

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 8 (92)
август
2012

Издается с января 2005 г.

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

Председатель редакционного совета

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

Заместитель главного редактора

д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН

д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК

д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ

А.П. БАБИЧЕВ

В.П. БАЛКОВ

В.М. БАШКОВ

А.И. БЕЛИКОВ

С.Н. ГРИГОРЬЕВ

В.А. ЗЕМСКОВ

С.А. КЛИМЕНКО

В.А. ЛАШКО

В.А. ЛЕБЕДЕВ

В.В. ЛЮБИМОВ

Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО

Х.М. РАХИМЯНОВ

Б.П. САУШКИН

В.П. СМОЛЕНЦЕВ

А.М. СМЫСЛОВ

Г.А. СУХОЧЕВ

В.П. ТАБАКОВ

В.А. ШУЛОВ

М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:

Л.П. ШЕСТОПАЛОВА

Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" 85159, "Пресса России" 39269, "Почта России" 60252) или в издательстве.

Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.

Факс: (499) 269-48-97.

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Глазков А.В. Стабильность технологических процессов виброабразивного упрочнения рабочего колеса турбонасосного агрегата 3

Исаев А.Н., Лебедев А.Р., Земляной С.А. Особенности сборки составных цилиндров из сварных труб дорнованием 6

Копылов Ю.Р. К проблеме трехмерного моделирования процессов виброударного упрочнения 11

Лебедев В.А., Марченко Ю.В., Соколов В.С., Апрышкин Д.С. Энергетическая модель процесса поверхностного пластического деформирования свободно-движущимися инденторами 15



ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Албагачиев А.Ю. Эффективные покрытия деталей машин 18

Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С. Теоретическая оценка адгезионных свойств покрытий режущего инструмента 22



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Анкудимов Ю.П., Анкудимов П.Ю. Операционные возможности метода вибрационной обработки при комплексном энергетическом воздействии на технологическую систему 26

Бабичев А.П., Тамаркин М.А., Вяликов И.Л., Коваль Н.С. Разработка и исследование технологической схемы виброультразвуковой обработки 29

Иванов В.В., Булгаков Я.С. Влияние вибрационных твердосмазочных покрытий MoS₂ на качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей 33

Киричек А.В., Соловьев Д.Л. Новые технологии обработки поверхностным пластическим деформированием 36

Степанов Ю.С., Сотников В.И., Ткаченко А.Н. Экспериментальное исследование процесса комбинированной обработки точением и алмазным выглаживанием торцовых поверхностей деталей из меди 43

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 8 (92)
August
2012

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. BEZYZYCHNYI

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
S.N. GRIGORIEV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOICHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

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

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

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

CONTENTS



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

- Glazov A.V.** Stability of technology hardening processes vibroabrasive impeller turbopump unit 3
- Isaev A.N., Lebedev A.R., Zemlyanoyi S.A.** Features of the assembly compound cylinders from welded pipe by mandrelling 6
- Kopylov Yu.R.** The problem of three-dimensional simulation vibro-impact hardening processe 11
- Lebedev V.A., Marchenko Yu.V., Sokolov V.S., Aprishkin D.S.** The energy model of the process of reservoir located in the free movement of indenters 15



POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

- Albagachiev A.Yu.** Effective coverings of details of machines 18
- Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S.** Theoretical estimate of adhesive properties surfaces of the cutting tool 22



PROCESSING BY COMBINED METHODS

- Ankudimov Yu.P., Ankudimov P.Yu.** Manufacturing opertions of vibration process method obtained by comlex energy influence 26
- Babichev A.P., Tamarkin M.A., Vyalikov I.L., Koval N.S.** Working out and research of the technological scheme vibro-ultrasonic processings 29
- Ivanov V.V., Bulgakov Yu.S.** The influence of the vibration of solid lubricants coatings MoS₂ on the quality of surface and operational properties of the parts 33
- Kirichek A.V., Soloviev D.L.** New technologies for surface plastic forming. 36
- Stepanov Yu.S., Sotnikov V.I., Tkachenko A.N.** Experimental study of combined treatment of turning and diamond caress end surface of components made of copper 43

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

А.В. Глазков (Воронежский государственный технический университет)
E-mail: aleksandr.glazkov.1979@mail.ru

Стабильность технологических процессов виброабразивного упрочнения рабочего колеса турбонасосного агрегата

Рассмотрены вопросы обеспечения стабильности технологических процессов виброабразивного упрочнения деталей авиационного производства, спроектированных при максимальном ограничении массы, работающих при интенсивных нагрузках, высоких требованиях к усталостной прочности и надежности. В качестве примера приводится оценка технологической стабильности рабочего колеса турбонасосного агрегата методом сплайнового компьютерного моделирования с последующей экспериментальной проверкой на натурной детали.

Ключевые слова: погрешность, стабильность, виброабразивное упрочнение, виброударное упрочнение, крыльчатка, рабочее колесо, турбонасосный агрегат.

The article deals with questions of stability of technological processes vibroabrasive hardening of parts of aircraft production, designed with a maximum weight limit, working under intense stress, high requirements for the fatigue strength and reliability. As an example of technological assessment of the stability of the impeller turbopump unit spline method of computer modeling and subsequent experimental verification by full-scale detail.

Keywords: accuracy, stability, vibroabrasive hardening, vibroimpact hardening, impeller, turbopump assembly.

Введение

К деталям авиационной техники, спроектированных при максимальном ограничении массы, работающих при интенсивных нагрузках, предъявляются повышенные требования – к усталостной прочности и надежности. В 25...60 % случаях отказов основными причинами являются несовершенство технологических процессов, низкая технологическая дисциплина, неэффективный контроль, недостаточная стабильность и надежность технологических процессов [1]. Особая роль в обеспечении технологической надежности авиационных деталей принадлежит упрочняющим технологиям, так как именно они после размерной механической обработки обеспечивают усталостную прочность, ресурс и надежность [2]. Для деталей, имеющих сложную форму, в большинстве случаев с недоступным расположением поверхностей для закрепленных лезвийных и абразивных инструментов, виброабразивная обработка и виброударное упрочнение, являются единственными эффективными методами упрочнения [3]. Однако в настоящее время технологии виброабразивного и виброударного упрочнения не отвечают современным требованиям технологической надежности.

При конструировании изделий и проектировании технологий их изготовления формируются требования к критическим параметрам деталей, обеспечивающих с необходимой вероятностью допустимые эксплуатационные показатели изделий; при производстве принимаются меры для их реального выполнения; при эксплуатации осуществляется реализация технологической надежности [2]. Отработка на технологическую надежность может выполняться параллельно с отработкой на технологичность деталей, которая предусматривает оценку выполнимости требований конструкторской документации и достижение оптимальных затрат на изготовление.

Основным затруднением в определении показателей технологической надежности является высокая трудоемкость натуральных испытаний в течение длительного времени, в то время как информация о надежности необходима уже на этапе конструирования изделия и проектирования технологий. В мировой практике машиностроения для отработки и обеспечения технологической надежности изделий авиационной техники используются различные методы компьютерного моделирования рабочих, технологических и эксплуатационных процессов с последующей экспериментальной проверкой [2].

Описание объекта исследований

Материал рабочего колеса – высокопрочная жаростойкая сталь. Заготовка изготавливается литьем по выплавляемым моделям. Поверхность заготовки имеет "дефектный слой" толщиной 50...100 мкм. Проточные каналы имеют узкие изогнутые в пространстве межлопаточные зазоры 12...25 мм. Исходная шероховатость Rz 25...32, Ra 6,25...8, требуемая шероховатость Rz 5...12, Ra 1,25...3, допуск на параметр шероховатости $T_{Ra} = 1,75$ мкм. Основными критическими технологическими показателями качества рабочего колеса являются параметры шероховатости проточных каналов, влияющие на гидравлическое сопротивление, турбулентность проточных каналов и КПД изделия; величина и глубина формирования сжимающих остаточных напряжений, влияющих на усталостную прочность и надежность колеса и изделия.

Методика проведения исследований

Конструктивные элементы рабочего колеса спроектированы с максимальным ограничением массы. На рабочее колесо воздействуют интенсивные знакопеременные центробежные и изгибающие силы, вибрации, гироскопические моменты, температурные и химические воздействия. Запас прочности по конструктивным элементам выбран предельно допустимым. Повышение надежности обеспечивается улучшением качества литья заготовки, оптимизацией конструкции и увеличением площади сечения детали. Однако это снижает весовую эффективность изделия. Необходима оптимизация технологий виброабразивной обработки для стабильного удаления дефектного слоя и последующего виброударного упрочнения поверхностей проточных каналов. Удаление дефектного слоя необходимо в связи с тем, что при упрочнении по дефектному слою усталостная прочность – из-за шаржирования оксидов и других дефектов в поверхностный слой – снижается.

Для оценки погрешностей и стабильности технологических процессов виброабразивного и виброударного упрочнения поверхностей межлопаточной проточной части рабочего колеса турбонасосного агрегата выполнена серия экспериментов.

Стабильность виброударного упрочнения определяется как отношение допуска на параметр шероховатости T_{Rz} диапазона рассеяния их действительных значений δ_{Rz} и смещение центра группирования $\Delta_{сис}^{Rz}$ для партии деталей

$$\eta_{Rz} = \frac{T_{Rz}}{\delta_{Rz} + \Delta_{сис}^{Rz}}.$$

В практике машиностроения принято считать, что стабильность технологического процесса по критерию шероховатости считается низкой, если коэффициент $\eta_{Rz} < 1$, а процент выхода параметра за пределы допуска превышает $k_{\text{вых}}^{Rz} > 0,27$ %. Если $1,0 < \eta_{Rz} \leq 1,33$, а $k = 0,006...0,27$ %, то стабильность считается удовлетворительной. Если $\eta_{Rz} > 1,33$, а $k < 0,006$ %, то стабильность технологического процесса – хорошая [1].

Эксперимент №1 – определение распределения параметра шероховатости Ra в проточном канале одной пары лопаток от входной ее части к выходной. Упрочняемая деталь жестко закрепляется в контейнере с вертикальным расположением оси вращения, выходными кромками лопаток вверх. Колебания однокоординатные с вертикальной амплитудой $A_y = 0,32$ см, частотой $\omega = 75$ с⁻¹. Экструзия поджатой среды в проточных каналах создается с амплитудой скорости $A_3 \omega_3 = 22,1$ см/с. Частицы среды – абразивные шарики на керамической связке диаметром $a_ч = 0,4...0,5$ см, зерно – белый электрокорунд, зернистость № 8. Исходный параметр шероховатости $Ra_{исх} = 6,25...8$.

Диапазон рассеяния Ra в проточном канале вдоль одной пары лопаток без экструзии $\delta_{Ra} = 3,13$ мкм, с экструзией $\delta_{Ra} = 2,8$ мкм. Требуемое значение Ra 1,25...3, допуск $T_{Ra} = 1,75$ мкм. Стабильность технологического процесса виброабразивной обработки проточного канала одной пары лопаток без экструзии $\eta_{Ra} = 1,75 / 3,13 = 0,56 \ll 1$, с экструзией и амплитудой скорости $A_3 \omega_3 = 22,1$ см/с, $\eta_{Ra} = 1,75 / 2,8 = 0,63 \ll 1$, т.е. недопустимо низкая.

Эксперимент № 2 – определение распределения Ra во входной части шестнадцати лопаток. Деталь жестко закрепляется в контейнере с вертикальным расположением оси вращения выходными кромками лопаток вверх. Колебания однокоординатные с вертикальной амплитудой $A_y = 0,32$ см, частотой $\omega = 150$ с⁻¹. Экструзия среды в проточных каналах создается с амплитудой скорости $A_3 \omega_3 = 22,1$ см/с.

Во входной части выпуклой поверхности лопатки (пов. А, рис. 1, а) $Ra_{\text{max}}^{\text{cp}} = 4,9$ мкм; $Ra_{\text{min}}^{\text{cp}} = 3,99$ мкм, разброс по средним значениям $\delta_{Ra}^{\text{cp}} = 0,91$ мкм (рис. 2, а). По сплайнам $Ra_{\text{max}} = 5,5$ мкм, $Ra_{\text{min}} = 3,6$ мкм, разброс по сплайнам $\delta_{Ra}^{\text{max}} = 1,9$ мкм. Отношение $\delta_{Ra}^{\text{max}} / \delta_{Ra}^{\text{cp}} = 2,09$. Технологическая стабильность режимов $\eta_{Ra} = 1,75 / 1,9 = 0,92 \cong 1$ не удовлетворительная, но близка к допустимой.

Во входной части вогнутой поверхности лопатки (пов. Б, рис. 1, а) $Ra_{\text{max}}^{\text{cp}} = 5,84$ мкм, $Ra_{\text{min}}^{\text{cp}} = 4,18$ мкм, разброс по средним значениям $\delta_{Ra}^{\text{cp}} = 1,66$ мкм

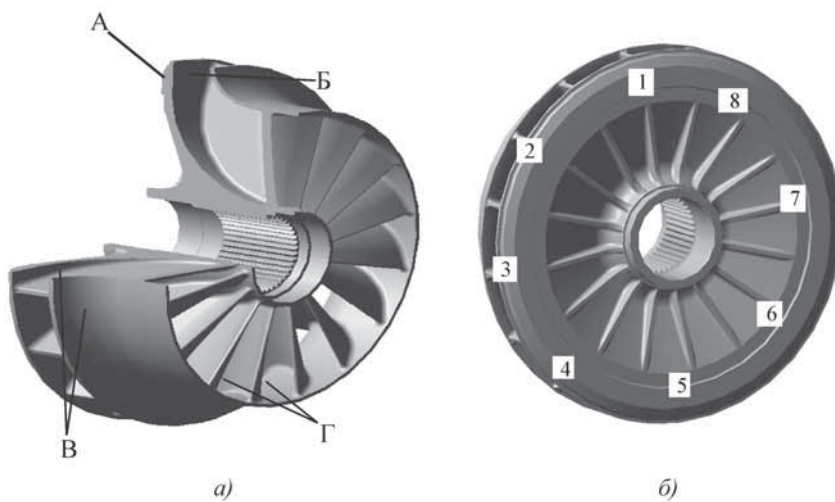


Рис. 1. Общий вид и обозначения исследуемых поверхностей (а) и распределение и нумерация лопаток (б) проточных каналов рабочего колеса турбонасосного агрегата:

А, Б – входная часть со стороны соответственно выпуклой и вогнутой поверхностей лопаток; В, Г – выходная часть со стороны соответственно вогнутой и выпуклой поверхностей лопатки

(рис. 2, б). По сплайнам $Ra_{max} = 6,2$ мкм, $Ra_{min} = 3,6$ мкм, разброс по сплайнам $\delta_{Ra}^{max} = 2,6$ мкм. Отношение $\delta_{Ra}^{max} / \delta_{Ra}^{cp} = 1,57$. Технологическая стабильность режимов $\eta_{Ra} = 1,75 / 2,6 = 0,67 \approx 1$ низкая.

Эксперимент № 3 – определение распределения параметра Ra во входной части шестнадцати лопаток. Деталь жестко закрепляется с вертикальным расположением оси выходными кромками лопаток вверх. Колебания двухкоординатные в вертикальной плоскости с $A_r = 0,41$ см, $\omega = 100$ см⁻¹. Экструзия с амплитудой скорости $A_s \omega = 82$ см/с.

Во входной части выпуклой поверхности лопатки (пов. А, рис. 1, а) $Ra_{max}^{cp} = 4,7$ мкм, $Ra_{min}^{cp} = 3,3$ мкм, разброс по средним значениям $\delta_{Ra}^{cp} = 1,4$ мкм (рис. 2, в). По сплайнам $Ra_{max} = 5,3$ мкм, $Ra_{min} = 2,6$ мкм, разброс по сплайнам $\delta_{Ra}^{max} = 2,7$ мкм, отношение

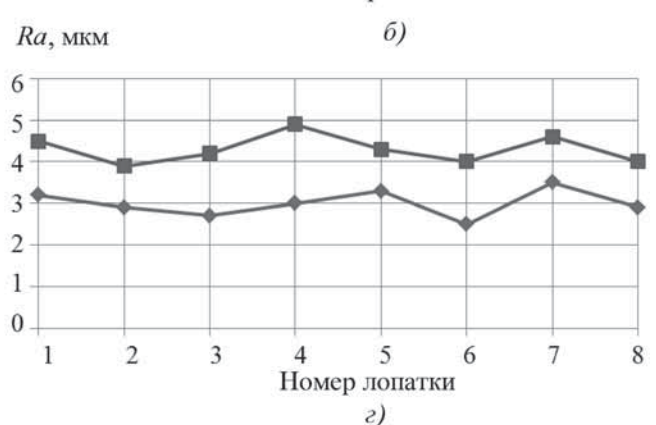
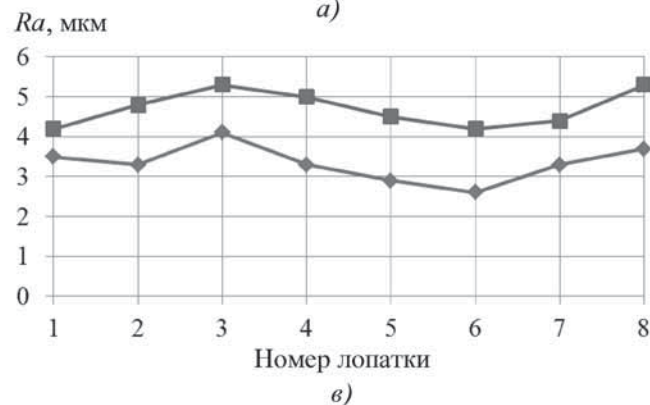
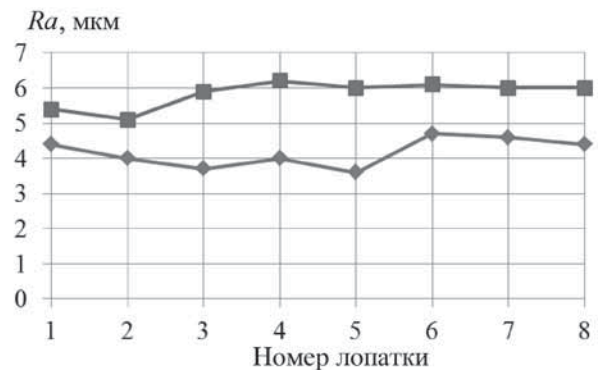
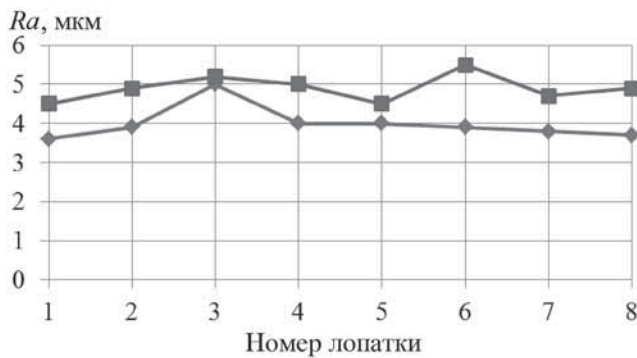


Рис. 2. Распределение максимальных (■) и минимальных (◆) значений Ra ($Ra_{max} = 6,25 \dots 8$ мкм) при колебаниях в среде абразивных шариков:

а, б – однокоординатных во входной части колеса со стороны соответственно выпуклой (А) и вогнутой поверхностей (Б) лопаток; в, г – двухкоординатных во входной части колеса со стороны соответственно выпуклой (А) и вогнутой поверхностей лопаток (Б, см. рис. 1); обработка в среде абразивных формованных гранул ПТ-5 призматической формы

$\delta_{Ra}^{\max} / \delta_{Ra}^{\min} = 1,9$. Технологическая стабильность $\eta_{Ra} = 1,75 / 2,7 = 0,65 < 1$ недопустимо низкая.

Во входной части вогнутой поверхности лопатки (пов. Б, рис. 1, а) $Ra_{\max}^{\text{сп}} = 4,3$ мкм, $Ra_{\min}^{\text{сп}} = 3,0$ мкм, разброс по средним значениям $\delta_{Ra}^{\text{сп}} = 1,4$ мкм (рис. 2, з). По сплайнам $Ra_{\max} = 4,9$ мкм, $Ra_{\min} = 2,9$ мкм, разброс по сплайнам $\delta_{Ra}^{\max} = 2,0$ мкм. Отношение $\delta_{Ra}^{\max} / \delta_{Ra}^{\text{сп}} = 1,9$. Технологическая стабильность $\eta_{Ra} = 1,75 / 2,7 = 0,65 < 1$ недопустимо низкая.

Выводы

При виброабразивной обработке с жестким закреплением стабильность вдоль проточного канала одной пары лопаток и во входной части всех лопаток процесса низкая. Для повышения стабильности и надежности необходимо вращать деталь или обеспечить смену траектории колебаний. Увеличение амплитуды скорости экструзии снижает высотные параметры шероховатости, повышает стабильность процесса.

За счет равномерного вращения детали может быть обеспечено повышение стабильности, однако это потребует использования специальной оснастки

и автономного привода, которые из-за применения в них подшипников качения в условиях вибрационного воздействия обладают низким ресурсом.

За счет смены эллипсных траекторий колебаний на угол $\gamma = 20...45^\circ$ через интервал времени $t = 7...17$ мин с поджатием вибрирующей инструментальной среды $\Pi = 0,03...0,05$ ($A\omega^2 / g$) стабильность формирования Ra в проточных каналах повышается на 15...50 %. Экспериментально установлено, что несовпадение теоретически и экспериментально определенных погрешностей при оценке стабильности составляет 30...50 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Рекомендации** по оценке точности и стабильности технологических процессов. Р 50-601-20-91 (оборудование). М., 1991. 76 с.
2. **Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И.** Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.
3. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронеж: ВГУМВД, 1999. 386 с.
4. **Копылов Ю.Р.** Динамика процессов виброударного упрочнения. Воронеж: Научная книга, 2011. 569 с.

УДК 539.374:621.787

А.Н. Исаев, А.Р. Лебедев, С.А. Земляной
(Донской государственный технический университет)
E-mail: anis101@yandex.ru

Особенности сборки составных цилиндров из сварных труб дорнованием

Приведен анализ напряженно-деформированного состояния материала сварной заготовки в процессе дорнования отверстия составного цилиндра и определены условия его качественного изготовления. Возможность достижения требуемого качества связана с ограничениями исходных зазоров между элементами составного цилиндра и зависящих от них величин натягов дорнования. Назначаемые пределы зазоров должны удовлетворять критерию прочности материала трубы при раздаче и критерию отсутствия затекания грата на обрабатываемую дорном поверхность отверстия.

Ключевые слова: составной цилиндр, сварная трубчатая заготовка, сварной шов, сварочный грат, дорнование отверстий, деформации, напряжения.

The analysis of the is intense-deformed state of a material of welded preparation in holes mandrelling process of the composite cylinder is resulted and conditions of its qualitative manufacture are defined. Possibility of achievement of demanded quality is connected to restrictions of initial gaps between elements of the composite cylinder and values of tightnesses depending on them mandrelling. Assigned limits of gaps should satisfy to criterion of durability of a material of a pipe at distribution and to criterion of absence rag output on a surface of a hole processed by the mandrelling

Keywords: the compound cylinder, welded tubular preparation, a welded seam, welding rag, mandrelling bores, deformations, pressure.

Введение

Применения сварных труб для изготовления составных цилиндров возможно лишь при условии предварительного удаления сварочного грата с по-

верхности отверстия. На практике применяются различные способы обработки внутренней поверхности электросварных труб в месте сварки, например, резанием, сжиганием, деформированием. Наиболее эффективным из них является способ дорнования от-

верстий, в процессе которого происходит смещение грата в область сварного шва и обеспечивается требуемое качество сопряжения элементов составного цилиндра. Однако для этого необходимо знать особенности деформационного процесса сборки составных цилиндров со сварной трубой при наличии сварочного грата на обрабатываемой поверхности.

Следует отметить, что в современной специальной литературе по обозначенной тематике широкие исследования практически не проводились.

Напряженно-деформированное состояние материала сварной заготовки. В исходном состоянии между сопрягаемыми цилиндрами имеется зазор; в поперечном сечении, проходящем через шов, образуются две опорные поверхности, имеющие существенно неодинаковые площади. В результате в области сварного шва и сварочного грата возникают большие радиальные напряжения, превышающие предел текучести материала шва, его пластическое деформирование и уширение. Одновременно увеличивается периметр кольцевого сечения сварной заготовки до полного устранения зазора. Важно, чтобы устранение зазора произошло после полного смещения грата в сварной шов, так как в противном случае часть металла грата будет выдавлена на обрабатываемую поверхность. Однако следует учитывать, что при большом начальном зазоре возможно разрушение заготовки, поэтому для сохранения целостности цилиндра и обеспечения качественной обработки отверстия необходимо установить предельные значения величины зазора по критерию прочности материала трубы при раздаче (наибольший допустимый зазор) и критерию отсутствия затекания грата на обрабатываемую дорном поверхность отверстия (наименьший допустимый зазор).

При продвижении дорна вдоль отверстия заготовки процесс формообразования полного кольцевого сечения составного цилиндра проходит несколько этапов, каждый из которых характеризуется присущими рассматриваемому этапу схемами деформаций и напряжений.

Этап I. В связи с наличием на поверхности отверстия сварочного грата первый контакт дорна с заготовкой происходит в продольном сечении, совпадающем с плоскостью симметрии сварного шва. Перемещение дорна вызывает интенсивное деформирование грата и растяжение поперечного сечения заготовки, которое приобретает эллиптическую форму, вытянутую в направлении сварочного грата. Напряженно-деформированное состояние сварного шва соот-

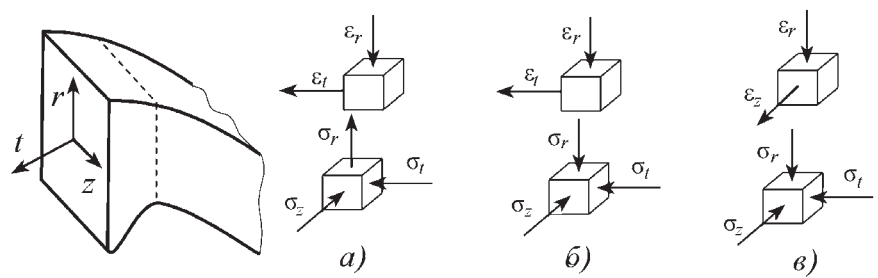


Рис. 1. Схемы главных деформаций (ϵ) и главных напряжений (σ) на этапах деформирования I (а), II (б) и III (в)

ветствует состоянию пластичности, остальная часть материала заготовки деформируется упруго.

