

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 16  
2020  
№ 9 (189)  
сентябрь

Издается с января 2005 г.

**Главный редактор**  
д.т.н., проф.  
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного совета**

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

**Заместитель главного редактора**

д.ф.-м.н., проф.  
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**

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

**Редакционный совет:**

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.  
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.  
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.  
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.  
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.  
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.

В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.  
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.  
Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.  
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.  
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.  
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

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

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.  
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.  
Ян СУХАНЭК

Мариан СЧЕРЕК

Войтек ХОМИК

**Редакция:**

О.С. ЛУКАШЕНКО

А.В. ОРЛОВА

Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.  
Тел.: (499) 269-52-98,  
268-47-19.  
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ



### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

- Анкудимов Ю.П., Садовая И.В.** Теоретико-вероятностная оценка энергетических возможностей вибрационной отделочно-упрочняющей обработки в металлических обрабатываемых средах ..... 387
- Берберов С.А., Лебедев В.А., Кочетов А.Н., Тороп Ю.А.** Повышение эффективности процесса дорнования шлицевых отверстий в условиях воздействия ультразвукового поля ..... 391
- Бутенко В.И.** Влияние начального состояния поверхностей деталей на технологическую совместимость создаваемых на них функциональных слоев и покрытий ..... 394
- Чаава М.М., Серга Г.В., Аль Обайди Луаи Мохаммед Раджаб.** Технологическая схема отделочно-упрочняющей обработки деталей в станках с винтовыми рабочими органами и обоснование мощности их привода ..... 400



### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Иванов В.В., Попов С.И., Донцов Н.С., Курская И.А.** Нанесение вибрационного двухкомпонентного твердосмазочного механохимического покрытия на различные детали из титанового сплава ..... 404
- Крупеня Е.Ю., Шишкина А.П.** Технологические возможности виброотделки деталей гранулированными органическими средами из природных материалов ..... 407
- Попов М.Е., Попов А.М., Корольков Ю.В., Сухоруков К.А.** Исследование процесса центробежно-ротационной обработки деталей в гранулированных средах ..... 411
- Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Троицкий В.М., Мордовцев А.А.** Подготовка деталей под покрытие обработкой в гранулированных абразивных средах ..... 416
- Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Сосницкая Т.С., Новокрещенов С.А.** Обеспечение надежности технологических процессов обработки деталей динамическими методами ППД ..... 419



### КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

- Лебедев В.А., Кочубей А.А., Давыдова И.В., Дёмин Г.В.** Технологические особенности упрочнения деталей в устройствах с вращающимся электромагнитным полем ..... 424
- Мельникова Е.П., Прокопец Г.А., Прокопец А.А.** Обеспечение качества изделий на основе обоснования метода финишной обработки и ее надежности ..... 427

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 по группам научных специальностей: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 16  
2020  
№ 9 (189)  
September

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 Assistant**

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

**Chairman Assistants:**

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

**Editorial council:**

Yu.P. ANKUDIMOV  
V.P. BALKOV  
V.M. BASHKOV  
A.I. BELIKOV  
A.I. BOLDYREV  
S.N. GRIGORIEV  
V.E. GROMOV  
S.A. KLIMENKO  
Yu.R. KOPYLOV  
N.K. KRIONI  
V.P. KUZNETSOV  
V.A. LEBEDEV  
V.V. LYUBIMOV  
E.D. MAKARENKO  
B.Ya. MOKRITSKY  
F.I. PANTELEENKO  
H.M. RAKHIMYANOV  
B.P. SAUSHKIN  
V.V. SLEPTSOV  
V.P. SMOLENTSEV  
A.M. SMYSLOV  
G.A. SUKHOCHEV  
V.P. TABAKOV  
V.A. SHULOV  
M.L. KHEIFETS  
Jan SUCHANEK  
Marian SZCZEREK  
Wojciech HOMIK

**Edition:**

O.S. LUKASHENKO  
A.V. ORLOVA  
E.A. SERIKOVA

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

Journal is registered by  
Roskomnadzor. The certificate  
of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015

## CONTENTS

### GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

- Ankudimov Yu.P., Sadovaya I.V.** Probability theoretical assessment of energy capabilities of vibration finishing and strengthening in metal processing mediums ..... 387
- Berberov S.A., Lebedev V.A., Kochetov A.N., Torop Yu.A.** Improving in mandrelling efficiency of spline holes under influence of ultrasonic field ..... 391
- Butenko V.I.** Effect of initial condition of parts surfaces on technological compatibility of functional layers and coatings created on them ..... 394
- Chaava M.M., Serga G.V., Al Obaydi Luai Mohammed Rajab.** Technological scheme of finishing and strengthening of parts in screw working elements machines and rationale for their drive power ..... 400

### MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

- Ivanov V.V., Popov S.I., Dontsov N.S., Kurskaya I.A.** Application of two-component vibration-based solid-lubricant mechanical and chemical coating on various titanium alloy parts ..... 404
- Krupenya E.Yu., Shishkina A.P.** Technological capabilities of vibration finishing of parts by granular organic media from natural materials ..... 407
- Popov M.E., Popov A.M., Korol'kov Yu.V., Sukhorukov K.A.** Study of centrifugal rotary processing of parts in granular media ..... 411
- Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Troitsky V.M., Mordovtsev A.A.** Preparation of parts for coating by granular abrasive media treatment ..... 416
- Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Sosnitskaya T.S., Novokreshchenov S.A.** Reliability control of technological processes of parts processing by dynamic methods of surface plastic deformation ..... 419

### QUALITY CONTROL OF STRENGTHENING PROCESSING

- Lebedev V.A., Kochubey A.A., Davydova I.V., Demin G.V.** Technological features of parts hardening in rotating electromagnetic field devices ..... 424
- Mel'nikova E.P., Prokopets G.A., Prokopets A.A.** Quality control of products based on justification of finishing treatment method and its reliability ..... 427

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 according to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology; 05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment; 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,  
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform



Ю.П. Анкудимов, И.В. Садовая

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

E-mail: [ankudimov50@mail.ru](mailto:ankudimov50@mail.ru)

## Теоретико-вероятностная оценка энергетических возможностей вибрационной отделочно-упрочняющей обработки в металлических обрабатывающих средах

*Приведены результаты исследования уровня энергетического взаимодействия частиц обрабатывающей среды с поверхностью обрабатываемых деталей на основе анализа следов обработки.*

**Ключевые слова:** *вибрационная отделочно-упрочняющая обработка, энергия воздействия обрабатывающей среды, параметры качества поверхности детали.*

*The results of the energy interaction level of the processing medium particles with the surface of the workpieces based on the analysis of processing traces are presented.*

**Keywords:** *vibration finishing and strengthening treatment, processing medium action energy, part surface quality parameters.*

Вибрационная отделочно-упрочняющая обработка (ВиОУО) успешно применяется в технологии изготовления деталей машин и приборов. Большой интерес специалистов к этому методу объясняется его широкими технологическими возможностями и технико-экономическими преимуществами. Вибрационная отделочно-упрочняющая обработка используется для создания оптимальных параметров шероховатости, упрочнения вибронаклепом, повышения микротвердости, создания остаточных напряжений сжатия, снижения концентрации напряжений. Особенности этого способа ППД — высокая производительность, низкая себестоимость, отсутствие вредных условий труда, возможность обработки деталей различной формы и размеров.

Большой вклад в изучение теоретических основ ВиОУО и ее практическое использование внес А.П. Бабичев и другие сотрудники кафедры "Технологии машиностроения" ДГТУ [1].

Развитие процесса ВиОУО происходит в нескольких направлениях. Во-первых, постоянно совершенствуется теоретическая база и идет дальнейшее изучение его основных закономерностей. Во-вторых, на этой основе совершенствуются известные и создаются новые разновидности обработки, появляются и исследуются новые технологические возможности.

Вибрационная отделочно-упрочняющая обработка заключается в механическом взаимодействии об-

рабатываемых деталей с обрабатывающей средой, помещенной в рабочую камеру вибрационного станка. Детали могут устанавливаться на внешних манипуляторах, крепиться к стенкам контейнера или свободно загружаться в обрабатывающую среду. Рабочая камера устанавливается на упругих элементах: чаще всего на цилиндрических и С-образных пружинах или пневмобаллонах. Ей сообщается одно-, двух- или трехкомпонентная вибрация, в результате чего происходят взаимное соударение и скольжение обрабатываемых деталей и частиц обрабатывающей среды.

Наименее исследованы закономерности вибрационной отделочно-упрочняющей обработки свободно загруженных деталей, вследствие наличия множества дополнительных факторов, влияющих на уровень силового взаимодействия обрабатывающей среды с деталями и носящих случайный характер (соотношение соударяющихся масс, углы ударов и т. д.).

Показатели качества поверхностей деталей при ВиОУО определяются в первую очередь силовыми (энергетическими) параметрами процесса. При правильно заданных режимах деталь приобретает высокие эксплуатационные свойства и, наоборот, неудачный их выбор ведет к ухудшению свойств или не реализует полностью технологические возможности обработки [4]. Возможность получения поверхности детали со свойствами, отличными от свойств основного металла, определяется уровнем механической энергии,

передаваемой поверхностному слою частицами рабочей среды, температурой процесса и наличием таких факторов, как химические реакции, акустические волны, электрическое и магнитное поле и др. [2, 3, 5].

Баланс механической энергии при взаимодействии обрабатываемой среды со свободно загруженной в рабочую камеру вибрационного станка деталью имеет вид:

$$\Theta = \Theta_d + \Theta', \quad (1)$$

где  $\Theta_d$ ,  $\Theta'$  — кинетическая энергия, идущая соответственно на деформирование и перемещение детали;  $\Theta$  — кинетическая энергия столба частиц обрабатываемой среды относительно детали:

$$\Theta = \frac{m_{\text{пр}} K_M (\bar{v}_1 - \bar{v}_2)^2}{2}, \quad (2)$$

где  $K_M$  — коэффициент одновременности действия столба частиц высотой  $h_c$ ;  $m_{\text{пр}} = \sum_1^n m_i$  — приведенная масса столба частиц обрабатываемой среды, кг;  $m_i$  — масса одной частицы, кг;  $n$  — число частиц в столбе;  $\bar{v}_1 - \bar{v}_2$  — векторная разность скоростей частицы обрабатываемой среды и детали, м/с;

Часть кинетической энергии  $\Theta_d$  при соударении с упруго-пластическим материалом поверхности условно можно разделить на деформацию упругую и пластическую с выделением количества энергии на тепловые потери:

$$\Theta_d = \Theta_{\text{упр}} + \Theta_{\text{пл}} + \Theta_{\text{т.п}}, \quad (3)$$

где  $\Theta_{\text{упр}}$ ,  $\Theta_{\text{пл}}$ ,  $\Theta_{\text{т.п}}$  — энергия, затрачиваемая на упругое, пластическое деформирование и тепловые потери соответственно.

На основе законов классической механики при условии разделения свойств материала, используя коэффициент восстановления  $K$ , равный отношению скоростей частиц обрабатываемой среды после и до соударения с поверхностью, проведен расчет распределения энергии прямого удара  $E_k$  по указанным направлениям:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{упр}} &= K^2 \Theta_d; \quad \Theta_{\text{пл}} = K(1 - K) \Theta_d; \\ \Theta_{\text{т.п}} &= (1 - K) \Theta_d; \quad E_{\text{упл}} = KE_k. \end{aligned} \quad (4)$$

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что максимальное значение энергии, затрачиваемой на пластическое деформирование, не может превышать 25 % общей кинетической энергии удара  $\Theta_d$ , при этом  $K = 0,5$ . Уменьшение энергии, расходуемой на пластическую деформацию, когда  $K < 0,5$ , происходит за счет увеличения энергии на тепловые потери; а при  $K > 0,5$  — за счет увеличения энергии на упругую деформацию поверхностного слоя.

Количественная оценка расходуемой энергии воздействия обрабатываемой среды на поверхность детали затруднена при ВиОУО вследствие стохастичности самого процесса.

В процессе низкочастотных колебаний детали и обрабатываемая среда непрерывно подвергаются

переменным по знаку ускорениям, приходят в интенсивное относительное перемещение, совершая два вида движения: быстрые колебания (вибрацию) и медленное вращение всей массы загрузки (циркуляцию). Результат таких движений — случайный характер соударения частиц среды с поверхностью детали и как следствие варьирование в широких пределах параметров зависимости (2). В то же время часть этой энергии — энергию, идущую на деформирование поверхностного слоя, можно оценить по оставляемым на поверхности следам обработки — отпечаткам.

Исходя из принципа независимости развития пластической и упругой деформаций, а также на основании предположения о равенстве энергий, затрачиваемых на упругопластическое внедрение при статическом и динамическом вдавливании, энергию, затрачиваемую на образование пластического отпечатка  $\Theta_{\text{пл}}$  и энергию, восстанавливаемую при отскоке частицы  $\Theta_{\text{упр}}$  можно определить из выражений:

$$\Theta_{\text{пл}} = \int_0^h F dh; \quad (5)$$

$$\Theta_{\text{упр}} = \int_0^l P_l dl, \quad (6)$$

где  $F$  — сила пластического вдавливания;  $h$  — глубина восстановленного отпечатка;  $P_l$  — текущее значение силы при упругом восстановлении отпечатка;  $l$  — упругая составляющая глубины отпечатка.

Учитывая, что диаметр отпечатка  $d$  при восстановлении практически не изменяется и, обозначив радиус кривизны частицы обрабатываемой среды  $0,5D$ , используем уравнение Мейера:

$$F = A_1 D^2 \left( \frac{d}{D} \right)^n,$$

где  $A_1$  и  $n$  — коэффициенты, зависящие от свойств материала,

$$h \approx \frac{d^2}{4D_1};$$

$D_1$  — двойной радиус кривизны восстановленной лунки,

$$\frac{1}{D_1} = \frac{1}{D} - \frac{7,5(1 - \mu^2)}{dE} \sigma_s,$$

где  $\sigma_s$ ,  $E$ ,  $\mu$  — предел текучести, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала детали.

Из приведенных зависимостей (5), (6) с учетом (4) установлена функциональная связь между диаметром пластического отпечатка и уровнем кинетической энергии частицы обрабатываемой среды, вызывающей этот отпечаток:

$$d = \sqrt[4]{\frac{3\Theta_d D(1 - 3/8K^2)}{\sigma_s}}. \quad (7)$$

Стохастичность процесса приводит к образованию на поверхности обрабатываемой детали отпечатков различных размеров. Для установления закона и па-

раметров распределения случайной величины — диаметра отпечатка в зависимости от режимов обработки был проведен многофакторный эксперимент на образцах из модельного материала — сплава  $O_3$  с низким пределом текучести ( $\sigma_s = 15$  МПа). Образцы крепили на оправках и помещали в рабочую камеру вибрационного станка на 4...5 с с обрабатывающей средой — стальными шарами из стали ШХ15 твердостью 62...64 HRC. Измерение отпечатков проводили с точностью до 0,01 мм. Для овальных отпечатков в качестве диаметра принимали наибольший размер в поперечном направлении.

Варьировали следующие параметры в диапазонах: амплитуда колебаний 1...3,5 мм; частота колебаний 25...33 Гц; объем рабочей камеры 5...25 дм<sup>3</sup>; масса обрабатываемой детали 0,05...0,5 кг; диаметр обрабатывающей среды 4...14 мм.

В результате математической обработки базы данных многофакторного эксперимента была выбрана эмпирическая степенная модель с использованием нормы Гаусса, т.е. минимизировали сумму квадратичных отклонений значений функции  $[C1(V_i)C2(A_i)C3(f_i)C4(m_i)C5(D_i)C6]$  и значений  $d_i$ , полученных экспериментально с использованием программы Mathcad.

Имеем следующие эмпирические зависимости для среднего размера отпечатка и среднеквадратичного отклонения от среднего:

$$a = 0,041V^{0,134}A^{0,361}D^{0,789}m^{0,178}; \quad (8)$$

$$\sigma = 0,056V^{0,164}A^{0,286}D^{0,416}m^{0,054}. \quad (9)$$

Данная модель работает в интервалах исследуемых факторов.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать выводы:

— максимальное влияние на размеры следов обработки оказывает диаметр частиц обрабатывающей среды;

— масса обрабатываемой детали оказывает влияние на размер отпечатков, не вызывая заметного изменения их разброса;

— частота колебаний камеры в диапазоне 25...33 Гц практически не влияет на размер и распределение отпечатков, поэтому допустимо ее не учитывать при расчетах.

По полученной модели были построены поверхности отклика для распределения математического ожидания  $M(d)$  и дисперсии  $\sigma(d)$  размеров следов обработки от режимов и условий (рис. 1 и 2, см. обложку).

Получив зависимости (8), (9) и зная теоретическую взаимосвязь энергии частицы обрабатывающей среды и диаметра отпечатка (7), можно вычислить функцию распределения энергии взаимодействия частиц обрабатывающей среды с обрабатываемой поверхностью:  $F(\Theta_d)$  и ее параметры  $M(\Theta_d)$  и  $D(\Theta_d)$  — математическое ожидание и дисперсию:

$$F(\Theta_d) = 0,5 + 0,5 \operatorname{erf} \left( \frac{\sqrt[4]{\Theta_d/B - a}}{\sqrt{2}\sigma} \right), \quad (10)$$

где  $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt$ ;

$$M(\Theta_d) = B(a^4 + 6a^2\sigma^2 + 3\sigma^4); \quad (11)$$

$$D(\Theta_d) = (B/1,5)^2(a^6\sigma^6 + 10,5a^4\sigma^4 + 24a^2\sigma^6 + 6\sigma^8), \quad (12)$$

где значение коэффициента  $B$ , учитывая зависимость (7) и механические свойства модельного материала, на котором проводили эксперименты, в первом приближении (сохраняя единицу величины  $D$ , мм) можно принять:  $B = 1/150D$ . Вид функции  $F(\Theta_d)$  представлен на рис. 3.

