленточки $f_d = 4$ мм; ширина ролика $b = 12$ мм. Число канавок для получения геометрически правильного рисунка ленточки f

равно 24. Ширина контактирующей поверхности и диаметр ролика выбраны исходя из известных технологических рекомендаций [2].

Образцы из серого чугуна, содержащего пластинчатый графит (твердость до ЭМО 230 НВ), имели форму параллелепипеда размерами $100 \times 15 \times 30$ мм.

Согласно работе Б.М. Аскинази [2], наиболее значимым параметром в эффективности проведения ЭМО является скорость перемещения обрабатывающего инструмента относительно поверхности упрочняемой детали. В экспериментах скорость перемещения детали составляла 1; 1,25; 1,5 м/мин; сила тока – 450, 600, 800 А. Ролик прижимали к детали с постоянной силой 50 Н.

Распределение микротвердости упрочненного слоя по глубине детали при $v = 1$ м/мин приведено на рис. 3. Максимальное значение микротвердости находится на расстоянии 0,04 мм от поверхности образца и составляет 62 HRC и по глубине слоя она убывает. У образцов, упрочненных с силой тока 800 А, при их перемещении со скоростью 1 м/мин микротвердость упрочненного поверхностного слоя снизилась до исходного значения на глубине 0,539 мм. При упрочнении с силой тока 450 и 600 А и перемещении детали с той же скоростью микротвердость по глубине слоя изменяется более плавно, ее снижение не столь значительно, как у деталей, упрочненных на других режимах.

На поверхности всех образцов в результате ЭМО по предлагаемой технологии образован регулярный рельеф с карманами для удержания смазки глубиной 0,2 мм.

В результате экспериментальных исследований получены математические модели зависимости микротвердости образцов от силы тока и глубины упрочнения при различных скоростях перемещения детали относительно обрабатывающего инструмента (ролика) (таблица). Получены трехмерные модели зависимости микротвердости упрочненного слоя металла от глубины упрочнения и силы тока (рис. 4, см. стр. 2 обложки).

Анализ рис. 4 и полученных уравнений регрессии показал, что глубина упрочненного слоя достигает своего максимального значения при максимальной силе тока и минимальной скорости перемещения инструмента относительно обрабатываемой детали. При этом наибольшее влияние на глубину упрочненного слоя оказывает скорость перемещения инструмента.

Сочетание всех вышеуказанных факторов дает наибольшую глубину упрочнения $L = 0,539$ мм (в условиях эксперимента) при $I = 800$ А; $v = 1$ м/мин; $P = 50$ Н.

При металлографическом исследовании шлифов чугунных образцов (рис. 5, см. стр. 2 обложки) установлено, что при воздействии обрабатывающего инструмента происходит растворение пластинчатого графита и он принимает вид мелких включений.

Математические модели микротвердости при различных скоростях перемещения

Скорость перемещения v , м/мин	Уравнение регрессии
1,00	$Y = 44,276 + 23,856X_1 - 134,222X_1^2 - 0,00123X_2 + 0,0000207X_2^2$
1,25	$Y = 20,756 - 71,377X_1 + 52,325X_1^2 + 0,0521X_2 - 0,0000184X_2^2$
1,50	$Y = 34,942 - 111,035X_1 + 130,922X_1^2 + 0,0155X_2 - 0,00000238X_2^2$

Примечание. X_1 – сила тока, А; X_2 – глубина упрочнения, мм; Y – микротвердость.

Как правило, в результате ЭМО формируется шероховатость упрочненной поверхности, которая исключает необходимость дополнительной механической обработки направляющих.

Таким образом, экспериментально показаны возможности предлагаемой технологии электромеханического упрочнения деталей с образованием на поверхности трения РР и разработаны рекомендации по назначению рациональных режимов ЭМО: скорость перемещения детали 1 м/мин, сила тока 800 А, сила прижима инструмента 50 Н.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жиганов В.И., Халимов Р.Ш. Некоторые способы улучшения динамических характеристик технологической системы токар-

ного станка // Матер. всерос. науч.-практ. конф. "Молодежь и наука XXI века". Ульяновск: УГСХА, 2007. С. 164–174.

2. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. Л.: Машиностроение, 1989. 184 с.

3. Прогрессивные технологии обработки материалов: науч. тр. Всерос. Совещания материаловедов России, г. Ульяновск, 11–15 сентября 2006 г. Ульяновск: УлГТУ, 2006. 95 с.

4. Жиганов В.И., Халимов Р.Ш. Исследование трения и разработка методов электромеханической обработки поверхностей направляющих скольжения металлорежущих станков // СТИН. 2009. № 4. С. 2–5.

5. Пат. 2271919 РФ, МПК В24В 39/00. Инструмент для электромеханической обработки поверхности деталей / В.И. Жиганов. Заявл. 20.04.2004. Оpubл. 20.03.2006.

6. Пат. 2385212 РФ, МПК В24В. Способ упрочнения поверхности деталей / В.И. Жиганов, Р.Ш. Халимов, Н.А. Смирнова. Заявл. 11.02.2008. Оpubл. 27.03.2010.

УДК 621.787

Е.А. Чудинова, В.Ф. Губанов, С.В. Шишкина, В.В. Марфицын
(Курганский государственный университет)
E-mail: kafss_uk@kgsu.ru

Инструменты для комбинированной отделочно-упрочняющей обработки

Обоснована целесообразность комбинированной обработки поверхностей деталей специальными конструкциями инструментов, сочетающими выглаживание и обкатывание. Предложено совместить достоинства данных методов отделочно-упрочняющей обработки для комплексного обеспечения параметров качества поверхностного слоя ответственных деталей. Представлены конструкции инструментов и описана последовательность их применения.

Ключевые слова: инструмент, выглаживание, обкатывание, комбинированная обработка.

Expediency of the combined processing of surfaces of details is proved by special designs of the tools combining the burnishing and rolling. It is offered to combine advantages of these methods of finishing strengthening processing for complex ensuring parameters of quality of a blanket of responsible details. Designs of tools are presented and the sequence of their application is described.

Keywords: tool, burnishing, rolling, the combined processing.

В настоящее время широкое распространение получила отделочно-упрочняющая обработка деталей поверхностным пластическим деформированием (ППД). В зависимости от служебного назначения изделия к поверхностному слою деталей часто предъявляются особые требования, которые можно обеспечить обкатыванием либо выглаживанием [1].

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки. Для объединения преимуществ этих методов и устранения недостатков каждого из них предлагается совместить эти виды обработки, что реализуется путем разработки специализированных инструментов, совмещающих выглаживание и обкатывание.

В случае использования в качестве рабочего тела для обкатывания шарика принцип работы инструмента следующий: шарик должен проходить по вершинам выступов профиля шероховатости поверхности, образованной индентором, что теоретически позволяет в четыре раза снизить высотные параметры шероховатости после обработки выглаживанием. При этом:

- если радиус индентора намного меньше радиуса шарика, то индентор обеспечит высокие значения микротвердости и остаточных напряжений сжатия, а шарик – малые высотные параметры шероховатости поверхности, вплоть до шероховатости в нанометровом диапазоне;
- такое конструктивное исполнение даст возможность повысить производительность процесса, так как можно работать при более высоких значениях подачи;
- поскольку шарик намного меньше нагружен, чем индентор, то для его изготовления можно использовать недорогие инструментальные материалы.

Конструкция инструмента для *отделочно-упрочняющей обработки* (ОУО) (рис. 1) [2] включает в себя следующие элементы: сепаратор 1, шарик 2, подшипник 3, ось 4, державка 5, винт 6, 11, 12, шток 7, пружина 8, винт 9, индентор 10, гайка 13.

Таким образом, инструмент для ОУО содержит индентор (например, алмазный), закрепленный при помощи винта в державке; шток, зафиксированный при помощи винта в державке, в котором закреплен при помощи оси подшипник; шарик (например, минералокерамический, с шероховатостью поверхности $Ra < 10$ нм), расположенный в сепараторе, который закреплен на штоке винтом и зафиксирован гайкой; пружину, надетую на шток, и винт, осуществляющий сжатие пружины. Индентор, закрепленный в державке, выполнен с обеспечением жесткой кинематической связи ме-

жду ним и деталью, а шток, зафиксированный в державке, выполнен с обеспечением упругой кинематической связи между ним и деталью. Упомянутые индентор и шарик расположены на расстоянии друг от друга в направлении оси центров станка.