В области сварного грата вследствие малости контактной площадки возникают большие радиальные напряжения, способствующие перемещению материала грата в сварной шов, который при этом расширяется (рис. 1, а). Расширению шва способствуют тангенциальные напряжения, возникающие в результате деформации кольцевого сечения сварной трубы. Осевое смещение материала грата практически не происходит, так как этому препятствуют примыкающие к сварному шву участки трубы, находящиеся в состоянии упругости. Этот процесс имеет место до тех пор, пока наружная поверхность заготовки в области сварного шва не коснется внутренней поверхности обоймы.

На этапе I в области сварного шва имеют место плоская деформация (сдвиг) и объемное напряженное состояние (радиальное и осевое сжатие и тангенциальное растяжение материала в области грата). Процесс деформирования сварной трубы происходит при увеличении ее наружного периметра до момента контакта заготовки с обоймой.

Следует обратить внимание на тот факт, что на первом этапе в сварном шве возникает разноименная схема напряжений с двумя сжимающими и одним растягивающим напряжениями, поэтому при больших деформациях, если зазор достаточно велик, возможно разрушение шва.

На этапе II в момент касания наружной поверхности сварной заготовки с внутренней поверхностью внешнего элемента составного цилиндра форма поперечного сечения сварочного шва изменяется вследствие смещения грата в область сварного шва, тангенциальное растяжение поперечного сечения заготовки переходит в состояние сжатия, из-за чего изменяется механическая схема деформации. Схема главных деформаций на втором этапе дорнования сохраняется, т.е. соответствует схеме первого этапа: сжатие в радиальном направлении и растяжение в окружном направлении (плоская деформация). Однако объемная

разноименная схема главных напряжений становится одноименной (рис. 1, б), т.е. с тремя сжимающими напряжениями (всестороннее сжатие). Связанно это с тем, что наружная поверхность сварного шва контактирует с внутренней поверхностью внешнего элемента составного цилиндра, при этом сварной шов находится в состоянии радиального, окружного и осевого сжатия. На втором этапе дорнования происходит выравнивание поперечного сечения окружности сварной заготовки (эллиптическое сечение вновь приобретает правильную кольцевую форму, при этом уменьшаются зазоры между заготовкой и обоймой за счет уширения сварочного шва при вдавливании в него сварочного графа.

На этапе III сварочный граф полностью смещен в область сварного шва, поперечное сечение сварной заготовки приобретает форму правильного кольца. Далее выполняется дорнование отверстия составного цилиндра [1]. На данном этапе схемы главных деформаций приобретают вид объемных схем растяжения с одной положительной и двумя другими отрицательными деформациями (рис. 1, в); схема главных одноименных напряжений (всестороннее сжатие) по сравнению с предыдущим этапом не изменяется, т.е. соответствует схеме напряжений второго этапа.

В момент совпадения наружной поверхности деформируемого сечения с внутренней поверхностью охватывающего элемента составного цилиндра граф должен быть полностью смещен в сварной шов, а с учетом того, что осевая деформация до момента устранения зазора отсутствует, минимальный зазор можно определить на основе равенства площадей кольцевого зазора и площади графа. Для этого требуется знать его форму, ширину и высоту.

Исследования геометрии вытекшего металла (графа) при изготовлении сварных труб показали, что внутренний граф имеет форму кругового сегмента [1]. Пластическая деформация сегмента вначале локализуется у его вершины, постепенно распространяясь вглубь, к основанию. Для выявления зависимости площади сегмента от геометрических параметров исходных заготовок предложена и обоснована модель формы графа в виде сегмента окружности с радиусом R , проведенным через две крайние точки графа через его вершину, ограниченную высотой h .

Анализ технологии изготовления сварных труб показал, что форма и геометрические размеры образующегося в процессе сварки графа зависят в основном от толщины стенки трубы и ее диаметра. Зависимости ширины сварного шва и высоты графа, выявленные экспериментально с использованием метода многофакторного анализа, имеют следующий вид:

$$b = 0,264 - 0,054 S + 0,081 D;$$

$$h = 0,264 - 0,054 S + 0,081 D.$$

Расчетные значения соответствуют данным эксперимента с отклонениями, не превышающими 20 % (адекватность для $b - S_{ад} = 0,027$; для $h - S_{ад} = 0,03$).

В качестве математических моделей графа исследованы треугольная, прямоугольная и круговая формы, приближение которых к фактическим формам графа оценивалась статистическими методами. По критерию минимума суммы квадратов отклонений теоретических значений от экспериментальных выбрана формула окружности.

Расчет площади сварного графа выполнен при следующих допущениях:

1. На основании фактических измерений и полученных профилограмм реального внутреннего графа, образующегося при массовом производстве сварных труб, принято, что граф имеет форму кругового сегмента (рис. 2).

2. В начальный момент деформирования в области графа имеет место плоская деформация (уменьшение высоты графа при уширении сварного шва, отсутствие осевой деформации).

3. В процессе деформирования графа исходный зазор между сопрягаемыми элементами цилиндра уменьшается за счет смещения материала графа и уширения сварного шва.

4. Полное радиальное смещение металла графа в область сварного шва и момент полного прилегания наружной поверхности заготовки к поверхности отверстия обоймы по всему периметру достигаются одновременно.

5. В целях упрощения математического анализа процесса деформирования внутреннего графа все его геометрические параметры ограничены площадью сегмента в поперечном сечении (рис. 2).

С учетом принятых допущений смещенная площадь $S_{сег}$ внутреннего графа в стенку трубы будет равна:

$$S_{сег} = S_{сек} - S_{тр},$$

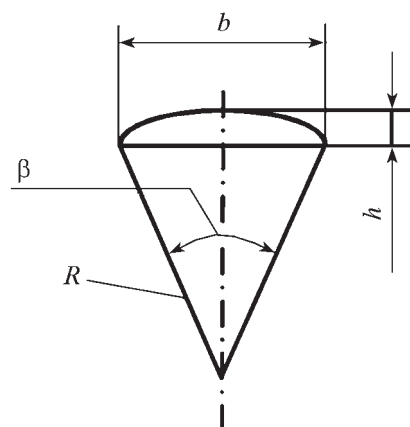


Рис. 2. Размеры сварного шва: b – ширина; h – высота; β , R – угол и радиус сегмента

где $S_{\text{сек}} = R^2 \arctg \frac{b}{2(R-h)}$ – площадь сектора;

$S_{\text{треуг}} = 0,5 b (R-h)$ – площадь треугольника.

Радиус сегмента окружности определяется по трем точкам в зависимости от ширины b и высоты грата h :

$$R = \frac{(0,25 b^2 + h^2)}{2h}.$$

Окончательно для расчета площади сегмента имеем выражение

$$S_{\text{сег}} = 0,5 \left[R^2 \arctg \frac{b}{2(R-h)} - b(R-h) \right]. \quad (1)$$

Наименьший допустимый зазор между соединяемыми элементами. При дорновании сварной заготовки с внутренним гратом происходит смещение металла грата в стенку трубы. Неправильно выбранный минимальный зазор между заготовкой и облойкой приводит к образованию закатов грата, ухудшающих прочность сварного шва, качество внутренней поверхности и, следовательно, эксплуатационные свойства деталей.

Учитывая вышесказанное, необходимо первоначально создать зазор между заготовкой и облойкой, минимальная величина которого определяется условием деформации грата за счет уширения сварочного шва.

Рассмотрим процесс деформирования сварной заготовки дорнованием (рис. 3). На этапе года происходит смещение материала грата сварного шва в стенку заготовки. Поперечное сечение заготовки после смещения грата в область сварного шва принимает форму правильного круга и происходит дорнование составного цилиндра, материал заготовки находится в состоянии растяжения.

Площадь сварочного шва до дорнования определяется по формуле

$$S_{\text{шва}} = b(R_3 - r_3).$$

Площадь сварочного шва после вдавливания сварочного грата в стенку сварной заготовки имеет вид

$$S_{\text{шва}} = b'(R-r).$$

Для того чтобы определить уширение сварочного шва в процессе дорнования, необходимо приравнять площадь сварочного шва до и после дорнования:

$$S_{\text{шва}} + S_{\text{сег}} = S'_{\text{шва}}.$$

После элементарных преобразований будем иметь

$$b(R-r) + S_{\text{сег}} = b'(R-r).$$

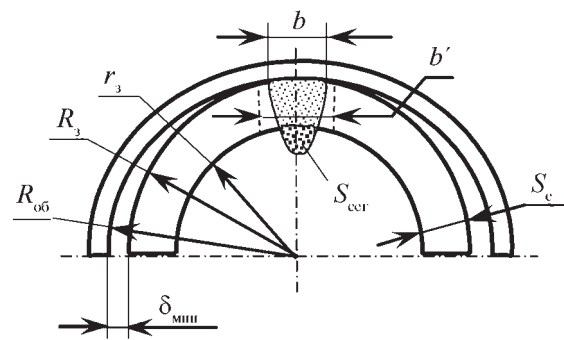


Рис. 3. Изменение параметров шва при дорновании внутренне-го отверстия

Из полученного выражения найдем ширину шва после дорнования сварной заготовки, зависящую от площади сегмента с учетом формулы (1):

$$b' = b + \frac{S_{\text{сег}}}{R-r}.$$

Удлинение сварного шва после смещения грата в область шва имеет вид

$$\Delta l_3 = b' - b.$$

Минимальный радиус внутренней поверхности облойки, при котором сварочный грат полностью перейдет в сварной шов, равен

$$R_{\text{об}}^{\text{мин}} = R_3 + \frac{\Delta l_3}{2\pi}.$$

Минимальный зазор между сварной заготовкой и охватывающим цилиндром, при котором после дорнования на внутренней поверхности трубы в области сварного шва не образуются дефекты, равен

$$\delta_{\text{мин}} = \frac{1}{2} (d_{\text{об}}^{\text{мин}} - D_3).$$

После элементарных преобразований будем иметь

$$\delta_{\text{мин}} = 0,5 \left[\left(\left(2 R^2 \arctg \frac{b}{2(R-h)} - 0,5 b (R-h) \right) / (R-r) \right) / \pi \right].$$

Наибольший допустимый зазор между соединяемыми элементами. Выше было показано, что между соединяемыми деформационным способом элементами первоначально необходимо создать зазор, минимальная величина которого определяется условием заката грата на поверхность отверстия, при этом наибольший допустимый зазор определяется пределом проч-

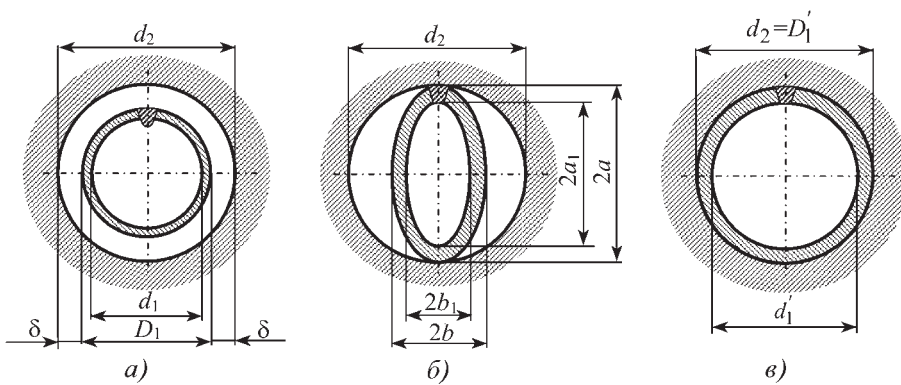


Рис. 4. Этапы деформации поперечного сечения сварной трубы, установленной в охватывающий цилиндр с зазором $2\delta > 2\delta_{\min}$:

a – исходное положение; *b* – пластическая деформация сварочного грата и упругое формоизменение поперечного сечения внутреннего элемента; *v* – пластическое формоизменение поперечного сечения до полного устранения зазора. Размеры элементов составного цилиндра отмечены индексами: 1 – внутреннего; 2 – наружного; штрихом – в конечной фазе деформирования

ности деформируемой заготовки. Фактически величина предельно допустимого зазора может быть установлена на основе технических требований к сварной трубе. При испытании сварной трубы на раздачу допускается увеличение наружного диаметра на 5,5...6 %, именно этот норматив может быть положен в основу выбора размеров наружной и внутренней заготовок. При оговоренных условиях величину наибольшего допустимого зазора можно считать заданной, однако остается неизвестным натяг дорнования, при котором наружный диаметр сварной заготовки станет равным диаметру отверстия охватывающего элемента составного цилиндра. В данном случае задача состоит в том, чтобы определить значение натяга дорнования, достаточного для полного устранения наибольшего допустимого зазора.

Рассмотрим процесс деформирования сварной заготовки дорнованием в случае, когда зазор между заготовкой и обоймой превышает минимальное значение (рис. 4). Схему деформирования поперечного сечения заготовки будем считать такой же, как на этапах I (превращение кольцевого поперечного сечения заготовки в эллиптическое) и II (смещение материала грата сварного шва в стенку заготовки). Однако, в отличие от описанной выше схемы деформации при малом зазоре на этапе III, в данном случае поперечное сечение заготовки после смещения грата в область сварного шва сохраняет эллиптическую форму, причем часть материала заготовки по оси симметрии, проходящей через сварной шов, находится в состоянии сжатия, а остальная часть заготовки – в состоянии растяжения. Последующее увеличение деформации (натяга дорнования) приводит в конечном итоге

к увеличению периметра заготовки до совпадения ее наружной поверхности с поверхностью отверстия обоймы, после чего происходит совместная деформация соединения.

На каждом этапе деформации площади фигур на рис. 4 остаются неизменными, так как при общем изменении формы сечений и их размеров сохраняется плоское деформированное состояние. Площади фигур могут быть рассчитаны отдельно на каждом этапе по формулам

$$a) 4\omega = \pi(D_1^2 - d_1^2);$$

$$b) \omega = \pi(ab - a_1 b_1);$$

$$v) 4\omega = \pi(d_2^2 - d_1'^2).$$

Из условия равенства и неизменяемости площадей сечений имеем

$$D_1^2 - d_1^2 = d_2^2 - (d_1')^2,$$

тогда внутренний диаметр сварной заготовки будет равен

$$d_{1\text{деф}} = \sqrt{d_2^2 + d_1^2 - D_1^2}.$$

С помощью полученного выражения определим толщину стенки сварной заготовки после формоизменения поперечного сечения:

$$S_{\text{деф}} = 0,5(d_2 - d_1) = 0,5[d_2 - \sqrt{d_2^2 + d_1^2 - D_1^2}].$$

Натяг дорнования, при котором периметр заготовки в конечном итоге увеличивается до диаметра отверстия обоймы, определяется выражением

$$i = d_1' - d_1 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 - D_1^2} - d_1. \quad (2)$$

Исключим из выражения (2) исходный внутренний диаметр охватывающего элемента d_2 , связав его с наружным диаметром сварного элемента D_1 и исходным зазором между элементами δ

$$d_2 = 2\delta + D_1.$$

Получим выражение для определения натяга дорнования в зависимости от величины исходного зазора:

$$i = \sqrt{d_1^2 + (2\delta + D_1)^2 - D_1^2} - d_1. \quad (3)$$

Практически удобнее выражение (3) привести к относительной форме, разделив полученное равенств-

во на диаметр отверстия сварной трубы. Обозначив относительный натяг через $\lambda = i / d_1$, получим

$$\lambda = \frac{i}{d_1} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\delta}{d_1} + m\right)^2 - m^2} - 1. \quad (4)$$

Определим величину предельного зазора между сварной заготовкой и обоймой, при котором заготовка не разрушится при дорновании. Подставив в выражение (4) вместо δ его предельное значение по условию прочности трубы ($\delta = \delta_{кр}$), получим

$$\lambda_{кр} = \frac{i}{d_1} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\delta_{кр}}{d_1} + m\right)^2 - m^2} - 1. \quad (5)$$

Практически исходная величина зазора между составными элементами составного цилиндра, как правило, известна, так как размеры сварной и охватывающей заготовок изделия считаются заданными. Поэтому требуемый для выборки зазора натяг можно определить из выражения (4), а наибольший зазор $2\delta_{кр}$, гарантированно обеспечивающий условие неразрушения сварной заготовки в процессе дорнования, рассчитать по формуле (5), приведенной к виду

$$\delta_{кр} = \frac{1}{2} (\sqrt{\lambda_{кр}^2 + 2\lambda_{кр} + m^2} - m) d_1.$$

Полученные формулы могут быть использованы: при расчете размеров элементов составных цилиндров;

для контроля пригодности составных элементов, используемых в при сборке составного цилиндра; в целях оптимизации параметров составного цилиндра по величине зазора.

Выводы

Выполнение специфических условий подготовки элементов составного цилиндра со сварным внутренним элементом гарантирует качественную сборку изделия дорнованием и его высокую эксплуатационную надежность.

Качество сопряжения можно обеспечить путем ограничения исходных зазоров между элементами составного цилиндра и зависящих от них натягов дорнования в пределах $i_{мин} \leq i \leq i_{кр}$.

Предельные величины зазоров должны удовлетворять критерию прочности материала трубы при раздаче (наибольший допустимый зазор) и критерию отсутствия затекания грата на обрабатываемую дорном поверхность отверстия (наименьший допустимый зазор).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев А.Н., Земляной С.А., Федин Э.И. Деформации и качество поверхности отверстий сварных труб, обработанных дорнованием // Известия ОрелГТУ. Сер. "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии". Орел: ОрелГТУ, 2010.

УДК 621.9.048

Ю.Р. Копылов (Воронежский государственный технический университет)
E-mail: urkopulov@mail.ru

К проблеме трехмерного моделирования процессов виброударного упрочнения

Рассмотрены предварительные результаты трехмерного сплайнового моделирования процесса виброударного упрочнения деталей сложной формы с закреплением в контейнере методом дискретных элементов с использованием программно-математической платформы CUDA. Даны характеристики современных аппаратных средств, в частности видеокарт для 3D моделирования фирмы NVidia CUDA, предназначенные для организации параллельных потоков вычислений.

Ключевые слова: виброударное упрочнение деталей, трехмерное компьютерное сплайновое моделирование.

We consider the preliminary results of a three-dimensional spline modeling of the process of hardening vibroshock intricate parts in a container with fixing the method of discrete elements using mathematical software platform CUDA. Given the characteristics of modern hardware, including graphics for 3D modeling firm NVidia CUDA, designed for parallel computing fluxes.

Keywords: vibro-impact hardening, of parts of three dimensional, computer simulation of the spline.

Введение

Компьютерное моделирование методом интегральных оценок свойств инструментальной среды [1], разработанное в 1980–1990-е гг., по усредненным показателям качества поверхностного слоя не обеспечивает учета распределения технологических параметров. Это

снижает эффективность технологий виброударного упрочнения. В 2000-е гг. был разработан метод компьютерного моделирования динамики гранулированных сред [2, 3] и др., метод сплайнового двухмерного моделирования процесса виброударного упрочнения деталей с закреплением в контейнере [3], на основе которого решен ряд технологических задач: снижение ко-

робления длинномерных деталей [4], повышение интенсивности и равномерности виброабразивной обработки и виброударного упрочнения [5] и др. Позднее был разработан метод квазитрехмерного сплайнового моделирования [4], в котором выполняли двухмерное сплайновое моделирование в продольных сечениях, а в поперечных сечениях осуществляли выборку параметров из сплайнов продольных сечений. Далее формировали трехмерную цветовую информацию, по которой посредством интерполяции определяли параметры любого участка поверхности детали. Недостаток метода – большой шаг дискретизации выборки и интерполяции результатов. Уменьшение шага связано с увеличением объема вычислений, так как при трехмерном моделировании количество сплайнов и частиц увеличивается от размеров в кубической зависимости. Для вычислений использовали программу GranMos и Vibrohardening 2D [2, 3]. Для автоматизированного построения эпюр использовали программу "AutoEpure" [5].

Методика моделирования

Методика трехмерного компьютерного сплайнового моделирования с использованием программной платформы CUDA (Compute Unified Device Architecture) имеет характерные особенности – моделирование процессов виброударного упрочнения *методом дискретных элементов* (МДЭ) выполняется при колебаниях с интенсивным виброускорением 8...10 g частиц инструментальной среды. Моделирование МДЭ начинается с построения размерной 3D геометрической модели технологической системы. Далее в 3D систему помещают при определенных условиях частицы инструментальной среды. Перемещения и силы взаимодействия частиц между собой сплайнами детали и контейнера рассчитывают с учетом трения и упруго-пластических деформаций в зоне косых соударений, а конечное множество соударений исследуют методом фазовых траекторий с использованием программно-математической платформы CUDA с временным шагом $(0,5...1,0) \cdot 10^6$ с.

На частицы и сплайны действуют силы соударения, трения, проскальзывания, отталкивания, гравитационные силы, которые складывают и находят вектор результирующей силы воздействия каждой из частиц между собой и сплайнами. Изменение положения и скорость каждой частицы в течение временного шага определяли из законов Ньютона и метода интеграции. Новое положение использовали для расчета сил в последующем шаге. Эти циклы повторяются.

Контейнер имеет форму цилиндра с радиусом 150 мм и глубиной 75 мм. Деталь имеет форму ко-

нуса – больший радиус равен 50, меньший 25 мм, глубина равна глубине контейнера – 75 мм. Параметры инструментальной среды следующие: количество гранул 24 780, радиус 2,5 мм, материал частиц – сталь. Количество частиц среды – 75 % загрузки свободного объема контейнера. Важную роль в процессе расчета играет шаг итерации. Увеличенный шаг приводит к "проникновению" вибрирующих частиц сквозь виртуальные стенки контейнера и детали. Мелкий шаг приводит к увеличению времени моделирования.

Аппаратурное обеспечение

Для обеспечения требуемого быстродействия параллельной схемы вычислений перемещений ансамбля частиц используют 3D видеокарты и технологию NVidia CUDA. Под МДЭ подразумевается семейство численных методов, применяемых для описания поведения сложных дискретных пространственных систем посредством вычисления движения большого количества отдельных размерных частиц сыпучей среды в задачах смешивания и сегрегации, течения и циркуляционных перемещений в замкнутых объемах. Фундаментальной характеристикой МДЭ является предположение о размерности конечного множества дискретных частиц, обладающими различными физико-механическими свойствами [7].

Впервые удачную попытку предоставить большие вычислительные мощности на массовом потребительском рынке предприняла американская фирма NVidia, представив в конце 2006 г. видеопроцессор G80. Им оснащались видеоакселераторы GeForce 8-й серии. Отличительной особенностью этого микрочипа является поддержка CUDA – программно-аппаратной архитектуры, позволяющей производить вычисления с использованием графических процессоров, поддерживающих технологию GPGPU (произвольных вычислений на видеокартах). Этот видеопроцессор имел до 128 потоковых процессоров, 896 МБ собственной памяти и мог выступать как своеобразный сопроцессор для решения обширного круга задач. Фирма NVidia во всех последующих семействах своих продуктов, таких как G200, Fermi, постоянно совершенствует эту архитектуру, добавляя новые возможности. Сейчас CUDA присутствует в следующих сериях графических чипов: GeForce, Quadro и Tesla. В таблице представлены сравнительные характеристики производительности видеочипов и вычислительных модулей.

В настоящее время на рынке доступны следующие продукты, поддерживающие технологию NVidia CUDA: видеокарты серии GeForce 8, 9 серии; GT200; Fermi 400-й и 500-й серии, специализированные вычислительные модули Tesla (серия С, М), профессиональные видеокарты серии Quadro (для работы с

Характеристики современных видеокарт фирмы NVidia CUDA [7]

Наименование вычислительного модуля (видеокарты)	Объем памяти, МБ	Производительность, GFLOPS, (одинарная/двойная точность)	Количество ядер CUDA
Tesla C2050/M2050	3072 ECC	1030,4/515,2	448
Tesla C1060	4096 ECC	933/78	240
GeForce 580 GTX	1536	1581/197	512
GeForce 480 GTX	1536	1344/168	480
GeForce 295 GTX	2×896	2×894,2/2×74,5	2×240

AutoCAD, CATIA, компас-3D, Siemens NX и др.), вычислительные серверы (суперкомпьютеры) Tesla (серия S). В своих исследованиях мы использовали следующие видеокарты: GeForce 260 (216 ядер), GeForce 295 (2×240 ядер), GeForce 550 Ti (192 ядра). Для создания 3D моделей использовали редактор 3D Studio Max (рис. 1, см. стр. 4 обложки), разработан специальный интерфейс, использованы программные средства: NVidia Parallel NSight – отладчик (плагин для MS Visual Studio); Visual Studio 2008; СУБД Microsoft Access; NVidia CUDA SDK. Задание исходных данных выполняли с помощью панели задания параметров моделирования.

Результаты моделирования

Алгоритм моделирования включает в себя инициализацию, определение пар вероятных соударяющихся частиц, расчет сил соударений, интегрирование уравнений движения частиц и сплайнов, обновление информации о соударениях в новом такте, передачу текущей информации в базу данных, повтор цикла вычислений с шагом 0,5...1 мкс.

Инициализация выполняется на центральном процессоре. Задаются начальные положения в пространстве и начальные скорости конечного множества частиц, инициализируется сеточная структура системы, подготавливается база данных. Структура базы данных содержит шаг моделирования, вектор гравитации, размер сетки, параметры колебаний, координаты и скорости частиц на *i*-м шаге итерации, положение и скорость центра контейнера, положение и скорость каждого сплайна детали, шероховатость, наклеп, остаточные напряжения.

Определение пар соударяющихся частиц является началом главного цикла вычислений, выполняется на центральном процессоре и видео-плате. Поиск бли-

жайших соседей осуществляется методом разбиения пространства регулярной сеткой на кубические ячейки, в каждой из которых хранится список гранул, центры которых расположены внутри данной ячейки. Размер ячейки выбирается несколько большим, чем характерный размер частиц среды. Расчет упругопластического контакта осуществляется только между гранулами, центры которых попали в одну или соседнюю ячейку, координаты между которыми уменьшаются.

Контактная модель. В применяемом методе дискретных элементов используется деформируемая частица. При соударении частицы деформируются, центры их сближаются, при этом сила взаимодействия пропорциональна величине перекрытия. Величина нормальной составляющей контактной силы

$$\vec{F}_n = cx + \alpha \vec{V}_n, \quad (1)$$

где *x* – сближение центров частиц;
c – коэффициент квазиупругой жесткости;
 α – коэффициент сопротивления взаимному проникновению частиц.

Тангенциальная составляющая силы при учете Кулонова трения

$$\vec{F}_t = \mu \vec{s} |F_n|, \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения;
s – вектор, направленный в сторону, противоположную вектору тангенциальной составляющей относительной скорости соударения.

Общая сила будет равна векторной сумме тангенциальной и нормальной составляющих. После расчета контактной силы обновляется скорость. Модель адекватно описывает поведение трехмерной среды. Эта же контактная модель используется при расчете соударения гранулы о сплайн поверхности детали и контейнера. Сплайн в виде плоского участка детали или контейнера в данном случае подменяется виртуальной частицей со значительно большими размером и массой, частица расположена в момент соударения на поверхности сплайна.