Полученные зависимости позволяют связать режимы и условия применения вибрационной отделочно-упрочняющей обработки с ее энергетическими возможностями. Такая взаимосвязь представлена в таблице, которая составлена для условий вибраци-

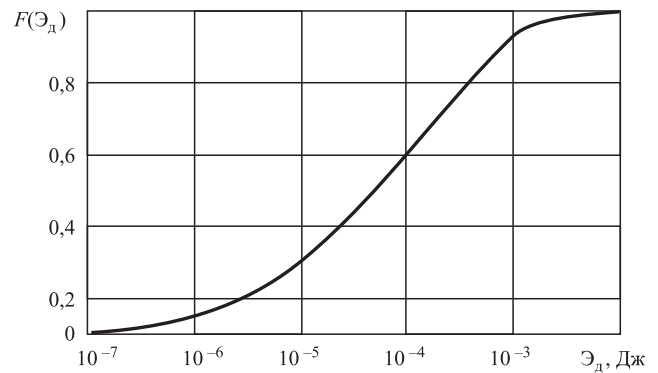


Рис. 3. График функции  $F(\Theta_d)$

Значения  $M(\Theta_d)$  и  $D(\Theta_d)$  в зависимости от условия обработки

Постоянные параметры	Изменяемый параметр	Значение параметра					
		0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$V = 10$ дм <sup>3</sup> $m = 0,1$ кг $D = 8$ мм $B = 0,0008$	$a$ , мм	0,1564	0,2007	0,232	0,2576	0,2792	0,2981
	$\sigma$	0,1462	0,1776	0,1989	0,2156	0,2295	0,2415
	$M(\Theta_d)$ , Дж	$4,26 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$2,45 \cdot 10^{-5}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$
	$D(\Theta_d)$ , Дж <sup>2</sup>	$3,15 \cdot 10^{-12}$	$1,709 \cdot 10^{-11}$	$4,6 \cdot 10^{-11}$	$9,326 \cdot 10^{-11}$	$1,61 \cdot 10^{-10}$	$2,52 \cdot 10^{-10}$

Постоянные параметры	Изменяемый параметр	Значение параметра			
		5	15	100	200
$A = 2,5 \text{ мм}$ $m = 0,1 \text{ кг}$ $D = 8 \text{ мм}$ $B = 0,0008$	$V, \text{ дм}^3$	5	15	100	200
	$a$	0,2499	0,2979	0,4036	0,4509
	$\sigma$	0,2026	0,2469	0,3474	0,3936
	$M(\Theta_d), \text{ Дж}$	$2,029 \cdot 10^{-5}$	$4,293 \cdot 10^{-5}$	$1,5689 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$
	$D(\Theta_d), \text{ Дж}^2$	$6,171 \cdot 10^{-11}$	$2,829 \cdot 10^{-10}$	$3,932 \cdot 10^{-9}$	$1,029 \cdot 10^{-8}$
$A = 2,5 \text{ мм}$ $V = 100 \text{ дм}^3$ $D = 8 \text{ мм}$ $B = 0,0008$	$m, \text{ кг}$	0,01	0,10	1,00	10,00
	$a$	0,2792	0,4036	0,5834	0,8432
	$\sigma$	0,3474	0,3474	0,3474	0,3474
	$M(\Theta_d), \text{ Дж}$	$8,857 \cdot 10^{-5}$	$1,568 \cdot 10^{-4}$	$3,384 \cdot 10^{-4}$	$8,871 \cdot 10^{-4}$
	$D(\Theta_d), \text{ Дж}^2$	$1,714 \cdot 10^{-9}$	$3,932 \cdot 10^{-9}$	$1,177 \cdot 10^{-8}$	$4,695 \cdot 10^{-8}$
$V = 10 \text{ дм}^3$ $m = 0,1 \text{ кг}$ $A = 2,5 \text{ мм}$	$D, \text{ мм}$	3	8	12	20
	$B$	0,0022	0,00083	0,00055	0,00033
	$a$	0,1364	0,279	0,3754	0,545
	$\sigma$	0,152	0,229	0,2721	0,337
	$M(\Theta_d), \text{ Дж}$	$1,007 \cdot 10^{-5}$	$3,255 \cdot 10^{-5}$	$5,498 \cdot 10^{-5}$	$1,099 \cdot 10^{-4}$
	$D(\Theta_d), \text{ Дж}^2$	$2,048 \cdot 10^{-11}$	$1,612 \cdot 10^{-10}$	$3,989 \cdot 10^{-10}$	$1,308 \cdot 10^{-9}$

онной отделочно-упрочняющей обработки как входящих, так и выходящих за пределы варьируемых параметров эксперимента.

### Заключение

Проведенные исследования показали, что оценка уровня энергии взаимодействия частиц обрабатываемой среды по зависимости (2) дает удовлетворительные результаты, попадающие в интервал значений, определяемый математическим ожиданием и дисперсией (11), (12). Так, при большой массе детали, когда условия обработки приближаются к условиям обработки закрепленной детали ( $\Theta' = 0$ ), расчет по зависимости (2) дает средние значения энергии  $M(\Theta_{d0})$  при  $m_{пр}K_m \approx 3m_i$ .

Анализ значений дисперсии  $D(\Theta_d)$  показал наличие большого количества низких и более высоких уровней энергии, причем отличие от среднего значения увеличивается по мере ужесточения режимов обработки. В целом можно отметить, что наибольшее влияние на уровень энергии частиц обрабатываемой среды оказывают амплитуда колебаний рабочей камеры и диаметр частиц среды. Так, увеличение амплитуды в 3 раза от 0,5 до 1,5 мм или от 1 до 3 мм повышает энергию в 4 раза. Увеличение диаметра частицы в 4 раза повышает энергию еще значительнее — в 5,5 раза, в то время как увеличение массы обрабатываемой детали в 10 раз повышает уровень энергии, идущей на деформацию поверхностного слоя, только в 2 раза. Частота колебаний в исследуемом диапазоне практически значимого влияния на уровень энергии не оказывает.

Знание энергетических параметров вибрационной отделочно-упрочняющей обработки позволяет теоретически обосновывать ее технологические возможности. Полученные зависимости могут быть полезны специалистам, работающим в области упрочняющих технологий для научно обоснованного назначения режимов рассматриваемого метода обработки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2008. 694 с.
2. **Анкудимов Ю.П., Анкудимов П.Ю.** Операционные возможности метода вибрационной обработки при комплексном энергетическом воздействии на технологическую систему // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 8. С. 26—28.
3. **Анкудимов Ю.П., Чаава М.М., Чернега Ю.Г.** Применение комплексного энергетического воздействия для модифицирования поверхностного слоя стальных деталей методом вибрационной обработки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 8 (128). С. 28—33.
4. **Анкудимов Ю.П., Садовая И.В., Чернега Ю.Г.** Энергетическая оценка амплитудно-частотных и временных режимов вибрационной обработки на основе моделирования ее виброударной системы // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 2 (53). С. 11—15.
5. **Application of Aluminum Coatings in Vibrational Finishing of Steel Parts / Yu.P. Ankudimov, I.V. Sadovaya, M.M. Chaava et al. // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38. No. 9. P. 733—734.**

С.А. Берберов, В.А. Лебедев, А.Н. Кочетов, Ю.А. Тороп  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: va.lebidev@yandex.ru

## Повышение эффективности процесса дорнования шлицевых отверстий в условиях воздействия ультразвукового поля

Проведен анализ технологических параметров процесса отделочно-упрочняющей обработки шлицевых отверстий фасонными дорнами. Показано, что основным технологическим параметром, обуславливающим эффективность обработки, является тяговая сила. Предложена технологическая схема дорнования шлицевых отверстий зубчатых колес, обеспечивающая его снижение путем наложения на обрабатываемую деталь ультразвукового поля.

**Ключевые слова:** дорнование, фасонный дорн, шлицевое отверстие, тяговая сила, ультразвуковое поле.

The analysis of the technological parameters of the finishing and strengthening of spline holes by shaped mandrels is performed. It is shown that the main technological parameter determining the processing efficiency is pull. Technological scheme for the mandrelling of spline holes of gear wheels is proposed, which ensures its reduction by applying ultrasonic field to the workpiece.

**Keywords:** mandrelling, shapon mandrel, spline hole, pull, ultrasonic field.

### Введение

Дорнование — один из эффективных методов отделочно-упрочняющей обработки шлицевых отверстий деталей машин пластическим деформированием, который осуществляется фасонными дорнами путем проталкивания или протягивания их сквозь шлицевое отверстие на прессе или на протяжном станке [1].

В результате проведенных исследований процесса обработки дорнованием решен целый комплекс вопросов, обуславливающих его практическое применение [2, 3]. Разработана конструкция шлицевого дорна (рис. 1), обеспечивающая эффективную реализацию процесса дорнования при помощи рабочих органов

в виде твердосплавных пластин 2, имеющих заборные и обратные конуса по наружному диаметру и боковым поверхностям шлица и калибрующие ленточки.

Определены геометрические параметры рабочих поверхностей фасонных дорнов, которые играют важную роль в процессе дорнования, так как оказывают существенное влияние на условия деформирования поверхностного слоя металла, изменение тяговых сил, качество обработанной поверхности, износостойкость дорнов. Установлены основные технологические параметры процесса дорнования, обуславливающие механизм поверхностного пластического деформирования и формирование геометрических и физико-механических характеристик качества поверхностного слоя.

**Цель работы** — проведение анализа закономерностей влияния технологических параметров на процесс дорнования и выработка предложений по повышению его технологической эффективности.

### Технологические параметры процесса дорнования

При обработке шлицевых отверстий дорнованием основными технологическими параметрами процесса являются геометрия инструмента, тяговые силы, натяг и скорость дорнования. Обобщая результаты теоретических и экспери-

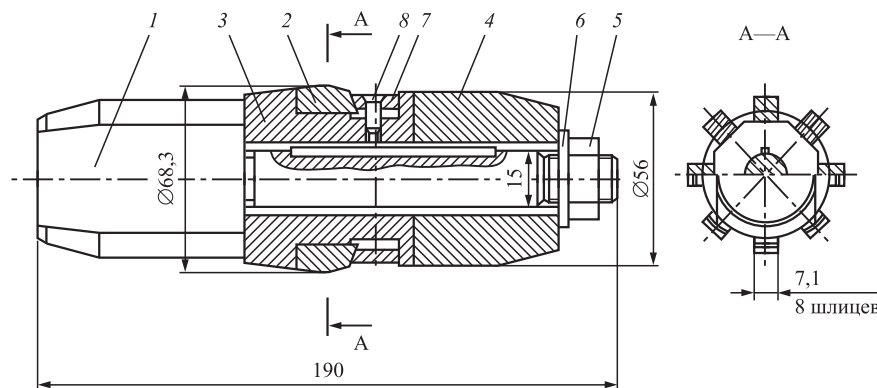
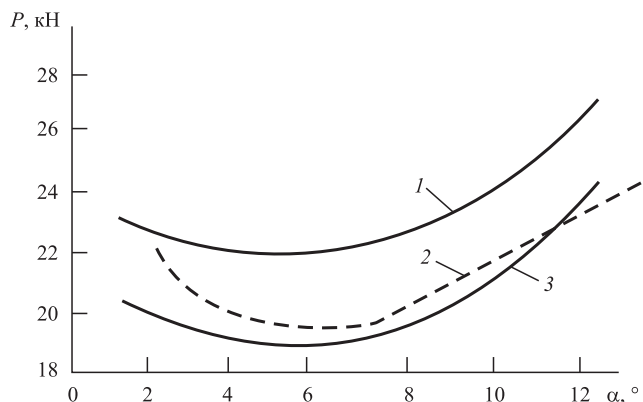


Рис. 1. Фасонный дорн для калибровки шлицевых отверстий:

1 — оправка; 2 — твердосплавные пластины; 3 — корпус; 4 — втулка; 5 — гайка; 6 — шайба; 7 — сухарик; 8 — винт



**Рис. 2. Изменение тяговых сил  $P$  в зависимости от заборного угла  $\alpha$  для различных марок стали:**

1 — 20X, цементованная и закаленная до твердости 58...62 HRC; 2 — 40X, закаленная до твердости 48...52 HRC; 3 — 40X, закаленная до твердости 48...52 HRC

ментальных исследований, можно констатировать следующее [2, 3].

Один из важнейших элементов, определяющих форму рабочей поверхности дорна, — угол заборного конуса. Заборной частью осуществляется основная деформация обрабатываемого металла и от нее в значительной степени зависят сила дорнования  $P$  и качество поверхности (рис. 2). При правильном выборе углов заборных конусов шлицевых дорнов тяговая сила будет минимальной, шероховатость поверхности обрабатываемого отверстия также будет наименьшей ввиду преимущественного радиального течения металла. Установлено, что оптимальная геометрия дорнующего инструмента  $\alpha = 4...5^\circ$  обеспечивает наивысшее качество обработанной поверхности шлицевого отверстия и наименьшую тяговую силу дорнования.

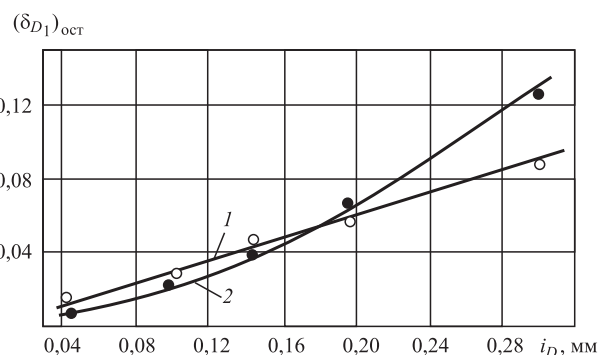
В процессе калибрования фасонными дорнами в поверхностном слое шлицевого отверстия обрабатываемой детали протекают упругие и пластические деформации по профилю, которые приводят к изменению его напряженного состояния и как следствие оказывают значительное влияние на точность размеров шлицевых отверстий. Остаточная деформация поверхности шлицевого отверстия при калибровании зависит от: натягов по наружному диаметру —  $i_D$  и боковой поверхности шлицев —  $i_B$ ; физико-механических свойств обрабатываемого материала, толщины стенки втулки, схемы деформирования поверхностей отверстия. Как показано на рис. 3, зависимость остаточных деформаций металла по поверхности наружного диаметра шлицевого отверстия  $(\delta_{D1})_{ост}$  от натяга дорнования  $i_D$  имеет, примерно, прямолинейный характер и малый угол наклона к оси абсцисс. Это свидетельствует о том, что остаточная деформация по наружному диаметру шлицевого отверстия при дорновании намного меньше натяга дорнования. Следовательно, обратные упругие деформации в этом

случае имеют максимальное значение из общей суммы абсолютной деформации (натяг дорнования  $i_D$ ). Свое начало на оси абсцисс прямая берет от некоторой положительной величины натяга, так как при меньших натягах обрабатываемая втулка находится в режиме чистых упругих деформаций и остаточных деформаций не имеет.

Таким образом, на основе величины остаточных деформаций по профилю шлицев можно правильно подобрать рациональные натяги дорнования и обеспечить получение шлицевых отверстий в деталях в пределах требуемой точности.

Определение тяговой силы при дорновании шлицевых отверстий имеет большое практическое значение, так как, зная заранее силу, можно правильно выбрать конструктивные размеры протяжного станка или прессы, рассчитать инструменты, приспособления и обрабатываемую деталь на прочность и устойчивость. С учетом тяговой силы можно правильно назначить оптимальную геометрию инструментодорнов, обеспечивающую при всех прочих равных условиях минимальное значение тяговой силы. На рис. 4 представлен график зависимости тяговых сил  $P$  от натяга  $i_D$ , из которого видно, что тяговые силы при обработке объемно-закаленной стали 40X с увеличением натяга дорнования  $i_D$  значительно возрастают примерно по прямолинейному закону.

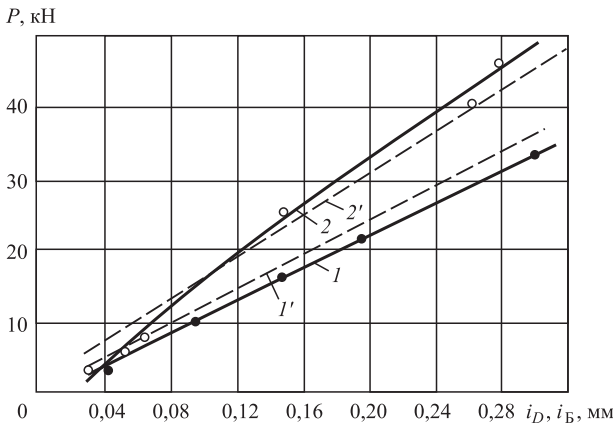
При дорновании образцов из цементованной и закаленной стали 20X тяговые силы с увеличением натяга дорнования по наружному диаметру шлица  $i_D$  и по боковым поверхностям  $i_B$  значительно возрастают, примерно по прямолинейному закону только до  $i_D = 0,13$  мм. Это свидетельствует о том, что происходит деформирование только поверхностных слоев металла. После превышения этого натяга увеличение тяговых сил становится менее интенсивным и кривая плавно изгибается, так как при натягах, больших  $i_D = 0,13$  мм, происходит пластическое деформирование металла ниже цементованного



**Рис. 3. Изменение остаточных деформаций  $(\delta_{D1})_{ост}$  металла по поверхности наружного диаметра шлица от натяга  $i_D$ :**

1 — сталь 40X, объемно-закаленная до твердости 48...52 HRC; 2 — сталь 20X, цементованная на глубину 0,8...1,1 мм и закаленная до твердости 58...62 HRC





**Рис. 4. Зависимость тяговых сил  $P$  от натяга дорнования образцов из различных марок стали:**  
 1 — 40X, объемно-закаленная до твердости 48...52 HRC; 2 — 20X, цементованная на глубину 0,8...1,1 мм и закаленная до твердости 40...45 HRC. Штриховые линии — расчетные значения, сплошные — экспериментальные

слоя, имеющего меньшую твердость, и поэтому металл оказывает меньшее сопротивление деформированию. Начиная с натяга  $i_D = 20$  мм, тяговые силы продолжают возрастать примерно по прямолинейному закону, указывая на то, что при этих натягах пластическим деформированиям подвергаются не только слои металла под цементованным слоем, но и сам цементованный слой.