Вследствие жестко-упругой кинематической связи между инструментом и деталью, а также того, что индентор и шарик расположены на расстоянии ΔX друг от друга в направлении оси центров станка, достигается следующий технический результат: высотные параметры шероховатости поверхности, образованные индентором, после прохода по поверхности детали шариком уменьшаются в четыре раза (при одинаковых радиусах индентора и шарика).

При помощи винта 11 индентор 10 закрепляется в державке 5. В паз штока 7 вставляется подшипник 3 и фиксируется осью 4. В сепаратор 1 вставляется шарик 2. Сепаратор 1 из антифрикционного материала навинчивается на шток 7 и фиксируется на нем при помощи винта 12 и гайки 13. Шток 7 вставляется в державку 5 и фиксируется в нем при помощи винта 6. На шток 7 одевается пружина 8 и в державку 5 ввинчивается винт 9. Посредством ввинчивания винта 9 в державку 5 осуществляется сжатие пружины 8 на требуемую силу ОУО.

Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки функционирует следующим образом: инструмент устанавливается на оси центров станка (при обработке деталей в виде тел вращения) и при его движении на рабочей подаче, назначаемой в зависимости от ΔX , шарик уменьшает величину высотных параметров шероховатости поверхности, гарантированно проходя по выступам профиля шероховатости поверхности, образованной индентором. Если поверхность ступенчатая, то после ее обработки индентором осуществляется поворот инструмента относительно оси штока и поверхность без затруднений обрабатывается полностью.

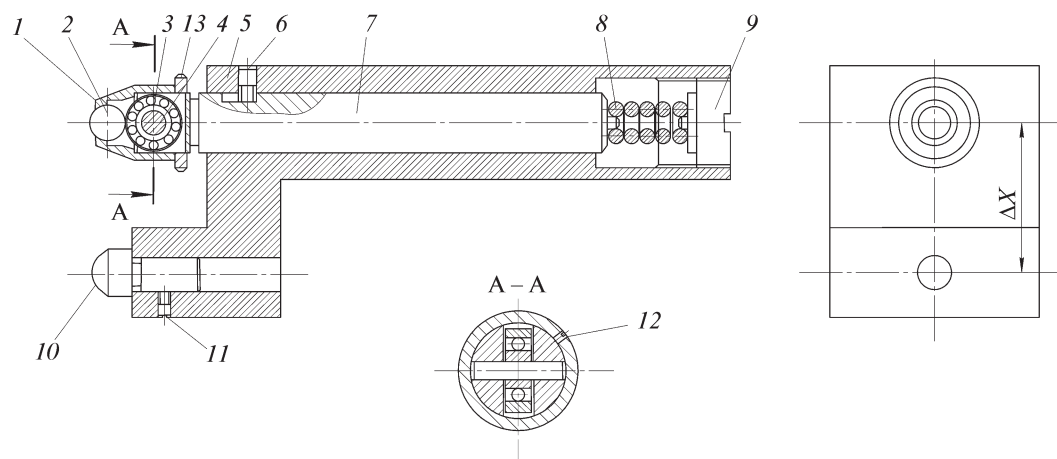


Рис. 1. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки

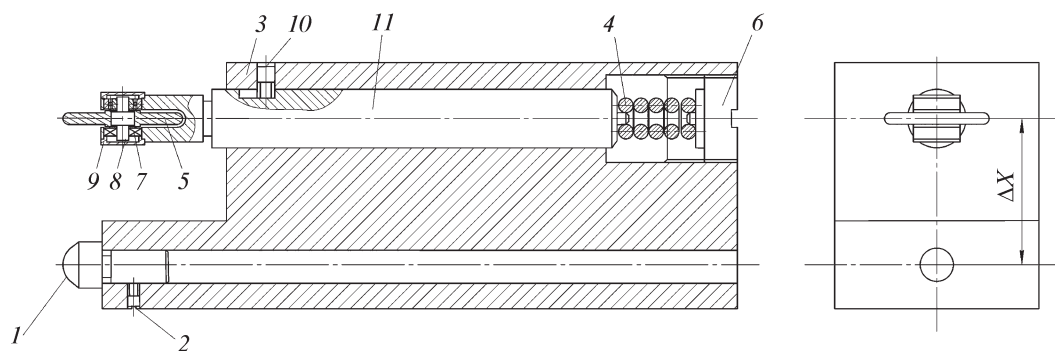


Рис. 2. Комбинированный инструмент

Данная конструкция инструмента позволяет комплексно обеспечить параметры качества поверхностного слоя рабочих поверхностей деталей за счет разных радиусов рабочих элементов: индентор необходимо взять меньшего радиуса, чем шарик. Таким образом, индентором будут обеспечены максимальные значения микротвердости поверхностного слоя и остаточных напряжений сжатия, а шариком – минимальные значения высотных параметров шероховатости поверхности детали.

В случае использования в качестве рабочего тела для обкатывания ролика с целью уменьшения высотных параметров шероховатости поверхности необходимо применять инструмент [3], конструкция которого включает в себя следующие элементы (рис. 2): индентор 1, винт 2, державку 3, пружину 4, ролик 5, винт 6, два подшипника 7, ось 8, две резьбовые крышки 9, винт 10, шток 11.

При помощи винта 2 индентор 1 закрепляется в державке 3. В ролик 5 вставляется ось 8. На ось 8 одеваются два подшипника 7, ось с одетыми подшипниками вставляется в шток 11 и фиксируется в нем посредством ввинчивания в него двух резьбовых крышек 9. Шток 11 вставляется в державку 3 и фиксируется в ней при помощи винта 10. На шток 11 одевается пружина 4 и в державку 3 ввинчивается винт 6. Посредством ввинчивания винта 6 в державку 3 осуществляется сжатие пружины 4 на требуемую силу отделочно-упрочняющей обработки.

Комбинированный инструмент функционирует следующим образом: инструмент устанавливается на оси центров станка и при его движении на рабочей подаче ролик уменьшает величину высотных параметров шероховатости поверхности, гарантированно проходя по выступам профиля шероховатости поверхности, образованной индентором, что обеспечивается подбором величины ΔX и подачи.

Если требуются такие же параметры шероховатости, как при обработке одним индентором, то подача

может быть увеличена в два раза. Радиус индентора может быть равен радиусу ролика, и чем больше они будут, тем меньше будут высотные параметры шероховатости поверхности.

Для сглаживания шероховатости поверхности и работы на значительных скоростях рекомендуется работать с маленькими натягами, при этом сила выглаживания будет незначительна, соответственно увеличение скорости не приведет к интенсивному изнашиванию инструментального материала.

В данном случае при изготовлении ролика можно применить инструментальный материал с меньшими твердостью и износостойкостью, чем у сверхтвердых материалов, поскольку нагрузка на поверхностный слой инструментального материала незначительна. В результате вращения ролика происходит равномерное изнашивание его рабочей поверхности и положительный эффект на износостойкость также оказывает постоянная смазка рабочих участков ролика.

Применение данных инструментов на металлообрабатывающем оборудовании повышенной точности позволит обеспечить значение среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности $Ra < 100$ нм с одновременным значительным упрочнением поверхностного слоя детали (для инструмента [2]) либо обеспечить $Ra < 100$ нм поверхности детали при работе на производительных режимах (для инструмента [3]).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губанов В.Ф. Комплексное обеспечение профиля шероховатости и микротвердости поверхности при алмазном выглаживании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 49–52.
2. Пат. 128148 РФ. Инструмент для отделочно-упрочняющей обработки / В.Ф. Губанов, С.В. Шишкина, Е.А. Чудинова и др. Опубл. 13.12.2012.
3. Пат. 130900 РФ. Комбинированный инструмент / В.Ф. Губанов, С.В. Шишкина, Е.А. Чудинова и др. Опубл. 27.11.2012.



Определение методом динамического механического анализа модуля упругости системы стальная подложка – покрытие нитрида титана

Получены экспериментальные результаты, показывающие, что методом динамического механического анализа можно определить модуль упругости системы стальная подложка – покрытие. В совокупности с результатами измерений микротвердости для данной системы можно оценить упрочняющее влияние покрытия нитрида титана.

Ключевые слова: упрочнение поверхности, вакуумно-дуговой метод, покрытие нитрида титана, метод динамического механического анализа, модуль упругости, микротвердость.

The experimental results show that the method of dynamic mechanical analysis can be used to determine the elastic modulus of the steel substrate – coating system. In conjunction with the results of microhardness measurements of the system, the hardening effect of the titanium nitride coating can be estimated.

Keywords: surface hardening, vacuum-arc method, the coating of titanium nitride, the method of dynamic mechanical analysis, elastic modulus, microhardness.