Расчет сил взаимодействия. При установлении контакта между частицами рассчитывается сила взаимодействия. В алгоритме расчета имеется функция, которая вызывается для расчета соударений для каждой из множества частиц. Для сокращения время вычислений указанная функция запускается параллель-

но до нескольких десятков тысяч потоков для нескольких сотен тысяч частиц.

Интегрирование уравнений движения. После расчета сил взаимодействия для каждой частицы вычисляются результирующую действующих на нее сил, после чего интегрируют уравнения движения для определения новых значений линейной скорости, координат положения частиц и сплайнов. Для интегрирования используется метод Адамса.

Обновление информации о потенциальных контактах. Так как все частицы в пространстве постоянно совершают "быстрые" виброударные и "медленные" циркуляционные перемещения, меняют координаты своего положения относительно друг друга и сплайнов, необходимо указанную информацию обновлять на каждом шаге итерации методом фазовых траекторий.

Переход на следующий шаг происходит после завершения всех перечисленных процедур расчета внутри шага и передачи результатов в базу данных, что необходимо для перехода вычислений к следующему шагу итерации.

Программа позволяет загрузить 3D-модели детали и контейнер произвольной формы в формате 3D Studio Max, сохранить результаты в базе данных любого формата. Визуализация результатов осуществляется в виде эпюр, цветовых изображений (рис. 2, см. стр. 4 обложки), динамических презентаций с требуемым ускорением, замедлением и с паузами.

Предварительные результаты исследований

В результате трехмерного моделирования по разработанной программе получена информация о трехкоординатном распределении скоростных и энергетических параметров, технологических параметров формирования поверхностного слоя для конечного множества сплайнов детали сложной формы, с уче-

том ее размеров, формы и расположения поверхности, физико-механических свойств ее материала, размерных и физико-механических параметров инструментальной среды. Демонстрация динамики перемещений частиц вибрирующей инструментальной среды в режиме "Player" показывает их адекватность перемещениям в натурном эксперименте.

На рис. 2, *а* (см. стр. 4 обложки) розовый цвет соответствует сжимающим остаточным напряжениям $\sigma_0 = 250...320$ МПа, а на рис. 2, *б* в верхней части конусной детали $Rz = 12...15$ мкм, в нижней $Rz = 7...9$ мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронеж: ВГТУ, 1999. 386 с.
2. **Шевцов С.Н.** Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах. Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2005. 194 с.
3. **Копылов Ю.Р.** Динамика процессов виброударного упрочнения. Воронеж: Научная книга, 2011. 569 с.
4. **Копылов Ю.Р., Копылов А.Ю.** Численное проектирование процесса виброударной обработки методом последовательных приближений // Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия: тр. 2-го Международ. науч. симпозиума. Орел: ОРГТУ, 2003. С. 246–249.
5. **Копылов Ю.Р., Попов А.А.** К проблеме трехмерного моделирования процесса виброударного упрочнения // Авиакосмические технологии. АКТ-06: тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2006. С. 542–546.
6. **Копылов Ю.Р., Емельянов С.В.** Влияние динамики виброабразивной обработки на интенсивность съема металла на различных участках заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 10. С. 24–28.
7. **Боресков А.В., Харламов А.А.** Основы работы с технологией CUDA. М.: ДМК Пресс, 2010. 232 с.
8. **Богульская Н.А.** Моделирование поведения гранулированной среды в подвижных сосудах: Автореферат дис. ... канд. физ.-мат. наук. Красноярск, 2011.

В.А. Лебедев, Ю.В. Марченко, В.С. Соколов, Д.С. Апрышкин
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: va.lebidev@yandex.ru

Энергетическая модель процесса поверхностного пластического деформирования свободнодвижущимися инденторами

На основе фундаментального уравнения Гиббса предложена энергетическая модель упрочнения поверхностного слоя деталей в процессе поверхностного пластического деформирования (ППД) свободнодвижущимися инденторами.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, энергия, упрочнение, плотность внутренней энергии, индентор.

On the basis of the fundamental equation of Gibbs energy model proposed by hardening the surface layer of parts in the process of PPD located in the free movement indenters.

Keywords: surface plastic deformation, energy, hardening, the density of internal energy, indenter.

Постановка задачи исследования

На современном этапе в качестве основополагающих подходов к описанию процессов упрочнения ППД используют механический и металловедческий. Металлофизический подход активно применяют для качественного объяснения и предсказания сущности явлений, наблюдаемых при ППД реальных материалов и не используют в расчетной практике. Механические модели дают возможность приближенно количественно оценивать механическое поведение твердых тел в определенных условиях их нагружения, но не являются надежными для разработки расчетно-аналитических методов прогнозирования механических характеристик реальных твердых тел после ППД в широком диапазоне их применения. В этой связи в последние годы многие исследователи для описания процессов пластической деформации и разрушения твердых тел все чаще обращаются к энергетическим параметрам, в качестве которых выступают основные термодинамические характеристики материала поверхностного слоя: энергия, энтропия, температура и т. д., а расчетные зависимости строят на основе уравнения баланса энергии (энтропии).

По современным представлениям любой процесс деформирования и разрушения, а значит и процесс ППД, является кинетическим и необратимым процессом независимо от физико-химической природы материала, его структуры, а также условий нагружения. Результаты исследований в области упрочнения и разрушения металлов при пластической деформации и установленные при этом общие закономерности дают возможность описать кинетическую сущность процесса и являются исходной предпосылкой разработки энергетических моделей упрочнения методами ППД.

Разработка энергетической модели ППД

Согласно энергетической интерпретации процесса ППД [1] предельная деформируемость элемента *поверхностного слоя* (ПС) наступает при достижении критического значения плотности его внутренней энергии. Рассматривая физическое бесконечно малый объем твердого тела как открытую термодинамическую систему, находящуюся при установившихся внешних условиях в состоянии локального равновесия, т.е. обладающую совокупностью интенсивных (мольных)

свойств, условие предельной деформируемости элемента ПС материала можно представить в виде

$$E(t_i) = E_0(0) + \Delta E(t_i) = E^*, \quad (1)$$

где $E_0(0)$ – плотность внутренней энергии элемента ПС в исходном (до ППД) состоянии ($t = 0$), учитывая наследственные свойства материала;

$\Delta E(t_i)$ – изменение плотности внутренней энергии элемента ПС при i -м цикле его силового нагружения, кДж/моль.

Физический смысл этого условия заключается в том, что когда левая часть $E_0 + \Delta E(t_i)$, соответствующая повышенной внутренней энергии системы, достигает правой части E^* , являющейся фундаментальной энергетической характеристикой прочности материала, произойдет его разрушение.

Для оценки изменения внутренней энергии системы в процессе ППД используем фундаментальное уравнение Гиббса, записанное в локальной форме [2]:

$$\Delta E(t_i) = T \Delta s + p \Delta V + \sum \bar{\mu}_i \Delta W_i, \quad (2)$$

где T – абсолютная температура;

p – давление;

Δs – приращение мольного значения энтропии;

ΔV – приращение мольного объема;

$\bar{\mu}_i$ – мольное значение химического потенциала;

ΔW_i – приращение мольной доли i -го компонента.

Из уравнения (2) следует, что первое слагаемое является элементарным мольным приращением связанной энергии, необратимый рост которой при любых неравновесных процессах постулируется вторым законом термодинамики. Второе и третье слагаемые в совокупности представляют собой изменение свободной энергии. Причем, как отмечается в работе [1], свободная и связанная доли внутренней энергии в (2) являются интенсивными (удельными) характеристиками материала и не связаны с какими-либо конкретными видами энергий, их физический смысл зависит от масштабного уровня и условий протекания рассматриваемого процесса.

На основе Больцмановской интерпретации, а также анализа производства энтропии в системе на различных масштабных уровнях, в работе [2] показано, что изменение

мольной энтропии в общем виде можно представить следующим образом:

$$\Delta s = R \ln (t / \tau_0), \quad (3)$$

где t – время пребывания системы в нагруженном состоянии;

τ_0 – период тепловых колебаний атомов.

Применительно к процессу ППД выражение (3) будет иметь вид

$$\Delta s = R \ln (t_i / \tau_0), \quad (4)$$

где t_i – время пребывания локального элемента ПС в нагруженном состоянии, обусловленное числом циклов силового нагружения, которое может быть оценено из соотношения

$$t_i = t_{cp} i,$$

где t_{cp} – среднее расчетное время контакта индентора с обрабатываемой поверхностью.

Исследования, проведенные В.В. Петросовым, позволили получить зависимость t_{cp} по определению для материалов, склонных к упрочнению, в виде

$$t_{cp} = 0,21 \cdot 10^{-3} / v_y^{0,5}, \text{ с}, \quad (5)$$

где v_y – скорость соударения инвенторов.

В уравнении (2) подразумевается, что система совершает работу против сил внешнего давления, поэтому элементарная работа $p \Delta V$ здесь является положительной. В процессе ППД приращение внутренней энергии в ПС материала складывается из потенциальной энергии $e_{упр}$, обусловленной внешними и внутренними (остаточными) упругими напряжениями, и энергии $e_{пл}$, накопленной при пластической деформации, т.е. $p \Delta V = \Delta e_{упр} + \Delta e_{пл}$. Анализ исследований по оценке величины энергий, вносимых упругими силами и накопленными в результате пластической деформации, показывает, что первое слагаемое значительно меньше второго, поэтому энергией упругих напряжений при анализе повреждаемости и разрушения материалов часто пренебрегают.

При пластической деформации материала переданная системе механическая энергия равна мольной работе неупругих сил и по аналогии с [2] может быть представлена в виде

$$\Delta e_{пл} = V_m \cdot 10^{-6} \sigma \varepsilon_i, \quad (6)$$

где σ – эффективное значение напряжения в локальной зоне силового нагружения ПС, которое в условиях динамического ППД с учетом коэффициента стеснения c ($c = 2,8...3$) можно представить как произведение:

$$\sigma = c \sigma_s,$$

где σ_s – статический предел текучести;

ε_i – относительное значение деформации материала за время пребывания локального элемента ПС под воздействием силового нагружения;

V_m – мольный объем.

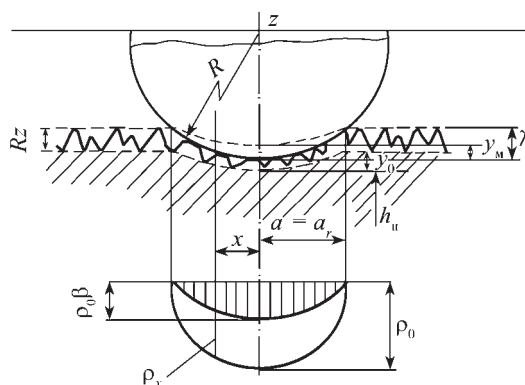
В большинстве работ, посвященных исследованию методов ППД для оценки деформационного упрочнения поверхностного слоя, используется соотношение

$$\varepsilon_i = d_i / D, \quad (7)$$

где d_i – диаметр пластического отпечатка, формируемого на поверхности в процессе ППД после i -кратного воздействия индентора;

D – диаметр индентора обрабатывающей среды.

Установлено, что между деформационными и энергетическими характеристиками процесса ППД существует тесная взаимная связь. Поэтому очень важно для корректной оценки изменения внутренней энергии при пластической



Расчетная схема контактного взаимодействия сферы с шероховатым упругопластическим пространством:

R – радиус индентора; Rz – параметр шероховатости; λ – глубина внедрения индентора; y_m – деформация микронеровностей по оси x ; y_0 – деформация основания микропрофиля по оси x ; ρ_x – удельное давление на расстоянии x ; β – коэффициент, учитывающий влияние характеристик шероховатости на изменение эпюры давления в зоне контакта; ρ_c – удельное давление в центре круговой площадки при соударении сферического индентора с гладкой поверхностью; h_n – глубина упрочненного слоя; a_p – радиус пластического отпечатка

деформации иметь научно обоснованные зависимости для расчета деформационных параметров, по которым оценивается эффективность процесса ППД, в качестве которого, в частности, выступает d_i .

В целях практического применения уравнения (6) и обоснования d_i в работах [3] проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований по анализу процесса деформирования ПС свободнодвижущимися инденторами. Показано, что формирование поверхностного слоя при обработке деталей динамическими методами ППД происходит в результате последовательного или стохастического нанесения пластических отпечатков, являющихся следствием контактного взаимодействия индентора (или инденторов) с обрабатываемой поверхностью с изменяющимся усилием деформации от нуля до максимального значения (см. рисунок).

Последовательность процесса развития пластической контактной деформации при соударении единичного индентора радиусом рабочей части R с упругопластическим материалом, обладающим известными физико-химическими свойствами и заданной исходной шероховатостью, описанной нормальным однородным случайным полем, состоит из трех этапов. Первый этап – пластически деформируются микронеровности и сплошная контактная площадка отсутствует; второй – соответствует образованию массовых микроучастков контакта; третий этап характеризуется началом деформации основания микропрофиля.

Допустив, что при дальнейшем развитии процесса контактного взаимодействия микронеровности и их основание деформируются одновременно, получено следующее аналитическое выражение для определения диаметра пластического отпечатка d_i в функции от технологических факторов контакта, формируемого при однократном (первоначальном) взаимодействии индентора с шероховатой поверхностью:

$$d_i = 2 \left[0,1 \left(\frac{P_{\text{д}}}{\sigma} \right)^2 + RzD \left(\frac{0,477}{b} \right)^{\frac{1}{v}} \left(\frac{P_{\text{д}}}{\sigma} \right)^{\frac{1}{v}} \right]^{0,25}, \quad (8)$$

где P_d – максимальная динамическая нагрузка, вызывающая возникновение пластической деформации в зоне контакта сферического индентора с гладкой поверхностью;

b, v – параметры опорной кривой микропрофиля обрабатываемой поверхности;

Rz – параметр шероховатости.

С учетом исследований [3] выражение для определения предельного размера пластического отпечатка, формируемого на поверхности в процессе ППД динамическими методами, можно представить в виде

$$d_i = 2n_{np} \left[0,1 \left(\frac{P_d}{\sigma} \right)^2 + RzD \left(\frac{0,477}{b} \right)^{\frac{1}{v}} \left(\frac{P_d}{\sigma} \right)^{\frac{1}{v}} \right]^{0,25}, \quad (9)$$

где n_{np} – коэффициент пропорциональности, учитывающий физико-механические характеристики обрабатываемого материала: $n_{np} = 1,3$ (для материалов с $HВ > 300$); $n_{np} = 1,4$ (для материалов с $300...500 HВ$); $n_{np} = 1,5$ (для материалов с $HВ < 150$).

При упрочняющей обработке динамическими методами ППД основным технологическим параметром является скорость соударения свободнодвижущихся инденторов с обрабатываемой поверхностью. В этой связи целесообразно в выражениях (8) и (9) P_d выразить в зависимости от v_y , используя соотношение

$$P_d = K_M v_y \frac{2n}{1+n}, \quad (10)$$

где $K_M = \left(\frac{M}{2\xi} \frac{1+n}{n} \right)^{\frac{n}{1+n}},$

M – масса инденторов;

ξ – коэффициент податливости материала;

n – коэффициент, характеризующий условия соударения.

На основе вышеприведенных результатов исследований в работе [3] установлена формула для определения минимальной скорости соударения, при которой начинается деформация основания микропрофиля и, как следствие, наблюдается эффект упрочнения поверхностного слоя:

$$v_{min} = \left\{ \frac{RzD}{K_M} \left[\frac{0,477 (\pi\sigma)^{v+1}}{b} \right]^{\frac{1}{v}} \frac{(x-1) \frac{(v-1)}{2v}}{2v} \right\}^{\frac{1+n}{2n}}. \quad (11)$$

Практическая значимость этой формулы состоит в том, что она позволяет, исходя из физико-механических характеристик обрабатываемого материала, параметров исходной шероховатости поверхности, выделить диапазоны скоростей отделочной и с преобладанием упрочняющей обработки динамическими ППД.

Таким образом, с учетом (7) можно записать

$$\Delta e_{пл} = V_m \cdot 10^{-6} \sigma d_i / D. \quad (12)$$

Как следует из фундаментального уравнения Гиббса (2), изменение внутренней энергии системы происходит под действием комплексного влияния различных термодинамических сил: тепловых, механических, химических, диффузионных, электромагнитных и др. Выше были рассмотрены только первые два основных фактора. Остальные факторы, сопровождающие процесс ППД и обусловленные его технологиче-

ским назначением, можно, по аналогии с рассуждениями, приведенными в работе [2], учесть обобщенно переменной $\Delta\psi$, имеющей размерность энергии и характеризующей вклад немеханических обратимых сил в преодолении энергетического барьера, которую можно выразить через обобщенные силы и обобщенные координаты или же посредством химических потенциалов и массовых долей компонентов, т.е.

$$\Delta\psi = \sum \bar{\mu}_i \Delta W_i. \quad (13)$$

Учитывая (4)–(13), условие деформируемости и упрочняемости элемента ПС материала в процессе ППД свободнодвижущимися инденторами можно записать в следующем виде:

$$E_o(0) + TR \ln(t_i / \tau_0) + V_m \cdot 10^{-6} \sigma d_i / D + \Delta\psi \leq E, \quad (14)$$

где $R = 0,008314$ кДж/(К·моль);

$T, K; E, \Delta\psi$, кДж/моль;

t_i, τ_0, d_i, D , мм;

σ , МПа.

Полученная на основе проведенного анализа энергетическая модель процесса ППД (14) учитывает вклад в рост внутренней энергии материала поверхностного слоя накопления энергии в процессе технологической обработки поверхности до ППД (первое слагаемое), повышения энергии за счет роста энтропии (второе слагаемое), увеличения энергии искажений кристаллической решетки в результате действия пластических деформаций (третье слагаемое), изменения внутренней энергии в результате физико-химических процессов, протекающих в поверхностном слое при взаимодействии с внешней химически активной средой (четвертое слагаемое).

Из условия (14) следует, что по своей физической сущности его левая часть, представленная в виде функции времени, является кинетической моделью повреждаемости материалов, которая при значениях $t_i < t_i^*$, где t_i^* – предельно-допустимое время пребывания локального элемента ПС в нагруженном состоянии, описывает процесс роста внутренней энергии системы. При достижении $t_i = t_i^*$ происходит разрушение локального элемента ПС, что является источником снижения эксплуатационных свойств поверхности детали.

В момент достижения равенства (14), когда длительность приложения нагрузки становится эквивалентной времени до разрушения локального элемента ПС, пластическая деформация становится критической для данного состояния материала $d_i = d_i^*$. Таким образом, уравнение для определения предельно-допустимого времени пребывания локального элемента ПС в нагруженном состоянии в процессе ППД можно представить в виде:

$$t_i^* = \tau_0 \exp \left(\frac{E^* - E_o(0) - V_m \cdot 10^{-6} \sigma d_i^* / D - \Delta\psi}{TR} \right).$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев В.А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. 156 с.
2. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.
3. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006. 183 с.



Эффективные покрытия деталей машин

Приведены результаты исследований эффективных покрытий для деталей машин.

Ключевые слова: покрытия, нанопокрывтия, трение, износ, инструмент, детали машин, тормоза, микро-твердость, температура, коэффициент трения, поверхностная энергия, испытания.

Results of researches of effective coverings for details of machines are resulted.

Keywords: coatings, nanocoatings, friction, wear, tool, machine parts, brakes, microhardness, temperature, friction coefficient, surface energy, test.

Введение

В настоящее время, в период развития рыночной экономики, особое внимание уделяется повышению интенсивности эксплуатации транспортных средств. Особенно остро эта проблема проявляется в области авиационного транспорта.

Однако регулярность полетов во многом определяется техническим состоянием оборудования летательных аппаратов. Одними из наиболее ответственных агрегатов являются шасси самолетов, в частности тормозные колеса.

Авиационные тормоза современных самолетов при посадке поглощают весьма высокую энергию, обусловленную их значительной массой и высокой посадочной скоростью. В связи с этим тормоза изготавливают в виде многодисковой конструкции, что обеспечивает достаточно высокое значение тормозного момента в период короткого послепосадочного тормозного пробега.

Тормоза тяжелых пассажирских и транспортных самолетов могут быть оборудованы пакетом, состоящим из 8 и более дисков.

В процессе торможения пакет дисков принудительно сжимается, при этом диски (как вращающиеся, так и невращающиеся) должны передвигаться в осевом направлении.

В этом случае шипы дисков или пазы, оборудованные металлическими накладками, перемещаются под воздействием контактной нагрузки вдоль соответствующих направляющих.

Таким образом, множественный набор фрикционных пар может создавать существенные осевые усилия, противодействующие рабочему передвижению дисков и равномерному сжатию всего пакета.

Указанные усилия в зонах контакта (до 30–50 пар) в сумме могут составлять общее суммарное усилие, достигающее 30...50 % от рабочего усилия сжатия пакета, но противоположного направления. В таком случае полезное распорное усилие может не достигать дисков, расположенных вблизи опорного фланца тормоза, а вследствие этого, эффективность работы тормоза может существенно снижаться.

В процессе перемещения пакета отдельные диски могут занимать "нештатное" положение, в частности перекашиваться, в таком случае стальная накладка будет опираться на направляющую не по плоскости, а "процарапывать" углом локальный участок ответной детали. На практике неоднократно отмечались случаи достаточно глубокой "выработки" направляющих, вплоть до образования лунки, что еще более затрудняет передвижение пакета дисков в осевом направлении.

Это явление особенно часто встречается в длинных многодисковых тормозах тяжелых самолетов, и в итоге может приводить к снижению эффективности тормозов либо, как крайний случай, выкатыванию машины за посадочную полосу.

Постановка задачи

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость поиска путей предотвращения "застревания" дисков в процессе торможения.

Эта проблема может решаться многими путями, например:

- применением миниатюрных игольчатых подшипников на одной из сопрягаемых деталей;
- подбором специальных материалов для трущихся пар;
- применением специальных смазок и др.

Одним из наиболее эффективных средств решения проблемы является снижение коэффициента трения в рабочей паре шип (паз)–направляющая за счет нанесения покрытий на поверхности сопрягаемых деталей (или на одну из них) специальных составов, существенно снижающих коэффициент трения пары.

Однако решение этой проблемы связано с определенными и достаточно серьезными трудностями, поскольку разработчики тормозных устройств выдвигают жесткие требования к такого рода покрытиям. Они должны иметь:

- хорошую адгезию с основным материалом;
- равномерное распределение по длине направляющей;
- обеспечивать длительность сохранения антифрикционных свойств в течение длительного периода эксплуатации;
- противостоять периодическому воздействию высоких температур.

В целом эта проблема может быть решена за счет подбора соответствующих материалов, отработки технологии нанесения покрытий и создания специализированного оборудования для технологического процесса покрытия достаточно сложных по конфигурации деталей.

Процесс обработки должен предусматривать периодический контроль сохранения и эффективности технических характеристик поверхностных слоев деталей, подвергнутых покрытию.

К таким средствам могут быть отнесены методы замера микротвердости, испытания на моделирующих установках, воспроизводящих условия трения пары в длительном режиме, и т.п.

Методы проведения исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

По методикам модельных испытаний на машинах трения ПРУ-2 и УМТ-1С были испытаны образцы легированных сталей 50ХФА, 12ХН3А, 10Х18Н9БЛ с покрытиями, нанесенными по двум технологиям: вакуумным напылением и электроэрозионным синтезом и без них. Трение и износ осуществлялись на ПРУ-2 при возвратно-поступательном движении по схеме ролик–пластина при нормальной силе 500 Н, скорости скольжения 0,166 м/с и на УМТ-1 с исполь-

зованием кольцевых образцов при нормальной силе 450 Н, скорости скольжения 5 м/с.

В лаборатории вакуумных покрытий ИМАШ РАН было проведено напыление двухслойных покрытий – нитрид молибдена + молибден ($\text{Mo}_2\text{N} + \text{Mo}$) на образцы из легированных сталей 50ХФА, 12ХН3А. Общая толщина покрытия составляла ~14 мкм.

Методом электроэрозионного синтеза покрытие Ti+C наносили на образцы из сталей 50ХФА, 12ХН3А, 10Х18Н9БЛ в Московском автомеханическом институте.

С помощью прибора МТИ-3М исследовали микротвердость образцов из легированных сталей без покрытия, с покрытием до и после испытания их на машине трения ПРУ-2. Было проведено исследование микротвердости по глубине отпечатка трех марок сталей (№ 1 – 50ХФА, № 2 – 12ХН3А, № 3 – 10Х18Н9БЛ) и трех типов покрытий на них: $\text{Mo}_2\text{N} + \text{Mo}$ (7 мкм Mo + 7 мкм Mo_2N), Ti + C и $\text{TiB}_2 + \text{CrB}_2$. Регистрация диаграмм упругопластической деформации производилась на двухкоординатном самописце в координатах "сила F – глубина отпечатка h ".

Отпечатки наносили сначала на стальную исходную поверхность, далее на покрытие, нанесенное на эту поверхность и, наконец, на изношенную часть поверхности после испытания на машине трения. Число отпечатков (диаграмм) на каждом образце составляло не менее 21.

Наблюдалось повышение микротвердости дорожки трения после износа "чистых" поверхностей: у стали 50ХФА от 2620 до 5020 МПа, у стали 12ХН3А от 2940 до 5550. По всей видимости, подобное повышение связано с упрочнением, возникающим в контакте образца с контртелом в процессе испытания на машине трения. Микротвердость изношенных поверхностей дорожек трения существенно выше по сравнению с исходным ее состоянием. Микротвердость молибденового покрытия составила 10 550 и 10 660 МПа, соответственно, для вышеприведенных сталей. Это естественно, поскольку в данном случае действует эффект влияния подложки, на которую наносили покрытие, т.е. молибден наносили на нитрид молибдена (Mo_2N), микротвердость которого составила от 9000 до 13 000 МПа.

Наряду с повышенной микротвердостью наблюдалось увеличение интервала разброса: для стали 50ХФА $\Delta\text{HNV}_{120} = 9130$ МПа (8410...17 540 МПа) и для стали 12ХН3А $\Delta\text{HNV}_{120} = 7120$ МПа (8180...15 300 МПа).

Практически у всех диаграмм отсутствует эффект ярко выраженного хрупкого разрушения, но заметна потеря устойчивости покрытия. Координата усредненной из 21 диаграмм точки устойчивости соответствует $h = 1,901$ мкм при $F = 108$ сН.