### Влияние ультразвуковых колебаний на процесс дорнования

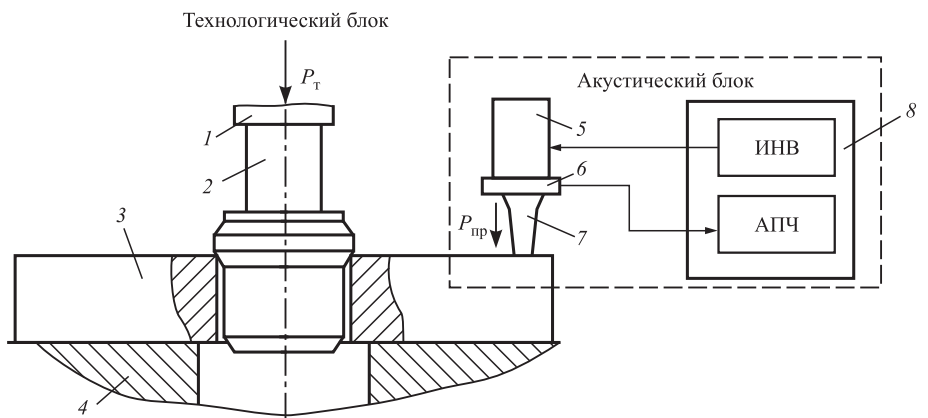
Наряду с рассмотренными выше факторами, оказывающими влияние на тяговую силу процесса дорнования, определяющими в обосновании ее значения являются механические свойства обрабатываемого материала и физико-механические характеристики качества поверхностного слоя шлицевого отверстия, сформированного на операциях, предшествующих дорнованию, а также геометрические размеры шлицевого отверстия. Экспериментально установлено [2], что при дорновании деталей, изготовленных из материалов с большим пределом текучести, требуются большие тяговые силы, и наоборот, чем меньше предел текучести, тем меньше тяговые силы. Применение больших тяговых сил требуется для дорнования термообработанных шлицевых отверстий, имеющих поверхностную

твердость после закалки 50...55 HRC. При выборе тяговых сил необходимо также учитывать номинальный размер шлицевого отверстия. Шлицевым отверстиям с большими номинальными размерами соответствуют большие тяговые силы, так как объем и работа деформирования при этом получаются больше.

Из этого следует, что технико-экономическая эффективность процесса дорнования шлицевых отверстий зависит от рационального выбора тяговой силы. Для решения этой задачи необходимо обеспечить управление напряженным состоянием поверхностного слоя в зоне контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью.

В качестве одного из путей управления напряженным состоянием поверхностного слоя предлагается наложение ультразвуковых воздействий на процесс дорнования. В работе [4] показано, что ультразвуковые колебания снижают внутреннее трение в материале, в результате чего создаются более эффективные условия воздействия инструмента на него.

На рис. 5 представлена принципиальная схема процесса дорнования шлицевых отверстий с наложением на него ультразвукового поля. Предлагаемая схема состоит из двух блоков: технологического, реализующего процесс дорнования шлицевого отверстия фасонным дорном, и акустического, создающего в материале детали (или инструменте) сложное акустическое поле. Основными элементами акустического блока являются: ультразвуковой генератор, предназначенный для того, чтобы электрический ток промышленной частоты 50 Гц преобразовать в электрические колебания частотой 22 кГц; магнито-стрикционный преобразователь, преобразующий электрическую частоту 22 кГц в механические перемещения; волновод, который формирует в детали сложное акустическое поле путем трансформации продольных колебаний в продольно-крутильные.



**Рис. 5. Схема процесса дорнования шлицевого отверстия зубчатого колеса с применением ультразвукового поля:**  
 1 — силовой шток; 2 — фасонный дорн; 3 — зубчатое колесо; 4 — установочный стол; 5 — магнито-стрикционный преобразователь; 6 — датчик акустической обратной связи; 7 — волновод; 8 — генератор (АПС-система автоподстройки частоты, ИНВ — инвентор)

Наложение на деталь акустического поля обеспечивает повышение эффективности работы всей технологической системы за счет знакопеременных изменений геометрических размеров детали в радиальном и тангенциальном направлениях, обусловленных протеканием в материале детали с высокой скоростью волновых процессов, приводящих к снижению ее напряженного состояния.

### Заключение

Достичь эффективной калибровки шлицевого отверстия детали фасонным дорном при уменьшении тяговой силы позволяет использование при ППД энергии ультразвуковых колебаний, оказывающих существенное влияние на характер контактного взаимодействия инструмента и поверхности детали. При использовании ультразвукового воздействия на инструмент обеспечиваются существенное уменьшение трения и увеличение пластичности в очаге деформации, что обуславливает сглаживание шероховатости поверхностей шлицевого отверстия, спо-

собствует глубокой пластической и упругопластической проработке поверхностного слоя, созданию благоприятных сжимающих напряжений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. М.: Машиностроение, 1984. 223 с.
2. Берберов С.А., Лебедев В.А. Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях // Научно-технические проблемы машиностроения. 2017. № 9 (75). С. 38—41.
3. Берберов С.А., Болокан А.Г. Инструмент для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2014. С. 22—29.
4. Абрамов О.В., Манохин А.И. Воздействие мощного ультразвука на межфазную поверхность металлов. М.: Наука, 1986. 265 с.

УДК 669.056.9:629.118.6 + 621.81.01

DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-9-394-400

**В.И. Бутенко**

(Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону)  
E-mail: butenkowiktor@yandex.ru

## Влияние начального состояния поверхностей деталей на технологическую совместимость создаваемых на них функциональных слоев и покрытий

*Рассмотрено влияние шероховатости и физико-механического состояния материала поверхностного слоя деталей на технологическую совместимость создаваемых на них функциональных слоев и покрытий. Показана зависимость коэффициента технологической совместимости наносимых на рабочие поверхности деталей функциональных слоев и покрытий от напряжения сцепления их с материалом поверхностного слоя, учитывать которую необходимо при проектировании технологических процессов изготовления деталей.*

**Ключевые слова:** деталь, поверхность, функциональные слои и покрытия, шероховатость, остаточные напряжения, сцепляемость, прижоги.

*The effect of the roughness and physical-mechanical state of the material of the surface layer of parts on the technological compatibility of the functional layers and coatings created on them is considered. The dependence of the technological compatibility coefficient of functional layers and coatings created on the working surfaces of parts on the adhesion stress of the surface layer material, which must be taken into account when designing the technological processes for manufacturing parts.*

**Keywords:** part, surface, functional layers and coatings, roughness, residual stresses, adhesion, burns.

Современное машиностроительное производство остро нуждается в разработке и внедрении технологических мероприятий, направленных на существенное повышение работоспособности и надежности

машин и механизмов. Опыт работы передовых предприятий машиностроения и результаты исследований отечественных и зарубежных научных школ и конструкторско-технологических институтов пока-

зывает, что решение этой проблемы в большой степени зависит от состояния поверхностного слоя деталей [1]. Создание на рабочих поверхностях деталей модифицированных или многокомпонентных функциональных слоев позволяет существенно повысить их работоспособность при сравнительно небольших дополнительных экономических затратах [2, 3].

Учитывая многообразие применяемых на рабочих поверхностях деталей машин функциональных слоев и покрытий, существенно повышающих их работоспособность, возникла проблема технологической совместимости используемых для их создания компонентов с основным материалом детали. Решение этой проблемы во многом связано с начальным состоянием материала поверхностного слоя детали, сформировавшимся в процессе выполнения всего технологического процесса механической обработки. В связи с этим представляет большую практическую значимость определение степени влияния начального состояния поверхностного слоя детали, полученного при выполнении финишной операции технологического процесса механической обработки, на технологическую совместимость создаваемого на нем функционального слоя или покрытия.

**Цель работы** — установление связи между параметром начальной шероховатости  $Ra_{нач}$ , величиной и знаком технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  и показателем технологической совместимости  $\Pi_{т.с.}$ , тесно связанным с толщиной созданного на поверхности детали функционального слоя или покрытия.

### Методика проведения исследований

Исследования влияния начального состояния материала поверхностного слоя детали на технологическую совместимость создаваемых на них функциональных слоев и покрытий проводили на образцах из сталей 12ХН3А, 30ХГСА, 45, 50ХН, Х18Н9Т и сплавов 45Х25Н20С2А, ЖС6У, прошедших в качестве финишной операции тонкое точение, шлифование, обкатку роликом или полирование. Параметры шероховатости поверхности  $Ra$ ,  $Rmax$ ,  $Sm$  и  $tp$  определяли с помощью профилограмм, снятых на профилографе-профилометре мод. 170311. При этом относительную опорную длину профиля  $tp$  определяли на уровне сечения микропрофиля поверхности  $p$ , значение которого принимали в соответствии с формулой, приведенной в работе [4]:

$$p = Rp - 10^{-2} pmRmax, \quad (1)$$

где  $Rp$  — заданная высота сглаживания профиля микронеровностей с высоты наибольшего выступа  $Rmax$ ;  $pm$  — принятый средний уровень профиля микронеровностей поверхности детали.

В качестве функциональных слоев и покрытий, наносимых на поверхности исследуемых образцов, были приняты следующие: медный слой, никельфосфорное покрытие и многокомпонентный слой на по-

лимерной основе. Медный слой и никельфосфорное покрытие наносили на поверхность образца электролитическим путем в соответствии с технологиями, изложенными в работах [3, 5], а многокомпонентный слой на полимерной основе, включающий полиэтилен ПЭНД, сплав Вуда, графит и кристаллический йод, создавали по технологии, изложенной в работах [3, 6]. Толщину слоя или покрытия  $h_c$  устанавливали назначением режимов их создания и контролировали при помощи четырехзондового устройства [7]. Напряжение сцепления функционального слоя или покрытия с основным материалом исследуемого образца  $\tau_{сц}$  определяли на специальной установке [7].

Технологическую совместимость функциональных слоев и покрытий оценивали показателем  $\Pi_{т.с.}$ :

$$\Pi_{т.с.} = \Theta_{уд1} / \Theta_{уд2}, \quad (2)$$

где  $\Theta_{уд1}$ ,  $\Theta_{уд2}$  — удельные значения накопленной энергии деформации материала поверхностного слоя детали соответственно до и после создания на нем функционального слоя или покрытия, Дж/м<sup>2</sup>.

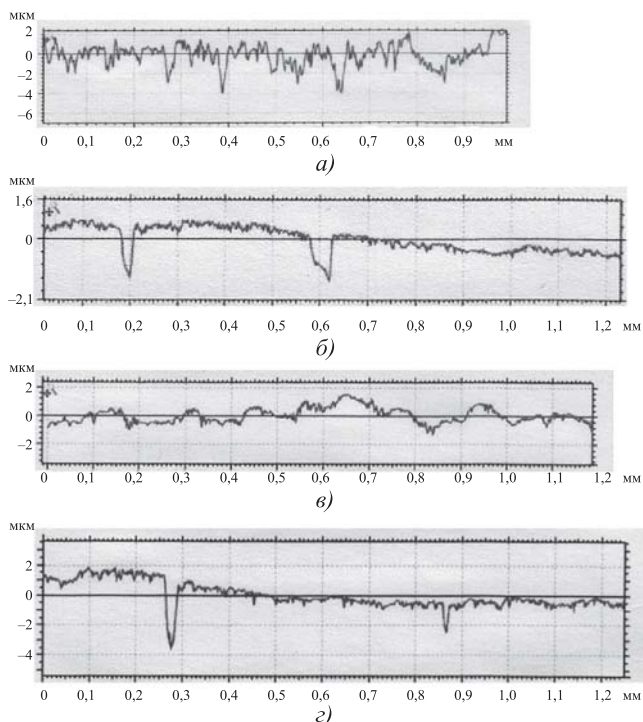
Значения  $\Theta_{уд1}$  и  $\Theta_{уд2}$  определяли по методике, изложенной в работе [8], с использованием установки, описание которой приведено в работе [9].

### Результаты исследований и их обсуждение

Выполнены экспериментальные исследования влияния способа финишной обработки поверхности детали на изменение шероховатости поверхности после нанесения на нее медного слоя толщиной 10 мкм (рис. 1). Установлено, что независимо от способа финишной обработки детали модифицирование поверхностного слоя медью приводит примерно к одинаковому характеру нивелирования поверхности с образованием микроканалов, появление которых, по-видимому, обусловлено перераспределением внутренних напряжений по толщине модифицированного слоя.

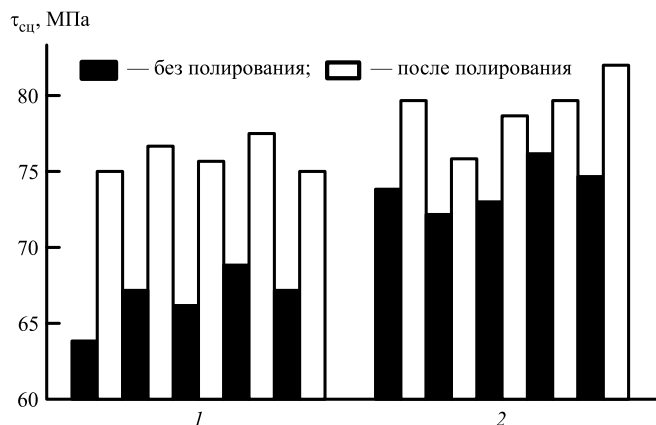
На рис. 2 приведены гистограммы зависимости напряжения  $\tau_{сц}$  от исходных параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Sm$  и относительной опорной длины профиля  $tp = (30 \pm 5) \%$ , которая достигалась полировкой поверхности образцов до заданного уровня  $p$ , определяемого по формуле (1). Исследования проводили на образцах из стали 12ХН3А, подвергнутых предварительному шлифованию или обкатке роликом. После этого электролитическим путем наносили никельфосфорное покрытие.

Анализ представленных гистограмм свидетельствует о том, что полирование предварительно шлифованных поверхностей образцов позволяет на 13,2...18,5 % увеличить напряжение сцепления  $\tau_{сц}$  нанесенного никельфосфорного покрытия. Полирование поверхностей образцов, подвергнутых предварительной обкатке роликом, повышает напряже-



**Рис. 1. Типовые профилограммы шероховатости поверхностей деталей:**

*a* — после шлифования перед нанесением медного слоя; *б* — шлифованная поверхность с медным слоем толщиной 10 мкм ( $P_{T.C} = 0,97$ ); *в* — после упрочнения поверхности перед нанесением медного слоя; *з* — упрочненная поверхность с медным слоем толщиной 10 мкм ( $P_{T.C} = 0,96$ )



**Рис. 2. Гистограммы напряжения сцепления  $\tau_{сц}$  никельфосфорного покрытия с основным материалом поверхностного слоя детали, подвергнутого предварительной обработке:**

*1* — шлифование; *2* — обкатка роликом; сталь 12ХН3А, давление контртела на исследуемую поверхность  $q = 0,5$  МПа, скорость перемещения контртела относительно поверхности образца  $v_{ск} = 0,3$  м/с, температура  $\Theta = 20$  °С

ние сцепления  $\tau_{сц}$  нанесенного никельфосфорного покрытия на 6,8...8,5 %. При этом сглаживание микронеровностей предварительно обработанной поверхности детали, приводящее к увеличению относительной опорной длины профиля  $t_p$ , также способствует повышению показателя  $P_{T.C}$ .

Используя метод планирования эксперимента типа  $2^k$ , была получена следующая зависимость напряжения сцепления  $\tau_{сц}$  от исходных параметров шероховатости  $Ra$ ,  $Sm$  и относительной опорной длины профиля исследуемой поверхности  $t_p$  на уровне сечения  $p$ :

$$\tau_{сц} = C_{сц} Ra^a Sm^b t_p^c, \quad (3)$$

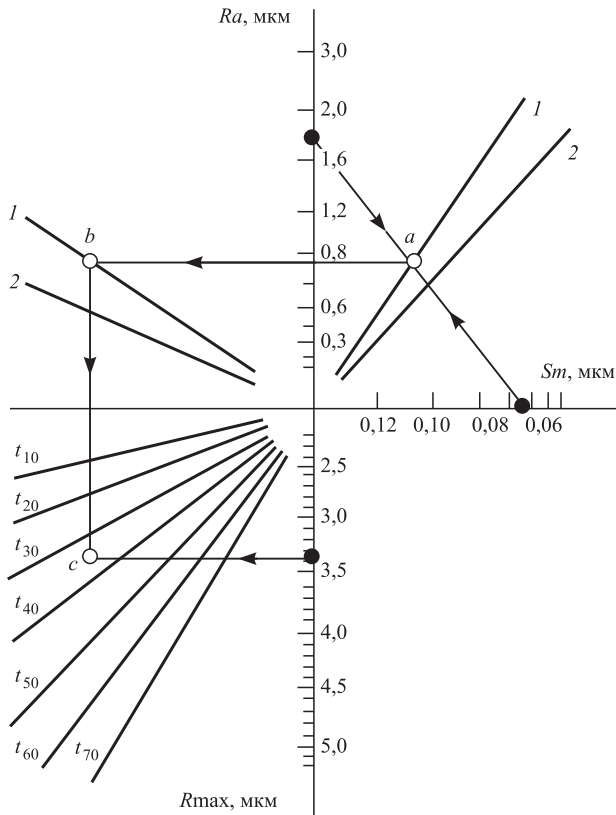
где  $C_{сц}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициент и показатели степеней, зависящие от способа предварительной обработки поверхности детали и вида создаваемого функционального слоя или покрытия; значения  $C_{сц}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  для железоуглеродистых сплавов, не подвергнутых термической обработке, приведены в табл. 1.

Формула (3) может быть использована для сравнительной оценки сцепляемости создаваемых на поверхностях деталей функциональных слоев или покрытий в зависимости от способа их предварительной обработки и последующего вычисления  $P_{T.C}$ . Однако исследование показали [10], что напряжения сцепления  $\tau_{сц}$  (следовательно, и  $P_{T.C}$ ) зависят не только от свойств обрабатываемого материала детали и способа ее предварительной обработки, но и от равномерности начального распределения полученных высот микронеровностей и их шагов  $S_i$  вдоль опорной длины профиля на заданном уровне  $p$  [4].