Введение

В последние годы во всем мире значительно вырос интерес к вакуумно-дуговым методам получения различного рода покрытий. Это подтверждается большим количеством научных исследований и публикаций, а также повышенным интересом к этой технологии отечественных и западных компаний [1, 2].

Плазменное нанесение покрытий относится к прогрессивным технологиям и является в ряде случаев наиболее эффективным, а иногда и единственно возможным средством решения сложных технических проблем, так как, не меняя прочностных характеристик материала, изменяются лишь свойства поверхностного слоя. В настоящее время широкое распространение получили покрытия нитрида титана. Технология их нанесения была разработана в ХФТИ еще в 1974 г. [3, 4]. Исследования показали, что покрытия из нитрида титана (TiN) обладают достаточной твердостью, высокими защитными свойствами, что дает возможность использовать их для повышения износостойкости деталей трения и продления

срока службы инструментов для механической обработки [3, 4, 9].

Известно, что для изделий, работающих в условиях изнашивания, наиболее важными свойствами являются твердость и поверхностная прочность при сохранении пластичности основной массы детали. Измерение свойств материалов во времени является важной характеристикой для диагностики конструкций, предотвращения разрушения и аварий.

Анализ литературы показывает, что при определении такой механической характеристики материала с покрытием, как микротвердость, следует учитывать толщину покрытия, нагрузку и глубину проникновения индентора [5, 6]. При этом получаемые экспериментально значения в этом случае соответствуют микротвердости композиции подложка–покрытие. С увеличением толщины покрытия и уменьшением нагрузки на индентор покрытие влияет на механическое поведение композиции при нагружении, поскольку перераспределяет напряжения в системе при воздействии на нее индентора [7]. В этом случае следует ожидать, что изменение физико-механических свойств поверхности материала после нанесения твердого покрытия окажет влияние на модуль упругости системы подложка–покрытие.

* Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Диагностика структуры и свойств наноматериалов" НИУ "БелГУ".

В настоящее время для исследования вязкоупругих свойств материалов широко используется метод *динамического механического анализа* (ДМА). Данный метод позволяет получить информацию об изменении модуля упругости [8]. Анализ литературных данных показал, что метод ДМА применяется для изучения различных композиционных и полимерных материалов, однако работ по оценке данным методом влияния упрочняющего покрытия на модуль упругости системы подложка–покрытие не проводилось. В связи с этим представляет интерес проведение исследований методом ДМА модуля упругости системы стальная подложка – покрытие TiN по сравнению с исходным материалом без покрытия. В качестве объектов исследования были выбраны образцы из стали 12Х18Н10Т.

Методика проведения эксперимента

Нанесение покрытия нитрида титана осуществлялось в вакуумной камере установки УВНИПА-1-002, оснащенной двумя электродуговыми источниками плазмы. Процесс включал два основных этапа: очистку поверхности подложки и конденсацию.

Очистка предварительно механически полированных, обезжиренных образцов ($47,7 \times 8,7 \times 1,2$ мм) из стали 12Х18Н10Т производилась в вакууме ($2,4 \cdot 10^{-3}$ Па) путем распыления поверхностных слоев ускоренными ионами титана. Ускоряющий потенциал подложки (U_n), обеспечивающий эффективную очистку за время ~ 6 мин при бомбардировке ионами титана, составлял 1000...1200 В, ток дуги – 60...66 А. Процесс конденсации осуществлялся непосредственно после операции очистки поверхности при снижении ускоряющего потенциала до 100...150 В.

Для получения конденсата, представляющего собой соединение титана с азотом, в камеру при помощи игольчатого натекаателя вводился азот. Его давление поддерживалось на заданном уровне и контролировалось вакуумметром ВМБ-14. Дуга горела постоянно, ток дуги 150...175 А. Время конденсации составляло в первом случае 11 мин, во втором – 22 мин.

Микротвердость образцов измерялась на микротвердомере "DM8-B" в диапазоне нагрузок 0,025...0,5 Н. Исследование поверхности после микроиндентирования проводили с использованием растрового ионно-электронного микроскопа "Quanta 200 3D". Модуль упругости исходных образцов и образцов с покрытием определялся методом трехточечного изгиба при помощи динамического механического анализатора "DMA 242E". Испытания проводились при температуре

25 °С в диапазоне нагрузок 0,04...6 Н при частоте колебаний пуансона $f = 1$ Гц.

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам проведенных предварительных измерений модуля упругости образцов с покрытиями, нанесенными при различном времени конденсации, для дальнейших исследований были отобраны образцы с однократным и двукратным временем нанесения покрытия нитрида титана, поскольку они представляли в нашем случае практический интерес.

Трехточечным методом на ДМА были проведены измерения модуля упругости исходной стали без покрытия и с покрытием разной толщины при комнатной температуре и постоянной частоте при различной нагрузке. В процессе испытания значение статической силы фиксировалось, оно составляло $F_s = 0,1$ Н, а динамическая нагрузка изменялась от 0,04 до 6 Н. Время испытания при каждой нагрузке составляло 20 мин.

На рис. 1, а, б (см. стр. 3 обложки) представлены результаты измерения значений модуля упругости исходных стальных образцов и образцов с покрытием нитрида титана толщиной 5 и 10 мкм в зависимости от времени испытания (соответственно, нагрузки на пуансон). Данные графики были построены при обработке результатов ДМА-измерений с помощью программного обеспечения Proteus®.

Полученные результаты позволяют говорить о том, что методом ДМА можно зафиксировать упрочняющее влияние покрытия нитрида титана, а именно изменение такой характеристики материала, как модуль упругости. Для образцов с покрытием данная величина выше, чем для исходных стальных образцов, но разброс значений модуля упругости при малых нагрузках значительный. В первом случае для исходной подложки он составляет 190...212 ГПа, а для стали с покрытием толщиной 5 мкм – 208...230 ГПа. Во втором случае, для подложки разброс значений 186...210 ГПа, а для образца с покрытием 10 мкм – 198...238 ГПа.

При обработке полученных экспериментальных данных были построены зависимости среднего значения модулей упругости исходных образцов и образцов с покрытием от прикладываемой в процессе испытания нагрузки на пуансон. Так, на рис. 2, а, б (см. стр. 3 обложки) представлены зависимости модуля упругости исходной стали и стали с покрытием нитрида титана толщиной 5 и 10 мкм соответственно.

Полученные экспериментальные результаты показывают, что нанесение нитрида титана улучшает

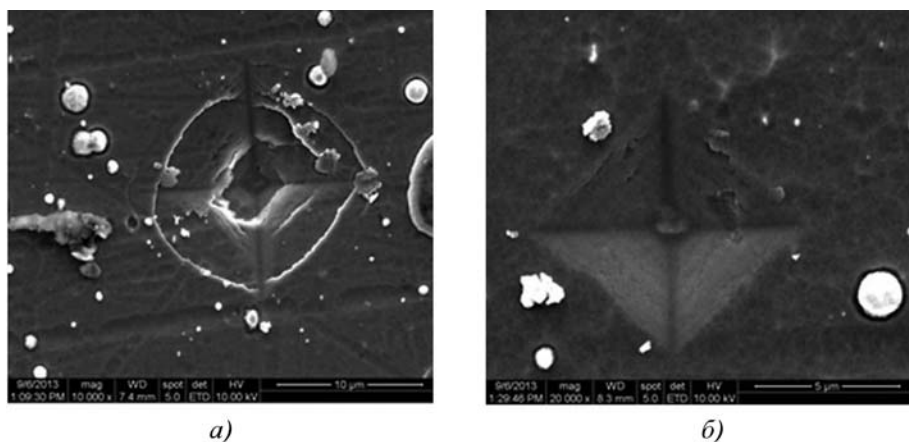


Рис. 4. Разрушение покрытия при микроиндентировании (нагрузка на индентор 0,05 Н) при толщине покрытия, мкм:
 а – 5; б – 10

прочностные характеристики исходной стали, что проявляется в увеличении значений модуля упругости образцов с покрытиями. Поскольку толщина нитрида титана составляет всего 5 и 10 мкм, то в данном случае мы можем говорить об изменении модуля упругости именно системы подложка–покрытие. Для оценки влияния покрытия на механические свойства такой системы дополнительно были проведены измерения микротвердости образцов в зависимости от нагрузки на индентор. Данные измерений представлены на рис. 3 (см. стр. 3 обложки).

Анализ результатов показывает, что для нагрузки в 0,025 Н микротвердость образцов с покрытием увеличилась по отношению к исходной подложке в 2,6 раза при толщине покрытия 5 мкм и более чем в 7 раз при толщине покрытия 10 мкм. При увеличении нагрузки свыше 0,05 Н микроиндентирование сопровождается хрупким разрушением отдельных микрообъемов покрытия, что приводит к образованию зоны хрупкой повреждаемости в районе отпечатка, включающей всевозможные нарушения однородности.