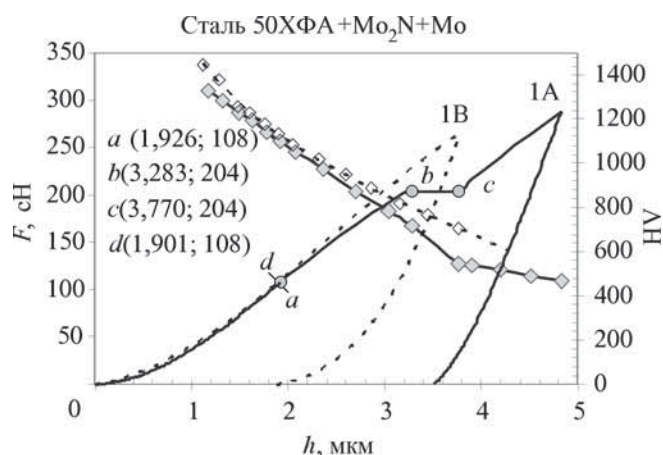


Рис. 1. Диаграмма деформации и микротвердости молибденового покрытия на сталях 50XФА+Mo₂N (7 мкм)+Mo (7 мкм), 50XФА+Mo₂N+Mo: a, b, c, d – точки перегиба

Таким образом, на границе между нитрид-молибденовым и молибденовым покрытиями возникает слабая механическая связь. В результате, при воздействии на Mo-покрытие внешних сил, эта связь нарушается, что приводит к зарождению трещин и, в итоге – хрупкому разрушению поверхностного слоя.

Предполагалось, что этот эффект должен проявляться на 7-микронном уровне Mo-покрытия, однако зарождение трещин и локальное разрушение отпечатка начинается на глубине с 3 мкм. Причина, на наш взгляд, заключается в потере устойчивости механического состояния Mo-покрытия на стадии внедрения индентора в ее поверхность. Критерием устойчивости к силам F_{cr} является точка перелома на участке диаграммы "Нагружение". Именно, начиная с этой точки ($F_{cr} \cong 84 \dots 108$ сН), при индентировании заметно проявляется пластическая деформация (на диаграмме перелом кривой выпуклостью вверх). В итоге это и приводит к образованию трещин и дальнейшему хрупкому разрушению отпечатка. Естественно, с ростом размера отпечатка нарушается и плавность хода зависимости микротвердости HV от глубины отпечатка h (рис. 1).

Визуальная оценка дорожки трения после испытания на машине трения показала наличие следов покрытия в виде небольших пятен, разбросанных по большей части изношенной поверхности.

Кинетическую микротвердость Mo-покрытия можно считать до точки перелома по формуле

$$HV = 37,84 F / h^2 \text{ при } F \leq F_{cr} \text{ и } h \leq h_{cr},$$

где F – сила;

F_{cr} – сила в точке перелома;

h – глубина внедрения;

h_{cr} – глубина в точке перелома.

Учитывая проявление неспособности внешнего Mo-покрытия к устойчивости в области микромеханического состояния, следует ожидать его полного износа в области больших контактных нагрузок при трении, что и подтвердилось при испытаниях на машине трения ПРУ-2.

В паре трения (50XФА + Mo₂N) + 10X18H9БЛ с первых секунд испытания наблюдается схватывание и связанный с ним большой разброс значений коэффициента трения, его нестабильность в течение всего времени испытания, так при $t = 25$ с $f_{max} = 0,472$, а $f_{min} = 0,108$.

Среди сопряженных пар трения, составленных и испытанных из сталей 50XФА, 12ХН3А, 10Х18Н9БЛ без покрытий, долговечной (время до начала схватывания) и с весьма нестабильным коэффициентом трения, величина которого колеблется от 0,1 до 0,25, является пара 50XФА + 10Х18Н9БЛ.

Сравнительный анализ зависимостей средних значений коэффициента трения от времени испытаний на машине ПРУ-2, полученных при возвратно-поступательном перемещении образца из стали 10Х18Н9БЛ относительно пластины из стали 12ХН3А с титаноуглеродным покрытием, TiC и относительно стали 12ХН3А без покрытия, показал, что покрытие титан–углерод, нанесенное (методом электроэрозионного синтеза) на сталь 12ХН3А, приводит к стабилизации коэффициента трения (0,2) за счет исключения схватывания, а долговечность (время до начала схватывания) пары трения с покрытием в 5 раз превышает долговечность этой же пары, испытанной без покрытия (рис. 2).

Установлено, что при трении по стали 10Х18Н9БЛ титаноуглеродное покрытие в 5,5 раз превосходит по долговечности двухслойное (Mo₂N + Mo) покрытие, толщиной 15 мкм, полученное на стали 12ХН3А вакуумным напылением. При этом, с учетом разброса, средний коэффициент трения второго покрытия пре-

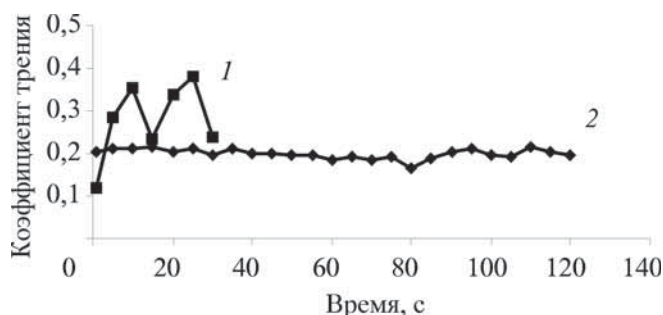


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения f от времени испытания:

1 – пара трения 12ХН3А+10Х18Н9БЛ; 2 – пара трения (12ХН3А+TiC)+10Х18Н9БЛ

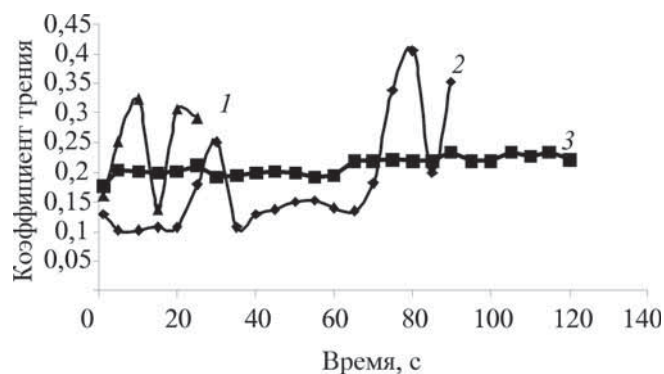


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения f от времени испытания для пар трения: 1 – $(Mo_2N+Mo)+10X18H9BL$; 2 – $50XFA+10X18H9BL$; 3 – $(50XFA+TiC)+10X18H9BL$

вышает коэффициент трения первого в 2 раза (рис. 3).

Другие испытания трением на установке УМТ-1 (кольцо–кольцо) титаноуглеродного покрытия на стали 12ХН3А и двухслойного молибденового покрытия на стали 10Х18Н9БЛ показали, что коэффициент трения вначале, в течение 5 мин, возрос с 0,05 до 0,1 и стабилизировался до конца испытаний. Молибденовое покрытие за время испытания полностью истерлось, и стала изнашиваться стальная подложка под ним, в то время как у титаноуглеродного покрытия за это время наблюдался незначительный износ.

Проведенные исследования позволяют рекомендовать для слабого звена из сопряженных шлицевых пар многодисковых тормозов самолета и шлицевых сопряжений деталей машин титаноуглеродное покрытие, которое может быть нанесено методом электроэрозионного синтеза.

Покрытие, обеспечивающее абразивную износостойкость металлов. При применении различных способов химико-термической обработки – цементации и азотирования – можно получить недостаточно высокую твердость, а следовательно, и износостойкость диффузионного слоя. Борирование также увеличивает твердость, но слой становится более хрупким, что отрицательно сказывается на износостойкости. Для повышения абразивной износостойкости авторы рекомендуют проводить многокомпонентное насыщение бором, кремнием и углеродом (а.с. 1650771 СССР).

Износостойкие покрытия были получены диффузионным насыщением образцов из стали 45 в смеси порошков бора, кремния и углерода при температуре 950...1050 °С в течение 5...10 ч. Насыщение проводили в контейнере, герметизированном жидким затвором из силиката натрия. Путем изменения состава насыщающей смеси на основе планирования эксперимента и поиска максимума определили оптимальное соотно-

шение элементов, % мас.: 30В; 50Si; 20С. Микротвердость покрытия этого состава 3000HV. Толщина покрытий, зависящая от времени насыщения, составила 250...400 мкм.

Для оценки энергетического состояния покрытий разного состава применен метод исследования поверхностной энергии металлических материалов. Его отличием от метода измерений микротвердости является учет изменения геометрии зоны контакта, структуры, напряжений в поверхностных слоях, наличия адсорбированных пленок, что позволяет получить объективную информацию о состоянии поверхности. Установлено, что при раздельном учете компонентов насыщающей смеси с увеличением массовой доли углерода, бора и кремния величина поверхностной энергии возрастает до определенного значения. Последующее увеличение количества насыщающего элемента уменьшает поверхностную энергию. Ее максимум соответствует максимуму микротвердости. Для выяснения влияния химического состава смеси на износостойкость диффузионных покрытий на установке проведены испытания покрытий на изнашивание о закрепленный абразив – электрокорунд. Цилиндрический образец сплошного сечения диаметром 10 мм и длиной 35 мм перемещался в радиальном направлении по поверхности вращающегося абразивного круга.

В этой серии экспериментов анализировали влияние на износостойкость покрытий поверхностной энергии, поскольку в отличие от микротвердости ее изменение в большей мере отражает стойкость покрытия к воздействию абразивных частиц при их движении по изнашиваемой поверхности. Результаты этих экспериментов показали, что износостойкость полученных покрытий возрастает пропорционально микротвердости и поверхностной энергии (рис. 4, 5). Рентгеновские исследования, проведенные на ди-

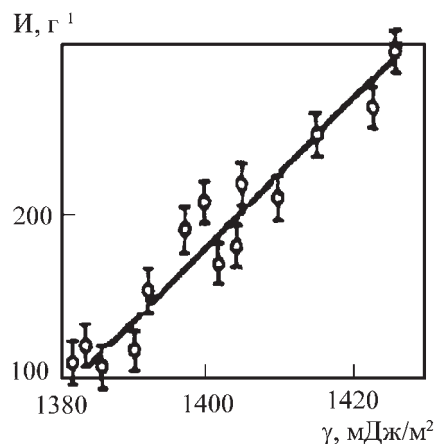


Рис. 4. Диаграмма износостойкости и поверхностной энергии покрытия

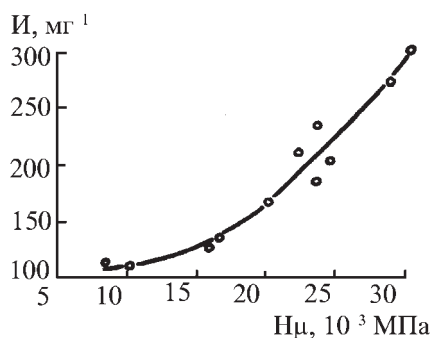


Рис. 5. Зависимость износостойкости покрытия от микротвердости

фрактометре "ДРОН-2" в кобальтовом излучении, показали наличие в диффузионном слое соединения типа $B_{12}(C, Si, B)_3$ с гранецентрированной кубической решеткой. В нескольких образцах образовались фазы B_4 , Si , $B_{23}C$, однако некоторое изменение периода кристаллической решетки этих фаз указывает на взаимную растворимость бора, кремния и углерода в этих соединениях.

Выводы

В результате проведения сравнительных исследований установлено (рис. 6), что износостойкость по-

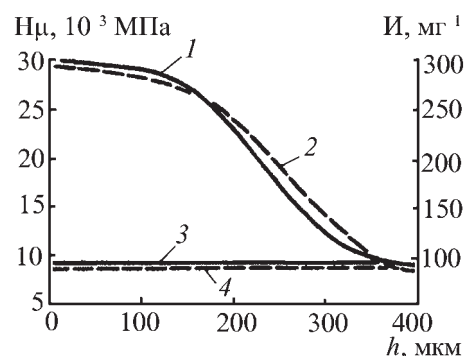


Рис. 6. Микротвердость (1) и износостойкость (2) покрытия оптимального состава в сравнении с микротвердостью (3) и износостойкостью (4) закаленной стали 45

лученных покрытий при абразивном изнашивании в 3,8 и 1,5 раза выше, чем износостойкость соответственно закаленной стали 45 и покрытия бором, поскольку новое покрытие более пластично, чем борированный слой.

Таким образом, проведенные исследования позволили рекомендовать боркремнеуглеродное покрытие как наиболее износостойкое при абразивном изнашивании деталей машин и имеющее максимальные значения микротвердости и поверхностной энергии.

УДК 539.3

Л.Ю. Фроленкова, В.С. Шоркин (Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел)
E-mail: VShorkin@yandex.ru

Теоретическая оценка адгезионных свойств покрытий режущего инструмента

Для повышения прочности, надежности, долговечности режущего инструмента на его режущую часть наносят различные износостойкие покрытия. При этом, в условиях резания необходимо обеспечить высокую степень адгезии покрытия к этой части инструмента. В работе представлены теоретические рассуждения, позволяющие выбрать режимы работы инструмента, сохраняющие целостность системы "покрытие–основа".

Ключевые слова: износостойкое покрытие, энергия адгезии, адгезионная прочность, микрополярная теория упругости, касательное напряжение, сплошная упругая среда.

It put various wearing qualities coverings on cutting part for increase of durability, wearing qualities, longevity of the cutting tool. Thus, in the conditions of cutting, it is necessary to provide high degree of adhesion of a covering to this part of the tool. In work the theoretical reasonings, which allowed to choose modes tool work keeping integrity of system "covering–basis", are presented.

Keywords: coverings, energy of adhesion, adhesive durability, the micropolar theory of elasticity, shearing stress, the continuous elastic environment.

Введение

В процессе работы режущего инструмента основная нагрузка приходится на его рабочую поверхность (режущую часть), приводящая в итоге к ее частично-

му или полному износу. Среди различных технологических способов, позволяющих повысить прочность, долговечность, надежность режущего инструмента, наиболее эффективным и перспективным является

нанесение на его режущую часть износостойкого покрытия со специально подобранными свойствами. Для этого необходимо обеспечить высокую степень адгезии покрытия к режущей части инструмента. В связи с этим теоретическое исследование адгезионных свойств материалов покрытия и основы, предсказание на их основе, для конкретных пар материалов, оценочных значений характеристик прочности адгезионного соединения является актуальными.

В работах [1–3] рассмотрены вопросы и приведены расчетные формулы для вычисления энергии и сил адгезии, несплошности адгезионного контакта, зависимости их от температуры.

Для оценки прочности адгезионного соединения при сдвиге покрытия относительно основы применяется условие равенства энергии упругих деформаций в сдвиговом покрытии энергии его адгезии [4]. Зная энергию адгезии и достаточно точно выразив энергию упругих деформаций через действующие классические напряжения, можно оценить их предельную допустимую величину, не приводящую к отрыву или срезу покрытия. В работе показано, что классический подход, основанный на этой идее, может привести к ошибочным результатам. Поэтому для описания упругих свойств покрытия предложено использовать микрополярную теорию упругости.

Теоретические положения

Простейшее выражение для определения максимально допустимого касательного напряжения τ_{\max} , не приводящего к отрыву пленки от основы, построенное на классическом представлении о связи напряжений и деформаций, имеет вид

$$\frac{h \tau_{\max}^2}{2\mu} = F_a, \quad (1)$$

где h – толщина покрытия;

μ – параметр Ламэ;

F_a – энергия адгезии, вычисленная, например, с помощью формулы [1]:

$$F_a = \frac{W_{p(1)} W_{p(2)} (k_{(1)} + k_{(2)})^2}{W_{p(1)} k_{(2)}^2 + W_{p(2)} k_{(1)}^2}; \quad k_j = \frac{\nu_{(j)}}{1 - \nu_{(j)}}, \quad (2)$$

где $\nu_{(j)}$ – коэффициент Пуассона для материала тела. Формула совпадает с известной формулой [5] при упругом условии $\nu_{(j)} = 0,25$.

В данной работе предлагается уточнение правой части формулы (1) на основании следующих соображений.

Поверхность металлической основы обладает ориентирующим влиянием из-за наличия приповерхно-

стного электрического поля с напряженностью $E \sim 10^9$ В/м – для каждого конкретного материала эта величина может быть оценена физическими методами [6, 7]. При соединении материала покрытия с основой его атомы или молекулы продолжают атомную решетку, структуру основы. При этом они приобретают ориентацию, не свойственную их ориентации в структуре материала вдали от поверхности адгезионного контакта. Это равносильно тому, что те же атомы оказываются повернутыми ориентирующим полем материала основы распределенными вдоль поверхности контакта моментами на определенный угол ω , совершающими при этом работу против внутренних сил и моментов материала покрытия. Из-за этого в этом материале, даже в отсутствии внешних воздействий в поверхностном слое, развивается напряженное состояние, концентрируется определенная энергия Δ упругих деформаций, которая не учтена при построении выражения (1). С учетом этих причин выражение (1) должно приобрести вид

$$\frac{h \tau_{\max}^2}{2\mu} + \Delta = F_a. \quad (3)$$

Тогда при оценке допустимого касательного напряжения τ_{\max} оказывается справедливой оценка

$$\tau_{\max}^* = \sqrt{\frac{2\mu (F_a - \Delta)}{h}} < \tau_{\max} = \sqrt{\frac{2\mu F_a}{h}}. \quad (4)$$

Это неравенство свидетельствует о том, что расчет, основанный на классических представлениях об упругих свойствах поверхностного слоя материала, приводит к завышенным значениям допустимых касательных напряжений.

Для оценки величин μ и Δ предлагается использовать микрополярную теорию упругости [8]. В ее основе лежит представление о том, что частица сплошной упругой среды обладает не тремя, как в классическом случае, а шестью степенями свободы. Соответственно, для описания ее движения используются вектор перемещения $u = u(r)$ и вектор малого угла поворота $\omega(r)$, где r – радиус-вектор центра масс частицы.

Выражение для вычисления объемной плотности энергии упругих деформаций w согласно этой модели можно представить в виде [9]

$$w = \frac{\mu + \alpha}{2} \gamma_{ij} \gamma_{ij} + \frac{\mu - \alpha}{2} \gamma_{ij} \gamma_{ji} + \frac{\lambda}{2} \gamma_{kk} \gamma_{nn} + \frac{\gamma + \varepsilon}{2} \kappa_{ij} \kappa_{ji} + \frac{\beta}{2} \kappa_{kk} \kappa_{nn}, \quad (5)$$

где λ, μ – классические константы, коэффициенты Ламэ;

$\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$ – дополнительные константы, нуждающиеся в экспериментальном или теоретическом (на основании физических соображений) определении;

$\gamma_{ij} = u_{ij} - \varepsilon_{kji} \omega_k$; $\kappa_{ij} = \omega_{ij}$ – тензоры деформаций материала (ε_{kji} – трехиндексный символ Леви–Чивита; индекс после запятой означает дифференцирование по координате с соответствующим номером; u_i, ω_i – компоненты векторов u, ω в ортонормированном базисе e_i декартовой системы координат x_i). В выражении (5) осуществляется суммирование по повторяющемуся индексу.

Учитывая, что внутренние напряжения σ_{ij} и моменты μ_{ij} при постоянной температуре выражаются через тензоры деформаций с помощью соотношений

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial w}{\partial \gamma_{ij}} = 2\mu \gamma_{(ij)} + 2\alpha \gamma_{\langle ij \rangle} + \lambda \gamma_{kk} \delta_{ij}, \quad (6)$$

$$\mu_{ij} = \frac{\partial w}{\partial \kappa_{ij}} = 2\gamma \kappa_{(ij)} + 2\varepsilon \kappa_{\langle ij \rangle} + \beta \kappa_{kk} \delta_{ij}, \quad (7)$$

для объемной плотности энергии упругих деформаций w можно получить выражение

$$w = \mu \sigma_{(ij)} \sigma_{(ij)} + \alpha^* \sigma_{\langle ij \rangle} \sigma_{\langle ij \rangle} + \frac{\lambda^*}{2} \sigma_{kk} \sigma_{nn} + \gamma^* \mu_{(ij)} \mu_{(ij)} + \varepsilon^* \mu_{\langle ij \rangle} \mu_{\langle ij \rangle} + \frac{\beta^*}{2} \mu_{kk} \mu_{nn}. \quad (8)$$

В выражениях (6)–(8) круглые скобки означают симметричную часть, а угловые – антисимметричную часть соответствующего тензора; δ_{ij} – символ Кронекера;

$$\mu^* = \frac{1}{4\mu}; \quad \alpha^* = \frac{1}{4\alpha}; \quad \gamma^* = \frac{1}{4\gamma}; \quad \varepsilon^* = \frac{1}{4\varepsilon}; \quad (9)$$

$$\lambda^* = -\frac{\lambda}{6\mu K}; \quad \beta^* = -\frac{\beta}{6\gamma\Omega}; \quad K = \lambda + \frac{2}{3}\mu; \quad (10)$$

$$\Omega = \beta + \frac{2}{3}\gamma.$$

В выражении (8) первое слагаемое полностью соответствует классическим представлениям об объемной плотности энергии упругих деформаций. Далее, при оценке роли суммы остальных слагаемых, полагаем, что напряжения $\sigma_{(ij)}$ совпадают со своими классическими значениями.

В случае плоского сдвига, представляющего интерес при рассмотрении затронутой в данной работе проблемы, векторы перемещений и микровращений приобретают вид

$$u = (u_1(x_2), 0, 0); \quad \omega = (0, 0, \omega_3(x_2)). \quad (11)$$

При этом ось Ox_1 направлена вдоль плоскости контакта покрытия и основы в направлении действия параллельного ей касательного напряжения $\tau = \tau_1$. Ось Ox_2 направлена перпендикулярно плоскости контакта. Сдвиг происходит в плоскости x_1Ox_2 . В результате в рассмотрении оказываются лишь следующие величины:

$$\begin{aligned} \gamma_{12} &= u_{1,2} + \omega_3; & \kappa_{32} &= \omega_{3,2}; & \gamma_{(12)} &= \frac{1}{2}u_{1,2}; \\ \gamma_{\langle 12 \rangle} &= \frac{1}{2}u_{1,2} + \omega_3; & \kappa_{(32)} &= \frac{1}{2}\omega_{3,2}; & \kappa_{\langle 23 \rangle} &= \frac{1}{2}\omega_{3,2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнения равновесия в напряжениях в рамках рассматриваемой модели среды имеют в общем случае вид

$$\sigma_{ij,i} = 0; \quad \mu_{ij,i} + \varepsilon_{ijk} \sigma_{ik} = 0. \quad (13)$$

В рассматриваемом плоском случае чистого сдвига на основании (13), записав при этом второе уравнение в перемещениях, можно получить

$$\sigma_{21,2} = 0; \quad (\gamma + \varepsilon) \omega_{3,22} + 2\alpha u_{1,2} - 4\alpha \omega_3 = 0. \quad (14)$$

Краевыми условиями для них являются соотношения

$$\sigma_{21}(h) = \tau; \quad \mu_{23}(h) = 0; \quad u_1(0) = 0; \quad \omega_3(0) = \omega^0. \quad (15)$$

Первое уравнение системы (14) с учетом первого из краевых условий (15) дает основание считать, что, как и при использовании классической модели линейно-упругой среды, в рамках рассматриваемой модели касательное напряжение, сдвигающее покрытие, распределено по его толщине h равномерно и равно действующему сдвиговому напряжению на поверхности

$$\sigma_{21} = \tau. \quad (16)$$

Этот результат, а также соотношения (6) и (7), связывающие внутренние напряжения и деформации, и последнее из соотношений (15) позволяют сделать вывод о том, что распределения перемещений $u_1(x_2)$ и поворотов $\omega_3(x_2)$, а также их производных по толщине покрытия отличны от нуля. На основании (8) и (9) с учетом (7) этот вывод приводит к утверждению о том, что энергию упругих деформаций W , сосредоточенную под единицей площади поверхности покрытия, можно записать в виде

$$\begin{aligned} W &= \frac{h\tau^2}{2\mu} + \frac{\alpha}{2} \int_0^h \left(\frac{1}{2}u_{1,2}(x_2) + \omega_3(x_2) \right)^2 dx_2 + \\ &+ \frac{\gamma + \varepsilon}{2} \int_0^h (\omega_{3,2}(x_2))^2 dx_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Сравнивая его с левой частью равенства (3), можно убедиться, что

$$\Delta = \frac{\alpha}{2} \int_0^h \left(\frac{1}{2} u_{1,2}(x_2) + \omega_3(x_2) \right)^2 dx_2 + \frac{\gamma + \varepsilon}{2} \int_0^h (\omega_{3,2}(x_2))^2 dx_2. \quad (18)$$

Видно, что классическая оценка энергии адгезии меньше по сравнению с той, которую можно получить, приравняв (17) величине F_a . Очевидно, при достаточно больших значениях α и $\gamma + \varepsilon$ классическими оценками τ_{\max} пользоваться нельзя.

В работе [10] для значений напряженности $E \sim 10^9$ В/м сделаны оценки: $\alpha \approx 10^8$ н/м²; $\gamma + \varepsilon \approx 10^6$ Дж/м. Для покрытия с толщиной $h \approx 10^{-4}$ м, $u_1 \approx 10^{-6}$ м, $\omega \approx 10^{-3}$, рад значение величины Δ может оказаться соизмеримым с величиной F_a , имеющей порядок 1. (При оценке величины Δ учитывалось, что подинтегральная функция имеет порядок своего среднего значения, равного полусумме ее крайних значений, а производная – отношения среднего значения к толщине покрытия.) Поэтому расчет τ_{\max} на основании классических представлений может привести к значительным погрешностям. Это подтверждает необходимость учета изложенных выше взглядов при расчете режимов резания инструментами с покрытиями.

Заключение

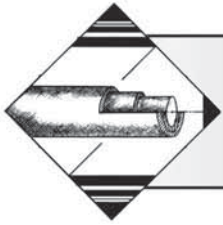
В работе представлено теоретическое обоснование необходимости использования при оценке величины максимально допустимых касательных напряжений в покрытиях режущих инструментов, дано представление об упругих свойствах материалов, применяемых микрополярной теорией упругости. Приведенные числовые оценки свидетельствуют о необходимости более точного физического и теоретического, на основе микрополярной теории упругости, анализа рассмот-

ренной в работе ситуации и выработки необходимых для практических приложений рекомендаций.