Таблица 1

**Значения коэффициента  $C_{сц}$  и показателей степеней  $a$ ,  $b$ ,  $c$  в формуле (3)**

Способ обработки поверхности детали	Вид создаваемого слоя или покрытия	$C_{сц}$	$a$	$b$	$c$
Тонкое точение	Медный слой	1426	0,69	1,75	-1,64
	Никельфосфорное покрытие	1518	0,53	1,79	-1,68
	Слой на полимерной основе	1207	0,80	1,96	-1,36
Шлифование	Медный слой	1394	0,71	1,88	-1,59
	Никельфосфорное покрытие	1485	0,65	1,85	-1,47
	Слой на полимерной основе	1136	0,78	1,92	-1,25
Обкатка роликом	Медный слой	1415	0,67	1,73	-1,61
	Никельфосфорное покрытие	1509	0,52	1,81	-1,79
	Слой на полимерной основе	1033	0,59	2,14	-1,83



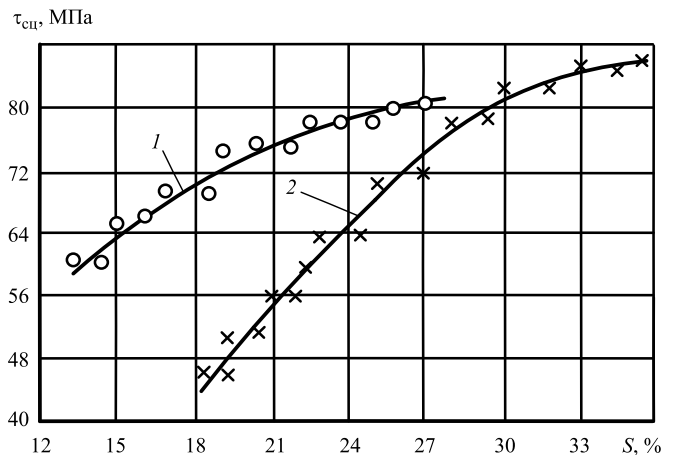
**Рис. 3. Номограмма определения рационального значения  $t_p$  по известным значениям параметров  $R_a$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$  и способу обработки поверхности:**  
 1 — шлифование; 2 — упрочняющая обработка

По результатам более 500 экспериментов, проведенных на образцах из сталей 12ХН3А, 30ХГСА, 45, 50ХН, Х18Н9Т, сплавах 45Х25Н20С2А, ЖС6У, была составлена номограмма для определения рационального значения  $t_p$  в зависимости от заданных значений параметров шероховатости поверхностного слоя: шлифования или упрочняющей обработки (рис. 3). На номограмме стрелками показана последовательность нахождения рационального значения  $t_p$ .

На технологическую совместимость функционального слоя или покрытия большое влияние оказывает начальное физико-механическое состояние материала поверхностного слоя, полученное в процессе предварительной обработки. Проведены исследования влияния прижогов на сцепляемость наносимого электролитическим путем никельфосфорного покрытия. На рис. 4 приведены зависимости напряжения  $\tau_{сц}$  никельфосфорного покрытия толщиной 20 мкм от относительной площади прижогов  $S$  поверхности плоских образцов размерами  $B \times H \times L = 50 \times 10 \times 100$  мм из стали 12ХН3А и сплава 45Х25Н20С2А, анализ которых свидетельствует о том, что с увеличением относительной площади прижогов  $S$  сила сцепления никельфосфорного покрытия  $\tau_{сц}$  значительно повышается. Это может быть объяснено снижением напряженного со-

стояния материала поверхностного слоя детали в процессе нанесения покрытия и увеличением площади соприкосновения наносимого покрытия с основным материалом детали за счет образовавшихся микротрещин в прижоговой зоне.

На рис. 5 приведены фотографии зон прижогов на шлифованной поверхности образцов, из анализа которых следует, что образовавшиеся микротрещины, распространяясь на значительную глубину по толщине поверхностного слоя (рис. 5, б), не только в десятки раз увеличивают площадь контакта электролитически наносимого функционального слоя с основным материалом поверхностного слоя, но и



**Рис. 4. Зависимости напряжения сцепления никельфосфорного покрытия  $\tau_{сц}$  от относительной площади прижогов  $S$  шлифованных поверхностей для стали 12ХН3А (1) и сплава 45Х25Н20С2А (2)**



а)



б)

**Рис. 5. Фотографии участков зон прижога на шлифованной поверхности образцов из сплава 45Х25Н20С2А: а — в плоскости шлифования ( $\times 25$ ); б — в разрезе ( $\times 75$ )**

приводят к перераспределению напряжений, возникших в нем при шлифовании детали.

С повышением напряжения сцепления никель-фосфорного покрытия с основным материалом детали  $\tau_{сц}$  увеличивается значение показателя технологической совместимости  $P_{т.с}$ : для стали 12ХН3А при повышении относительной площади прижогов  $S$  от 13,2 до 27 %  $P_{т.с}$  увеличивается от 0,88 до 0,95; для сплава 45Х25Н20С2А при повышении  $S$  от 18,3 до 35,6 %  $P_{т.с}$  увеличивается от 0,84 до 0,96. Аналогичное повышение  $P_{т.с}$  с увеличением  $\tau_{сц}$  отмечается при создании на поверхности детали других функциональных слоев или покрытий, например, медного слоя или слоя на полимерной основе, нанесенных на шлифованную поверхность детали (табл. 2).

Следовательно, для получения эффективных функциональных слоев и покрытий с высоким  $P_{т.с}$  с основным материалом поверхностного слоя деталей машин, подвергаемых предварительной обработке шлифованием, целесообразно эту обработку проводить на режимах, обеспечивающих наибольшее число прижогов (или относительную площадь прижогов) на шлифованной поверхности. В результате становится возможным предварительную обработку поверхности детали шлифованием проводить при более высоких скоростях резания, что особенно важно при шлифовании поверхностей деталей из труднообрабатываемых хромоникелевых сталей и сплавов, так как в этом случае повышается производительность обработки за счет уменьшения основного времени, а требуемая работоспособность детали достигается созданием на ее рабочих поверхностях функциональных слоев или покрытий. Поэтому в соответствии

с концепцией функционального единства технологического процесса механической обработки детали [1] реализация изготовления тяжело нагруженных деталей трибосистем может быть осуществлена по следующему маршруту: заготовительная операция → черновая обработка → чистовая обработка → шлифование (упрочняющая обработка) → полирование → нанесение функционального слоя или покрытия. При этом необходимо иметь в виду, что создание на поверхности детали функционального слоя или покрытия приводит к некоторому снижению технологических остаточных напряжений в основном материале поверхностного слоя детали независимо от ее предварительной обработки, о чем свидетельствуют данные, приведенные на рис. 6.

По результатам выполненных исследований установлена прямо пропорциональная связь между  $P_{т.с}$  и напряжением сцепления функционального слоя или покрытия  $\tau_{сц}$  с основным материалом поверхности детали:

$$P_{т.с} = (1,1...1,3) \cdot 10^{-2} \tau_{сц} K_{ф.с.п}, \quad (4)$$

Таблица 2

Экспериментальные значения  $\tau_{сц}$  и  $P_{т.с}$  для медного слоя и слоя на полимерной основе

Обрабатываемый материал	$S, \%$	Вид наносимого слоя или покрытия	$h_c, \text{мкм}$	$\tau_{сц}, \text{МПа}$	$P_{т.с}$
Сталь 12ХН3А	18	Медный слой	14	67	0,92
	36		16	70	0,94
	51		12	79	0,98
	22	Слой на полимерной основе	110	48	0,59
	38		120	52	0,67
	49		120	55	0,71
Сплав 45Х25Н20С2А	21	Медный слой	12	64	0,89
	40		10	76	0,93
	57		14	78	0,95
	20	Слой на полимерной основе	120	46	0,54
	39		100	54	0,66
	55		120	55	0,70

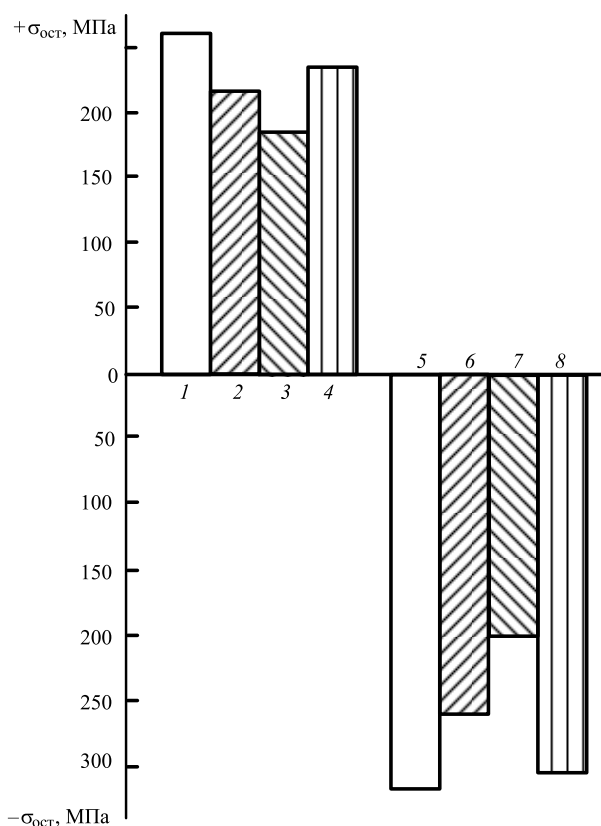


Рис. 6. Гистограммы значений технологических остаточных напряжений  $\sigma_{ост}$  в материале поверхностного слоя деталей машин из стали 12ХН3А после:

1 — шлифования; 2, 3 — нанесения медного слоя толщиной 10 мкм; 3, 7 — нанесения никельфосфорного покрытия толщиной 40 мкм; 4, 8 — создания слоя на полимерной основе толщиной 120 мкм; 5 — обкатки роликом

где  $K_{ф.с.п}$  — коэффициент, зависящий от вида создаваемого на поверхности детали функционального слоя или покрытия, для медного слоя при  $h_c = 10...40$  мкм  $K_{ф.с.п} = 1,2$ ; для никельфосфорного покрытия при  $h_c = 20...80$  мкм  $K_{ф.с.п} = 1,1$ ; для слоя на полимерной основе при  $h_c = 80...150$  мкм  $K_{ф.с.п} = 0,9$ .

Выполнены испытания образцов из стали 12ХН3А с различными функциональными покрытиями и слоями на трение при различных начальных значениях  $Ra_{нач}$  и  $h_c$  с определением коэффициента трения  $f$  и показателя  $\Pi_{т.с}$ . В качестве контртела использовали бруски из закаленной быстрорежущей

стали Р6М5, параметр шероховатости контактной поверхности равен  $Ra = 0,32...0,40$  мкм. Результаты исследований представлены в табл. 3, из анализа которой следует, что для каждого функционального покрытия или слоя существуют сочетания  $Ra_{нач}$  и  $h_c$ , при которых достигается максимальное значение показателя  $\Pi_{т.с}$  и минимальное значение коэффициента трения  $f$ : для медного слоя  $h_c/Ra_{нач} = 25...30$ , для никельфосфорного покрытия  $h_c/Ra_{нач} = 80...100$ , для многокомпонентного слоя на полимерной основе  $h_c/Ra_{нач} = 180...200$ . При таких соотношениях  $h_c$  и  $Ra_{нач}$  обеспечивается надежное нивелирование поверхностного слоя детали и проявляется эффект "нанотрибологической ямы" [1]. Задаваясь параметром шероховатости поверхности  $Ra_{нач}$ , назначается способ финишной обработки детали и принимается толщина функционального слоя или покрытия  $h_c$  и технология их создания.

Одновременно было установлено, что время приработки поверхностей образцов  $T_{пр}$  в значительной степени зависит от начального значения  $\Pi_{т.с}$  (рис. 7). При этом для всех исследуемых функциональных покрытий и слоев увеличение показателя  $\Pi_{т.с}$  приводит к существенному уменьшению времени приработки поверхностей  $T_{пр}$ . Очевидно, что это связано с процессом адаптации контактирующих материалов поверхностей деталей, протекающим на атомно-молекулярном уровне [11]: чем выше технологическая совместимость материалов, входящих в состав поверхностного слоя детали, тем быстрее происходит приспособление его к сопряженной поверхности. Этот фактор следует учитывать при выборе вида функционального покрытия или слоя и технологии его создания.

Таблица 3

Результаты исследования зависимости  $\Pi_{т.с}$  и коэффициента трения  $f$  от  $Ra_{нач}$  и  $h_c$  (сталь 12ХН3А,  $q = 0,5$  МПа,  $v_{ск} = 0,3$  м/с,  $\Theta = 20$  °С)

Функциональный слой или покрытие	$Ra_{нач}$ , мкм	$h_c$ , мкм	$\Pi_{т.с}$	$f$
Медный слой	0,32	5	0,95	0,10
		10	0,97	0,06
		20	0,91	0,12
	0,63	5	0,92	0,11
		10	0,94	0,07
		20	0,95	0,08
	0,80	5	0,89	0,15
		10	0,91	0,13
		20	0,88	0,09
Никельфосфорное покрытие	0,32	20	0,81	0,11
		40	0,93	0,05
		80	0,83	0,10
	0,55	20	0,80	0,11
		40	0,89	0,06
		60	0,80	0,12
	0,80	20	0,78	0,16
		40	0,84	0,14
		80	0,87	0,09
Слой на полимерной основе	0,63	80	0,72	0,18
		120	0,77	0,12
		200	0,69	0,20
	1,10	80	0,70	0,20
		120	0,78	0,17
		200	0,67	0,13
	1,65	80	0,68	0,24
		120	0,79	0,21
		200	0,63	0,18

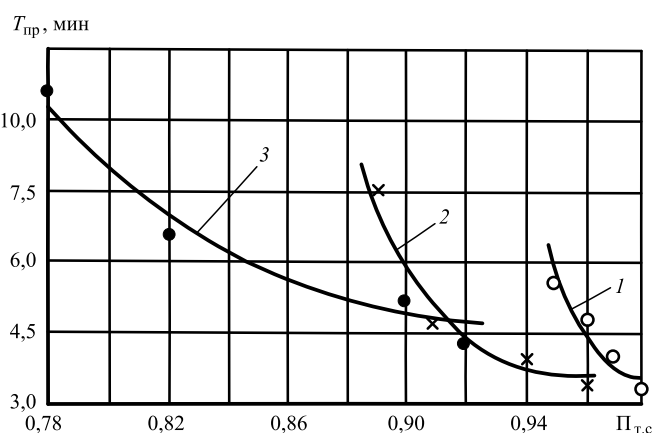


Рис. 7. Зависимости времени приработки  $T_{пр}$  поверхностей деталей от начального значения  $\Pi_{т.с}$ : 1 — медный слой толщиной 10 мкм; 2 — никельфосфорное покрытие толщиной 40 мкм; 3 — функциональный слой на полимерной основе толщиной 120 мкм (сталь 12ХН3А,  $q = 0,5$  МПа,  $v_{ск} = 0,3$  м/с,  $\Theta = 20$  °С)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бутенко В.И.** Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2017. 481 с.
2. **Албагачиев А.Ю.** Эффективные покрытия деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 8. С. 18—22.
3. **Бутенко В.И.** Модифицированные и многокомпонентные функциональные слои на поверхностях деталей машин. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. 235 с.
4. **Инженерия** поверхности детали / А.Г. Суслев, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. М.: Машиностроение, 2008. 426 с.
5. **Бутенко В.И., Шаповалов Р.Г.** Влияние никельфосфорного покрытия на эффективность использования металлорежущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 10 (166). С. 435—438.
6. **Бутенко В.И.** Инновационные технологии создания многокомпонентных слоев на поверхностях деталей трибосистем // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 7 (37). С. 30—35.
7. **Бутенко В.И.** Научные основы нанотрибологии. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. 275 с.
8. **Тимофеев М.В., Прокофьев М.А.** Методика и аппаратура измерения накопленной энергии деформации в поверхностном слое деталей машин // Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении (ТМ-2012): материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Ч. II. Рыбинск: Изд-во РГАТУ, 2012. С. 25—29.
9. **Бутенко В.И., Давиденко К.В., Сосницкая Т.С.** Установка для определения энергетического состояния материала поверхностного слоя детали // Инженер. 2019. № 2 (28). С. 24—28.
10. **Бутенко В.И.** Управление нанотрибологическими характеристиками поверхностей тяжело нагруженных опор и подшипников скольжения. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. 385 с.
11. **Кабалдин Ю.Г., Власов Е.Е., Кузьмишина А.М.** Квантово-механическое моделирование энергии адгезии наноструктурных покрытий с режущим инструментом и с обрабатываемым материалом // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 8 (64). С. 339—343.

УДК 621

DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-9-400-403

<sup>1</sup>М.М. Чаава, <sup>2</sup>Г.В. Серга, <sup>1</sup>Аль Обайди Луаи Мохаммед Раджаб  
 (<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону,  
<sup>2</sup>Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, г. Краснодар)  
 E-mail: miho\_ch@list.ru

## Технологическая схема отделочно-упрочняющей обработки деталей в станках с винтовыми рабочими органами и обоснование мощности их привода

*Представлена типовая технологическая схема станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки с рабочими органами в виде винтовых роторов, смонтированных из тетраэдральных пустот. Предложена методика расчета привода этих станков, учитывающая массы загрузки, рабочего органа и загрузки, расположенной в рабочем органе несимметрично оси его вращения, которая позволяет рассчитать мощность электродвигателя станков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки с учетом воздействий симметричной и несимметричной загрузки, обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред относительно оси вращения винтового ротора.*

**Ключевые слова:** рабочий орган, винтовой ротор, расчет привода, симметричная и несимметричная загрузка.

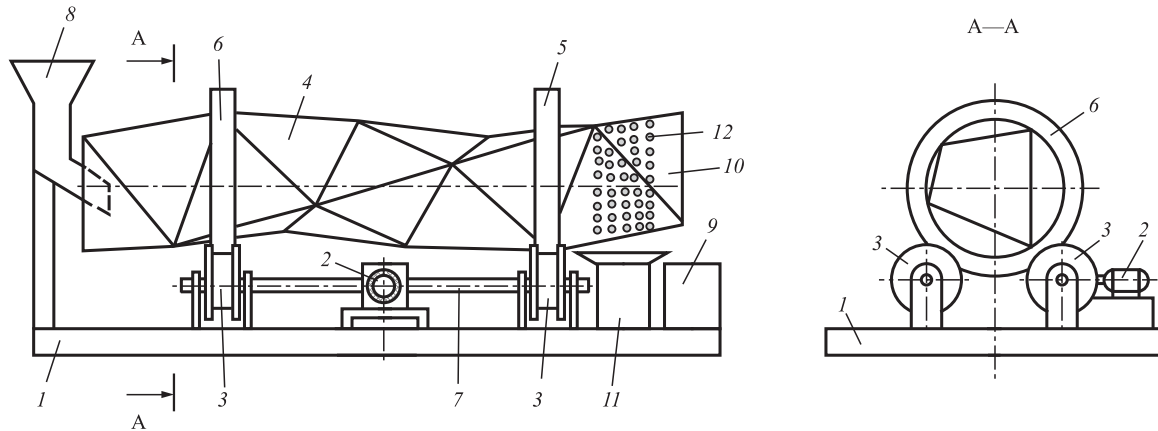
*Typical technological scheme of the machine for finishing and cleaning and strengthening treatment with working elements in the form of screw rotors mounted from tetrahedral voids is presented. Method for calculating of the drive of these machines is proposed, taking into account the load mass, the working element mass and the load mass located asymmetrically in the working element of the rotation axis, which allows you to calculate the power of the electric motors of machines for finishing, cleaning and strengthening treatment taking into account the actions of symmetrical and asymmetric loading processed parts and particles of the working medium relative to the rotation axis of the screw rotor.*

**Keywords:** working element, screw rotor, drive design, symmetric and asymmetric loading.

Сложность динамики работы станков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей с винтовыми рабочими органами, смонтированными из тетраэдральных пустот, обусловлена много-

гранностью поверхности рабочего органа [1—3] и протеканием мощных ударно-волновых процессов при выполнении таких технологических операций [4—11]. Для обеспечения стабильного запуска дан-





**Рис. 1. Станок для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки на базе винтового ротора, смонтированного из пустотелых тетраэдров:**

1 — станина; 2 — привод; 3 — роликовые опоры; 4 — рабочий орган в виде винтового ротора; 5 и 6 — обод; 7 — два вала; 8 — загрузочная воронка; 9 — устройство приема обработанных деталей; 10 — торцевое отверстие для выгрузки обработанных деталей; 11 — емкость приемки отходов обработки и частиц рабочих сред; 12 — отверстия для вывода отходов обработки и частиц рабочих сред за пределы станка

ных станков требуется соответствующая мощность электродвигателей, обоснование которой является актуальной задачей.