Так, на рис. 4, а, б представлены изображения остаточных отпечатков, полученные методом растровой электронной микроскопии. Видно, что при одной и той же нагрузке, но разной толщине покрытия характер разрушения по поверхности различный. С увеличением нагрузки на индентор при микроиндентировании процессы разрушения в покрытиях идут более интенсивно, что ведет к уменьшению значений микротвердости системы подложка–покрытие (см. рис. 3). В то же время при увеличении нагрузки на пуансон при динамическом нагружении образцов в процессе испытания на ДМА-анализаторе фиксируется уменьшение значений модуля упругости систем подложка–покрытие, однако это не приводит к

процессам пластической деформации или хрупкому разрушению на поверхности образцов.

Вывод

Полученные экспериментальные результаты показывают, что методом ДМА можно определить модуль упругости системы стальная подложка – покрытие. В совокупности с результатами измерений микротвердости для данной системы можно оценить упрочняющее влияние покрытия нитрида титана на сталь 12Х18Н10Т. При этом если в процессе микроиндентирования с увеличением нагрузки на индентор начинаются процессы хрупкого разрушения отдельных микрообъемов покрытия, приводящих к образованию зоны хрупкой повреждаемости в районе отпечатка, включающей всевозможные нарушения однородности, то испытания методом ДМА не приводят к процессам пластической деформации или хрупкому разрушению на поверхности образцов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев А.А. Вакуумно-дуговые износостойкие покрытия // Труды научно-практического симпозиума. ОТТОМ. Харьков. Украина. 2000. С. 179.
2. Синани И.Л., Федосеева Е.М., Береснев Г.А. Методы нанесения покрытий: учебное пособие. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 110 с.
2. Асанов Б.У., Макаров В.П. Нитридные покрытия, полученные вакуумно-дуговым осаждением // Вестник КРСУ. 2002. Т. 2. № 2. С. 5–8.
4. Ануфриев Н.Г., Рычков Б.А., Климов А.Д. Исследование защитных свойств покрытий нитрида титана на низкоуглеродистой стали и влияние толщины подслоя никель–фосфор // Практика противокоррозионной защиты. 2008. № 1 (47). С. 37–43.
5. Воеводин А.А., Спасский С.Е., Ерохин А.Л. Определение микротвердости тонких покрытий с учетом их толщины и твердости подложки // ФХОМ. 1991. № 6. С. 45–46.
6. Зибуц Ю.А., Матвиенко Л.А., Каминкас А.И. Оценка микротвердости упрочняющих покрытий // ФХОМ. 1998. № 4. С. 40–41.
7. Korsunsky A.M. Constantinescu A. On property deconvolution from indentation of coated systems // XXX Convegno Nazionale AIAS – Alghero (SS). September 2001. P. 12–15.
8. <http://www.spectrosystems.ru/methods/dma.shtml>.
9. Зенин Б.С., Овечкин Б.Б. Современные технологии модифицирования поверхности и нанесения покрытий: учебное пособие. Томск. 2008. 75 с.



УДК 631.794.61

А.М. Михальченков¹, Е.В. Бутарева¹, М.А. Михальченкова²
(¹ Брянский филиал Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ),
² Брянский институт управления и бизнеса)
E-mail: ing@bgsha.com

Изнашивание локально упрочненных деталей при свободном перемещении в абразивной среде (на примере плужного лемеха)

Показано, что различные технологические варианты изготовления и восстановления лемехов влияют на геометрию износа, определяющую его предельное состояние, а характер изменения износа в линейном и весовом выражении одинаков для всех способов реновации.

Ключевые слова: изнашивание, локальное упрочнение, абразивная среда, плужный лемех, ресурс, наработка, технологические воздействия, геометрия износа, предельное состояние, восстановление.

It is shown that the various technological options to restore and produce plowshares affect the geometry of the wear and tear that determines its ultimate state; the nature of the changes in the linear wear and the weighted terms is the same for all modes of renovation.

Keywords: wear process, local hardening, abrasive sphere, ploughshare, resource, working hours, technological impact, the geometry of wear, limiting state, recovery.

Введение

Эксплуатация деталей почвообрабатывающих, строительных и некоторых других машин часто проходит в условиях абразивного изнашивания при их свободном перемещении и, как правило, сопровождается локальными износами (I), приводящими к потере работоспособности изделия в целом.

Снизить отрицательное влияние местного изнашивания на работоспособность конструктивных элементов позволяет проведение упрочнения областей ожидаемого износа на стадии изготовления или восстановления. Нужно отметить, что данный метод широко распространен в различных отраслях техники при конструировании, производстве и ремонте деталей [1].

Рассматриваемая проблема характерна и для доломобразных цельнометаллических лемехов плужных корпусов отечественного производства. Лемех является наиболее типичной деталью, вобравшей в себя все факторы воздействия абразивной среды при его перемещении в незакрепленном абразиве.

Постановка задачи



Одним из способов, обеспечивающих локальное упрочнение деталей для обработки почвы, является

создание штампосварных конструкций, у которых остов изготавливается из стали с относительно невысокими свойствами, а наиболее нагруженная часть — из материала с повышенной стойкостью к абразивному изнашиванию. В настоящее время этот способ нашел определенное распространение при восстановлении плужных лемехов [2].

Реализация способа выражается в технологии реставрации, основанной на способе "термоупрочненных компенсирующих элементов", подробно описанной в работах [2–4] и заключающейся в приваривании долота взамен предельно изношенного. В то же время исследований по динамике износа и его геометрии, определяющих предельное состояние применительно к восстановленным подобным способом изделий, в известной литературе не найдено. Прежде всего, возможность эксплуатации таких деталей, как известно, ограничивается затуплением и истиранием заглубляющей части, образованием трапециевидной формы и остаточной толщиной лучевидного износа [5].

Для решения этих вопросов проводилась серия экспериментов, основанных на сравнительном анализе изнашивания и геометрических форм, ограничивающих ресурс лемехов, подвергнутых различным вариантам упрочняющего восстановления и в состоянии поставки.

Наработка и причины утраты работоспособности лемехов, восстановленных по различным технологическим вариантам

Цифровое обозначение варианта	Технологический вариант восстановления	Наработка на отказ Т, га	Причина утраты работоспособности (параметр предельного состояния)	Предельное состояние лемехов, фотография
1	Лемехи в заводском исполнении	9,5	Лучевидный износ	
2	Долото, приваренное встык с армированием области восстановления электродом для сварки углеродистых сталей	14,0	Трапецевидный профиль, износ носка свыше 45 мм	
3	То же без армирования	16,0	Износ носка свыше 45 мм	

Восстановление лемехов плужных корпусов как российского, так и зарубежного производства с одновременным повышением стойкости к абразивному изнашиванию в настоящее время приобретает особое значение в связи с их невысоким ресурсом и значительной ценой.

Таким образом, цель данных изысканий – выявление геометрических факторов, определяющих ресурс лемехов после реставрации с учетом предельного состояния, и изучение характера изменения износов в зависимости от наработки (Т) этих деталей, восстановленных путем замены износившейся долотообразной части на долото повышенной стойкости к абразивному изнашиванию.

Методика исследований

Испытывались лемеха в состоянии поставки – 1 и восстановленные по двум технологическим вариантам (таблица): 2 – приваривалось термостойкое долото взамен непригодной, предельно изношенной носовой части и производилось наплавочное армирование в области восстановления [6], 3 – то же, что и вариант 2, но без дополнительных упрочняющих воздействий. Цифрами обозначены группы экспериментальных лемехов в соответствии с технологическими вариантами (схемами) (см. таблицу).

Количество опытных деталей составило 9 шт. на каждую технологическую схему, что обусловлено периодичностью измерений, диктуемой сменностью работы пахотного агрегата.

Измерения I проводились в полевых натуральных условиях (супесчаные почвы с влажностью 25...28 % при соблюдении агротехнических и эксплуатационных условий) после каждой смены, чтобы отследить динамику износа. Из-за особенностей испытаний величина наработки носила непостоянный характер и составляла примерно около двух га.