Работа проведена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственное задание № 2.479.2011).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Adhesion** energy estimation of some composite materials. I.V. Vitcovsky, A.N. Konev, V.S. Shorkin, N.D. Kzaev, A.E. Rusanov, V.M. Khoroshikh and S.L. Leonov // *Plasma Devices and Operations*. 2003. V. 11(2). P. 81–87.
2. **Шоркин В.С., Фроленкова Л.Ю., Азаров А.С.** Учет влияния тройного взаимодействия частиц среды на поверхностные и адгезионные свойства твердых тел // *Материаловедение*. 2011. № 2. С. 2–7.
3. **Теоретическая** оценка несплошности адгезионного контакта элементов жидкометаллического бланкета термоядерного реактора / И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин, С.И. Якушина // *Журнал технической физики*. 2007. Т. 77. Вып. 6. С.28–33.
4. **Шоркин В.С., Батищев А.Н., Кузнецов Ю.А.** Анализ напряженного состояния износостойких покрытий восстановленных деталей // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2003. № 3. С. 28–30.
5. **Зимон А.Д.** Адгезия пленок и покрытий. М.: Химия, 1977. 352 с.
6. **Партенский М.Б.** Самосогласованная электронная теория металлической поверхности // *Успехи физических наук*. 1979. Т. 128. Вып. 1. С. 69–106.
7. **Вакилов А.Н., Мамонова М.В., Прудников В.В.** Адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма // *Физика твердого тела*. 1997. Т. 39. № 6. С. 964–967.
8. **Кувшинский Е.В., Аэро Э.Л.** Континуальная теория асимметричной упругости. Учет внутреннего вращения // *ФТТ*. 1963. Т. 5. Вып. 9. С. 251–264.
9. **Новацкий В.** Теория упругости. М.: Мир, 1975. 872 с.
10. **Влияние** электростатического поля на механические свойства диэлектрика / С.Н. Ромашин, А.В. Седов, М.В. Хорошилова, В.С. Шоркин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 1(291). С. 3–9.



Операционные возможности метода вибрационной обработки при комплексном энергетическом воздействии на технологическую систему

Рассмотрены комплексные изменения в поверхностном слое деталей, получаемые вибрационной обработкой под комбинированным энергетическим воздействием.

Ключевые слова: *вибрационная обработка, энергетическое воздействие, качество поверхности.*

The general purpose of this work is based on the complex change in superficial layer properties of articles obtained by vibratory finishing under composite energy influence.

Keywords: *vibration processing, energy influence, quality of surface.*

Постановка задачи исследования

Вибрационная обработка (ВиО) относится к методам металлообработки свободными гранулированными средами с заданными свойствами. Она позволяет воздействовать на обрабатываемую поверхность механическими ударами гранул рабочей среды и низкочастотными колебаниями заданной интенсивности (в диапазоне частот 15...50 Гц). Детали свободно загружаются или устанавливаются в рабочую камеру, совершающую гармонические колебания на упругих элементах под действием возмущающей силы, создаваемой вращающимися дебалансами. В рабочую камеру помещается также обрабатывающая среда и подается технологическая жидкость.

Под действием колебаний стенок камеры частицы обрабатывающей среды и детали совершают "быстрые" периодические перемещения в возникающих динамических зазорах и "медленное" циркуляционное движение за счет эффекта вибротранспортирования. Первое движение обеспечивает ударное воздействие частиц рабочей среды на поверхность деталей, что ведет к поверхностно-пластическому деформированию материала детали, его диспергированию и микрорезанию, а второе – равномерное распределение следов динамического воздействия по обрабатываемой поверхности с получением однородности ее свойств и показателей качества. Технологическая жидкость совершает циркуляционное и пульсирую-

щее движение в зазорах между частицами рабочей среды. Особенности кинематики этих движений, а также состав и свойства рабочих сред и технологических жидкостей во многом определяют сущность и технологические возможности вибрационной обработки, которые широко апробированы – от доделочных-зачистных до отделочно-упрочняющих операций [1, 2].

На основе изучения основных закономерностей комбинированных методов металлообработки разработан ряд схем подвода дополнительной рабочей энергии различной природы в зону контакта рабочей среды с деталями при вибрационной обработке. Данные разработки являются основой для комплексного повышения качества поверхности обрабатываемых деталей и создания конструкций вибрационных станков и дополнительных устройств к ним, позволяющих существенно расширить технологические возможности вибрационной обработки.

Влияние дополнительных источников энергии на повышение эффективности технологических систем ВиО

Применение повышенных температур (до 120...400 °С) в процессе ВиО позволяет осуществлять этим методом ряд новых технологических операций. *Вибрационная механотермическая обработка (ВиМТО)*, осуществляемая при температуре

0,2...0,5 $T_{пл}$ материала обрабатываемых деталей, позволяет интенсифицировать упрочняющий эффект вибрационной обработки за счет совмещения вибронаклепа с низкотемпературным отпуском и старением ряда сплавов, а также наносить в процессе обработки металлические антикоррозионные покрытия (цинк, алюминий), неметаллические антифрикционные покрытия (графит, дисульфид молибдена) и другие материалы.

Использование энергии химических реакций *вибрационной механохимической обработки* (ВиМХО) способствует более интенсивному протеканию физико-химических процессов на поверхности обрабатываемой детали.

Ввод в рабочую камеру жидких химических компонентов для активации механохимических реакций нанесения металлических и оксидных пленок, интенсификации зачистных, отделочных, упрочняющих и других финишных операций осуществляется различными способами. Разработанные технологии механохимической обработки позволяют получать декоративные поверхности деталей из черных и цветных металлов с низкой шероховатостью и высокой отражательной способностью, оксидировать детали из алюминия и его сплавов, покрывать цинком стальные поверхности.

Интересные возможности для интенсификации ВиО открывает использование энергии электрического поля, которое в зависимости от своих параметров вызывает электрохимические или электроэрозионные процессы в зоне контакта рабочей среды с поверхностью обрабатываемых деталей.

Виброабразивная электрохимическая обработка (ВиАЭХО) характеризуется совмещением во времени и в пространстве механического разрушения и электрохимического растворения поверхностного слоя материала детали. В качестве рабочей среды используются гранулы абразивного наполнителя – бой шлифовальных кругов, фарфора, керамики, специальных абразивов для галтовки и вибрационной обработки. Процесс осуществляется с непрерывным прокачиванием электролита, в качестве которого используются растворы на основе нейтральных солей. Наложение электрохимического воздействия на процесс ВиО повышает интенсивность съема материала в 6–10 раз.

Для получения качественной поверхности при ВиАЭХО особое значение имеет соотношение механической и электрохимической составляющих съема материала. Образующиеся при анодном растворении пассивные пленки обуславливают преимущественное растворение микровыступов и сглаживание микронеровностей.

Вибрационная электрофизическая обработка (ВиЭФО) использует совокупность процессов электрической эрозии, ионного и контактного массопереноса, диффузии и наплавки материала рабочей среды на обрабатываемую поверхность. Особенностью ее является использование токопроводящих рабочих сред. Токопроводящие гранулы рабочей среды под воздействием вибрации периодически контактируют с обрабатываемой поверхностью, инициируя искро-дуговые разряды в микрозазорах, приводящие к преимущественному разрушению материала гранул (анод) и переносу его на деталь (катод) с образованием легированного слоя. В качестве легирующих элементов могут быть использованы также порошковые наполнители, что существенно расширяет диапазон получаемых свойств поверхности. В условиях высоких температур, скоростей нагрева и охлаждения поверхностные слои детали претерпевают физико-химические и структурные превращения, сопровождающиеся изменением исходных свойств материала детали.

Ниже приводятся результаты исследования некоторых операционных возможностей метода ВиО, дополненного комбинированным энергетическим воздействием на его технологическую систему. На рис. 1 показан микрошлиф цинкового покрытия, полученного в процессе ВиМТО при температуре 250 °С, что существенно ниже, чем температура диффузионного

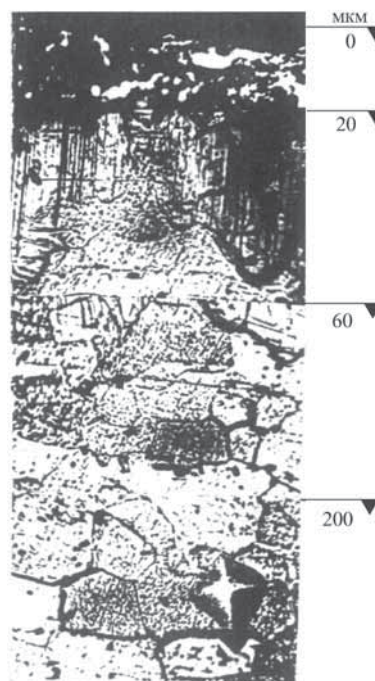


Рис. 1. Микроструктура цинкового покрытия, нанесенного методом ВиМТО. $\times 1350$

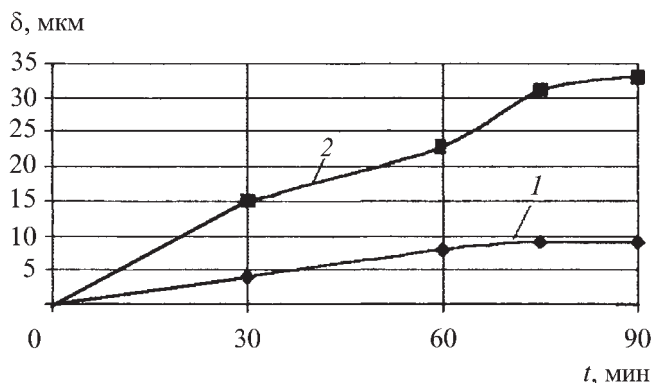


Рис. 2. Изменение толщины δ цинкового покрытия от времени t его нанесения в процессе:
1 – ВиМХО; 2 – ВиМТО

цинкования в порошковых смесях без виброударного воздействия.

Технологические операции цинкования стальных деталей включают применение как метода ВиМТО, так и ВиМХО, что позволяет совместить отделку и упрочнение поверхности с приданием ей антикоррозионных свойств.

Совмещенный процесс ВиМТО и цинкования производился в герметично закрытой рабочей камере (без доступа воздуха). В качестве рабочей среды использовали стальные шары, дробь и порошок цинка с добавлением в его состав 5 % (по объему) хлористого аммония, при разложении которого от нагрева образуется восстановительная атмосфера. Температура процесса 200...300 °С. Полученное таким способом цинковое покрытие состоит из верхнего слоя – частиц цинкового порошка, соединенных между собой, и диффузионной зоны цинкового феррита, ширина которой зависит от температуры обработки. Эта зона содержит до 5 % цинка и отличается повышенной твердостью. Значения микротвердости в ней 1900...2500 МПа, в то время как микротвердость пластически деформированных зерен феррита составляет 1700...1800 МПа (основной металл – сталь 08кп). Обработка при температуре 250 °С в течение 90 мин приводит к диффузии цинка на глубину 30...40 мкм. Постепенно эта зона переходит в основную структуру (феррит с повышенной микротвердостью), которая на глубине 150 мкм понижает микротвердость до исходных значений 1350...1500 МПа. Рост толщины цинкового покрытия от времени обработки показан на рис. 2.

Совмещенный процесс ВиМХО и нанесения цинкового покрытия производится в рабочей среде, состоящей из фарфоровых или стеклянных шаров, цин-

кового порошка и жидкого химического активатора. Роль активатора, как поставщика ионов осаждаемого цинка на первоначальном этапе, выполняют соответствующие растворы солей цинка. В дальнейшем ионы цинка поступают в раствор в результате взаимодействия металлического порошка с компонентами раствора. Ударное воздействие твердой рабочей среды активирует покрываемую поверхность за счет ее поверхностно-пластического деформирования и способствует контактному осаждению цинка, уплотнению образующегося покрытия, прочному схватыванию частиц покрытия между собой и подложкой. Продолжительность процесса обработки в течение 60...80 мин приводит к образованию тонкого цинкового покрытия толщиной 5...8 мкм, отличающегося хорошими декоративными свойствами (низкой шероховатостью и высокой отражательной способностью). Образцы деталей с нанесенным по разработанным технологиям цинковым покрытием прошли испытание на атмосферную коррозию по ГОСТ 9.012–71 в течение 480 ч с использованием 5 %-ного раствора NaCl. Установлено, что защитные свойства покрытий не уступают гальваническому цинкованию, превосходя его по технологическим возможностям комплексного влияния на параметры качества как покрытия так и основы, а также по ряду экономических и экологических показателей.

Вывод

Управляя режимами процесса ВиО и дополнительным энергетическим воздействием, можно создавать поверхности деталей с требуемыми показателями качества и эксплуатационными свойствами – микрогеометрией, твердостью, коррозионной стойкостью, низким коэффициентом трения и др.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. 694 с.
2. The Quality Rising of Precision Surface by Mecanic Chemical Vibratory Finishing / Yu.P. Ankudimov, A.P. Babichev, S.V. Milaeva, S.N. Hudoley, V.V. Ivanov // 6th International Conference "Precision Surface Finishing and Deburring Technology–2000" "PSFDT–2000", Saint-Petersburg, 2000, 3 p.
3. Hamouda Khaled, Ankudimov Yu.P. Complex Change in Superficial Layer Properties of Specimen Obtained by Metallurgical Powder Vibration Process Method // Defekt and Diffusion Forum. V. 297–301(2010). P. 1103–1108. Trans Tech Publications Switzerland.

А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин, И.Л. Вяликов, Н.С. Коваль
(Донской государственный технический университет)
E-mail: vialikov@mail.ru

Разработка и исследование технологической схемы виброультразвуковой обработки

Рассмотрены вопросы, связанные с повышением интенсивности вибрационных методов обработки (отделочных, упрочняющих) путем наложения ультразвуковых колебаний. Представлен анализ разработанной технологической схемы комбинированного метода обработки – виброультразвуковой обработки использование которой обеспечит снижение стоимости изделия и машины в целом за счет сокращения продолжительности процесса.

Ключевые слова: вибрационная обработка, ультразвуковые колебания, схема обработки.

The questions of higher productivity of vibrating processing methods (finishing, strengthening) by ultrasonic fluctuations application are considered. The analysis of the developed technological scheme of the combined processing method (vibration- ultrasonic processing is submitted for consideration. The use of this processing method will assure product and car depreciation due to the reducing of the process duration.

Keywords: vibrating processing, ultrasonic fluctuations, processing scheme.

Введение

В связи с постоянным увеличением удельного веса машиностроительного производства, а следовательно, и ассортимента деталей машин, проблема увеличения ресурса работы, износостойкости и прочности не утратила своего значения и на сегодняшний день. Как показывает отечественный и зарубежный опыт, решение этой проблемы связано с разработкой и внедрением эффективных технологических процессов, базирующихся на использовании различных видов энергии: плазмы, лазера, электрического и магнитного полей, ультразвуковых колебаний и др. Одним из наиболее производительных методов обработки, на базе которого разработано большое количество комбинированных методов обработки, является *вибрационная обработка* (ВиО). Анализ работ [1, 2], посвященных возможности повышения интенсивности ВиО, показывает, что решение рассматриваемой проблемы возможно в следующих направлениях:

– конструктивные изменения оборудования (использование манипуляторов, экранов-вставок, сжатого воздуха, подаваемого в рабочую камеру, применение подвижных и неподвижных приспособлений и т.д.);

– комбинирование различных видов энергии.

Последнее направление является особенно важным, так как исключается обработка на более высоких режимах ($f, A, t_{\text{обп}}$), что приводит к повышенным нагрузкам на подшипниковые узлы оборудования и неоправданно высокому расходу абразивного материала. Таким образом, основаны такие разновидно-

сти ВиО, как: виброшпиндельная, виброхимическая, вибрационная электрохимическая обработка и т.д. осуществляются сочетанием вибрации и дополнительных видов энергии и приводят к повышению производительности в 1,5–2 раза.

Цель работы – разработка технологической схемы *виброультразвуковой обработки* (ВиУЗО), обеспечивающей повышение интенсивности процесса, качества изделия и снижение его себестоимости.

Разработка технологической схемы виброультразвуковой обработки

Предлагаемая схема (рис. 1) представлена в виде компоновки вибрационного станка и ультразвукового преобразователя 5. Рабочей камере прямоугольной формы 8, установленной на упругих пружинах 4 и имеющей возможность колебаться в различных направлениях, сообщается вибрация от инерционного вибратора 7 в виде вращающегося вала с несбалансированными грузами с частотой до 50 Гц и амплитудой от 0,5 до 6...8 мм. Работа преобразователя 5 обеспечивается сообщением электрических импульсов, передаваемых при помощи системы 2 ультразвуковым генератором 1.

Ультразвуковые колебания с определенной амплитудой и частотой, проходя через технологическую жидкость, вводимую в рабочую камеру 8 помпой 11 через систему трубопроводов 9, сообщаются частицам рабочей среды 13, постепенно затухая, проходя через каждый слой. При этом за счет погружения преобразователя 5 в определенный объем технологиче-

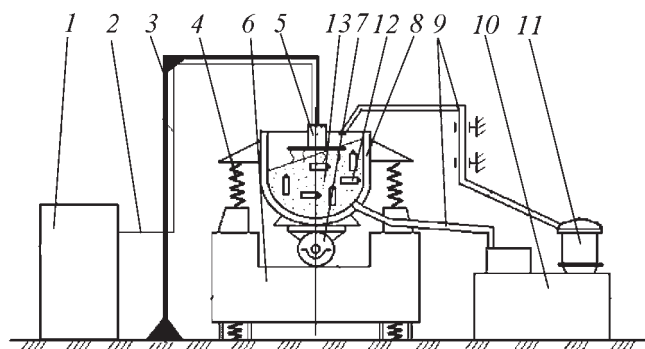


Рис. 1. Технологическая схема процесса ВиО с наложением ультразвукового воздействия:

1 – ультразвуковой генератор; 2 – система подвода питания; 3 – стойка; 4 – пружина; 5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – основание; 7 – вибратор; 8 – рабочая камера; 9 – система подачи и слива ТЖ; 10 – бак-отстойник; 11 – помпа; 12 – обрабатываемые детали; 13 – рабочая среда

ской жидкости, в последней возникают полости, заполненные паром, – кавитационные пузырьки или каверны. Эффект обусловлен понижением давления в жидкости менее некоторого критического значения и приводит к резкому возрастанию скорости движения частиц среды 13 относительно друг друга и всего объема относительно рабочей камеры 8. Обрабатываемые детали 12 могут располагаться при обработке свободно или с закреплением в зависимости от требований, предъявляемых к качеству наружных и внутренних поверхностей, конструкции деталей и массы. Стоит отметить также, что образование кавитационных пузырьков приводит к изменению (смещению), по сравнению с базовой схемой ВиО, зон давления среды в рабочей камере, что повышает интенсивность обработки в ее различных точках.

Разработка приспособлений и специального оснащения

Рассмотренная технологическая схема (рис. 1) может быть реализована путем различной установки ультразвукового преобразователя относительно рабочей камеры виброустановки. На рис. 2 представлены варианты конструкций рабочих камер.

При "встраивании" источника ультразвуковых колебаний 5 в стенку рабочей камеры 6 (рис. 1, а) под различными углами создается возможность суммирования механических и ультразвуковых волн, оказывающих воздействие на массу загрузки, в результате чего значительно увеличивается циркуляция рабочей среды и создается возможность производить обработку по более "мягким" режимам. Ультразвуковой преобразователь 5 при помощи креплений 2 установлен вместо боковой стенки рабочей камеры прямоуголь-

ной формы объемом 10 литров. Фиксация конструкции предусматривает затяжку резьбовых соединений 1. Герметизация внутренней полости рабочей камеры обеспечивается размещением резиновых прокладок толщиной 5...6 мм по контуру конструкции 2. Таким образом, рабочая поверхность преобразователя имеет возможность совершать колебания с заданными амплитудой и частотой без повреждений.

При фиксации преобразователя 5 над камерой 6 на уровне циркуляции рабочей среды (рис. 1, б), обеспечивается ее поджатие на определенную величину, что приводит к увеличению сил соударения частиц между собой и обрабатываемыми деталями в зоне низкого давления и, как следствие, повышению интенсивности обработки. Преимуществом рассматриваемой схемы является ее высокая универсальность, так как сохраняется неизменность конструкции и геометрии рабочей камеры, что позволяет использовать приспособления в целях установки преобразователя по торцу рабочей камеры либо обособлено для обработки партии деталей, после чего его демонтируют. Конструкция, аналогично рассмотренной ранее, предполагает жесткое закрепление преобразователя 5 относительно рабочей камеры 6 с помощью креплений 2 и резьбовых соединений 1. Магнестрикционный преобразователь имеет наружное охлаждение, в конструкции которого предусмотрены штуцеры 4 для подачи и отвода охлаждающей жидкости, смотровой люк для визуального контроля уровня жидкости 3 и специальные элементы для установки на торец рабочей камеры 6 вибрационной установки.

Расположение преобразователя 5 на расстоянии 5–6 слоев от дна рабочей камеры 6 (рис. 1, в) обеспечивает возрастание колебаний в центре камеры, которые при базовой схеме ВиО весьма малы за счет потери энергии при прохождении многослойной рабочей среды. Повышение интенсивности обработки обеспечивается за счет создаваемого пространства, в котором находится определенный объем рабочей среды, частицы которой получают колебания с одной стороны от стенки рабочей камеры, а с другой – от ультразвукового преобразователя. При движении обрабатываемых деталей под действием циркуляции в данном пространстве силы соударения и количество ударов с частицами рабочей среды значительно возрастают. В целях фиксации цилиндрического преобразователя у дна рабочей камеры разработана специальная конструкция (рис. 2, в). По торцам преобразователя 5 расположены крышки, установленные с резиновыми прокладками. Через весь преобразователь проходит стержень диаметром 10...15 мм, который зафиксирован при помощи гаек. Необходимое положение обеспечивается при помощи крепления 2, фиксируемое по торцу рабочей камеры 6. Подача и отвод жидкости

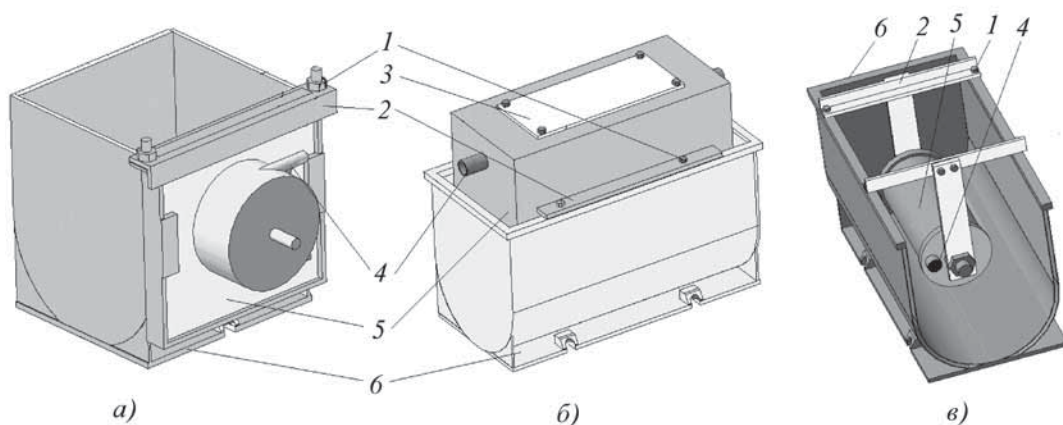


Рис. 2. Конструкция рабочей камеры для виброультразвуковой обработки деталей в свободном состоянии с расположением ультразвукового преобразователя:

а – в стенке рабочей камеры; *б* – над рабочей камерой; *в* – у дна рабочей камеры: 1 – резьбовые соединения; 2 – крепление; 3 – смотровой люк; 4 – штуцер для подачи охлаждающей жидкости; 5 – ультразвуковой преобразователь; 6 – рабочая камера

осуществляются посредством шлангов, подсоединяемых к штуцерам 4.

Технологические испытания опытных образцов рабочих камер

Для исследования разработанной технологической схемы (см. рис. 1) в качестве опытного оборудования использовали вибрационный станок модели УВГ4×10 и универсальный ультразвуковой генератор УЗГ3-4, позволяющий регулировать частоту колебаний преобразователя от 18 до 22 кГц, в широком диапазоне – ток подмагничивания.

Разработаны конструкции рабочих камер прямоугольной формы объемом 10 и 20 дм³ (рис. 3) в целях проведения технологических испытаний, изучения явлений, протекающих при осуществлении комбинированного процесса ВиУЗО, и установления возможности достижения необходимого качества поверхно-

сти деталей при условии сокращения времени обработки, по сравнению с вибрационной и виброударной обработкой.

Результаты проведенных исследований разработанных технологических схем представлены на рис. 4.

Обработку образцов-свидетелей осуществляли при следующих режимах: амплитуда колебаний виброустановки – $A_v = 3$ мм и преобразователя – $A_n = 0,5$ мкм, частота колебаний соответственно $f_v = 30$ Гц, $f_n = 22$ кГц, технологическая жидкость – 3 %-ный водный раствор кальцинированной соды.