Винтовой ротор таких станков по периметру сформирован из направленных друг против друга винтовых линий и винтовых поверхностей, с помощью которых обрабатываемым деталям и частицам рабочих сред (в дальнейшем массам загрузки) при вращении винтовых роторов придаются движения с амплитудой более 20...1000 мм [4—11]. Шаг винтовых линий и винтовые поверхности роторов определяют характер движения обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред, давая возможность увеличивать или уменьшать транспортный (технологический) эффект. На рис. 1 приведена типовая схема станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки непрерывного действия, разработанная на базе винтового ротора, смонтированного из пустотелых тетраэдров.

Массы симметричной загрузки частицами рабочих сред и обрабатываемыми деталями внутренней полости винтового ротора, его ствола, двух ободов, жестко закрепленных по его наружному диаметру, а также масса загрузки внутренней полости винтового ротора, расположенная несимметрично оси вращения в сечении ротора плоскостью, перпендикулярной к оси его вращения, определяют мощность электродвигателей привода. Загрузка внутренней полости винтового ротора определяется коэффициентом заполнения  $K_v$ . Рекомендации по его применению в расчетах при проектировании станков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки на базе винтовых роторов приведены в работах [5—11].

Число тетраэдров определяется требуемыми конструктивно-технологическими параметрами процесса обработки, а именно длиной винтового ротора  $L$  и его наружным диаметром  $D_{в.р}$ , которые в свою очередь зависят от заданной производительности процесса.

Принимая, что  $D_{в.р} = 1,16a$ , можно определить объем одного тетраэдра (рис. 2):

$$V = \frac{1}{3} Bh; \quad (1)$$

$$B = \frac{a^2}{4} \sqrt{3}; \quad (2)$$

$$h = \sqrt{S^2 - r^2}, \quad (3)$$

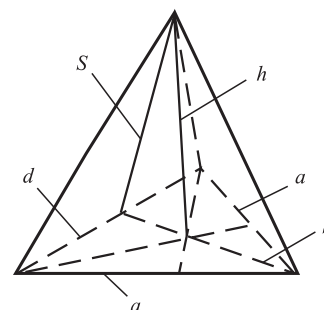
где  $B$  — площадь основания;  $h$  — высота тетраэдра;  $a$  — боковая сторона тетраэдра;  $S$  — апогема;  $r$  — радиус вписанной в сторону тетраэдра окружности;

$$S = \frac{a}{2} \sqrt{3}; \quad r = \frac{a}{6} \sqrt{3}, \quad (4)$$

$$h = \sqrt{\left(\frac{a}{2} \sqrt{3}\right)^2 - \left(\frac{a}{6} \sqrt{3}\right)^2} = \frac{a\sqrt{2}}{\sqrt{3}}. \quad (5)$$

С учетом (1)—(5) получим зависимость для определения объема внутренней полости одного тетраэдра:

$$V_m = \frac{1}{3} \frac{a^2 \sqrt{3}}{4} \frac{a\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 0,11785a^3. \quad (6)$$



**Рис. 2. Тетраэдр**

Из условия заполнения объема винтового ротора, массу загрузки, находящейся внутри винтового ротора, можно определить по зависимости:

$$m_1 = 0,55V_m k \rho, \quad (7)$$

где  $\rho$  — насыпная плотность, соответствующая среднему удельному весу массы загрузки, заполняющей винтовой ротор;  $k$  — число пустотелых тетраэдров, из которых смонтирован винтовой ротор.

Винтовой ротор смонтирован из отдельных правильных тетраэдров, соединенных между собой гранями (рис. 3). Вершины тетраэдров такого ствола образуют трехходовую цилиндрическую винтовую линию, а ребра тетраэдров являются секущими этой винтовой линии.

Массу винтового ротора определяют путем вычисления площади винтового ротора по периметру (см. рис. 3).

Внутренний диаметр ободов 5 и 6 (см. рис. 1) винтового ротора, смонтированного из тетраэдральных пустот, определяется с помощью зависимости  $D_{в.р} = 1,16a$ . Наружный диаметр ободов принимаем из конструктивных соображений.

Таким образом, масса винтового ротора в сборе включает в себя: массу загрузки, находящейся внутри винтового ротора,  $m_1$ ; массу винтового ротора  $m_2$ ; массу двух ободов, жестко закрепленных по

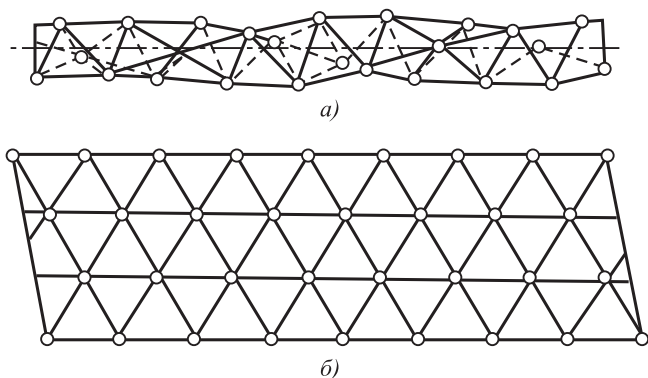


Рис. 3. Винтовой ротор станка: а — вид спереди; б — развертка боковой поверхности

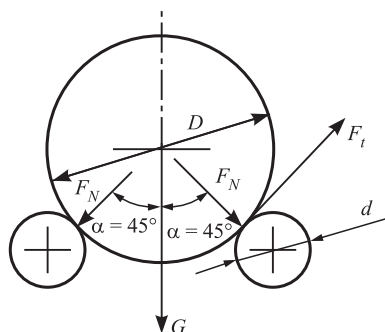


Рис. 4. Схема сил, действующих при вращении винтового ротора

наружному диаметру винтового ротора,  $2m_3$ . При равномерном распределении частиц массы загрузки общая масса винтового ротора в сборе будет равна:

$$m = m_1 + m_2 + 2m_3. \quad (8)$$

Силу прижатия винтового ротора к опорным роликам, при условии равномерного распределения в нем обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред (рис. 4), можно определить с помощью зависимости:

$$F_N = G \cos \alpha. \quad (9)$$

Вращающий момент на валу опорных роликов:

$$M = \frac{F_N f d}{K \omega}, \quad (10)$$

где  $f$  — коэффициент трения;  $d$  — диаметр ведущего катка;  $K$  — коэффициент запаса сцепления,  $K = 1,3$ ;  $\omega$  — передаточное число от винтового ротора к опорным роликам  $\omega = \pi n / 30$ ;  $n$  — частота вращения электродвигателя.

Для передачи крутящего момента  $M$  от электродвигателя на вал роликов 3 (см. рис. 1), обеспечивающих вращение винтового ротора общей массой  $m$ , используется редуктор. При симметричном расположении загрузки обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред (масс загрузки) для работы станка достаточен привод, включающий электродвигатель, мощность которого с учетом КПД редуктора  $\eta_{об}$  будет равна:

$$N = \frac{M \omega}{\eta_{об}}. \quad (11)$$

В действительности масса загрузки обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред расположена в винтовом роторе несимметрично оси вращения. Поэтому рассчитанной мощности электродвигателя для работы станка на базе винтового ротора будет недостаточно. Рассмотрим сечение винтового ротора плоскостью, перпендикулярной к оси вращения (рис. 5). Радиус  $OC$  обозначим  $e$ :

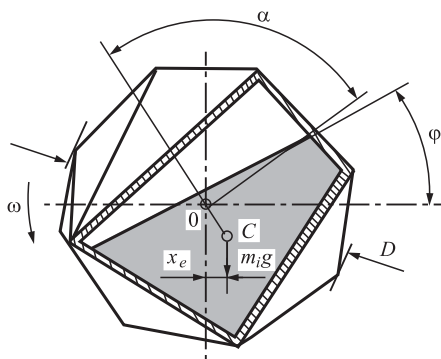
$$e = 0,424(1 - K_v)D. \quad (12)$$

Момент относительно оси вращения винтового ротора, создаваемый несимметричной загрузкой обрабатываемыми деталями и частицами рабочих сред, определяется зависимостью:

$$M_1 = x_e m_1 g, \quad (13)$$

где  $m_1$  — масса обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред, находящихся внутри винтового ротора;  $g$  — ускорение свободного падения;  $x_e$  — проекция отрезка  $OC$  на горизонтальную ось, определяемая зависимостью:

$$x_e = e \sin \varphi. \quad (14)$$



**Рис. 5. Схема к расчету привода винтового ротора:**

$\varphi$  — угол расположения свободной поверхности масс загрузки — обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред относительно горизонта;  $\alpha$  — половина угла сегмента свободного объема винтового ротора;  $0$  — центр тяжести загрузки винтового ротора;  $m_i$  — масса загрузки — обрабатываемые детали и частицы рабочих сред

Зная момент  $M_1$ , создаваемый загрузкой винтового ротора, можно определить мощность электродвигателя, затрачиваемую на преодоление момента, создаваемого несимметричной загрузкой обрабатываемыми деталями и частицами рабочих сред относительно оси вращения винтового ротора:

$$N_1 = \frac{M_1 \omega}{\eta_{об}} \quad (15)$$

Таким образом, суммируя мощности электродвигателей для вращения винтового ротора при воздействии симметричной и несимметричной загрузки, получаем суммарную мощность электродвигателя устройства для отделочно-упрочняющей обработки деталей машин (см. рис. 1):

$$N_{общ} = N + N_1. \quad (16)$$

На основании суммарной мощности по справочнику выбираем ближайший по ряду и характеристикам электродвигатель.

Предложенная методика расчета позволяет рассчитать мощность электродвигателя станков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки с учетом воздействий симметричной и несимметричной загрузки, обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред относительно оси вращения винтового ротора.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2507053 РФ, МПК В24В 31/02. Устройство для отделочно-зачистной обработки / Г.В. Серга, В.В. Иванов, В.А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный аграрный университет". № 2012150229/02; заявл. 23.11.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.

2. Пат. 2519398 РФ, МПК В24В 31/02. Станок для химико-отделочно-упрочняющей обработки деталей / В.В. Иванов, Г.В. Серга В.А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный аграрный университет". № 2013106597/02; заявл. 14.02.2013; опуб. 10.06.2014, Бюл. № 16.

3. Пат. 2528291 РФ, МПК В24В 31/02ю Устройство для отделочно-упрочняющей обработки / В.В. Иванов, Г.В. Серга В.А. Лебедев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный аграрный университет". № 2013106599/02; заявл. 14.02.2013; опубл. 10.09.2014, Бюл. № 25.

4. Серга Г.В., Лебедев В.А., Иванов В.В. Применение винтовых барабанов для нанесения механико-химических покрытий // Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. "Инновации в машиностроении — основа технического развития России". Барнаул, 2014.

5. Серга Г.В., Иванов В.В., Лебедев В.А. Разработка конструкций устройств с большой амплитудой колебаний для отделочно-упрочняющей обработки деталей машин / Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях: сб. тр. Междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей и механиков. Ростов-на-Дону, 2014. С. 344—352.

6. Интенсификация отделочно-упрочняющей обработки в винтовых роторах путем последовательного уплотнения и разряжения масс загрузки / Г.В. Серга, Н.Н. Кузнецова, А.Н. Иванов, В.А. Лебедев: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2013. С. 130—137.

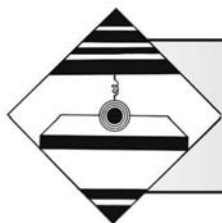
7. Серга Г.В., Лебедев В.А., Кочубей А.А. Закономерности процесса упрочнения деталей гранулированными средами в виброударных технологических системах // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 6 (314). С. 78—82.

8. Повышение производительности технологических систем отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей на основе винтовых роторов / Г.В. Серга, В.А. Лебедев, К.А. Белокур, Д.Я. Яковлев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 4. С. 16—19.

9. Серга Г.В., Белокур К.А., Лебедев В.А. Технологические особенности изготовления винтовых роторов для отделочно-упрочняющей обработки деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 4. С. 8—12.

10. Main trends in intensification of rotor-screw processing of parts / V.A. Lebedev, G.V. Serga, I.V. Davydova et al. // MATEC Web Conf. 226 (2018) 01008. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateccconf/201822601008>.

11. Lebedev V.A. et al. 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 327 042062. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042062>.



**В.В. Иванов, С.И. Попов, Н.С. Донцов, И.А. Курская**  
(Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону)  
E-mail: [vivanov\\_dstu@mail.ru](mailto:vivanov_dstu@mail.ru)

## Нанесение вибрационного двухкомпонентного твердосмазочного механохимического покрытия на различные детали из титанового сплава

*Представлены результаты исследований, связанных с нанесением двухкомпонентных твердосмазочных покрытий — дисульфида молибдена ( $MoS_2$ ) и дисульфида вольфрама ( $WS_2$ ) в условиях вибрационного воздействия.*

**Ключевые слова:** твердосмазочные материалы, вибрационная обработка, вибрационные механохимические покрытия, дисульфид молибдена ( $MoS_2$ ), дисульфид вольфрама ( $WS_2$ ), упрочнение.

*The results related to the application of two-component solid-lubricant coatings — molybdenum disulfide ( $MoS_2$ ), tungsten disulfide ( $WS_2$ ) under vibration conditions are presented.*

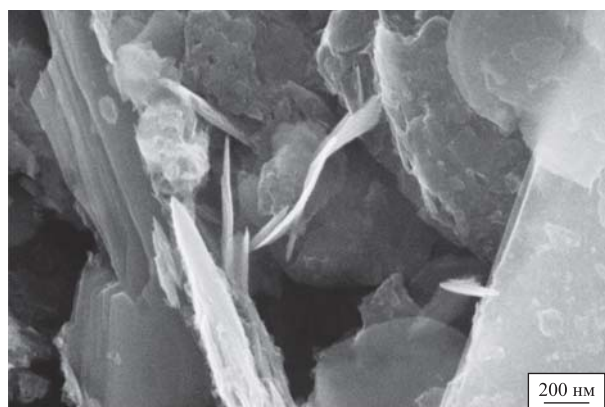
**Keywords:** solid lubricants, vibration treatment, vibration mechanical and chemical coatings, molybdenum disulfide ( $MoS_2$ ), tungsten disulfide ( $WS_2$ ), hardening.

Механохимические покрытия в совокупности с вибрационным упрочнением дают уникальную возможность наносить и комбинировать не только традиционное упрочнение поверхностного слоя металла, но и внедрять в его поверхность различные твердосмазочные материалы. Уникальные свойства твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена ( $MoS_2$ ), вольфрама ( $WS_2$ ), графита и не менее уникальные свойства вибрационной механохимии (ВиМХ) создают предпосылки для повышения износостойкости ответственных деталей, входящих в пары трения различных изделий. Дисульфид молибдена обладает слоистой структурой, в которой есть "прочные" и "плотные" слои, в достаточной степени удаленные друг от друга. При этом в слое, покрывающем поверхность трения, имеются сильные связи, тогда как связь между слоями слабая [1–3]. Такие свойства твердосмазочного покрытия обеспечивают "легкое" скольжение трущихся поверхностей относительно друг друга, существенное снижение коэффициента трения и изнашивания пары трения.

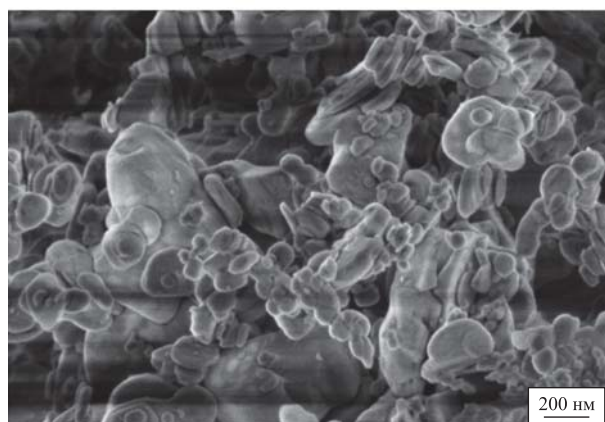
Дисульфид молибдена хорошо зарекомендовал себя при работе в вакууме, однако его свойства снижаются на 50 % во влажной среде. Поэтому вторым материалом был выбран дисульфид вольфрама, который име-

ет значительно более высокую стойкость во влажной среде [3–5]. Соотношение компонентов:  $MoS_2$  — 60 %,  $WS_2$  — 40 %. Структура порошков, используемых для создания покрытия, показана на рис. 1.

Покрытия формируются путем механического сближения материала покрытия с поверхностью металла и удерживаются силами Ван-дер-Ваальса. Наносятся они на поверхность металла частицами рабочей среды путем внедрения мелкодисперсного сухого порошка в поверхность детали. При виброволновом воздействии частицы рабочей среды, наносящие удары по обрабатываемой поверхности, обеспечивают сближение наносимого материала покрытия и поверхности металла в зоне контакта до возникновения сил молекулярного взаимодействия. Формирование вибрационных механохимических покрытий (ВиМХП) во многом зависит от интенсивности процессов, происходящих в зоне непосредственного контакта. В результате многократного ударно-импульсного воздействия частиц рабочей среды на поверхности формируется сравнительно равномерный слой пластически-деформированного активного металла с покрытием. Для сравнения качества полученного покрытия на рис. 2, б приведено покрытие дисульфида молибдена, нанесенное традиционным методом — кистью, широко применяемым на предприятиях машиностроения и авиастроения.