Контролировались: остаточная толщина и соответствующий износ (Δt_i); износ (ΔL_0 и ΔL_1) заглабляющей части по размерам L_0 и L_1 (рис. 1, а, б). Износ по толщине в данном случае может определять предельное состояние, так как восстановлению подвергались детали после определенной наработки с уменьшенной толщиной. Количество контролируемых точек при исследовании Δt_i выбиралось из сооб-

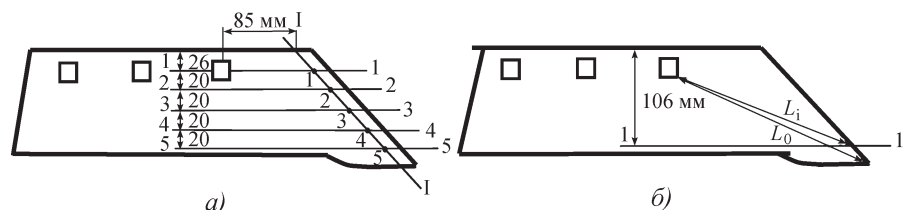


Рис. 1. Схема измерения геометрических параметров: а – износ по толщине; б – износ по заглабляющей части

ражений максимального охвата области полевого обреза. Некоторое их удаление от его кромки связано с высокой вероятностью истирания. Наряду с измерением геометрических параметров определялся износ по массе Δm .

Экспериментальные лемехи соответствовали техническим и сельскохозяйственным условиям на эти детали. Твердость серийных изделий в области носка составляла 23...25 HRC, твердость приваренных долот около 45...48 HRC.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При анализе динамики износов по толщине на графиках $\Delta t_i = f(T)$ (рис. 2) показаны результаты измерений только в точках 1, 3, 5 (см. рис. 1, а), так как они в достаточно полной мере характеризуют изнашивание исследуемой части лемеха (где T – наработка, га). Для более подробной оценки данных экспериментов рассматривались эпюры износов по длине полевого обреза (см. рис. 1, б).

Зависимости Δt_i лемеха от его наработки T носят линейный характер (см. рис. 2) и идентичны для всех испытываемых деталей. Аналогичная связь была полу-

чена в лабораторных условиях [7] и подтверждена натурными экспериментами [8] для различных оценочных параметров износа, что указывает на одинаковый характер процесса изнашивания в условиях абразивного воздействия почвенной массы. Графики построены до наработки, определяемой предельным состоянием экспериментальных образцов ($T_{пр}$), выражающимся в образовании лучевидного износа у лемехов заводского исполнения и трапецевидной формой с износом носка более 45 мм у восстановленных (см. таблицу). Максимальную $T_{пр} = 16$ га имеют восстановленные лемеха без упрочнения (см. рис. 2, в), минимальную – лемеха в состоянии поставки – 9,5 га (см. рис. 2, а). Армирование, как дополнительная операция упрочнения, не обеспечивает должной эффективности по наработке, так как предельное состояние достигается при $T_{пр} = 14$ га, что ниже, чем у лемехов без армирования.

Наибольший износ по толщине наблюдается в точках 5 (см. рис. 1, а) как у изделий заводского исполнения, так и у восстановленных (см. рис. 3, а–в). Это обусловлено максимальными давлениями почвы в заглубляющей части, хотя ее изнашивающая способность в этой области сравнительно невысока из-за

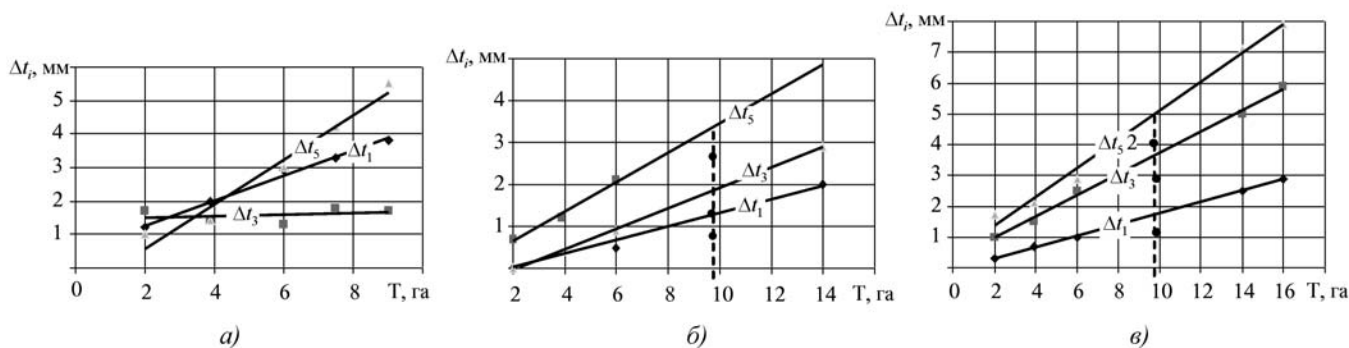


Рис. 2. Изменение износов лемехов по толщине: а – лемех в состоянии поставки; б – лемех с приваренным встык долотом и армированием области восстановления; в – то же без дополнительных технологических воздействий

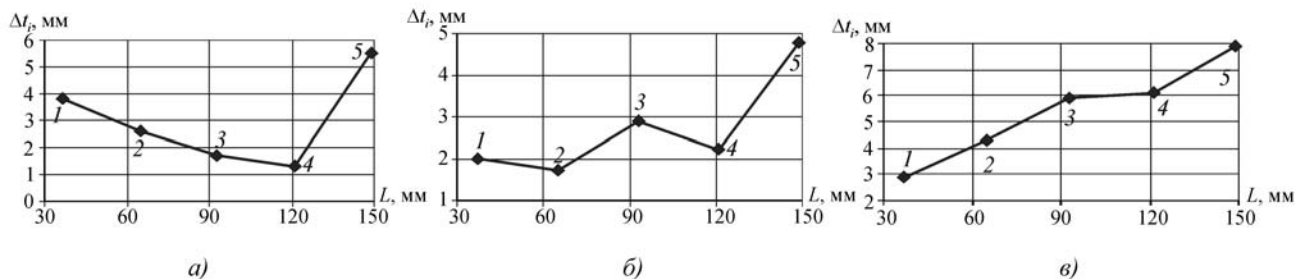


Рис. 3. Эпюры износов лемехов по толщине: а – лемех в состоянии поставки; б – лемех с приваренным встык долотом и армированием области восстановления; в – то же без дополнительных технологических воздействий (L – длина полевого обреза)

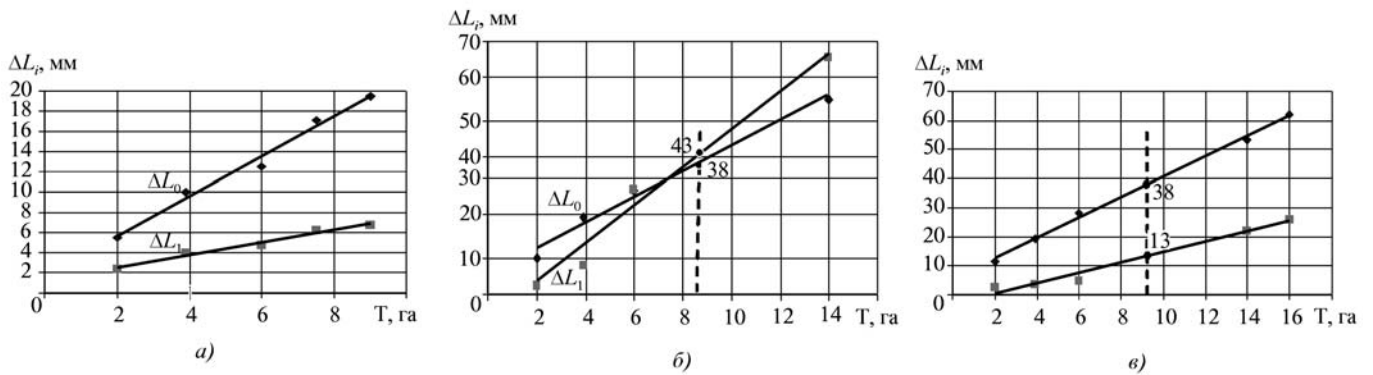


Рис. 4. Изменение износов заглабляющей части лемехов от наработки:

a – лемех в состоянии поставки; *б* – лемех с приваренным встык долотом и армированием области восстановления; *в* – то же без дополнительных технологических воздействий

комковатой структуры. (Рассматриваются эпюры Δt_i при наработке до достижения лемехами предельного состояния.) По мере приближения к верхнему обрезу (точка 1) у восстановленных лемехов, согласно эпюрам (рис. 3, б, в), прослеживается тенденция к уменьшению Δt_i ввиду снижения такого давления.