На рис. 4, *а* представлена зависимость, характеризующая изменение шероховатости поверхности образцов из алюминиевого сплава АВТ-1 и стали 45 после обработки в среде абразивных гранул ПТ 15×15, от метода обработки и продолжительности процесса. Снижение шероховатости поверхности наблюдается при ВиУЗО алюминиевых образцов на всех времен-

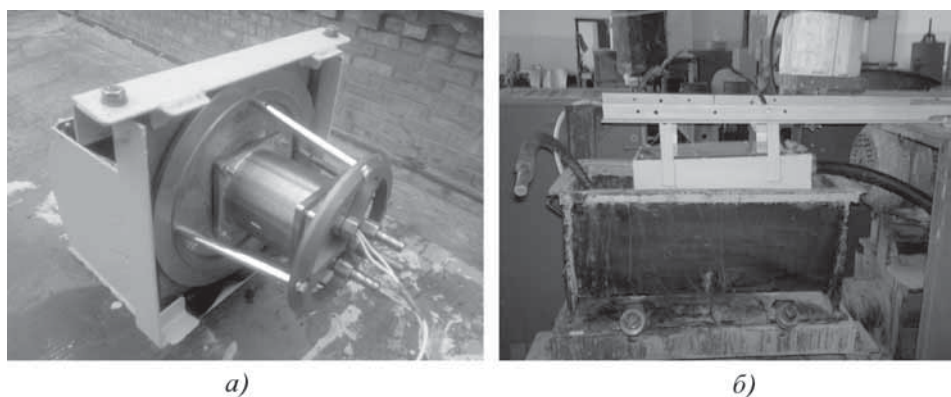


Рис. 3. Конструкция экспериментальных рабочих камер прямоугольной формы объемом 10 и 20 дм³ при расположении преобразователя:

а – в передней стенке;

б – над рабочей камерой

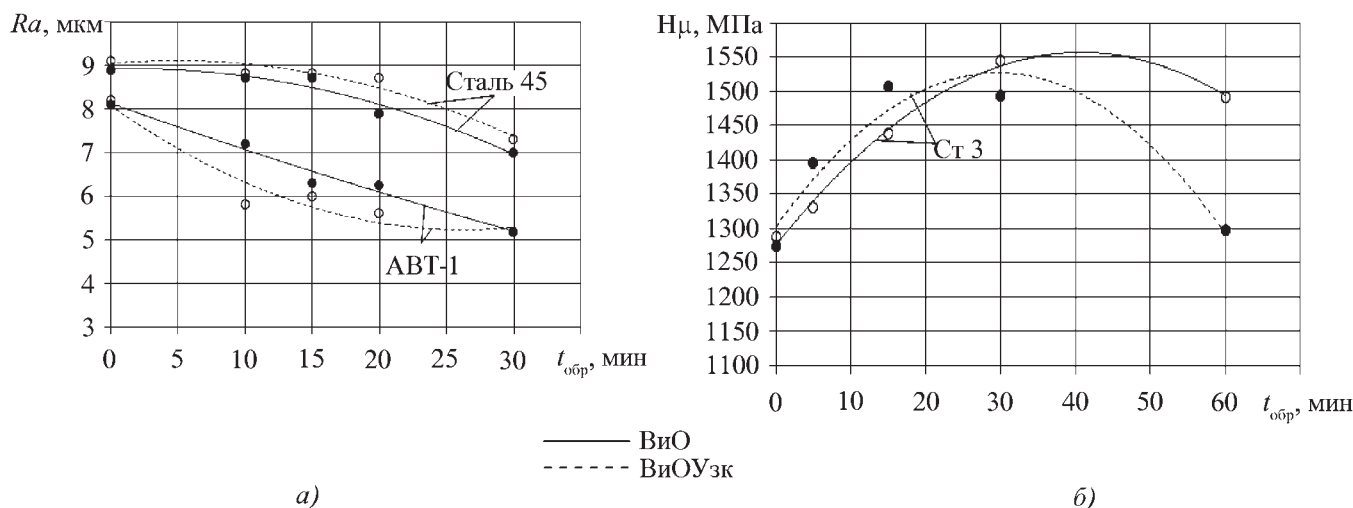


Рис. 4. Изменение показателей качества поверхностного слоя образцов – свидетелей в зависимости от метода обработки, продолжительности процесса и расположения преобразователя:
a – в стенке рабочей камеры; *б* – над рабочей камерой

ных интервалах. Наиболее интенсивно процесс протекает во временном интервале от 10 до 20 мин.

Обработка при ультразвуковом воздействии пластин из стали 3 (рис. 4, б) в среде стальных закаленных шаров диаметром 7...8 мм обеспечивает большой прирост исследуемой величины (до 50 МПа), по сравнению с виброударной обработкой, в интервальном промежутке от 5 до 30 мин с последующим снижением микротвердости качества поверхностного слоя в период от 30 до 60 мин (рис. 4, б).

Выводы

В работе представлена технологическая схема, обеспечивающая повышение интенсивности процесса вибрационной обработки за счет установки ультразвукового преобразователя в рабочей камере вибрационного станка, совершающей колебания с амплитудой A и частотой f . Анализируя полученные результаты экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Интенсификация метода ВиО возможна путем наложения ультразвуковых колебаний при расположении преобразователя над рабочей камерой.
2. При использовании разработанной технологической схемы обработки возможно достижение необходимого качества поверхностей детали.

3. В целях повышения интенсивности процесса ВиО необходимо проведение дальнейших экспериментальных исследований, при этом варьируемыми параметрами необходимо принять амплитуду и частоту колебаний вибрационной установки и ультразвукового преобразователя, расположение ультразвукового преобразователя, а также выбор рабочей среды и количество охлаждающей жидкости.

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XV международную научно-техническую конференцию "Фундаментальные проблемы техники и технологии – ТЕХНОЛОГИЯ–2012" (5–8 июня 2012 г., г. Орел, Госуниверситет – УНПК).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д: ДГТУ, 1999. 620 с.
2. **Санамян В.Г.** Повышение интенсивности процесса вибрационной обработки деталей за счет увеличения давления в рабочей камере: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 1997. С. 257.
3. **Берман Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во иностр. лит., 1967. 726 с.

В.В. Иванов, Я.С. Булгаков (Донской государственный технический университет)
E-mail: vivanov_dstu@mail.ru

Влияние вибрационных твердосмазочных покрытий MoS_2 на качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей

Рассмотрены технологические возможности применения вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий на основе MoS_2 для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей.

Ключевые слова: вибрационная обработка, вибрационные механохимические покрытия, твердые смазки.

The article considers the technological possibilities of the application of the vibration mechanochemical solid lubricant coatings on the basis of MoS_2 to improve the quality of surface and operational properties of components.

Keywords: vibration processing, vibrating mechano-chemical coatings, solid lubricant.

Введение

В современной специальной литературе повышению конкурентоспособности машин и агрегатов уделяют должное внимание. Разработка и внедрение в производство практичных, высокоэффективных технологических процессов, обеспечивающих высокое качество, эксплуатационные свойства и товарный вид выпускаемой продукции, является одним из приоритетных направлений прикладной науки.

Важным условием решения этих задач является совершенствование и развитие финишных методов обработки и нанесения покрытий.

Одним из эффективных способов обработки, позволяющих комбинировать процессы виброотделки деталей с одновременным нанесением на них покрытий, является вибрационная обработка.

Предметом исследований является твердосмазочное покрытие на основе дисульфида молибдена MoS_2 , формируемое на поверхности детали в условиях виброобработки свободнодвижущимися инденторами. Интерес многих исследователей к твердосмазочным покрытиям на основе MoS_2 обусловлен его уникальными свойствами, которые способствуют повышению износостойкости ответственных деталей, входящих в пары трения различных изделий. Дисульфид молибдена имеет гексагональную слоистую решетку в форме призматического шестигранника (рис. 1). Такое строение кристаллической решетки MoS_2 обеспечивает нали-

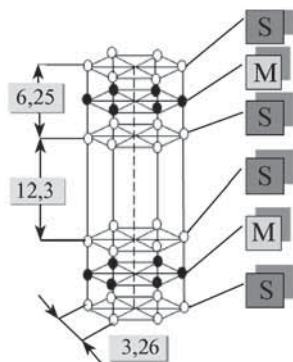


Рис. 1. Кристаллическая решетка MoS_2

чие важных для смазочных материалов высоких адгезионных свойств.

MoS_2 обладает слоистой структурой, в которой есть "прочные" и "плотные" слои, в достаточно большой степени удаленные друг от друга. В слое, покрывающем поверхность трения, имеются сильные связи, однако связь между слоями слабая. Такие свойства твердосмазочного покрытия обеспечивают "легкое" скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, существенно снижая коэффициент трения и изнашивания пары трения. Высокая адгезия MoS_2 к металлам обусловлена прочными молекулярными связями, образуемыми атомами серы с металлом [2].

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования эксплуатационных характеристик проводили на машине трения СМЦ-2 по стандартной методике. Результаты исследований представлены на рис. 2–5.

Результаты проведенных исследований показали, что полученное в процессе вибрационной обработки твердосмазочное покрытие MoS_2 приводит к снижению коэффициента трения и повышению износостойкости пар трения при работе не только в воздушной среде, но и в среде масла. Износ при работе в течение 3 ч практически не отмечен. Экспериментально подтверждено, что наличие слоев различных атомов в структуре MoS_2 создает условия легкого скольжения.

Большое влияние на антифрикционные свойства покрытия оказывают наноразмерность и ориентация его частиц, а также нанорельеф поверхности основы. В процессе формирования покрытия MoS_2 вибрационным способом обеспечивается ориентация частиц базовыми плоскостями параллельно плоскости скольжения, и процесс приработки покрытия в этом случае практически отсутствует [1].

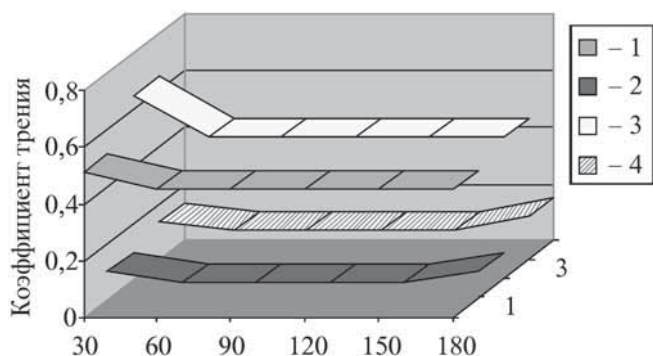


Рис. 2. Исследование коэффициента трения пар:
 1 – ШХ15-40Х – исходные; 2 – ШХ15 – покрытие MoS₂-40Х – исходные; 3 – 40Х – чугун СЧ 21 – исходные; 4 – 40Х – покрытие MoS₂ – чугун СЧ 21 – исходные

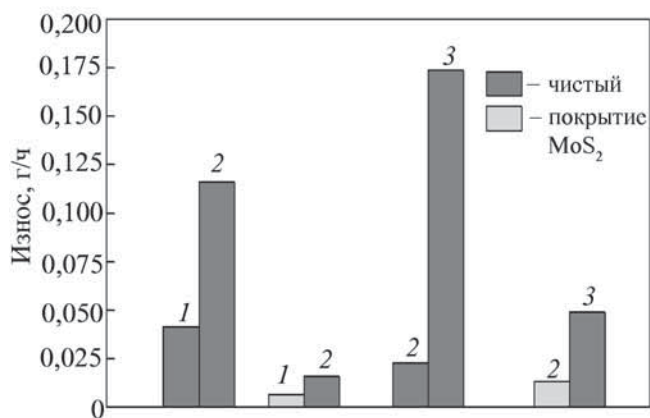


Рис. 3. Исследование износостойкости пар трения образцов:
 1 – сталь ШХ15; 2 – сталь 40Х; 3 – чугун СЧ 21

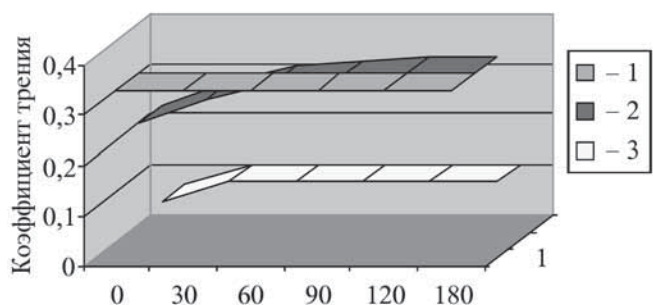


Рис. 4. Результаты испытаний образцов из титановых сплавов ВТ-20 при трении качения с 20 %-ным проскальзыванием, нагрузке 392,4 Н ($q = 88,29$ МПа) – при температуре 20 °С, без смазки:
 1 – исходные; 2 – виброупрочненные; 3 – покрытые MoS₂

В зависимости от условий эксплуатации и материала пар трения снижение коэффициента трения достигает 3–9 раз, а увеличение их износостойкости 4–20 раз.

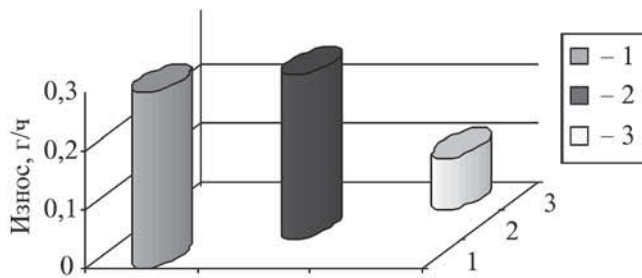


Рис. 5. Износостойкость пар трения образцов из сплава ВТ20 и сталь 10Х12Н2ВМФ:
 1 – исходные; 2 – виброупрочненные; 3 – покрытые MoS₂

В целях более глубокого исследования поверхности использовали электронный микроскоп "SUPRA 25", позволяющий изучать поверхность металла, материал покрытия, вести непрерывный контроль процесса, электронно-лучевую литографию и наблюдение материалов с ультрамалыми размерами (нм). Исследования поверхностного слоя проводили на сканирующем зондовом микроскопе "Nanoeducator" (NT-MDT), нанопрофиль поверхности – на туннельном микроскопе "PHYWE".

На рис. 6, 7 представлена серия фотографий, иллюстрирующих состояние поверхности образца из стали 45 и порошка MoS₂ в исходном состоянии и после нанесения покрытия MoS₂. Снимки произведены с различным увеличением и с различных позиций (изменением наклона предметного стола). Адсорбированные частицы твердой смазки не имеют определенной ориентации (рис. 6, а), но в зоне контакта, благодаря сближению и скользящим ударам индентора, частицы ориентируются базовыми плоскостями параллельно обрабатываемой поверхности, о чем говорят блестящие участки на поверхности покрытия, хорошо видимые на микрофотографии (рис. 6, б).

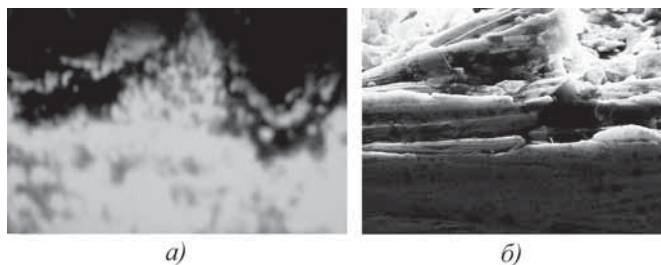


Рис. 6. Микроструктуры стали 45... 28 HRC с внедренными частицами порошка MoS₂, полученные на аналитическом автоэмиссионном электронном микроскопе Zeiss "SUPRA 25"×500:
 а – неориентированные частицы смазки; б – ориентированные частицы смазки в зоне контакта

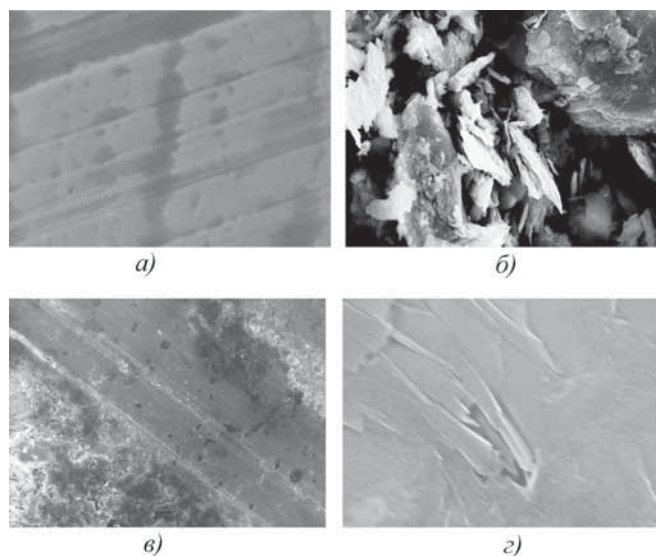


Рис. 7. Изменение характера рельефа покрываемой поверхности стали 3:

a – поверхность образца после механической обработки; *б* – покрытие из порошка MoS_2 ; *в* – поверхность после частичного удаления порошка MoS_2 ; *г* – слой твердой смазки из MoS_2 с тонкой пленкой на поверхности

Полученные фотографии дают наглядное представление о характере рельефа покрываемой поверхности и твердосмазочного покрытия, раскрывают механизм образования пленки при механическом (виброударном) воздействии в среде стальных инденторов диаметром 3...5 мм и ее влияние на бинарную смесь и порошок MoS_2 . На рис. 7, *a*, четко видны параллельные линии на металле, оставленные после механической обработки [3]. На рис. 7, *б* видны размеры и расположение порошка (хаотичное). После нанесения покрытия (рис. 7, *в*) механически была удалена часть порошка, таким образом образовалась четкая граница металл – покрытие, отчетливо видная на фотографии, что дало возможность увидеть боковой шлиф, который подтвердил ориентацию частиц MoS_2 относительно вращения детали. Кроме того, в результате проведенных исследований, установлено, что образуемый в процессе вибрационной обработки слой твердой смазки MoS_2 покрывается тонкой пленкой, имеющей ориентацию частиц базовыми плоскостями параллельно поверхности трения (рис. 7, *г*).

Исследование микрорельефа поверхности проводили на базе МРЦКП ДГТУ с использованием сканирующего зондового микроскопа "Nanoeducator" (NT-MDT), результаты представлены на рис. 8, 9 (см. стр. 4 обложки). В качестве исходной поверхности,

удовлетворяющей требованиям оборудования, использовали шлифованные образцы 10/10 мм из стали 45.

Как видно из представленных рисунков, поверхность с покрытием MoS_2 , по сравнению с необработанной, стала более полой, микровыступы скруглены. Такое строение пленки, как показал анализ, обусловлено включением в нее наноразмерных структур. Внедрение наноразмерных структур в вибрационное – механохимическое покрытие повышает эффективность твердых смазок. Установлено, что с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 нм объемная доля межзеренного вещества увеличится до 88 %, это позволяет получать покрытия с уникально высокими свойствами. Например, их долговечность в 2–7 раз выше, чем твердость крупнозернистых покрытий, прочность в 1,5–2 раза выше, а при уменьшении размера зерна от 10 мкм до 10 нм скорость износа покрытия уменьшается в 10 раз.

Выводы

Установлено, что вибрационные твердосмазочные механохимические покрытия на основе дисульфида молибдена работают не только в воздушной среде, но и в среде масла.

Нанесение покрытия не требует сложного оборудования и высокой квалификации рабочих.

Применение покрытия в парах трения увеличивает срок службы изделия в 10–20 раз, а внедрение наноразмерных структур открывает уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, долговечности, износостойкости, достаточно высокой пластичности, сохраняя при этом высокие эксплуатационные свойства изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Изд. 2-е, перераб. и доп. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. 694 с.
2. **Иванов В.В., Селеменов М.Ф., Марченко Ю.В.** Формирование вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 2 (286).
3. **Бабичев А.П., Иванов В.В., Булгаков Я.С.** Исследование коэффициента трения, износостойкости и микро/напрофиля поверхности вибрационного механохимического покрытия дисульфида молибдена MoS_2 // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 1 (285).

УДК 621.787.6.004

А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев (Орловский государственный технический университет)
E-mail: avk.57@yandex.ru

Новые технологии обработки поверхностным пластическим деформированием*

Выявлены новые перспективные и конкурентоспособные, в том числе комбинированные, упрочняющие технологии, позволяющие расширить область применения поверхностного пластического деформирования, показаны их технологические возможности и эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: пластическое деформирование, поверхностный слой, технология, комбинированное упрочнение, эксплуатационные свойства, методика, режимы.

New promising competitive and also combined strengthening technologies allowing a field of surface plastic forming application to be expanded are revealed. Their engineering possibilities and servicing characteristics are shown.

Keywords: plastic forming, blanket, technology, combined strengthening, servicing characteristics, methods, modes.

Современное машиностроение характеризуется непрерывным ростом требований к надежности, долговечности, прочности, износостойкости и нагрузочной способности изделий. В процессе эксплуатации наиболее нагружен поверхностный слой, для обеспечения качества которого, а также в целях повышения ресурса и эксплуатационных свойств деталей высокотехнологичных машин, широко используется упрочняющая обработка *поверхностным пластическим деформированием* (ППД) как самостоятельно, так и в составе совмещенных и комбинированных технологий.

ППД [1–3] имеет ряд несомненных преимуществ, связанных с отсутствием термических дефектов и шаржирования обработанной поверхности, сохранением целостности волокон металла, созданием мелкозернистой структуры – текстуры, плавным повышением микротвердости поверхностного слоя вследствие наклепа металла, формированием сжимающих остаточных напряжений, уменьшением шероховатости поверхности в несколько раз за один рабочий ход. При этом микронеровности имеют благоприятную для эксплуатации форму с большой относительной площадью опорной поверхности. Технологическая оснастка и деформирующий инструмент отличаются простотой конструкции и универсальностью. Не случайно на предприятиях развитых европейских стран почти 50 % технологической оснастки станков с *числовым программным управлением* (ЧПУ) составляют раскатные и обкатные устройства.

В промышленности широко применяют различные способы ППД: обкатывание (раскатывание) роликами или шариками, алмазное выглаживание, дорнование отверстий, чеканка, центробежная, дробеструйная и виброударная обработка, обработка металлическими щетками

и др. По виду упрочняющего воздействия способы ППД разделяют на статические и динамические.

Статические способы ППД (обкатывание, раскатывание, выглаживание и др.) предполагают воздействие на зону деформации неизменным во времени потоком энергии в условиях непрерывного контакта инструмента с деталью. Статические способы позволяют снижать исходную шероховатость поверхности, получать упрочненный поверхностный слой глубиной от нескольких микрометров до 1...3 мм.

При реализации динамических способов ППД (центробежной, дробеструйной и виброударной обработки, чеканки и др.) осуществляется ударное деформационное воздействие на обрабатываемую поверхность рабочих тел или инструмента в условиях прерывистого контакта. Динамические способы могут применяться как для получения неглубокого упрочненного поверхностного слоя до 0,5 мм и снижения шероховатости (обработка металлическими щетками, центробежная обработка), так и в случаях, когда необходимо получать большую глубину упрочнения 5...10 мм с формированием шероховатости больше исходной (чеканка). Преимуществом некоторых динамических способов является возможность упрочнения труднодоступных участков деталей и сложнопрофильных поверхностей (обработка дробью, обработка металлическими щетками).

Остановимся на новых наиболее интересных тенденциях, качественных направлениях и конкурентоспособных технологиях обработки ППД.

В общем случае, кроме обеспечения требуемых параметров шероховатости, желательное создание упрочненного слоя достаточной глубины с технологическими остаточными напряжениями сжатия, причем максимально наклепанный слой должен находиться как можно ближе к поверхности. Вследствие ограниченных возможностей управления параметрами качества поверхностного слоя большинством методов ППД в отдельности, обеспечение выполнения указанных требований затруднительно.

* Исследования выполнены при поддержке проекта, выполняемого в рамках гос. задания р/н 75052011

Поэтому все большее развитие получают комбинированные деформационные упрочняющие технологии. Комбинировать различные способы обработки следует в соответствии с возможностью обеспечения требуемой эпюры упрочнения.

Наиболее простым методом комбинированного упрочнения ППД является последовательная обработка детали инструментом с разными размерами деформирующей поверхности. При этом для любого вида обработки справедлива общая закономерность: увеличение радиуса деформирующей поверхности инструмента способствует увеличению глубины упрочненного слоя, смещает точку максимального упрочнения вглубь, снижает степень поверхностного упрочнения, и наоборот, уменьшение радиуса деформирующей поверхности уменьшает глубину упрочненного слоя, смещает точку максимального упрочнения к поверхности, повышает степень поверхностного упрочнения.

На основании изложенного, можно предложить комбинированные упрочняющие технологии ППД, в которых первой операцией будет ударное воздействие или статическое обкатывание шаром или роликом с большим радиусом приведенной кривизны деформирующей поверхности. В качестве финишной операции возможно алмазное выглаживание, обкатывание шарами меньшего диаметра, обработка металлическими щетками, вибрационная обработка, обработка дробью или микрошариками. Такие технологии, несмотря на свою простоту, не отработаны и еще ждут своего исследователя.

А.Ю. Албагачевым и В.В. Плешаковым предложен программный метод ППД, при котором вначале шариками большого диаметра с большой скоростью формируется упрочненный слой большой толщины (до 250 мкм), а затем для создания высоких остаточных напряжений в тонком подповерхностном слое (толщиной до 50 мкм) используются шарики малого диаметра. Рекомендуется для эффективного упрочнения применять шарики диаметром 2...3 мм. При управлении только скоростью шариков операцию упрочнения можно выполнять за один переход дискретным или непрерывным изменением скорости от 8...10 м/с до 2...3 м/с. В этом случае в поверхностном слое до 100 мкм формируются остаточные сжимающие напряжения до 1,5...1,6 ГПа.

Известно, что усложнение кинематики, увеличение количества управляемых технологических факторов, движений, а также изменение функционального соотношения между ними позволяют интенсифицировать любой процесс обработки, обеспечить получение новых, не достижимых ранее, результатов. Эффективным направлением интенсификации и расширения технологических возможностей ППД в обеспечении параметров качества поверхностного слоя является наложение на основной процесс дополнительных осциллирующих и колебательных движений.

Наиболее простым методом является сообщение осциллирующего движения деформирующему инструменту, что широко применяется в процессах создания регу-

лярного микрорельефа ППД (Ю.Г. Шнейдер). Представляет интерес развитие этой идеи в процессе ППД инструментом со скользящим контактом (М.Е. Попов). Инструментом является ролик с максимально смещенной тороидальной деформирующей поверхностью [2]. Управление скоростью скольжения инструмента по обрабатываемой поверхности и траекторией перемещения точки контакта позволяет регулировать термомеханические эффекты в очаге деформации, обеспечивать минимальную шероховатость (в 3 раза ниже по сравнению с ППД обычным дисковым роликом) или заданный микрорельеф.

Известно, что в связи с получением значительных деформаций за счет создания больших давлений в области контакта при сравнительно небольшой затраченной мощности, ударное импульсное нагружение материала является весьма эффективным как в целях разрушения, так и в целях упрочнения. Однако при использовании различных ударных систем при одной и той же энергии удара достигаются разные результаты.

Одним из сравнительно новых динамических методов ППД является процесс обработки инструментом, в котором генерирование ударного импульса осуществляется дополнительным пружинным приводом [2]. При этом инструмент совершает возвратно-поступательные осциллирующие движения в радиальном направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. Частота ударов определяется количеством ступеней кулачка и частотой вращения передающего ему крутящий момент вала двигателя. Технология упрочнения включает предварительное статическое и последующее периодическое ударно-импульсное нагружение инструмента. Варьирование режимами обработки позволяет получать на обработанной поверхности регулярный микрорельеф без явно выраженного следа обработки, сформированный в результате наложения множества отпечатков, открывает возможности управления параметрами поверхностного слоя в широком диапазоне.