*a)*



*б)*

**Рис. 1. Структура порошков для покрытия:**

*a* — MoS<sub>2</sub>; *б* — WS<sub>2</sub>



*a)*

*б)*

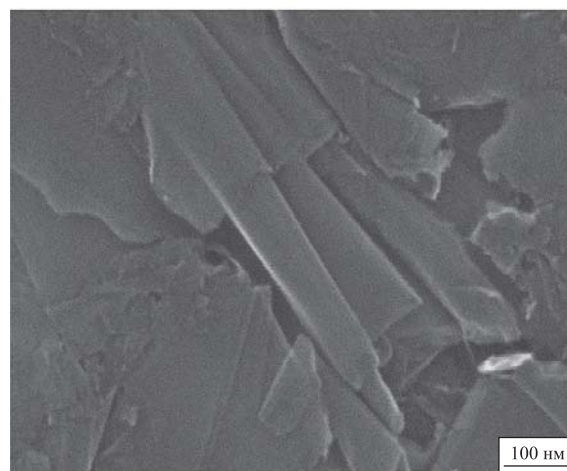
**Рис. 2. Морфология поверхности вибрационного механохимического твердосмазочного покрытия (*a*), и покрытия, нанесенного кистью (*б*)**

Исследования вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий (ВиМХТП) деталей, работающих в условиях трения, показали, что адсорбированные частицы покрытия в зоне контакта ориентируются базовыми плоскостями параллельно обрабатываемой поверхности, что видно на рис. 3. Такая ориентация частиц предопределяет повышенные антифрикционные свойства поверхностей, а следовательно, увеличение ресурса изделий в целом.

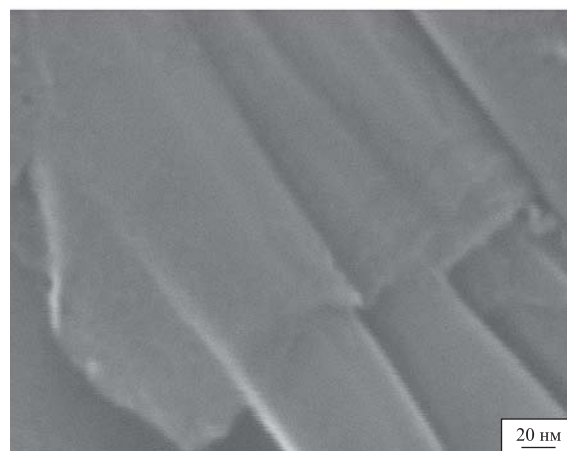
Существенное влияние на формирование покрытий оказывают амплитудно-частотные характеристики виброактивации процесса. Установлено, что максимальное увеличение толщины покрытия наблюдается при амплитуде до 3 мм, при ампли-



2 мкм



100 нм



20 нм

**Рис. 3. Поверхность материала с покрытием MoS<sub>2</sub> + WS<sub>2</sub> при разном увеличении**

туде более 3 мм толщина покрытия уменьшается. С повышением частоты колебаний толщина пленки покрытия увеличивается в связи с увеличением числа микроударов в единицу времени. Активный рост покрытия происходит при продолжительности обработки до 30 мин, далее происходит стабилизация толщины покрытия и оно уплотняется. При увеличении времени обработки более 120 мин толщина

покрытия незначительно уменьшается вследствие его разрушения.

При тяжелых режимах трения на воздухе в зоне контакта в присутствии серосодержащих твердых смазок  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$  происходит образование сульфидов ( $\text{FeS}$ ,  $\text{FeS}_2$ ) и оксидов железа. На основании проведенных рентгеноструктурных исследований можно предположить, что в данном процессе, благодаря большим контактными давлению, превышающим предел текучести обрабатываемого материала, и температуре в зоне контакта, происходит химическое взаимодействие порошка  $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$  с поверхностью детали на границе раздела "металл—покрытие". Образуется химически модифицированный граничный слой, содержащий сульфиды и частично оксиды железа.

Установлено, что нанесение покрытия  $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$  приводит к значительному уменьшению коэффициента трения с 0,24 в исходном состоянии до 0,19 при покрытии кистью, и до 0,04 при нанесении ВиМХП, т.е. ВиМХП обеспечивает повышение износостойкости образца в 7 раз.

Хорошие результаты были получены при нанесении покрытия на внутреннюю поверхность гильзы гидроцилиндра. Схема расположения гильз на виброплощадке установки УВГ 4×10 показана на рис. 4. Гильзы закрепляются в приспособлении 5 параллельно оси вала вибратора в районе опорных пружин 2. Отверстия закрываются специальными заглушками. В каждую гильзу засыпают шары и покрытие  $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$ . В процессе обработки гильзы через каждые 15 мин поворачивают на 90° в одном направлении вокруг оси для равномерного нанесения покрытия.

Также проведены производственные испытания инструмента для холодного прессования труб (пуансоны, матрицы, иглы) методом вибрационно-упрочнения поверхностного слоя с нанесением  $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$  на прессе мод. КА-5530.

Перед обработкой детали подвергали протравливанию для увеличения адгезии покрытия: травильный раствор — 1 часть дистиллированной воды и 0,5 частей  $\text{HCl}$ ; промывочный раствор — 1 часть воды,

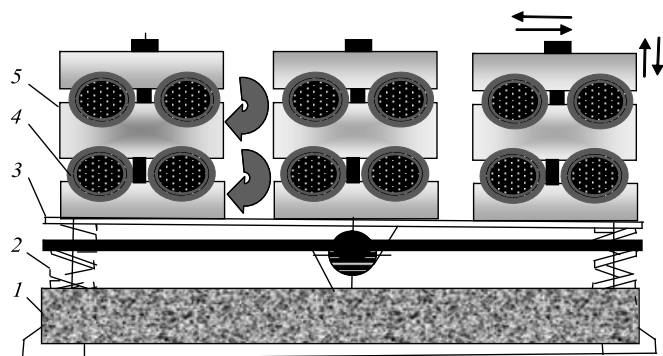


Рис. 4. Схема закрепления гидроцилиндров на площадке вибрационной установки УВГ 4×10:

1 — основание; 2 — пружины; 3 — виброплощадка; 4 — цилиндры; 5 — приспособление

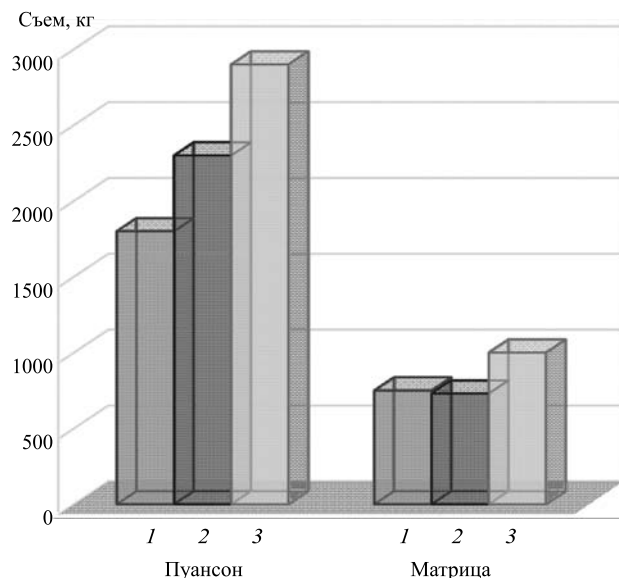


Рис. 5. Изменение стойкости инструмента для холодного прессования труб:

1 — средняя стойкость по нормам предприятия; 2 — стойкость серийного инструмента; 3 — стойкость инструмента с покрытием  $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$

0,25 частей  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 0,25 части хромпика. Обработку осуществляли в травильном растворе, нагретом до 60...70 °С, в течение 10...15 мин, с последующей промывкой в проточной воде и промывочном растворе.

Признаками выхода инструмента из строя по износу считали:

— для пуансона — износ рабочего пояса, что ведет к затеканию прессуемого металла в зазор между пуансоном обоймой, увеличение диаметра пуансона в месте наименьшего сечения;

— для матрицы — износ рабочего пояса, приводящий к увеличению диаметра прессуемой трубы, износ конусной части, приводящий к налипанию и ухудшению качества поверхности прессуемой трубы;

— для игл — разрушение по сечению.

При появлении одного из видов износа инструмент считается неработоспособным.

Сравнение данных испытаний с нормами средней стойкости инструмента, действующими на предприятии, показало (рис. 5), что увеличение стойкости обработанных пуансонов составляет 28 %, а увеличение стойкости матриц — 27 %.

Положительные результаты достигнуты также при использовании совмещенного процесса для обработки азотированных зубьев шестерен, сферических и приборных подшипников.

### Рекомендации по нанесению покрытия $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$

В качестве рабочей среды рекомендуется применять смесь стальных полированных шаров из стали

ШХ15 диаметром 2...9 мм (62 HRC) и мелкодисперсный порошок  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$  (ЦМТУ06-1-68).

Продолжительность обработки, требуемая для получения сплошной, плотной пленки  $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$ , составляет 60...90 мин.

Использовать можно вибрационные установки различных типов, позволяющих получить оптимальный режим обработки (амплитуда колебаний 2,5 мм и частота колебаний 33 Гц ( $2100 \text{ мин}^{-1}$ )). Рабочая камера или внутренняя полость детали заполняется шарами на 60 %. Рекомендуемые режимы позволяют одновременно получить оптимальную толщину пленки  $\text{MoS}_2 + \text{WS}_2$  и добиться улучшения качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Иванов В.В.** Основы вибрационных химико-механических методов нанесения покрытий. Дон. гос. техн. ун-т. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. С. 205.

2. **Комбинированные** методы повышения качества поверхностного слоя материалов / В.П. Смоленцев, М.В. Кондратьев, В.В. Иванов, Е.В. Смоленцев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 1 (321). С. 90—96.

3. **Особенности** механизма формирования вибрационного химико-механического цинкового покрытия / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.И. Попов, Н.С. Донцов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 2 (158). С. 51—54.

4. **Performance** characteristics of coatings for medical instruments and equipment / V.V. Ivanov, V.P. Smolentsev, Y. Panichev et al. // Pharmaceutical Sciences and Analytical Research Journal. 2020. Vol. 3. Iss. 1. 180031. URL: <https://chembiopublishers.com/PSARJ/PSARJ180031.pdf>.

5. **Study** of technological characteristics of the process of formation of vibration mechanochemical oxide coating / V.V. Ivanov, S.I. Popov, E.M. Selemeneva, N.T. Babazhanov // XV International scientific-technical conference “Dynamics of technical systems” (DTS-2019): AIP Conference Proceedings (Rostov-on-Don, Russia, September 11—13, 2019). 2019. Vol. 2188. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5138389>.

6. **Zinc** Coating Obtained in the Result of the Mechanochemical Effects in Vibrodynamic the Setups of Various Types / V.V. Ivanov, S.I. Popov, N.S. Dontsov, D. Essola // X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019): MATEC Web of Conferences (Kemerovo, Russia, November 26—29, 2019). 2019. Vol. 297. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929701003>.

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-9-407-410

**Е.Ю. Крупеня, А.П. Шишкина**

(Технологический институт (филиал) Донского государственного технического университета в г. Азове)

E-mail: e.yu.kru@mail.ru

## Технологические возможности виброотделки деталей гранулированными органическими средами из природных материалов

*Показаны сущность и область применения гранулированных органических сред из природных материалов в технологии изготовления деталей машин. Представлены модель процесса виброотделки поверхности деталей гранулами косточковых органических сред и результаты ее экспериментальной проверки, особенности сушки и вибропротирки деталей органическими средами.*

**Ключевые слова:** виброобработка, гранулированная органическая среда, отделка поверхности, сушка, вибропротирка.

*The essence and scope of granular organic media from natural materials in the technology for machine parts manufacturing are shown. Vibration finishing model of the parts surface by granules of stone organic media and the results of its experimental verification, features of drying and vibration wiping of parts by organic media are presented.*

**Keywords:** vibration treatment, granular organic medium, surface finishing, drying, vibration wiping.

### Введение

Гранулированные органические среды из природных материалов представляют собой самостоятельную группу обрабатываемых сред, состоящих из гранул косточек фруктовых деревьев, элементов

из древесины, гранул, полученных в результате дробления стержней початковых растений [1]. Особенность этих обрабатываемых сред обусловлена их специфическими биолого-химическими свойствами, сформированными у них на этапах созревания, переработки и хранения. Благодаря этим свойствам

органические обрабатывающие среды используют на операциях финишной отделки и полировки поверхностей сложнопрофильных деталей, высокоточных деталей гидроаппаратуры, электротехнических и других изделий, а также при подготовке поверхностей для нанесения функциональных покрытий. Органические среды расширяют возможности обработки металлов и сплавов различной твердости — от алюминия до закаленной стали и чугуна и от коррозионно-стойкой стали до золота и платины, обеспечивают проведение сухой обработки, не предусматривающей организацию систем отвода сточных вод.

В качестве базового технологического оборудования для виброотделки деталей органическими средами наиболее рационально использовать вибростанки с кольцевой рабочей камерой.

### Моделирование процесса виброотделки деталей косточковыми органическими средами

Считая органическую гранулированную среду сплошной, используя гидродинамическую аналогию и пренебрегая тепловыми эффектами в гранулированной среде, выражение плотности потока энергии, кг/с<sup>3</sup>, можно представить в виде:

$$E = \left( \frac{\rho_{oc} v^2}{2} + p \right) v, \quad (1)$$

где  $\rho_{oc}$  — плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  — средняя скорость потока среды, м/с;  $p$  — внешнее и внутреннее "гидростатическое давление" в среде, Па.

При фиксированном направлении потока относительно поверхности предложено выражение для скорости металлосъема, м/с:

$$\gamma_m = \frac{E}{\Sigma}, \quad (2)$$

где  $\Sigma$  — модуль сопротивления разрушению поверхности, Па.

Соотношение (2) качественно описывает установленную закономерность, состоящую в том, что повышение скорости и "давления" рабочей среды независимо увеличивают скорость металлосъема с поверхности.

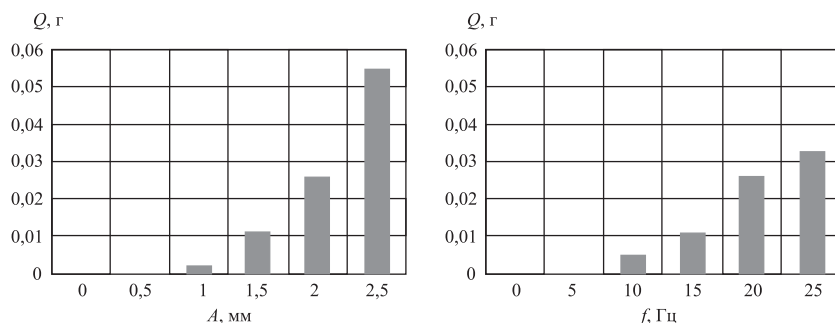


Рис. 1. Зависимость съема металла от амплитуды (а) и частоты колебаний рабочей камеры (б) при обработке образцов из стали 20 обрабатывающей средой, состоящей из гранул косточки абрикоса, и продолжительности обработки 90 мин

На основании анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований движения гранулированных сред в рабочих камерах вибромашин установлено, что технологический эффект обработки косточковыми органическими средами будет достигнут при соблюдении следующих условий:

— образование в рабочей камере стационарного циркуляционного движения среды по слабо эксцентричным (близким к окружности) эллипсам, обеспечиваемого выполнением критериев:

$$\frac{H}{L} \cong 1; \quad \frac{H}{d_{rp}} > 6; \quad \frac{(A \cdot 2\pi f)^2}{gH} < 0,5, \quad (3)$$

где  $H$  — высота загрузки рабочей камеры, мм;  $L$  — ширина сечения камеры, мм;  $d_{rp}$  — средний размер гранулы среды, мм;  $g$  — ускорение свободного падения;

— амплитуда  $A$  и частота  $f$  колебаний рабочей камеры превышают пороговые значения  $A_0 = 1$  мм,  $f_0 = 10...15$  Гц, ниже которых, как показали результаты экспериментальных исследований (рис. 1), эффект воздействия обрабатывающей среды на поверхность обрабатываемой детали, обуславливающий съем с нее материала, отсутствует.

Кроме того, установлено, что контактное давление потока среды на обрабатываемую поверхность зависит от высоты загрузки обрабатывающей среды в рабочую камеру, а скорость потока в состоянии установившегося движения потока по вибрирующей поверхности пропорциональна виброскорости самой поверхности.

Выразив высоту загрузки через ширину сечения рабочей камеры согласно уравнению (3)  $p = \rho_{oc} gH = \rho_{oc} gL$  и представив максимальную скорость циркуляционного движения среды внутри камеры соотношением  $v = K_d A \pi f$  ( $K_d$  — коэффициент диссипации), выражение для плотности потока энергии (1) преобразуем к виду:

$$E = K_d \pi g \rho_{oc} L (A - A_0) (f - f_0). \quad (4)$$

Параметр  $\Sigma$  в формуле (2) является комплексным параметром, характеризующим в данной трибосистеме микромеханику разрушения поверхности в процессе воздействия на нее потока гранул обрабатывающей среды. На основе кинетических представлений процесса разрушения поверхности установлена зависимость, раскрывающая физический смысл комплексного параметра  $\Sigma$ , из которой следует, что он зависит только от свойств обрабатываемого материала и обрабатывающей среды [2]:

$$\Sigma = H v \exp \left( \frac{\Delta H_{Ts} - k_T V_m H v_{cp}}{RT} \right), \quad (5)$$

где  $\Delta H_{Ts}$  — энтальпия, кДж/моль;  $k_T$  — коэффициент, учитывающий тепловой эффект;  $V_m$  — молярный объем обрабаты-



Таблица 1

Значения модуля сопротивления разрушению  $\Sigma$

Материал образца	Модуль сопротивления разрушению, $10^{10}$ Па, при виброобработке косточковой органической средой		
	Орех	Вишня	Абрикос
В95	8,27	8,35	8,31
Д16	7,145	7,219	7,178
Сталь 20	14,4	14,53	14,5

ваемого материала,  $m^3/\text{моль}$ ;  $HV_{\text{ср}}$  — твердость косточковой обрабатываемой среды, ГПа;  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $R = 0,008314$  кДж/(моль·К);  $T$  — абсолютная температура среды, К.

В табл. 1 представлены значения модуля сопротивления разрушению обрабатываемых материалов при виброобработке косточковыми органическими средами, рассчитанные согласно уравнению (5).