У лемехов же заводского исполнения Δt_i распределено иначе, и связь между давлением почвы и изменением толщины лемеха не просматривается (см. рис. 3, а). Относительно высокий износ в точке 1 в сравнении с точкой 4 объясняется увеличением влияния абразивности почвенной среды из-за большей возможности свободного перемещения абразивных частиц почвы на данном участке и сравнительно невысокой твердости металла детали. При этом повышение изнашивающей способности почвы превалирует над ее давлением на лемех (давление в точке 4 выше, чем в точке 1). В этом случае абразивность среды не будет оказывать столь значительного влияния на восстановленные изделия, как в случае износа лемехов заводского исполнения вследствие сравнительно высокой твердости приваренных долот, которая в определенной степени нивелирует воздействие данного фактора.

Использование наплавочного армирования создает условия для снижения изнашивания лемеха по толщине (см. рис. 3, б), которое связано с уменьшением времени и пути контактирования абразивных частиц с рабочей поверхностью, проявлением эффекта проскальзывания и увеличением толщины лемеха на отдельных участках за счет наплавленных валиков [9]. Значительное влияние на Δt_i , несомненно, будет оказывать величина наработки на отказ. Вследствие опережающего изнашивания заглабляющей части носка, в сравнении с другими участками лемеха, был сделан анализ износов, оцениваемых потерей размеров ΔL_0 и

ΔL_1 в контрольных точках: максимально удаленной от третьего крепежного отверстия и на пересечении плоскости 1–1 с полевым обрезом (см. рис. 1, б). Помимо этого для большинства лемехов, использующихся на различных типах почв, подобный износ является определяющим фактором предельного состояния.

У лемехов в заводском исполнении значение ΔL_0 при наработке 9,5 га равно 19,5 мм, а ΔL_1 – около 7 мм (рис. 4, а). При той же наработке потеря размеров L_0 и L_1 у восстановленных изделий составляет: у лемехов с армированием области носка $\Delta L_0 = 38$ мм, $\Delta L_1 = 43$ мм (рис. 4, б); у лемехов без дополнительных технологических воздействий $\Delta L_0 = 38$ мм, $\Delta L_1 = 13$ мм (см. рис. 4, в).

Анализ износов проводился для наработки $T = 9,5$ га, являющейся предельной для лемеха заводского исполнения. Из полученных данных следует, что интенсивность изнашивания (*i*) восстановленных лемехов в контрольных точках практически в 2 раза выше в сравнении с изделиями заводского исполнения (4 мм/га у восстановленных против 2 мм/га у заводских). Фактором, сдерживающим изнашивание заглабляющей части лемехов в состоянии поставки, является наличие слоя "сормайта" с тыльной стороны. Для таких лемехов признаком предельного состояния является образование ярко выраженного лучевидного износа, чего не наблюдается у деталей, подвергнутых реставрации.

Наличие лучевидного износа с остаточной толщиной стенки менее 2 мм определило столь невысокую величину ресурса изделий заводского исполнения, и в связи с этим износ заглабляющей части ΔL_0 и ΔL_1 в два раза меньше, чем у аналогичного показателя восстановленных деталей. Таким образом, применение долот повышенной твердости позволяет в определен-

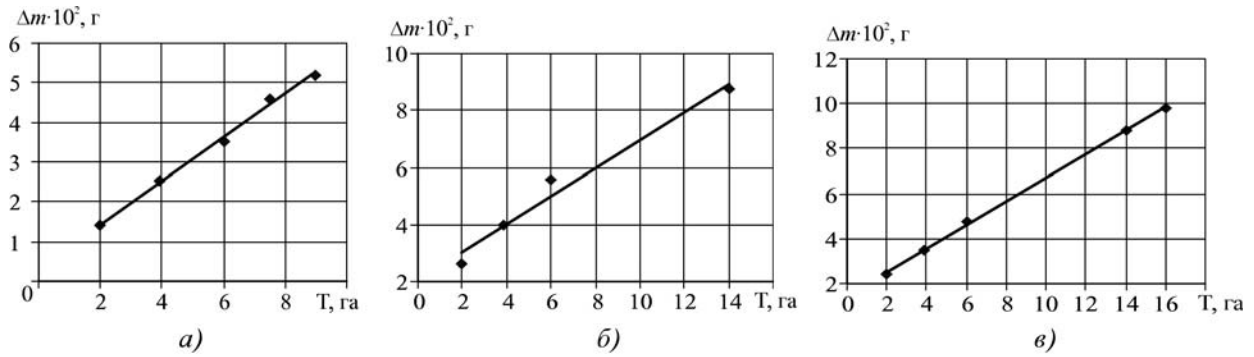


Рис. 5. Изменение износов лемехов по потере массы:

a – лемех в состоянии поставки; *б* – лемех с приваренным встык долотом и армированием области восстановления; *в* – то же без дополнительных технологических воздействий

ной степени затормозить образование и развитие лучевидного износа, тем самым увеличивая наработку на отказ.

Что касается восстановленных объектов исследования, то износы заглубляющей части носка ΔL_0 у обоих вариантов примерно одинаковы. Это обусловлено применением долот из одинакового материала, а также отсутствием армирования в этой области.

Износы полевых обрезов, оцениваемые по ΔL_1 , имеют существенную разницу – 13 и 43 мм для лемеха без дополнительных воздействий и лемеха армированного соответственно. Данное обстоятельство связано с нарушением правила Шарпи и большими тепловложениями при армировании. Кроме того, марганцовистая сталь 65Г, из которой изготавливаются долота, имеет повышенную чувствительность к температурным воздействиям, что приводит к появлению закалочных трещин и отпускной хрупкости, и соответственно изнашивание в зонах термического воздействия будет возрастать.

Как известно, весовой метод оценки износов деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин не позволяет судить об их работоспособном состоянии. Тем не менее, в практике исследования абразивного изнашивания контроль потери массы является неотъемлемой частью экспериментов.

В случае реновации деталей проведение экспериментов по изнашиванию с учетом потери массы, как сравнительного метода, важно ввиду применения различных материалов и способов упрочняющего восстановления.

Если же подходить к рассматриваемому вопросу с позиции трибологии, то оценка износов по потере массы будет более оправдана в сравнении с оценкой по потере размеров с точки зрения общей характеристики для различных деталей по их конструкции, технологическому воздействию и эксплуатирующихся в разнообразных условиях абразивного изнашивания.

Отмеченное выше в полной мере распространяется на исследования, проводимые в представленной работе.

Зависимости потери массы Δm_i от наработки T подчиняются линейной функции (рис. 5), подтверждая результаты, ранее полученные рядом исследователей [5], и еще раз указывают на то, что процесс изнашивания при свободном перемещении детали в абразивной среде един.

Потеря массы при наработке 9,5 га у лемехов заводского исполнения составила 520 г (рис. 5, *a*); у восстановленных с армированием – 700 г (рис. 5, *б*); без армирования – 650 г (рис. 5, *в*).

Минимальное значение Δm_i присуще лемехам в состоянии поставки и обусловлено наличием слоя сормайта на тыльной стороне режущее-лезвийной долотообразной части, а также их небольшой наработкой на отказ.

У армированных восстановленных лемехов весовые потери оказались самыми большими. Это связано с двумя факторами: первый – наличие армирующих валиков, подвергающихся высокой степени воздействия почвы; второй – снижение твердости рабочей поверхности вследствие проявления "отжигающего эффекта" от наплавки валиков электродом с малоуглеродистым стержнем. Кроме того, не следует забывать о различных причинах предельного состояния экспериментальных лемехов при оценке потери массы и определении максимальной наработки. Вопрос заключается в характере износа лемеха, который определяет его предельное состояние. Потеря массы лемехом даже до 1 кг не является причиной для его выбраковки, так как по своим линейным параметрам деталь остается пригодной к повторному восстановлению.

Выводы

1. Разнообразие технологических воздействий при изготовлении и восстановлении деталей, эксплуа-

тируемых в абразивной среде, во многом определяет формирование геометрии износа и его специфику, влияющие на предельное состояние детали.

2. Изменения износов в их линейном и весовом выражении от величины наработки описываются прямолинейной функцией независимо от технологических воздействий.

3. Для рассматриваемого способа восстановления, реализованного в двух вариантах, максимальный ресурс детали обеспечивается технологией, заключающейся в приваривании термоупрочненного долота без дополнительного воздействия.

4. Наплавочное армирование области восстановления, проведенное электродом для сварки углеродистых сталей, отрицательно влияет на ресурс детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. Краткий курс. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 308 с.

2. Михальченков А.М., Паршикова Л.А., Киселева Л.С. Классификация способов восстановления лемехов и возобновление их ресурса при наличии устранимых дефектов // Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. 2012. № 1. С. 39–43.