Эффективность ударного воздействия зависит от способа сообщения энергии в очаг деформации. Наибольшим КПД и наиболее широкими возможностями управления глубиной и степенью упрочнения отличается воздействие на обрабатываемый материал волной деформации в процессе *статико-импульсной обработки* (СИО) ППД (А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев и др.). При СИО энергия ударного импульса, сформированного ударом бойка по волноводу (рис. 1), сообщается в очаг деформации через предварительно поджатый к нагружаемой поверхности с некоторым статическим усилием инструмент [2, 4]. Особенностью СИО является рациональное использование энергии формирующихся в элементах ударной системы плоских акустических волн, и сообщение ее в очаг деформации посредством промежуточного звена — волновода. Это позволяет минимизировать потери энергии удара, а также управлять волновыми процессами, варьировать параметры ударного импульса. Форма импульса (волны деформации) отражает

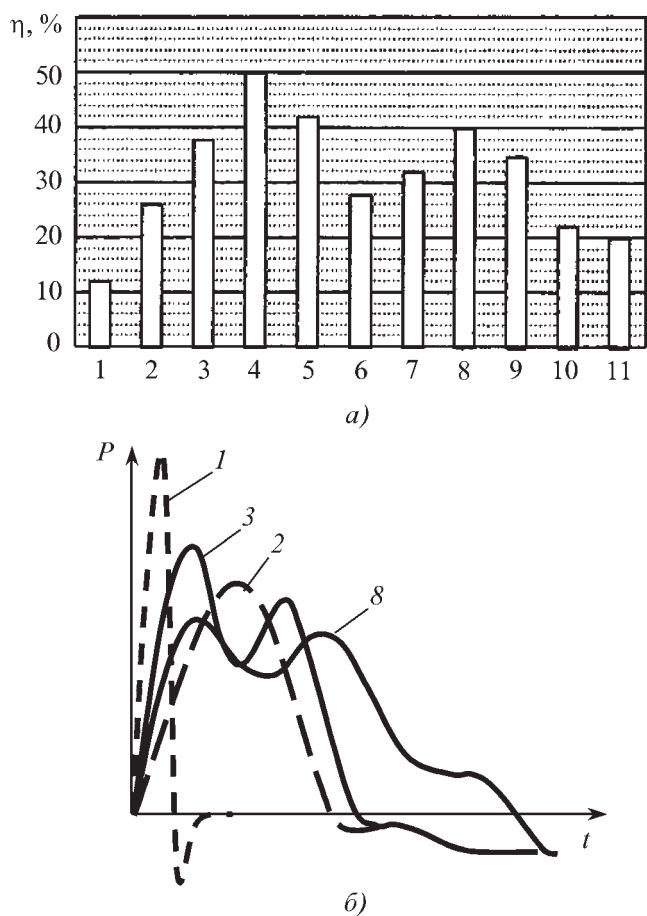


Рис. 1. КПД ударного воздействия (а) и форма деформирующих импульсов (б), генерируемых при различных способах динамического нагружения очага деформации и использовании в качестве инструмента:

1 – шара, 2 – плоского торца цилиндрического бойка, 3–7 – торца волновода: плоского, сферического, конического, плоского клиновидного, скругленного клиновидного соответственно; 8 – шара; 9 – стержневого ролика; 10 – дискового ролика; 11 – дискового ролика с тремя кольцевыми выступами на деформирующей поверхности; 1, 2 – удар наносится непосредственно инструментом; 3–11 – удар наносится бойком через промежуточное звено – волновод, на свободном торце которого смонтирован инструмент

закон изменения амплитуды динамической составляющей силы деформирования во времени, существенно влияет на результат СИО.

В процессе СИО генерируются пролонгированные ударные импульсы (рис. 2), состоящие из головной и хвостовой частей, причем хвостовая часть импульса формируется за счет энергии отраженных волн деформации и зависит от свойств нагружаемой среды. Энергия ударных импульсов может изменяться в диапазоне 5...200 Дж. Статическая нагрузка перед ударом должна составлять не менее 10 % от ударной. СИО отличается расширенным набором управляемых технологических

факторов, что позволяет создавать упрочненный поверхностный слой с различной равномерностью и глубиной до 10 мм.

Разработано достаточно большое количество разновидностей СИО.

При обработке плоских поверхностей (рис. 1, а) заготовке сообщается возвратно-поступательное движение относительно инструмента – стержневого ролика (рис. 3) и, при необходимости (если площадь обработанной поверхности больше), после каждого рабочего прохода в продольном направлении производится смещение заготовки в поперечном направлении на расстояние, определяемое шириной получаемых дорожек. Для такой схемы нагружения волновод может выполняться как в виде одного стержня, так и в виде пакета из стержней одинаковой длины. Использование в качестве деформирующих инструментов пакета волноводов позволяет формировать несколько очагов деформации за один удар бойка, увеличивая производительность процесса упрочнения.

После упрочнения СИО наиболее изнашиваемой части клина и усовиков опытной партии сердечников крестовины Р65 типа 1/11 железнодорожных стрелоч-

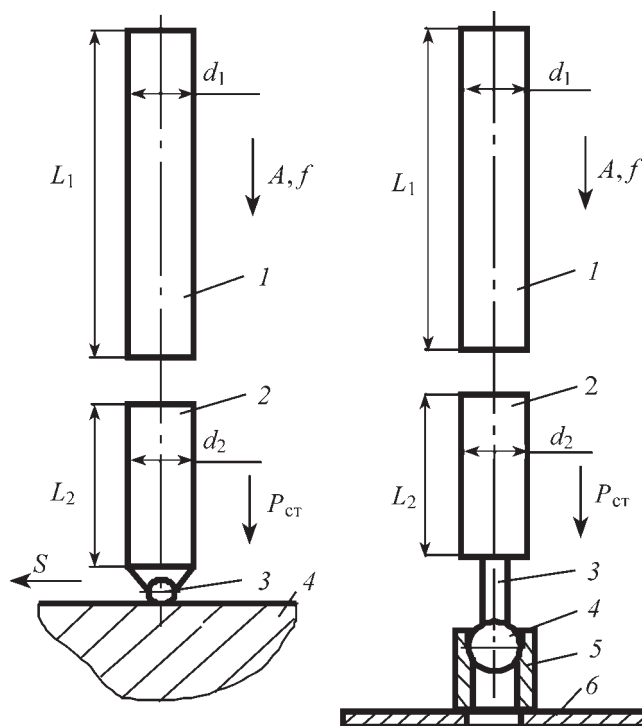


Рис. 2. Схема упрочнения поверхности детали статико-импульсной обработкой:

а – для плоской поверхности; б – отверстия по схеме прошивания: 1 – боек; 2 – волновод; 3 – инструмент; 4 – упрочняемая поверхность; 5 – заготовка; 6 – стол; A – энергия ударных импульсов; f – частота ударных импульсов; $P_{ст}$ – статическая нагрузка; S – подача; L_1, L_2 – длина соответственно бойка и волновода; d_1, d_2 – диаметр поперечного сечения соответственно бойка и волновода

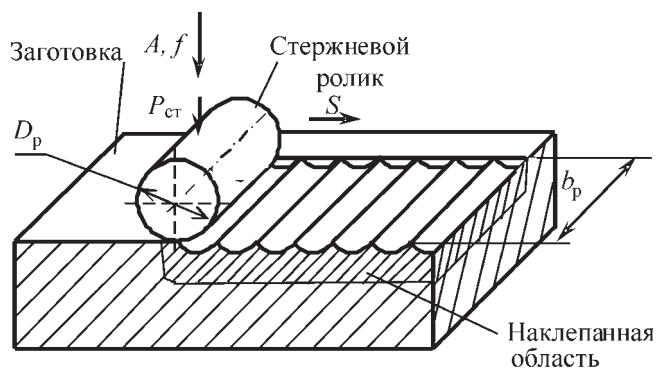


Рис. 3. Схема нанесения отпечатков на плоскую поверхность заготовки стержневым роликом при статико-импульсной обработке:

A – энергия ударных импульсов; f – частота ударных импульсов; $P_{ст}$ – статическая нагрузка; S – скорость подачи заготовки относительно ролика; D_p – диаметр ролика; b_p – ширина ролика

ных переводов, изготовленных из стали 110Г13Л, твердость была повышена в 2,5 раза (с 2600 до 6400 МПа), а глубина упрочненного слоя составила 8...9 мм [4]. Каждую поверхность сердечника обрабатывали за один проход стержневыми роликами диаметром 10 мм и шириной 20 мм, с энергией и частотой ударных импульсов 165 Дж и 15 Гц, статическая составляющая нагрузки 40 кН, скорость подачи заготовки относительно инструмента 460 мм/мин.

При статико-импульсном накатывании резьбовых профилей заготовке сообщается вращательное движение, а ударному устройству – осевая подача. Обработка производится по схеме с закрытым контуром. В результате СИО с энергией ударных импульсов 200 Дж и статической составляющей нагрузки 50 кН, резьбовых профилей с шагом 1...5 мм на заготовках из стали 40Х (максимальная степень упрочнения составляет не более 30 %) было установлено, что эффективная глубина слоя, упрочненного на 20 % и более, возрастает по сравнению с накатыванием аксиальными головками в 1,8–2,7 раза, а глубина слоя, упрочненного на 10 % и более, в 1,7–2,2 раза. Величина упрочненного слоя в целом после СИО в 3 раза больше, чем после накатывания с осевой подачи [4].

Для СИО внутренних цилиндрических поверхностей диаметром до 100...120 мм разработан ряд специальных схем, в которых, по аналогии с классическим дорнованием, основными параметрами процесса, определяющими показатели качества упрочненной поверхности, будут натяг, форма и размеры инструмента, толщина стенки упрочняемой втулки [5–8]. Для отверстий, длина которых не превышает 100...150 мм, обработка происходит по схеме прошивания (рис. 1, б), т.е. инструмент (шар или кольцевой дорн) проталкивается через отверстие под действием статической нагрузки и ударных импульсов. Для длинномерных отверстий разработаны схемы протягивания комбинированной статической и

ударной нагрузкой. В результате статико-импульсного дорнования с энергией и частотой ударных импульсов 160 Дж и 18 Гц, силе статического поджатия 40 кН можно осуществлять упрочнение толстостенных втулок (с толщиной стенки более 20 мм) с большими натягами до 1,7 мм и со скоростью 4,6 мм/с, что в 2 раза выше, чем при дорновании. Потребляемая мощность установки, включая гидроцилиндр, осуществляющий предварительное статическое нагружение, составляет не более 18 кВт, что в 2 раза меньше, чем при дорновании. При упрочнении втулок из стали 45 было установлено, что при натягах, начиная от 0,5 мм, упрочнение осуществляется на всю толщину стенки, которая достигала 21,7 мм. При обработке отверстий втулок с толщиной стенки 10...15 мм (рис. 4) упрочненный слой распространяется по всей толщине стенки, а его минимальная степень упрочнения составила не менее 52...42 %, при том, что максимальная степень упрочнения достигала 90 %. Шероховатость обработанной поверхности достигала $Ra = 0,5...0,065$ мкм.

Описанная технология обработки отверстий может достаточно эффективно использоваться как для упрочнения, так и для ремонта деталей машин.

Применение ППД в технологических процессах сборки и ремонта узлов "втулка–корпус" гарантирует высокое качество соединения и является наиболее эффективным, так как позволяет не только повысить производительность, но и свести к минимуму или исключить негативное влияние многих факторов на эксплуатационные свойства узла. Дорнование запрессованной втулки благоприятно сказывается на напряженно-деформированном состоянии узла, исправляет погрешности геометрической формы наружной поверхности втулки, а также отклонения от цилиндрической формы, вызванные запрессовкой, увеличивает фактическую площадь контакта до 60...70 % номинальной. Технология особенно актуальна для тонкостенных втулок, при отношении наружного диаметра втулки к внутреннему меньше или равно 1,2.

Область применения прессовых соединений со свернутыми втулками – производство и ремонт деталей машин с интенсивно изнашивающимися поверхностями, имеющими форму гладких замкнутых цилиндрических и конических поверхностей (разработчики – А.Н. Исаев, С.В. Лесняк и др.). Втулка сворачивается из плоской пластины, изготовленной из материала с высокими технологическими свойствами, который обеспечивает требуемую прочность и жесткость. Пластины могут быть биметаллическими с высокими антифрикционными свойствами рабочей поверхности. В целях образования масляных карманов возможно использование пластин с предварительно нанесенным макрорельефом, например в виде отверстий или пазов. С помощью тонкой пластины практически без изменения конструкции изделия можно существенно увеличить долговечность и повысить эксплуатационные свойства. Возможно получение трехслойных соединений типа "втулка–втулка–обойма".

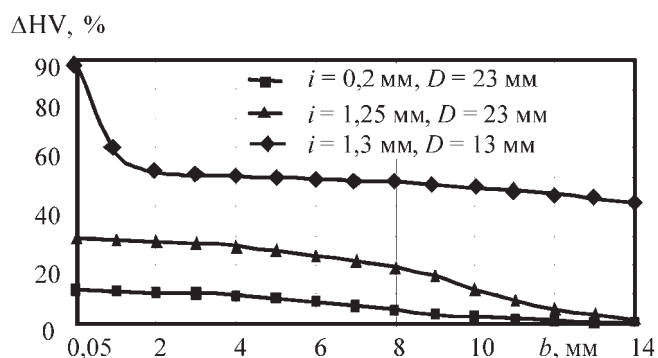


Рис. 4. Изменение степени упрочнения ΔHV по толщине стенки втулки b при статико-импульсном упрочнении отверстий с различными натягами i и диаметрами шаров D , при энергии ударных импульсов 160 Дж, частоте 18 Гц (сталь 45, исходная твердость $HV_0 = 1800$ МПа)

Свернутая пластина вставляется в обойму (ступицу) и обрабатывается дорнованием или раскатыванием. В процессе обработки свернутых втулок течение металла происходит как в осевом, так и в тангенциальном направлении, что приводит к заполнению стыка краев свернутой во втулку пластины.

В современном машиностроении появилась устойчивая потребность в многослойных изделиях, состоящих из листов, например, один с высокой твердостью, другой — из более мягкого, пластичного металла; один с высоким коэффициентом теплопроводности, другой прочный и жесткий. Разработана технология получения неразъемных биметаллических соединений, при которой в более прочной детали под углом к нормали поверхности выполняются непараллельные пазы, деталь из более пластичного материала укладывается на поверхность с пазами и обрабатывается ППД (Т.В. Бровман). После этого пазы в первой детали частично заполняются материалом второй, образуя прочное неразъемное соединение. Это позволяет плакировать, например, изношенные детали слоем толщиной в несколько миллиметров с высокой производительностью и с минимальными затратами энергии по сравнению с конкурирующими методами многослойной наплавки, сварки, соединения взрывом.

Использование статико-импульсного дорнования для описанных процессов позволяет значительно расширить номенклатуру обрабатываемых изделий, поскольку может осуществляться обработка не только тонкостенных втулок, но и втулок, имеющих отношение наружного диаметра к внутреннему больше 1,2, а также могут быть получены неразъемные биметаллические изделия, состоящие из слоев большой толщины, достигающей 10...15 мм.

Одним из перспективных направлений повышения контактной выносливости деталей машин является создание упрочненного поверхностного слоя с неравномерно упрочненной (гетерогенной) структурой, содержащей чередующиеся участки высокой и низкой твердо-

сти. Преимуществом материалов с гетерогенной структурой при действии на них циклических контактных нагрузок является торможение вязким и пластичным материалом хрупкой трещины, зародившейся в твердой структурной составляющей. Создание гетерогенной структуры возможно методами термической (В.И. Куманин, Г.А. Дорофеев) и химико-термической обработки (Г.П. Иванов и др.), электроэрозионным синтезом покрытий (В.М. Смелянский, В.А. Земсков), статико-импульсной обработкой ППД (А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев).

При термообработке гетерогенная структура может быть получена варьированием размерами областей нагрева, при этом глубина упрочненного слоя обычно не превышает 0,5 мм [9]. При химико-термической обработке известен метод создания гетерогенной структуры посредством нанесения лаковых масок, который позволяет увеличивать контактную выносливость зубчатых колес в 2–3 раза [10]. При электроэрозионном синтезе на поверхность детали наносится экзотермическая смесь порошков металлов с неметаллическими и органическими связующими, а затем осуществляется ее искровая обработка, в результате которой на поверхности протекают химико-термические реакции, приводящие к образованию сверхтвердых покрытий на основе карбидов, боридов и др., которые формируются в виде отдельных участков на поверхности основного более пластичного материала [11].

Достаточно точно регулировать равномерность упрочнения наклепанного поверхностного слоя позволяет технология СИО. После СИО упрочненная поверхность состоит из пластических отпечатков, которые перекрываются между собой в определенном порядке (рис. 3). Перекрытие пластических отпечатков определяет равномерность упрочнения, которая характеризуется коэффициентом перекрытия

$$K = 1 - \frac{X}{\delta}; \quad X = \frac{s}{f60},$$

где X — расстояние между центрами отпечатков, мм;

δ — размер отпечатка, измеряемого в направлении смещения очага деформации, мм;

s — скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин;

f — частота ударов, Гц.

Диапазон изменения K составляет от 0 до 1: при $K = 0$ отпечатки не перерываются, края отпечатков граничат друг с другом; при $K = 1$ происходит полное перекрытие отпечатков, удары наносятся в одно и то же место.

Установлено, что при режимах СИО, когда $0 \leq K \leq 0,5$, формируется явно выраженная гетерогенно упрочненная структура, для которой характерно чередование твердых и мягких областей (рис. 5). При режимах обработки, когда $0,5 < K < 0,8$, сверху поверхностного слоя равномерность упрочнения увеличивается, а более неравномерно упрочненные участки смещаются вглубь.

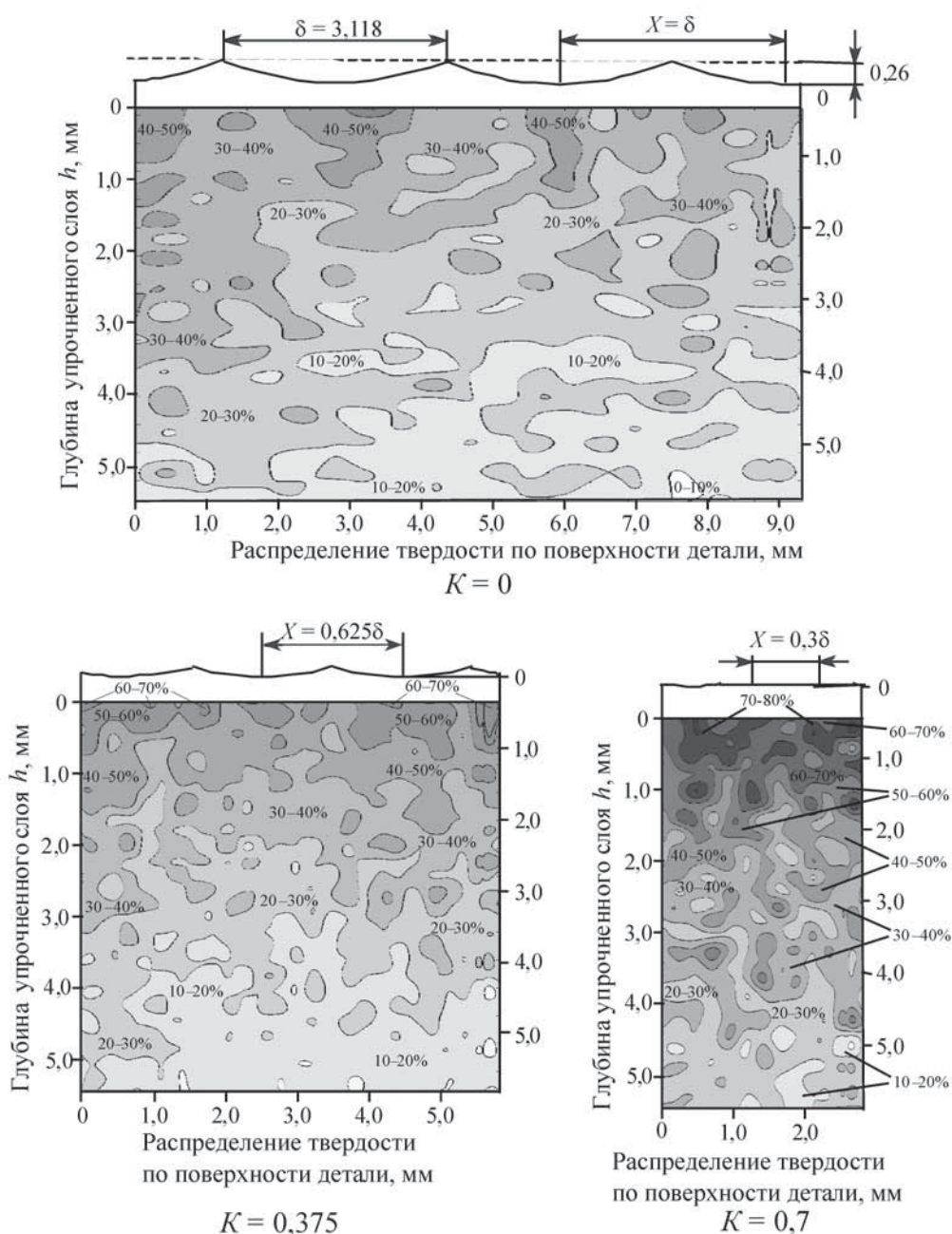


Рис. 5. Распределение упрочненных областей (значение степени упрочнения ΔHV указано в %) в поверхностном слое после СИО ударными импульсами энергией 56 Дж и частотой 8 Гц, стержневым роликом диаметром 10 мм и шириной 15 мм (сталь 45, исходная твердость $HV_0 = 2000$ МПа)

При $0,8 \leq K \leq 0,9$ крупные твердые участки, с твердостью максимально достигаемой для данной стали, расположенные ближе к поверхности, сливаются друг с другом, образуя достаточно равномерно упрочненный поверхностный слой, а на самой поверхности появляются микротрещины – результат перенаклепа.

При испытаниях на контактное выкрашивание установлено [12, 13], что долговечность образцов, имеющих гетерогенно упрочненную структуру, сформированную

при коэффициенте перекрытия $0,35 < K < 0,45$, была повышена в 3–6 раз, при этом в 1,5–2,5 раза снижено количество выкрашиваний и в 2–3 раза уменьшился их размер. При упрочнении с режимами, повышающими коэффициент перекрытия, увеличивается количество и площадь выкрашиваний, а начиная с $K > 0,7$, когда в верхней части упрочненного поверхностного слоя формируются близко расположенные твердые участки со степенью упрочнения, близкой к предельно достижи-

мой для данной стали, контактное выкрашивание становится больше чем у неупрочненной поверхности. Это объясняется значительной потерей пластичности верхней части упрочненного поверхностного слоя металла, что приводит к быстрому развитию микротрещин, приводящих к отслоению металлических частиц.

ППД позволяет полнее реализовать потенциальные возможности других упрочняющих технологий, поэтому широко применяется в комбинированных упрочняющих технологиях, сочетающих воздействия различной физической природы на упрочняемый материал.

Экспериментально доказано, что обработка ППД способствует диффузии, протекающей в металлах и сплавах. Использование ППД перед ХТО интенсифицирует диффузионные процессы и позволяет достигнуть более высоких значений концентрации углерода в диффузионной зоне. Установлено, что поверхностный слой после ППД и ХТО имеет в 2–3 раза меньшее содержание остаточного аустенита и более равномерную структуру скрытоигольчатого мартенсита, в отличие от мелкоигольчатой структуры, получаемой после ХТО без ППД.

В результате технологии, включающей деформационное упрочнение поверхностного слоя перед цементацией, можно ожидать увеличения ресурса работы изделия, по сравнению с ресурсом поверхности, упрочненной только ХТО. Наибольший эффект достигается при сочетаниях режимов ППД и ХТО, обеспечивающих примерно равную толщину упрочненного ППД и диффузионного при ХТО, слоев [14, 15].

Широкие технологические возможности способа упрочнения волной деформации в процессе СИО ППД определяют большие перспективы его использования при создании комбинированных упрочняющих технологий. Используя технологический маршрут обработки: черновая механическая обработка → СИО ППД → ХТО → чистовая механическая обработка для сталей 18ХГТ и 20Х2Н4А долговечность при действии контактных циклических нагрузок была повышена не менее чем в 1,5 раза по сравнению с ХТО.

Следовательно, одним из направлений развития ППД является создание новых технологий, комбинирующих нагрузку очага деформации, а также воздействия различной физической природы на упрочняемый материал, позволяющих расширить возможности при обеспечении, необходимой эпюры упрочнения в соответствии с эксплуатационными требованиями.

Среди способов комбинированного нагружения очага деформации, а также взаимодействия с химико-термической обработкой широкими возможностями обладает статико-импульсная обработка, имеющая в зависимости от формы упрочняемой поверхности ряд разновидностей и позволяющая получать поверхностный слой с различной степенью, равномерностью и глубиной упрочнения до 10 мм, способный увеличивать долговечность деталей до 6 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Одинцов Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. **Технологические** процессы поверхностного пластического деформирования / В.Ю. Блюменштейн, С.А. Зайдес, А.В. Киричек и др. Под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 404 с.
3. **Киричек А.В., Бабичев А.П., Блюменштейн В.Ю.** Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 5. С. 47–52.
4. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г.** Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
5. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л.** Деформационное упрочнение отверстий статико-импульсной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 5. С. 3–5.
6. **Поверхностное** пластическое деформирование длинномерных отверстий / Д.Л. Соловьев, А.В. Киричек, С.А. Силантьев, А.В. Васильев // Известия ОрелГТУ, серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии". 2010. № 6-2 (284). С. 115–117.
7. **Соловьев Д.Л., Киричек А.В., Медведев М.Н.** Возможности повышения долговечности траков гусеничных машин деформационным упрочнением // Известия ОрелГТУ, серия "Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии". 2011. № 2 (286). С. 89–92.
8. **Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Поляков А.В.** Упрочнение отверстий статико-импульсным дорнованием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 6. С. 14–16.
9. **Пат. № 2219271 РФ.** Способ упрочнения сплава на основе железа / Г.А. Дорофеев. 2003. Бюл. № 7.
10. **Иванов Г.П., Картонова Л.В., Худошин А.А.** Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макроструктуры // Строительные и дорожные машины. 1997. № 1. С. 33–34.
11. **Смелянский В.М., Земсков В.А.** Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 27–35.
12. **Установка** для испытаний на контактную выносливость плоских поверхностей деталей машин / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев, С.В. Баринов // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2007. № 3. С. 98–103.
13. **Повышение** контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.В. Баринов, С.А. Силантьев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 7. С. 9–15.
14. **Папшев Д.Д., Пронин А.М., Кубышкин А.Б.** Эффективность упрочнения цементованных деталей машин // Вестник машиностроения. 1990. № 8. С. 61–64.
15. **Киричек А.В., Тарасов Д.Е.** Повышение контактной выносливости деталей из цементуемых сталей упрочнением волной деформации // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4. С. 966–969.

Ю.С. Степанов, В.И. Сотников, А.Н. Ткаченко
(Государственный университет — научно-производственный комплекс, г. Орел)
E-mail: artyom270286@yandex.ru

Экспериментальное исследование процесса комбинированной обработки точением и алмазным выглаживанием торцевых поверхностей деталей из меди

Рассмотрено экспериментальное исследование процесса комбинированной обработки точением и алмазным выглаживанием торцевых поверхностей деталей из меди, выполняемые за один проход с использованием многофакторного планирования эксперимента. Получено уравнение регрессии влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности деталей, позволяющие определять оптимальные условия обработки.