В обобщенном виде модель, описывающая технологический эффект виброобработки косточковыми органическими средами, имеет вид:

$$\gamma_m = \frac{K_d \pi g \rho_{\text{ос}} L (A - A_0) (f - f_0)}{\Sigma} \quad (6)$$

Экспериментальная проверка аналитической модели (6), предложенной для расчета удельного металlosъема с поверхности образцов в процессе виброобработки косточковыми органическими средами, показала ее приемлемость для практического применения в целях оценки производительности процесса, а также определения геометрических параметров качества поверхности, формируемой в процессе виброобработки. Как следует из табл. 2 и рис. 2, степень расхождения экспериментальных и расчетных значений скорости металlosъема находится в пределах экспериментальной ошибки [3].

### Особенности вибропротирки деталей средами органического происхождения

Технологически вибропротирка деталей средами органического происхождения в виде гранул измельченных стержней початков кукурузы включает в себя два основных этапа: водопоглощение гранулами среды жидкости с поверхности детали и непосредственно сухая протирка для придания детали товарного вида.

Процесс вибропротирки имеет три явно выраженных этапа (рис. 3): водопоглощение, при котором происходит повышение влажности органической среды до критической; просушка органической среды и снижение ее влажности до нормативной; сухая протирка [4].

Таблица 2

Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных значений скорости металlosъема

Материал образца	Среда	Значение средней скорости металlosъема, $10^{-6}$ г/с		Погрешность, %
		экспериментальное	расчетное	
В95	Орех	4,61	4,41	4,34
	Вишня	4,06	4,36	7,39
Д16	Орех	4,94	5,10	3,24
	Абрикос	5,24	5,08	3,05

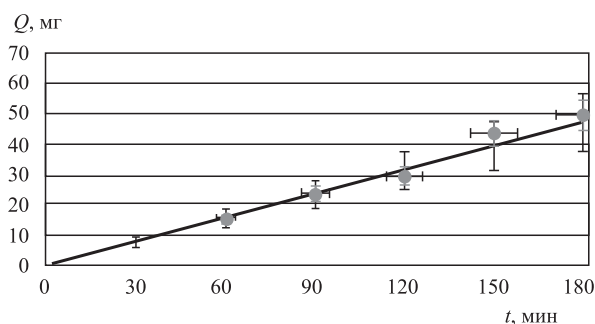


Рис. 2. Изменение съема металла в зависимости от продолжительности обработки при  $A = 2,5$  мм,  $f = 35$  Гц, материал образцов — сплав В95, обрабатываемая среда — гранулы вишни

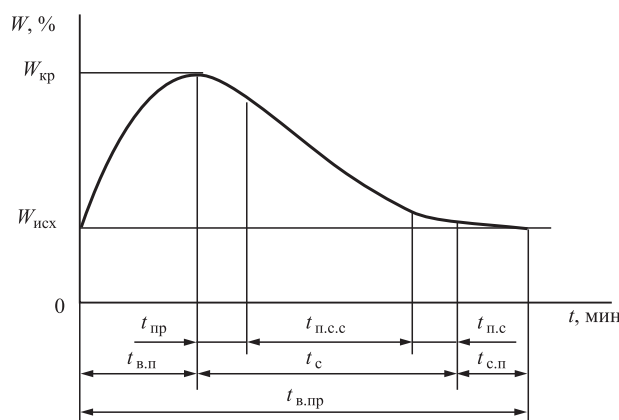


Рис. 3. Кинетика вибропротирки деталей во времени:  $W$  — влажность обрабатываемой среды;  $t_{\text{в.п}}$  — время водопоглощения;  $t_{\text{с}}$  — время сушки детали;  $t_{\text{с.п}}$  — время сухой протирки;  $t_{\text{пр}}$  — время прогрева массы загрузки;  $t_{\text{п.с.с}}$  — время постоянной скорости просушки среды;  $t_{\text{п.с}}$  — время падающей скорости просушки среды;  $t_{\text{в.пр}}$  — продолжительность вибропротирки

Важным показателем интенсивности процесса сушки детали является удельный влагоресурс жидкости с ее поверхности. По мере насыщения гранул органической среды влагой процесс приобретает

характер влажной протирки поверхностей деталей. Для осуществления сухой протирки деталей необходимо высушивать гранулы рабочей среды до степени влажности не более 13...15 %.

Возможны два технологических подхода при проведении вибропротирки. При первом подходе детали после виброабразивной обработки с СОЖ загружаются в виброкамеру с органической средой, имеющей нормативную влажность и соответствующую окружающей среде температуру. По истечении определенного промежутка времени  $t_{в.п.}$ , устанавливаемого регламентом, включаются нагревательные элементы, и масса загрузки просушивается для последующей сухой протирки деталей. При таком подходе разделены этапы влагонасыщения среды и сухой протирки, что влечет за собой увеличение продолжительности процесса и, как следствие, делает его технологически не производительным.

При втором подходе влажсъем с поверхности детали органической средой проводится с постоянно включенными нагревательными элементами, обеспечивающими нагрев обрабатываемой среды. Это позволяет совместить время прогрева массы загрузки с временем влагонасыщения обрабатываемой среды, не доводя ее влажность до критической. При этом сокращается продолжительность процесса и повышается производительность вибропротирки. Кроме того, проведение вибропротирки с постоянно действующими нагревательными элементами, встроенными в рабочую камеру, способствует более интенсивному перемешиванию массы загрузки в связи с ослабленными силами поверхностного взаимодействия частиц органической среды с деталью и между собой.

Продолжительность цикла вибропротирки для наиболее технологичного процесса можно записать в виде:  $t_{в.пр} = t_c + t_{с.п.}$ . Время для сухой протирки деталей должно устанавливаться экспериментально исходя из технологических соотношений, связанных с обеспечением требуемого качества поверхности конкретных деталей, и составлять от общей продолжительности определенную долю, т.е.  $t_{с.п.} \approx kt_{в.пр.}$ , где  $k$  — коэффициент, устанавливающий долю в процентах от продолжительности сухой протирки в общей продолжительности процесса вибропротирки.

Время просушки органической среды равно  $t_c = t_{пр} + t_{п.с.с} + t_{п.с.}$ . Для оценки времени прогрева массы загрузки при совпадении его с периодом влагопоглощения можно воспользоваться зависимостью

$$t_{пр} \approx t_{вп} = F \frac{\rho h}{q^*} K_T,$$

где  $F$  — площадь поверхности обрабатываемой детали;  $\rho$  — плотность жидкости;  $h$  — толщина жидкостной пленки на поверхности обрабатываемой детали;  $q^*$  — удельное объемное поглощение жидко-

сти с поверхности детали;  $K_T$  — коэффициент, учитывающий, температуру подогрева обрабатываемой среды.

Для расчета продолжительности просушки рабочей среды предлагаем формулу:

$$t_{п.с.с} = \frac{W_{пр} - W_{ТУ}}{K_x N},$$

где  $W_{ТУ}$  — влажность обрабатываемой среды, соответствующая техническим условиям, %;  $W_{пр}$  — предельная влажность обрабатываемой среды, достигаемая в процессе вибропротирки, %;  $N$  — скорость сушки;  $K_x$  — коэффициент, учитывающий химико-биологические свойства обрабатываемой среды.

## Выводы

1. Органические среды из природных материалов вполне обоснованно могут быть применены в качестве технологических обрабатывающих сред на операциях финишной отделки деталей в условиях виброобработки.

2. Вибропротирка деталей органическими средами в виде дробленых гранул стержней кукурузы может выступать в качестве альтернативного способа сушки небольших по массе и габаритным размерам маложестких деталей, позволяющая на базе виброустановок торového типа осуществлять удаление влажности с поверхности деталей, прошедших виброабразивную отделочную обработку с применением СОЖ, и может реализовываться в комплексе технологического оборудования для отделочной обработки деталей, являясь ее завершающим циклом.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев В.А., Шишкина А.П., Крупеня Е.Ю. Повышение качества виброотделки поверхностей высокоточных деталей средами органического происхождения // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 132—137.
2. Шишкина А.П., Лебедев В.А., Крупеня Е.Ю. Перспективы применения гранулированных сред органического происхождения в технологии виброобработки деталей // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2014: сборник статей Междунар. науч.-техн. конф., г. Волжский, 9—11 сентября 2014 г. Волгоград: ВолГАСУ, 2014. С. 131—133.
3. Шишкина А.П., Лебедев В.А., Чаава М.М. Энергетические аспекты виброобработки деталей косточковыми органическими средами // Вестник БГТУ. 2017. № 5 (58). С. 42—49.
4. Крупеня Е.Ю., Лебедев В.А. Технологические аспекты вибрационной протирки деталей рабочими средами органического происхождения // Известия ОрелГТУ. 2009. № 2—3/274(560).

**М.Е. Попов, А.М. Попов, Ю.В. Корольков, К.А. Сухоруков**  
 (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
 E-mail: kingkov@mail.ru

## Исследование процесса центробежно-ротационной обработки деталей в гранулированных средах

Изложены результаты имитационного моделирования процесса центробежно-ротационной обработки деталей в гранулированных средах. Рассмотрена модель процесса на микроуровне — движение отдельной частицы среды и на макроуровне — на уровне сложного тороидально-винтового движения среды в рабочей камере. Приведены зависимости, которые были использованы для имитационного моделирования и определения количественных закономерностей.

**Ключевые слова:** центробежно-ротационная обработка, имитационное моделирование, модели микро- и макроуровня, тороидально-винтовой поток, сферическая тарель, коническая тарель.

The results of centrifugal-rotary processing simulation of parts in granular media are presented. Model of the process at the microlevel — the movement of single particle of the medium and at the macrolevel — at the level of complex toroidal-screw motion of the medium in the working chamber is considered. Dependences used for simulation and determination of quantitative regularities are given.

**Keywords:** centrifugal rotary processing, simulation, model micro- and macrolevel, toroidal-screw thread, spherical plate, conical plate.

Центробежно-ротационная обработка в гранулированных средах на установках со сферической или конической тарелью (рис. 1) — один из эффективных динамических методов отделочно-упрочняющей обработки деталей.

Метод отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки (ОУ ЦРО) заключается в том, что гранулированный наполнитель 3 и обраба-

тываемые детали 4 (рис. 2) загружаются в рабочую камеру и приводятся во вращательное движение вокруг вертикальной оси таким образом, что вся масса загрузки приобретает форму тора [1].

Тороидально-винтовой поток обеспечивается конструкцией рабочей камеры, состоящей из неподвижной цилиндрической вертикально расположенной обечайки 1 и примыкающего к ней вращающегося дна 2, имеющего форму тарели. Для уменьшения износа внутренние поверхности дна и неподвижную часть рабочей камеры покрывают износостойким материалом. Чаще всего используются резиновые или

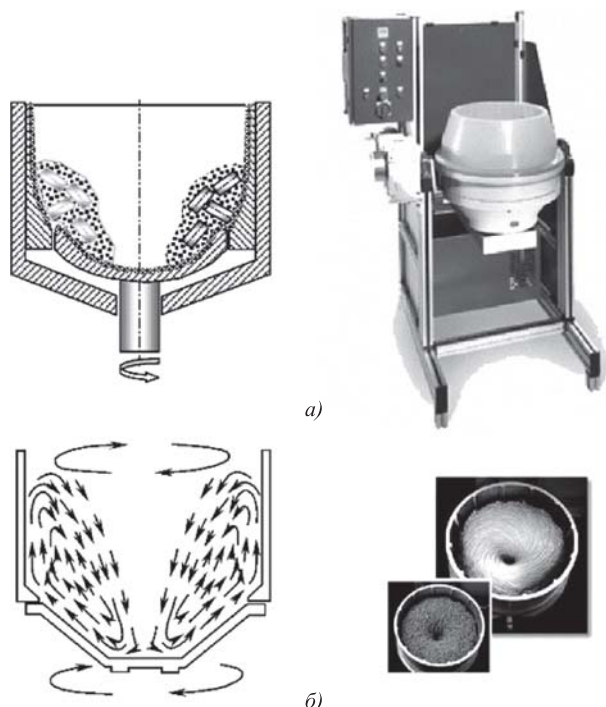


Рис. 1. Схемы установок для центробежно-ротационной обработки со сферической (а) и конической тарелью (б)

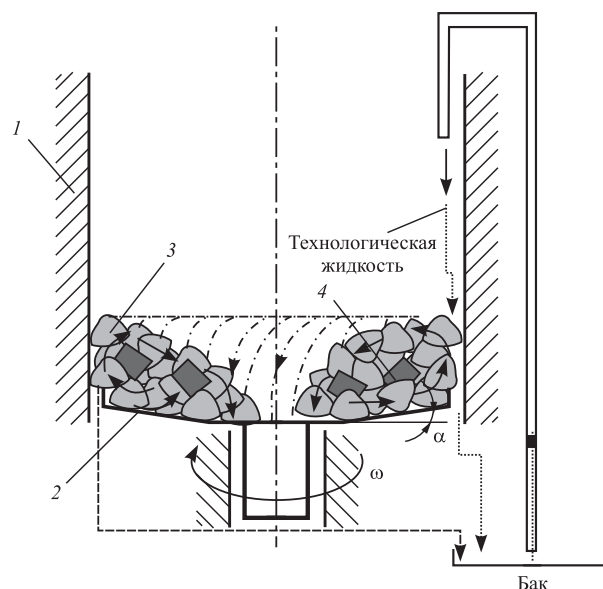


Рис. 2. Схема процесса центробежно-ротационной обработки

полиуретановые покрытия. Вращение дна обычно обеспечивается реверсивным электродвигателем или гидродвигателем.

Основные достоинства ОУ ЦРО: высокая интенсивность обработки, простое по конструкции оборудование, возможность одновременной обработки заготовок "внавал" большими партиями.

Шероховатость обработанной поверхности при ОУ ЦРО зависит от характеристик гранулированной рабочей среды, режимов обработки, объема загрузки рабочей камеры, физико-механических свойств обрабатываемого материала, исходной шероховатости и т.д.

ОУ ЦРО позволяет получить в зависимости от обрабатываемого материала: параметр шероховатости поверхности  $Ra$  до 0,8 мкм, сжимающие остаточные напряжения 100...130 МПа на глубине залегания 0,5...1,0 мм, повышение усталостной долговечности в 1,5...1,6 раза, увеличение степени упрочнения до 20 %.

В работах [2, 3] приводятся факторы, влияющие на производительность и качество обработки: угловая скорость вращения дна, угол наклона дна, параметры частиц рабочей среды (размеры шариков), свойства обрабатываемого материала, степень заполнения рабочей камеры, время обработки, соотношение объемов обрабатываемых заготовок и гибкой обрабатывающей среды, наличие и свойства ТЖ, исходное состояние поверхности заготовок и др.

Вращающееся дно 2 (см. рис. 2) выполняет функцию центробежного насосного колеса, которое сообщает всей массе загрузки вращательное движение вокруг вертикальной оси и масса загрузки приобретает форму тора с движением отдельных частиц по винтовой траектории.

Поток среды считаем осесимметричным, вязким и несжимаемым, поэтому его можно описать уравнением Навье—Стокса и уравнением неразрывности. Основные характеристики процесса: напор, создаваемый вращающимся дном; мощность потока среды; окружная скорость переносного движения. Энергия потока среды затрачивается на потери от трения и расширение потока, на поворот потока, потери на удар, связанные с натеканием потока на стенки неподвижной обечайки под некоторым углом атаки и на соударение частиц среды.

В зависимости от решаемых задач описание сложных систем выполняют на нескольких иерархических уровнях: микро-, макро- и метауровнях.

**Цель работы** — проведение имитационного моделирования процесса центробежно-ротационной обработки деталей. Рассмотрена модель процесса на микроуровне — движения отдельной частицы среды и макроуровне — на уровне сложного тороидально-винтового движения потока среды в рабочей камере при центробежно-ротационной обработке деталей.

### Моделирование на микроуровне

Моделирование процессов неголономной механики [4]. Неголономная механика, даже если ограничиться рассмотрением задач, связанных с ка-

чением твердых тел без проскальзывания, более многообразна по динамическому поведению, чем обычная гамильтонова динамика. Движение шарика по вогнутой поверхности можно рассматривать как вращательное относительно оси, проходящей через центр тяжести шарика, и поступательное.

Закон сохранения энергии для такого движения:

$$mgh = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (1)$$

где  $mgh$  — максимальное значение потенциальной энергии шарика;  $mv^2/2$  — максимальное значение кинетической энергии поступательного движения;  $J\omega^2/2$  — максимальная кинетическая энергия вращательного движения шарика.

Максимальная высота  $h$  подъема шарика на вогнутой поверхности рассчитывается по формуле

$$h = \frac{x^2}{2(R-r)}, \quad h \ll (R-r), \quad (2)$$

где  $x$  — максимальное смещение шарика;  $R, r$  — радиус кривизны поверхности и шарика соответственно.

С учетом того, что угловая скорость вращения  $\omega = v/r$ , а момент инерции  $J = \frac{2}{5}mr^2$ , закон сохранения энергии примет вид

$$\frac{mg}{(R-r)} \frac{x^2}{2} + \frac{7}{5}m \frac{v^2}{2} = E. \quad (3)$$

Для выбранной модели массой тела можно пренебречь. Построенная математическая модель может быть реализована в различных программных средах, особенно эффективно ее можно выполнить в системе Mathlab [5].

Данная система имеет обширный банк встроенных алгоритмов для имитационного моделирования. Используем встроенный блок *Flow Simulation (Sphere)* для инициализации рассматриваемой модели. Под сферой видны параметры, которые можно настраивать в зависимости от целей эксперимента.

Настройка *Starting point* включает в себя геометрические параметры настраиваемой модели:

( $r$ ) — изменяет расстояние от исследуемой точки до вертикальной оси сферы, проходящей через ее центр. Границы параметра: от 0 до 1 м, точность изменения параметра 0,010 м.

( $\theta$ ) — изменяет угол поворота материальной точки на заданном расстоянии, вокруг вертикальной оси сферы, проходящей через ее центр. Границы параметра: 0...360°, точность — 3...4°.

Начальные параметры эксперимента приведены на рис. 3.