3. Паршикова Л.А., Якушенко Н.А., Лавров В.И. Механические свойства области армирования горячедеформированной стали Л53 и термоупрочненной стали 65Г // Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. 2013. № 1. С. 29–33.

4. Михальченков А.М., Паршикова Л.А., Ковалев А.П. Восстановление лемехов методом приваривания вставок с повышением прочности и износостойкости // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. № 12. С. 16–18.

5. Михальченков А.М., Козарез И.В., Тюрева А.А. Критерии предельного состояния лемеха // Научное обеспечение агропромышленного производства: Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Курск. 2010. С. 278–281.

6. Пат. на полезную модель 90287 RU. Лемех плуга для отвальной вспашки с рифленой рабочей поверхностью / А.М. Михальченкова. Оpubл. 10.01.2010.

7. Добровольский А.Г., Кошеленко П.И. Абразивная износостойкость материалов. Справочное пособие. Киев: Техника, 1989. 125 с.

8. Михальченков А.М., Козарез И.В., Горбачев Р.В. Влияние наплавочного армирования на изнашивание восстановленных лемехов компании "Vogel & Noot" // Труды ГОСНИТИ. Т. 11. Ч. 1. 2013. С. 26–32.

9. Михальченков А.М., Комогорцев В.Ф., Тюрева А.А. Пути повышения износостойкости армированной поверхности лемеха // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 7. С. 35–37.

УДК 621.03:534

А.А. Перепечкин¹, Д.В. Демидов¹, А.И. Опальницкий²
 (¹ФГУП "НПО "Техномаш";
²Университет машиностроения, г. Москва)
 E-mail: artik_footbol@mail.ru

Особенности износа алмазосодержащего инструмента при ультразвуковом фрезеровании пазов

Рассмотрены два вида ультразвукового фрезерования в зависимости от применяемого инструмента. Показаны наиболее важные характеристики при выборе инструмента и их влияние на будущий износ. Построен график износа инструмента в зависимости от длины паза, рассмотрены наиболее характерные проблемы при обработке алмазным инструментом. Отмечены недостатки способа нанесения покрытия, выбранной связки и концентрации алмазного покрытия и предложены варианты их решения.

Ключевые слова: ультразвуковая размерная обработка, износ, алмазный инструмент, абразивные зерна, алмазосодержащие покрытия.

The paper considers two types of ultrasonic milling, depending on the tool used. We have shown the most important characteristics of the tool selection and their impact on the future wear. We plotted tool wear depending on the length of the groove, considered the most typical problems in the processing of diamond tool. We marked deficiencies coating method selected ligaments and concentration of the diamond coating and offered options for their solutions.

Keywords: ultrasonic dimensional treatment, wear, diamond tools, abrasive grain, diamond-coated.

Плохая обрабатываемость хрупких и композиционных материалов (керамика, кварц, стекло, ситаллы и др.) ограничивает их применение в промышленности. Ультразвуковая размерная обработка (УЗРО) —

гибридный процесс удаления материала путем резания алмазными зернами с наложением ультразвука — это единственный рентабельный метод обработки этих материалов. При УЗРО отсутствуют дефекты

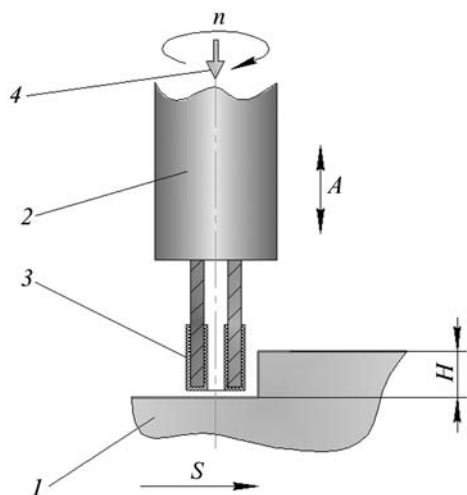


Рис. 1. Схема ультразвукового алмазного фрезерования:
 1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – часть инструмента с закреплёнными абразивными зёрнами; 4 – подача СОЖ

термического происхождения, аналогичные тем, что возникают при шлифовании, а также при обработке хрупких материалов в поверхностном слое могут возникать микротрещины.

В последние годы расширяется применение *ультразвуковой обработки (УЗО)* инструментом, покрытым слоем природных или синтетических алмазов на металлической связке. Способ нанесения алмазного покрытия на инструмент и тип связки должны обеспечивать стойкость алмазного слоя. Одной из проблем при обработке инструментом с алмазосодержащим покрытием является износ режущей части инструмента. На сегодняшний день уменьшение изнашивания алмазов при УЗО является приоритетной задачей машиностроения.

Процесс размерной обработки выполняется с подачей *смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ)* в зону обработки. При необходимости инструменту или заготовке задают вращение или поступательное перемещение [1]. Обработку вращающимся инструментом с его перемещением вдоль плоскости, перпендикулярной оси инструмента, называют ультразвуковым фрезерованием (рис. 1).

Величина износа инструмента зависит от свойств материалов заготовки и инструмента [2]. С увеличением твердости и вязкости обрабатываемого материала износ инструмента увеличивается. В данной схеме используется трубчатый инструмент с алмазным напылением, что позволяет уменьшить площадь обработки и прокачивать жидкость через отверстие в инструменте. Также возможно использование цельного инструмента с прессованным алмазом, что может обеспечить достаточную жесткость инструменту при обработке сверхтвёрдых материалов.

Обычно для изготовления инструмента применяют нержавеющие и низкоуглеродистые стали, режущие алюминиевые и медные сплавы.

Комбинированное действие вращающегося инструмента и наложенных нормальных ультразвуковых колебаний в совокупности с водяным охлаждением обеспечивает самоочистку инструмента, снижает его засаливание продуктами разрушения. Обработка ведется при значительно меньших контактных нагрузках, чем обычная алмазная обработка. Ультразвуковые колебания снижают трение между инструментом и деталью, что увеличивает стойкость алмазного инструмента по сравнению с безультразвуковым алмазным фрезерованием.

Следует отметить, что использование УЗРО в машиностроении возрастает, что связано с расширяющимся применением технических керамик и керамических покрытий [3].

Проектирование и разработка *алмазного инструмента (АИ)*, режимов формирования алмазосодержащего слоя является сложной конструкторско-технологической задачей. Неправильное решение на одном из этапов может привести к получению отрицательного значения при эксплуатации АИ [4].

Основными конструктивными элементами АИ для макета УЗО являются (рис. 2): резьбовой участок



Рис. 2. Основные конструктивные элементы алмазного инструмента

упорного торца 1, базовая поверхность АИ 2, корпус 3, алмазосносный слой 4.

При выборе оптимальной концентрации алмазного порошка в алмазосносном слое нужно учитывать, что уменьшение концентрации алмазов приводит к уменьшению стойкости инструмента, увеличению съема металла. АИ выпускается с относительной концентрацией алмазного порошка в инструменте 25, 50, 75, 100 и 150 %.

Важным критерием является также зернистость алмазного порошка, наиболее применяемыми являются порошки с зернистостью 160/125, 80/63, 40/28 мкм.

При выборе матрицы АИ следует учитывать свойства обрабатываемого материала, требования к производительности и качеству обработки, к стойкости инструмента. Матрица должна прочно удерживать алмазные зерна, препятствуя вырыву их из рабочей поверхности АИ.

Алмазы марки АС50 отличаются высокой прочностью, что увеличивает длительность работы зерен без разрушения и уменьшает их размерный износ. По результатам проведенных экспериментов, в которых сравнивались марки алмазного порошка АС15, АС32, АС50 зернистого 160/125 мкм, использование марки АС50 привело к увеличению ресурса работы инструмента и уменьшению шероховатости за счет увеличенной прочности зерен на сжатие. Поэтому для определения износа алмазосодержащего инструмента при УЗ-фрезеровании пазов использовалась марка синтетического алмаза АС50.

Профиль обработанной поверхности с высокой точностью (~0,01 мм) повторяет форму инструмента. Точность зависит от размера и износа инструмента, жесткости технологической системы, размера зерен абразива и технологических режимов обработки [5].



Рис. 3. Станок для УЗРО

Износ инструмента определяет срок его службы и оказывает существенное влияние на точность обработки. Изнашивание в продольном направлении происходит из-за разрушения торца инструмента при ударах по абразивным зернам и зависит от физико-механических свойств материала инструмента, а также от зернистости абразива.

В режиме ультразвуковых колебаний инструмент работает со знакопеременными нагрузками [6]. Поэтому материал, из которого изготовлен инструмент, должен иметь высокие прочностные характеристики, в частности усталостную прочность.