Ключевые слова: комбинированная обработка, шероховатость обработанной поверхности, обработка меди, поверхностная пластическая деформация, алмазное выглаживание, уравнение регрессии.

Considered in this work the experimental investigation of the combined treatment turning and diamond caress of face surfaces of the parts of copper, executed in a single pass using a multivariate experimental design. The regression equation the influence of technological factors on the roughness of the machined surface of parts, allowing to determine the optimum processing conditions.

Keywords: combined treatment, the roughness of the machined surface, the processing of copper, the surface plastic deformation, the diamond caress, the regression equation.

Многочисленные современные исследования эксплуатации изделий с поверхностями, которые работают в условиях высокой тепло- и электропроводности показали, что наиболее важными параметрами поверхностного слоя электротехнических деталей являются геометрические характеристики микронеровностей Ra , Sm , tp и Rp , которые оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхностей, непосредственно прилегающих к полупроводниковому элементу в электротехнических изделиях.

Формирование поверхностного слоя в основном происходит на финишных операциях обработки деталей, что определяет необходимость и важность исследования и внедрения в производство эффективных способов финишной обработки, обеспечивающих автоматическое получение заданных параметров качества поверхностного слоя деталей.

В работе представлены результаты экспериментального исследования процесса выглаживания с точки зрения получения требуемых параметров качества поверхностного слоя электротехнических деталей на основе многофакторного эксперимента.

Для проведения экспериментов был выбран токарно-винторезный станок 16A20Ф3 высокой точности и жесткости, обеспечивающий минимальную подачу $S = 0,01$ мм/об и максимальную частоту вращения шпинделя $n = 2200$ об/мин. Выглаживание производилось с применением *смазочно-охлаждающих технологических средств* (СОТС) — индустриального масла И-20. Э.Г. Грановским было установлено [1], что при-

менение данного СОТС снижает износ алмазного выглаживателя примерно в 5 раз по сравнению с выглаживанием всухую.

Процесс выглаживания совмещали в одной операции с чистовым точением резцом из пластины твердого сплава ВК8. Для проведения исследований выбрали способ выглаживания с жестким закреплением инструмента [2].

Для контроля качества плоской торцевой поверхности электротехнических деталей из меди использовали:

- профилограф-профилометр "АБРИС-ПМ7.2", предназначенный для измерения шероховатости и записи профиля поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, и для измерения шероховатости шаров при использовании дополнительных приспособлений (измерение параметров шероховатости поверхности производили по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789–73);

- производственную измерительную систему "АБРИС-К10.2" исп. 3, предназначенную для измерений отклонений формы, расположения поверхностей, волнистости и гранности деталей машин и приборов в цеховых и лабораторных условиях промышленных предприятий, измерение отклонений от круглости;

- исследовательский микроскоп отраженного света "Axioskop" 2 MAT фирмы CarlZeiss.

Исследования процесса комбинированной обработки точением и алмазным выглаживанием при ряде однофакторных экспериментов, проведенные с использованием синтетического алмаза типа АСПК на токарно-винторезном станке модели 16А20Ф3, подтвердили возможность применения процесса алмазного выглаживания для обработки торцевой поверхности детали "Основание" диодов и тиристоров большой мощности. Исследования показали, что при определенных параметрах исходной шероховатости торцевой поверхности, радиусе выглаживателя, режимов обработки (подачи, скорости и глубины выглаживания) высота микронеровностей обработанной поверхности была лучше требуемой по чертежу [3] ($Ra\ 0,63$) в несколько раз, а отклонение от плоскостности торцевой поверхности после комбинированной обработки не превышает 5 мкм, что хорошо согласуется с результатами, полученными ранее в работах профессора А.В. Киричека [4].

На сегодняшний день существуют либо однофакторные зависимости получаемых значений параметров качества поверхностного слоя от режимов выглаживания [3, 5, 6], либо трехфакторные [7], где предъявлены жесткие требования к параметрам качества поверхностного слоя деталей, достигаемые предшествующей выглаживанию обработкой. Поэтому интересно получить зависимости, учитывающие технологическую наследственность – исходные характеристики микрогеометрии поверхности перед выглаживанием [8].

Классический метод постановки эксперимента предусматривает фиксирование на принятых уровнях всех переменных факторов, кроме одного значения, который определенным образом изменяют в области его существования. Этот метод составляет основу однофакторного эксперимента. При однофакторном эксперименте, варьируя один фактор и стабилизируя все прочие на выбранных уровнях, находят зависимость исследуемой величины только от одного фактора. Производя большое число однофакторных экспериментов при изучении многофакторной системы, получают частотные зависимости, представленные многими графиками, имеющие иллюстративный характер. Найденные таким образом частные зависимости невозможно объединить в одну общую.

Использование однофакторного эксперимента для всестороннего исследования многофакторного процесса требует постановки очень большого числа опытов. Для их выполнения в ряде случаев необходимо значительное время, в течение которого влияние неконтролируемых факторов на результаты опытов может существенно измениться. По этой причине данные большого числа опытов оказываются несопоставимыми. Отсюда следует, что результаты однофакторных экспериментов, полученные при исследовании многофакторных систем, часто малоприменимы для

практического использования и получения рекомендаций для выбора определенных режимов обработки плоских торцевых поверхностей деталей из меди. Поэтому, для изучения многофакторных систем наиболее целесообразным является применение статических методов планирования многофакторного эксперимента, в целях получения зависимостей, учитывающих совместное влияние нескольких факторов на качество получаемого поверхностного слоя.

Для реализации многофакторной регрессионной модели процесса выглаживания был спланирован и поставлен эксперимент, учитывающий результаты предварительных экспериментов [2]. В качестве рассматриваемых факторов были приняты следующие параметры: $Ra_{исх}$ – среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости поверхности перед выглаживанием, мкм; h_3 – величина предварительно заданного натяга, мм; $S_{выг}$ – подача при алмазном выглаживании, мм/об; v – скорость алмазного выглаживания плоских торцевых поверхностей электротехнических деталей из меди, м/мин; $R_{выг}$ – радиус скругления вершины выглаживателя, мм.

В общем случае модель может быть представлена в виде

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где y – функция отклика;

x_1, x_2, \dots, x_n – факторы, от которых зависит отклик и которыми можно варьировать при постановке эксперимента.

В качестве функции отклика принято значение $Ra_{выг}$.

Для проведения исследования была реализована реплика 2^5 , методика реализации которого изложена в [9–11]. Интервалы варьирования принимали исходя из реальных пределов колебаний значений факторов, определенных в результате предварительных поисковых экспериментов.

Для предложенной реплики выбрали квадратичную модель, описание функции отклика которой представлено в виде полинома второй степени в расширенной форме:

$$\begin{aligned} y = & b_0 + b_1 x_1 + b_{11} x_1^2 + b_2 x_2 + b_{22} x_2^2 + \\ & + b_3 x_3 + b_{33} x_3^2 + b_4 x_4 + b_{44} x_4^2 + b_5 x_5 + b_{55} x_5^2 + \\ & + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{15} x_1 x_5 + \\ & + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{25} x_2 x_5 + b_{34} x_3 x_4 + \\ & + b_{35} x_3 x_5 + b_{45} x_4 x_5 + b_{123} x_1 x_2 x_3 + \\ & + b_{124} x_1 x_2 x_4 + b_{125} x_1 x_2 x_5 + b_{234} x_2 x_3 x_4 + \\ & + b_{235} x_2 x_3 x_5 + b_{345} x_3 x_4 x_5 + b_{1234} x_1 x_2 x_3 x_4 + \\ & + b_{1235} x_1 x_2 x_3 x_5 + b_{2345} x_2 x_3 x_4 x_5 + \\ & + b_{12345} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5. \end{aligned}$$

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровень фактора	Факторы				
	Подача $S_{\text{выг}}$, мм/об	Натяг h_3 , мкм	Среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости поверхности перед выглаживанием $Ra_{\text{исх}}$, мкм	Радиус скругления вершины выглаживания, $R_{\text{выг}}$, мм	Скорость алмазного выглаживания v , м/мин
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
Верхний (+)	0,1	0,06	3,6	3	180
Основной (0)	0,055	0,035	1,9	2,25	130
Нижний (-)	0,01	0,01	0,2	1,5	80

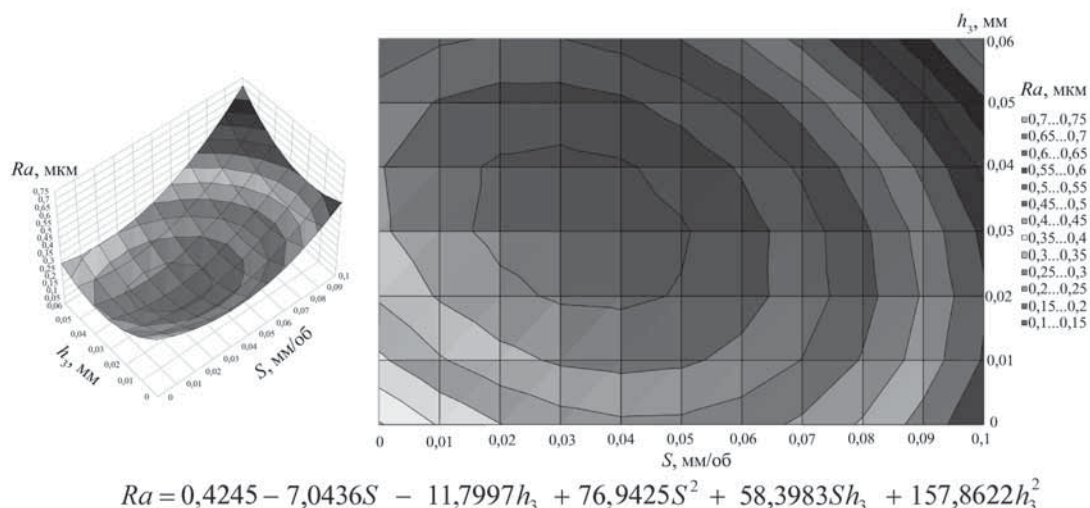


Рис. 1. Зависимость шероховатости плоской торцевой поверхности после алмазного выглаживания от подачи и предварительного натяга алмазного выглаживателя

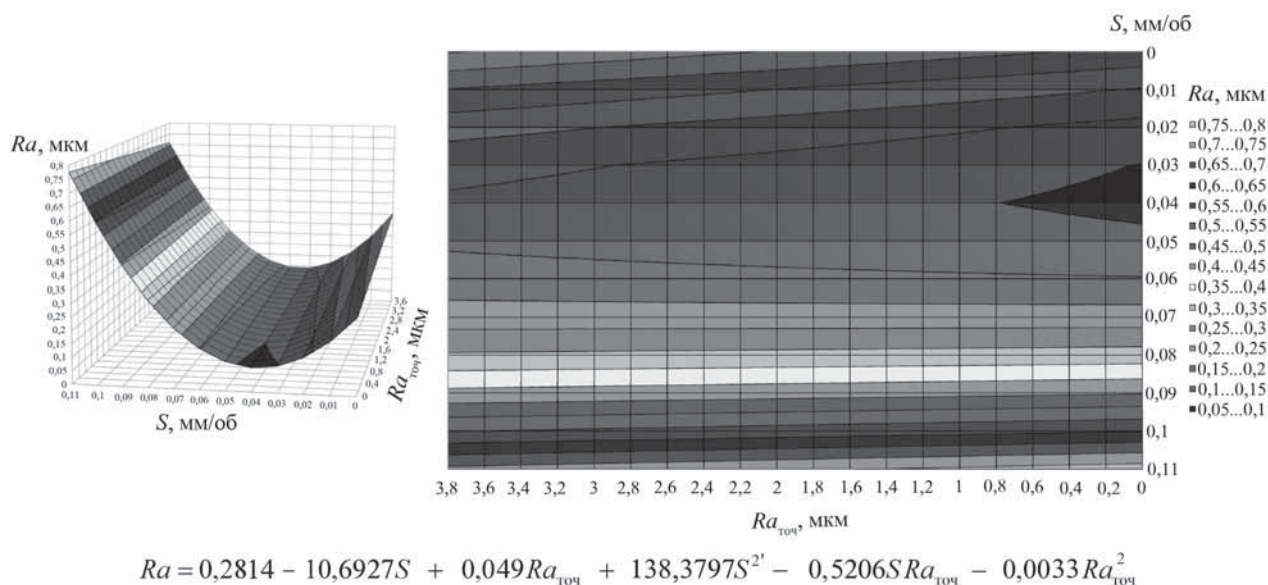
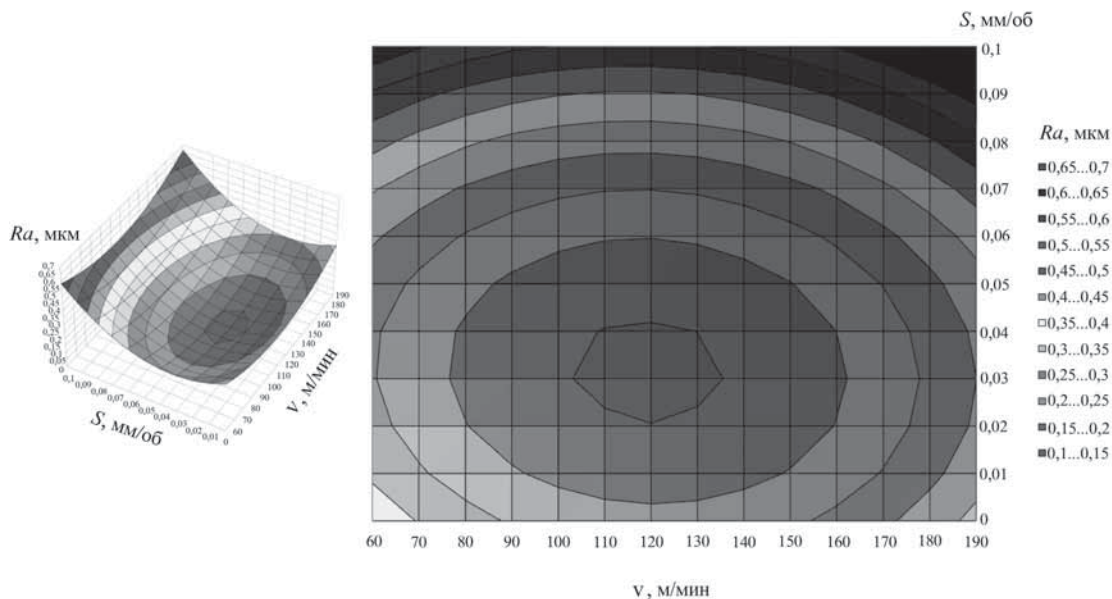


Рис. 2. Зависимость шероховатости плоской торцевой поверхности после алмазного выглаживания от подачи и шероховатости поверхности заготовки после предварительной токарной обработки



$$Ra = 0,6875 - 5,473S - 0,0077V + 76,3847S^2 + 0,0038SV + 3,1557 \cdot 10^{-5}V^2$$

Рис. 3. Зависимость шероховатости плоской торцевой поверхности после алмазного выглаживания от подачи и скорости выглаживания

Факторы, уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице.

Статистическую обработку экспериментальных данных производили на ПЭВМ с помощью программы Statistica® StatSoftInc многофакторного регрессионного анализа методом наименьших квадратов [12, 13].

В результате обработки экспериментальных данных и отбора коэффициентов уравнения регрессии со статистическим уровнем значимости (p – уровень) менее 0,05 было получено уравнение регрессии влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности электротехнических деталей из меди $Ra_{\text{выг}}$:

$$Ra_{\text{выг}} = 1,6578 + 12,2531S + 40,1981h_3^2 + 0,0979Ra_{\text{точ}} - 1,6480R + 0,3618R^2 - 104,9883Sh_3 - 1,2938SRa_{\text{точ}} - 3,5469SR + 0,00029RV + 49,8327Sh_3R - 0,7140h_3Ra_{\text{точ}}R + 10,0880Sh_3Ra_{\text{точ}}R.$$

На рис. 1–7 представлены графики влияния технологических факторов на шероховатость обработанной поверхности.

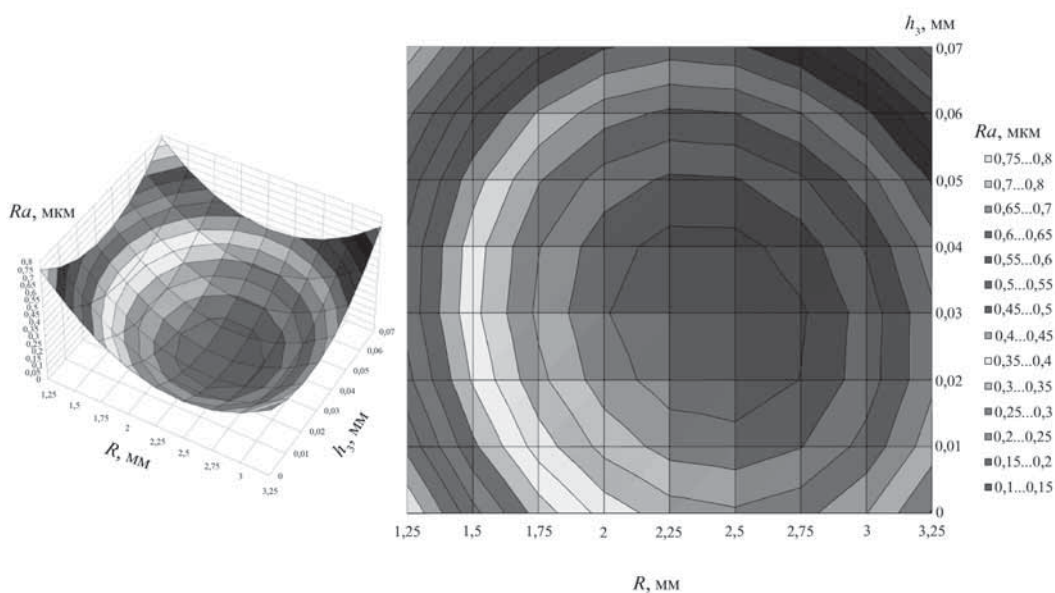


Рис. 4. Зависимость шероховатости плоской торцевой поверхности после алмазного выглаживания от предварительного натяга и радиуса скругления вершины алмазного выглаживателя

$$Ra = 2,2958 - 15,26h_3 - 1,6439R + 190,4344h_3^2 + 1,8244h_3R + 0,3308R^2$$

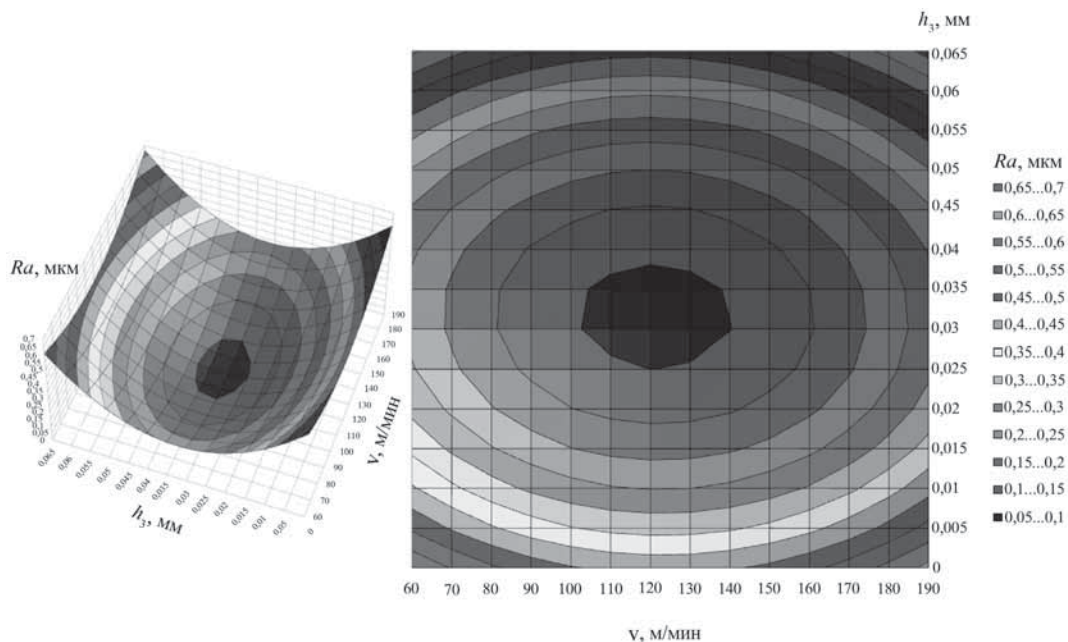


Рис. 5. Зависимость шероховатости плоской торцевой поверхности после алмазного выглаживания от предварительного натяга инструмента и скорости выглаживания

$$Ra = 1,0529 - 22,6642h_3 - 0,01V + 347,0028h_3^2 + 0,0051h_3V + 4,0714 \cdot 10^{-5}V^2$$

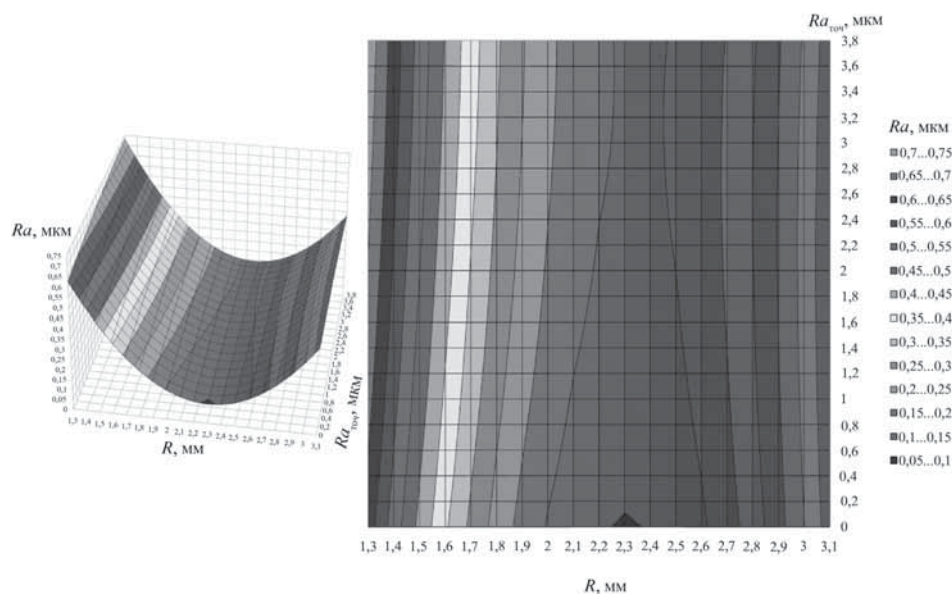


Рис. 6. Зависимость шероховатости плоской торцевой поверхности после алмазного выглаживания от шероховатости поверхности заготовки после токарной обработки и радиуса скругления вершины алмазного выглаживателя

$$Ra = 2,8564 + 0,0711Ra_{\text{точ}} - 2,397R - 0,0044Ra_{\text{точ}}^2 - 0,0181Ra_{\text{точ}}R + 0,5202R^2$$

Выводы

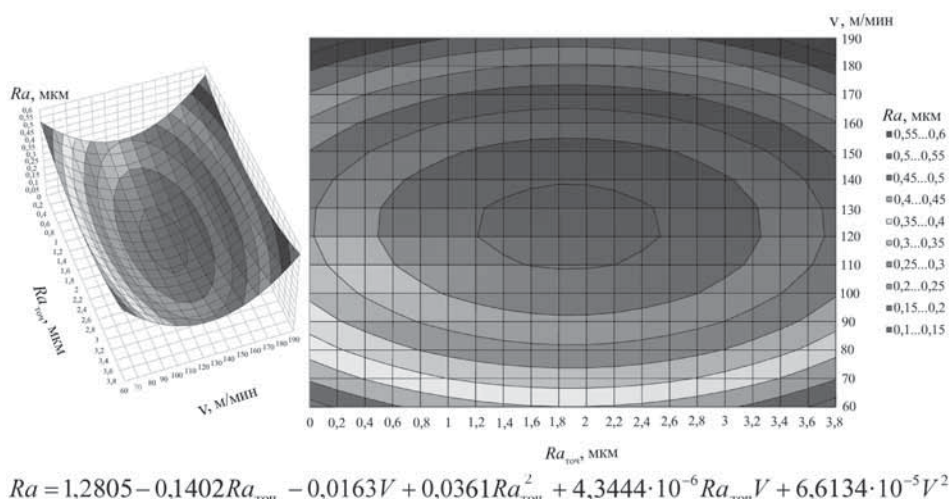
В работе рассмотрено экспериментальное исследование процесса комбинированной обработки точением и алмазным выглаживанием торцевых поверхностей деталей из меди, выполняемые за один проход.

На основе многофакторного эксперимента получено уравнение регрессии влияния технологических

факторов на шероховатость обработанной поверхности деталей.

Из графиков, построенных по этим уравнениям, видно, что при оптимальной исходной шероховатости торцевой поверхности, радиусе выглаживателя, режимах обработки (подачи, скорости и предварительного натяга) высота микронеровностей обработанной поверхности была лучше требуемой по чертежу \approx в 8 раз и достигала $Ra = 0,08$ мкм.

Рис. 7. Зависимость шероховатости плоской торцевой поверхности после алмазного выглаживания от шероховатости поверхности заготовки после токарной обработки и скорости выглаживания



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 105 с.
2. Степанов Ю.С., Сотников В.И., Ткаченко А.Н. Реализация комбинированного способа обработки плоских торцов деталей из меди // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2009. № 2—5/271 (546). С. 46—50.
3. Степанов Ю.С., Сотников В.И., Ткаченко А.Н. Исследование влияния алмазного выглаживания на шероховатость торцевой поверхности деталей из меди // Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 11-й Междунар. науч.-практ. конф. в 2-х ч. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. Ч. 2. С. 296—302.
4. Киричек А.В. Повышение качества аморфной ленты технологическими методами обработки литейных дисков из сплавов меди: дис. ... канд. техн. наук. Московский институт приборостроения. 1992. 202 с.
5. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

6. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
7. Сулов А.Г., Хандожко А.В., Орлов А.И. Измерительная система для шероховатости и волнистости АТС // Контроль. Диагностика. 1999. № 3 (9). С. 25—27.
8. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск.: Наука и техника, 1977. 256 с.
9. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
10. Ящерицын П.И., Махарский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении. Минск.: Высш. шк., 1985. 286 с.
11. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. М.: Атомиздат, 1978. 232 с.
12. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Учебник. М.: Бином-Пресс, 2007. 512 с.
13. Боровиков В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. 2-е изд. СПб.: Питер, 2003. 688 с.

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 05.06.12 г. Подписано в печать 24.07.12 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,68. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4