Были проведены непосредственные испытания АИ на износ в зависимости от длины пазов на специальном ультразвуковом станке с *числовым программным управлением* (ЧПУ), разработанным в лаборатории зачистных и ультразвуковых технологий НПО "Техномаш" (рис. 3). Работа установки регулируется пультом управления 1 с ЧПУ, программное обеспечение осуществляет поддержку в "онлайн" с 3D-графической детали и 3D-симуляцией, а также функциональность для широкого спектра применения. В нижней части установки расположен ультразвуковой генератор 2. Ультразвуковая головка 3 оснащена магнетострикционным преобразователем, головка обеспечивает биение до 0,01 мм и имеет вращение до 6000 мин⁻¹. Станок оснащен поворотным столом 4, который обеспечивает подачу детали и оснащен специальным устройством для вращения детали. Точность позиционирования станка 0,01 мм. Подготовка технологического процесса производства изделий ориентирована на использование ЭВМ САМ (*computer-aided manufacturing*), что позволяет программировать для обработки достаточно сложные поверхности.

Для определения износа алмазного покрытия трубчатого инструмента использовались аналитические весы "Ohaus Pioneer" с дискретностью 0,0001 (рис. 4). Функциональная особенность лабораторных весов "Ohaus Pioneer" состоит в ее внешней и внутренней калибровке (*InCal*), автоматических коррекции нуля и тарирования, процентном взвешивании (позволяет определить массу образца в процентах к массе предварительно взвешенного образца).

С помощью этих весов возможно измерение износа инструмента после прошивки, фрезерования или сложноконтурной УЗО. Высокая точность весов (до 0,0001) позволяет измерять даже малозначительный износ.

При УЗ-фрезеровании ситалла исследовался инструмент диаметром 6 мм с размером абразива 100/80 мкм, типом связки М2-01, частотой вращения 3000 мин⁻¹, глубиной обработки 5 мм, амплитудой 10 мкм (рис. 5, а, б). Кривая практически повторяет

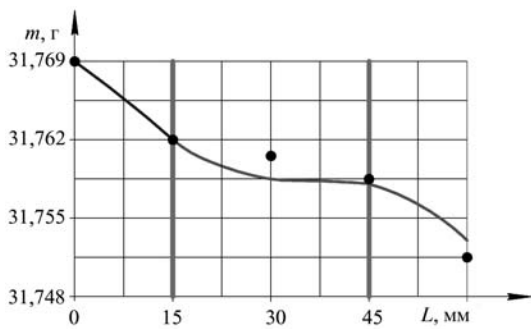


Рис. 4. Аналитические весы "Ohaus Pioneer"

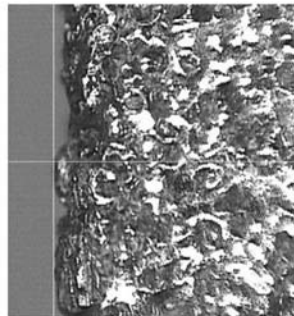
классическую кривую износа инструмента при механической обработке. Обработка паза на длину 15 мм (отмечено на рис. 5, *a* вертикальной линией) приво-

дит к вскрытию алмазных зерен АИ, и идет незначительный износ, так называемый процесс приработки (рис. 5, *б*). При обработке паза от 15 до 45 мм идет процесс активного резания (режим установившегося износа), объемная производительность обработки максимальная, под действием сил резания зерна постепенно вырывает с поверхности инструмента (рис. 5, *з*). Максимальный износ происходит после 45 мм обработки, наблюдается вырывание алмазных зерен, в результате остаются характерные лунки (рис. 5, *д*). Отмечено, что зерна не стираются, их просто вырывает с поверхности трубчатого инструмента, что свидетельствует о недостаточной стойкости связи и выбранном методе нанесения алмазного покрытия.

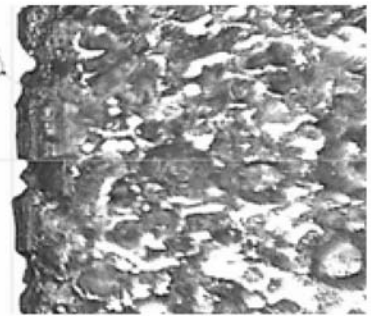
Далее износ АИ увеличивается, а процесс резания идет "голой" трубкой, при этом скорость постоянно уменьшается, т.е. процесс резания практически не происходит. Поэтому для предотвращения излома инструмента необходимо проводить дальнейшие экспериментальные исследования в области износа инструмента. Станки для проведения экспериментов



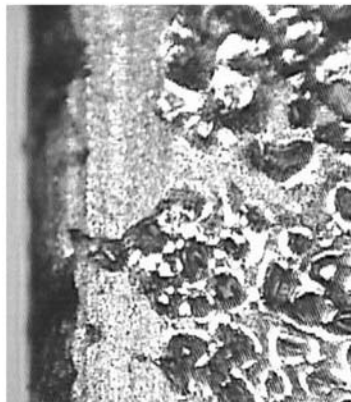
a)



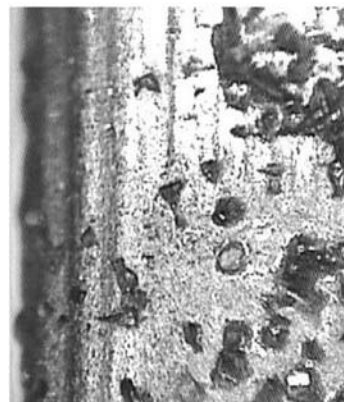
б)



в)



з)



д)

Рис. 5. Влияние длины обрабатываемого паза на износ алмазного инструмента:

a – кривая износа; микроструктуры поверхности АИ до обработки (*б*); после обработки на длину 15 мм (*в*); 15...45 мм (*з*); свыше 45 мм (*д*)

должны быть оборудованы специальными датчиками, которые в случае полного износа инструмента смогут приостановить обработку для замены или повторного напыления алмазного покрытия на инструмент.

Вывод

Таким образом, эксперимент показал недостаточную стойкость АИ зернистостью 100/80 мкм на связке М2-01 при гальваническом способе нанесения алмазосодержащего покрытия. При дальнейшей разработке АИ необходимо исследовать новые виды связок, концентрацию алмазного порошка, способ его нанесения, состав абразива, так как все это поможет уменьшить износ режущей поверхности АИ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Научеёмкие** технологии машиностроительного производства: Физико-химические методы и технологии: учеб-

ное пособие / Ю.А. Моргунов, Д.В. Панов, Б.П. Саушкин, С.Б. Саушкин; под ред. Б.П. Саушкина. М.: Изд-во "Форум", 2013. 928 с.

2. **Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: под ред. Б.П. Саушкина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 456 с.

3. **Шандров Б.В., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П.** Развитие и применение наукоёмких технологий в производстве летательных аппаратов // Известия МГТУ (МАМИ), 2013. № 2 (16). Т. 2. С. 278–283.

4. **Шандров Б.В., Варганов М.В.** Новые технологии автомобилестроения // Наука – производству. 2005. № 4. 15 с.

5. **Моргунов Ю.А., Опальницкий А.И., Перепечкин А.А.** Современное состояние и перспективы применения в отрасли ультразвуковой размерной обработки изделий // Известия МГТУ "МАМИ". 2012. № 2. С. 140–144.

6. **Саушкин Б.П., Шандров Б.В., Моргунов Ю.А.** Перспективы развития и применения физико-химических методов и технологий в производстве двигателей // Известия МГТУ "МАМИ". 2012. № 2. С. 242–248.



ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

учебное пособие

А.А. Гусев, И.А. Гусева

2013 г. Объем 416 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-722-9 Цена 700 р.



Изложены теория и практика конструирования современных прогрессивных приспособлений для механосборочных производств. Подробно представлен метод автоматизированного проектирования приспособлений и рационального их конструирования. Показаны точностные и силовые расчеты.

Даны зависимости для проведения экономических расчетов при применении различных видов приспособлений.

Во 2-м издании (1-е 2007 г.) представлены зарекомендовавшие себя на практике методы проектирования и средства автоматизации для мелкосерийных производств, показана высокoэкономичная система технологической оснастки для автоматической серийной многономенклатурной сборки изделий.

Для студентов и аспирантов технических вузов, может быть полезно инженерно-техническим работникам машиностроительных предприятий.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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

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

E-mail: utp@mashin.ru.

Web-site: www.mashin.ru.

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

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

Сдано в набор 25.12.13 г. Подписано в печать 17.02.14 г. Формат 60x88 1/8.

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

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

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