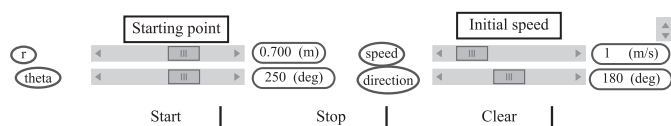


Рис. 3. Начальные настройки имитации (по умолчанию)

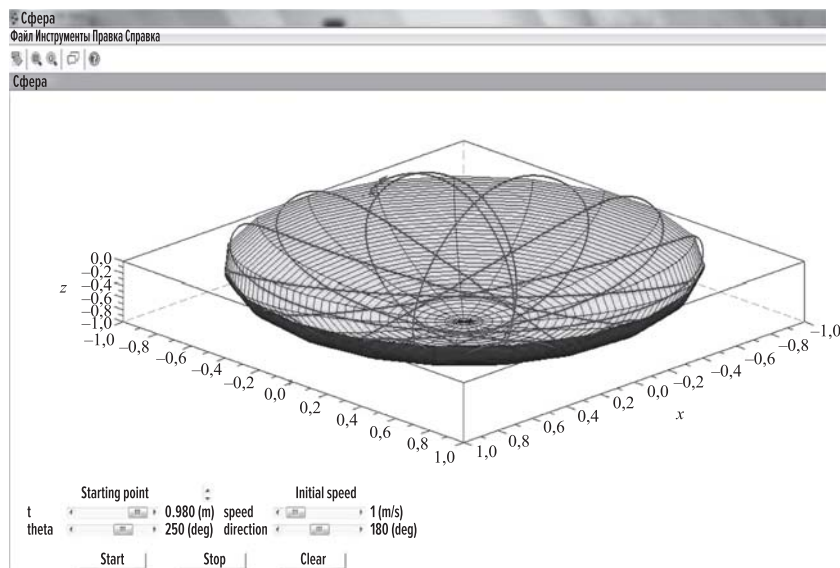


Рис. 4. Портрет имитации для конечных значений параметров

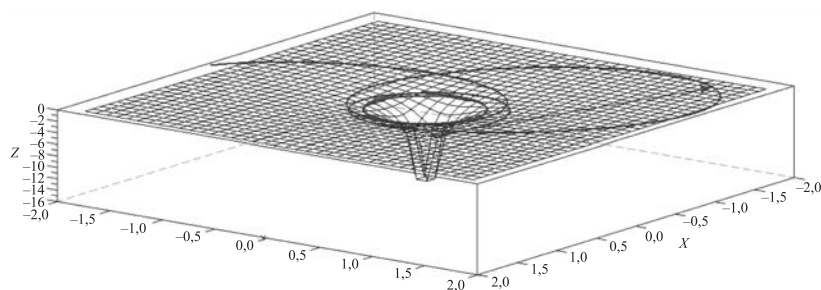


Рис. 5. Портрет модели при значении параметра speed = 3 м/с

Получить портрет имитационного эксперимента возможно при  $r = 0,98$  м (рис. 4).

Одной из критических ситуаций является запуск эксперимента при расположении тела в центре сферы при начальных параметрах.

### Моделирование на макроуровне

Модель Black hole, или "Черная дыра Митчелла" [4, 6].

В Ньютонском поле тяготения для частиц, покоящихся на бесконечности, с учетом закона сохранения энергии:

$$-\frac{GMm}{r} + \frac{mv^2}{2} = 0, \quad v^2 = 2GM/r.$$

Пусть гравитационный радиус  $r_g$  — расстояние от тяготеющей массы, на котором скорость частицы становится равной скорости света  $v = c$ .

Тогда

$$r_g = 2GM/c^2.$$

Настраиваемые параметры текущего эксперимента. Первый столбец *Starting point* включает

в себя геометрические настраиваемые параметры, второй столбец *Initial speed* — физические настраиваемые параметры.

Первый параметр *Starting point* —  $r$  позволяет изменять расстояние от центра "Черной дыры" до точки, с которой запускается эксперимент. Границы изменения 0,007...1,927 м, точность — 0,015...0,019 м.

Второй параметр — *theta* изменяет угол поворота исследуемой точки вокруг центра "Черной дыры". Границы изменения от 0...360°, точность — 3...4°.

В столбце *Initial speed* первый параметр — *speed* позволяет изменить модуль вектора скорости материальной точки. Границы изменения 0...3 м/с, точность — 1 м/с.

Настраиваемый параметр — *direction* позволяет изменить направление вектора начальной скорости материальной точки. Границы измерения 0...360°, точность — 3...4°.

Начальные параметры данного эксперимента каждый раз одинаковы:  $r = 1,100$  м;  $theta = 41^\circ$ ;  $speed = 2$  м/с;  $direction = 165^\circ$ .

Далее рассматриваются различные критические ситуации изменения одного из параметров, при условии, что остальные будут в начальном состоянии. Минимальное значение  $r$ , при котором возможен эксперимент, — 0,026 м.

При значении  $speed = 3$  м/с материальная точка после прохождения по некой траектории выходит за границы рассматриваемой плоскости (рис. 5). Подобная картина и наблюдается при значении  $r = 1,927$  м.

В производственной практике [1, 2] применяют более технологичные в изготовлении установки с конической тарелью (рис. 6).

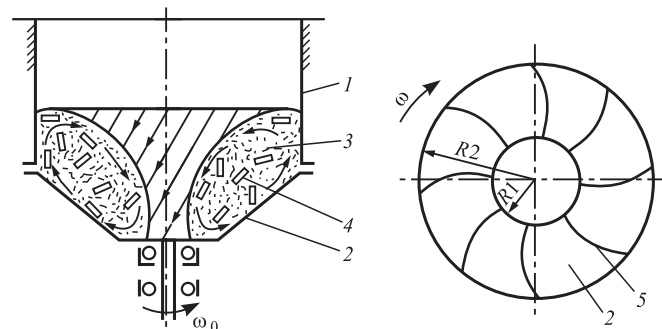


Рис. 6. Схема центробежно-ротационной обработки деталей на установках с конической тарелью:

1 — неподвижная обечайка; 2 — вращающаяся коническая тарель; 3 — обрабатываемая гранулированная среда; 4 — обрабатываемые детали

### Постановка задачи

В настоящей работе теоретически рассмотрено движение частиц гранулированной среды при центробежно-ротационной обработке деталей на установках с конической тарелью. На начальной стадии рассматривается вспомогательная модель: движение частицы по конической поверхности с данным углом полураствора под действием аксиального потока воздуха и сил трения. В этом случае нормаль к поверхности конуса имеет две компоненты: радиальную и вертикальную. Разработанная модель позволяет найти закон движения частицы по конической поверхности. Движение частиц происходит только по рабочей поверхности. Зная закон движения одной частицы, можно определить траектории системы невзаимодействующих частиц. Таким образом, в первом приближении для невзаимодействующих частиц можно определить концентрацию частиц на рабочей поверхности как в радиальном направлении, так и в вертикальной плоскости.

Для улучшения качества разрабатываемых устройств для центробежно-ротационной обработки деталей в гранулированных средах необходимы оценочные расчеты характеристик физических процессов, происходящих в них. В работах [3, 6] даны оценки характера движения частиц. Получаемые оценочные формулы имеют в основном эмпирический характер, но для более глубокого изучения физических процессов, происходящих внутри рабочей камеры центробежно-ротационной установки, необходимы математические модели, основанные на фундаментальных законах физики.

### Моделирование на микроуровне

Рассмотрим движение тел под потоком воздуха на внутренней стороне конической поверхности [4]. В данной задаче вихревой поток воздуха направлен вокруг оси симметрии системы вертикально. Начало координат совпадает с вершиной конуса (рис. 7).

Согласно классическому уравнению движения имеем:

$$m\ddot{\vec{R}} = \vec{F}_B + m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{N},$$

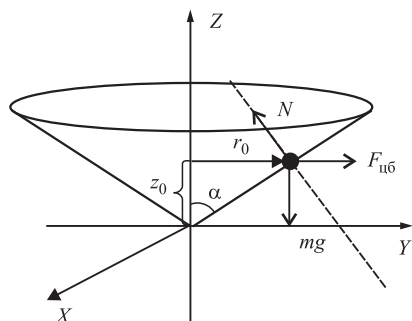


Рис. 7. Физическая модель частицы, находящейся на внутренней стенке конической поверхности потока

где  $\vec{R}$  — радиус-вектор тела;  $m$  — его масса;  $\vec{F}_B = F_B \vec{e}_\psi = a(v_0 - v_\psi) \vec{e}_\psi$  — сила действия потока воздуха;  $a$  — коэффициент сопротивления при движении тела в воздушной среде, зависящий от характеристики среды, формы и свойств тела;  $v_0$  — скорость потока воздуха;  $v_\psi$  — аксиальная составляющая скорости движения тела;  $\vec{e}_\psi$  — направление движения потока воздуха;  $\vec{g} = -g\vec{e}_z$  — ускорение свободного падения;  $\vec{F}_{\text{тр}} = Nf \frac{\vec{v}}{v}$  — сила трения о поверхность;

$\vec{N} = \vec{N}(v_\psi, r) = m \left[ g \sin \alpha + \frac{v_\psi^2}{v} \cos \alpha \right] \vec{e}_n$  — сила реакции поверхности;  $\vec{e}_n = -\cos \alpha \vec{e}_r + \sin \alpha \vec{e}_z$  — внутренняя к конической поверхности нормаль;  $\alpha$  — угол раствора конуса;  $r$  — расстояние от оси конуса до тела;  $\psi$  — угол цилиндрической системы координат;  $e_r, e_\psi, e_z$  — базисные векторы цилиндрической системы координат.

Сделаем первое приближение: коэффициент трения при движении тела о поверхность ничтожно мал, т.е.  $f \rightarrow 0$ .

Итак, имеем

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{R}} = & \frac{a}{m} (v_0 - v_\psi) \vec{e}_\psi - g \vec{e}_z + \\ & + \left[ g \sin \alpha + \frac{v_\psi^2}{r} \cos \alpha \right] (-\cos \alpha \vec{e}_r + \sin \alpha \vec{e}_z). \end{aligned} \quad (4)$$

Будем работать в цилиндрических координатах  $r, \psi, z$ :

$$x = r \cos \alpha; \quad y = r \sin \alpha; \quad r^2 = x^2 + y^2; \quad \frac{y}{x} = \text{tg} \alpha;$$

$$\vec{e}_r = \cos \psi \vec{e}_x + \sin \psi \vec{e}_y;$$

$$\vec{e}_\psi = -\sin \psi \vec{e}_x + \cos \psi \vec{e}_y;$$

$$\dot{\vec{e}}_r = -\sin \psi \dot{\psi} \vec{e}_x + \cos \psi \dot{\psi} \vec{e}_y = \dot{\psi} \vec{e}_\psi;$$

$$\dot{\vec{e}}_\psi = -\cos \psi \dot{\psi} \vec{e}_x - \sin \psi \dot{\psi} \vec{e}_y = -\dot{\psi} \vec{e}_r;$$

$$\dot{\vec{r}} = \frac{d}{dt} (r \vec{e}_r) = \dot{r} \vec{e}_r + r \dot{\vec{e}}_r = \dot{r} \vec{e}_r + r \dot{\psi} \vec{e}_\psi; \quad (5)$$

$$\ddot{\vec{r}} = (\ddot{r} - r \dot{\psi}^2) \vec{e}_r + (2\dot{r} \dot{\psi} + r \ddot{\psi}) \vec{e}_\psi;$$

$$\dot{\vec{R}} = \dot{r} + z \dot{\vec{e}}; \quad \ddot{\vec{R}} = \ddot{r} + z \ddot{\vec{e}}; \quad \ddot{\vec{R}} = \ddot{r} + z \ddot{\vec{e}};$$

$$\ddot{\vec{R}} = (\ddot{r} - r \dot{\psi}^2) \vec{e}_r + (2\dot{r} \dot{\psi} + r \ddot{\psi}) \vec{e}_\psi + z \ddot{\vec{e}}_z.$$

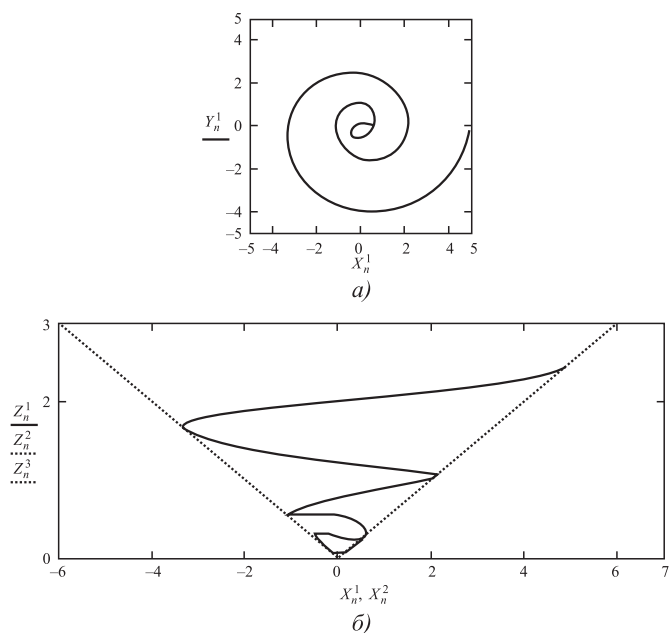
Сравнивая (4) и (5), получаем систему из трех уравнений второго порядка:

$$\ddot{r} - r \dot{\psi}^2 = - \left( g \sin \alpha + \frac{v_\psi^2}{r} \cos \alpha \right) \cos \alpha;$$

$$2\dot{r} \dot{\psi} + r \ddot{\psi} = \frac{a}{m} (v_0 - v_\psi);$$

$$\ddot{z} = -g + \left( g \sin \alpha + \frac{v_\psi^2}{r} \cos \alpha \right) \sin \alpha.$$

Понижая порядок уравнений системы, получаем систему из шести обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с начальными условиями.



**Рис. 8. Траектории частицы по поверхности конуса:**  
 а — вид сверху; б — вид сбоку

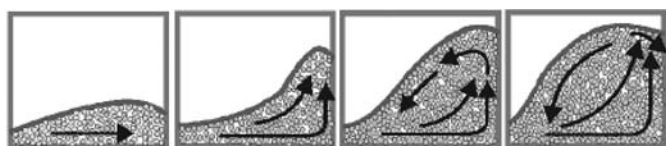
ными условиями  $r(0) = r_0$ ;  $\psi(0) = \psi_0$ ;  $z(0) = z_0$ ;  
 $v_r(0) = v_r$ ;  $v_\psi(0) = v_\psi$ ;  $v_z(0) = v_z$ , т.е. задачу Коши:

$$\dot{r} = v_r; \quad \dot{\psi} = \frac{v_\psi}{r}; \quad \dot{z} = v_z; \quad \dot{v}_r = \left( \frac{v_\psi^2}{r} \sin \alpha - g \cos \alpha \right) \sin \alpha;$$

$$\dot{v}_\psi = \frac{a}{m} (v_0 - v_\psi) - \frac{v_r v_\psi}{r}; \quad \dot{v}_z = \left( \frac{v_\psi^2}{r} \sin \alpha - g \cos \alpha \right) \cos \alpha.$$

Система уравнений решается методом Рунге—Кутты, например в пакете Mathcad [5].

На рис. 8 представлены траектории движения частицы по поверхности конуса с углом раствора  $63^\circ$  при заданных значениях скорости потока воздуха 15 м/с,  $a = 0,0002$  Н·с/м,  $m = 2$  г, при начальных значениях координат  $r_0 = 0,5$  м,  $\psi_0 = 0$ ,  $z_0 = 0,25$  м и скорости  $v_0 = 0$ . После начала движения частица движется вниз. Это связано с тем, что она еще не набрала достаточную скорость после движения из состояния покоя. Со временем она набирает скорость под действием воздушного потока, при этом увеличивается сила реакции на поверхность, обусловленная центробежной силой, что заставляет частицу двигаться вверх.



**Рис. 9. Основные четыре этапа процесса бункеризации**

### Моделирование на макроуровне

Зная закон движения одной частицы, можно определить траектории движения и для системы невзаимодействующих частиц. Большинство предлагаемых моделей базируются на том, что работа центробежно-ротационных установок основана на процессе вибробункеризации [6]. Вибробункеризация осуществляется, если на пути перемещающейся сыпучей среды поставить преграду. При достижении определенной высоты в сбункеризованном массиве начинается циркуляционное движение частиц по эллиптическим траекториям. На рис. 9 представлены четыре основных этапа процесса вибробункеризации.

Таким образом, в первом приближении для невзаимодействующих частиц можно определить концентрацию частиц на конической поверхности как в радиальном направлении, так и в вертикальной плоскости.

### Заключение

Результаты имитационного моделирования позволяют сформулировать (определить) условия начала возникновения и окончания (прекращения) движения тороидально-винтового потока, а также оптимальные параметры технологического процесса и конструкции установки (станка) для центробежно-ротационной обработки деталей. Представляет также интерес определение возможных максимальных и минимальных габаритных размеров обрабатываемых деталей.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Трилисский В.О. и др.** Объемная центробежно-ротационная обработка деталей. М.: НИИмаш, 1983. 53 с.
2. **Панчурин В.В.** Упрочняющая обработка зубчатых колес транспортных машин центробежно-ротационным способом: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИИЖТ, 1989. 243 с.
3. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Корольков Ю.В., Рожненко О.А.** Повышение эффективности центробежно-ротационной обработки в среде абразива // СТИН. 2009. № 2. С. 26—30.
4. **Голосков Д.П.** Уравнения математической физики. Решение задач в системе Maple. СПб.: Питер, 2004. 539 с.
5. **Чен К., Джиблин П., Ирвинг А.** MATLAB в математических исследованиях. М.: Мир, 2001. 346 с.
6. **Давыдова И.В., Золотопуп И.В., Гончаров М.О.** Модель образования тороидально-винтового потока в рабочей камере при ЦРО // Механика XXI века. 2017. С. 67—69.

М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, В.М. Троицкий, А.А. Мордовцев  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: tehn\_rostov@mail.ru

## Подготовка деталей под покрытие обработкой в гранулированных абразивных средах

*Исследовано формирование параметров качества поверхности деталей, обработанных в гранулированных абразивных средах, на поверхность которых необходимо наносить покрытия. Определены параметры следа при взаимодействии частицы среды с поверхностью детали. Установлены зависимости для расчета шероховатости поверхности и времени обработки. Описана методика проектирования технологической операции подготовки детали для нанесения покрытия.*

**Ключевые слова:** обработка в гранулированных абразивных средах, шероховатость поверхности, время обработки.

*The formation of surface quality parameters of parts treated in granular abrasive media, on the surface of which it is necessary to apply coatings is study. Parameters of trace are determined during interaction of medium particle with part surface. Dependencies for calculating of surface roughness and processing time are established. The design technique of technological operation for preparation of part for coating is described.*

**Keywords:** treatment in granular abrasive media, surface roughness, processing time.

Нанесение покрытия, как правило, является заключительной операцией в технологии изготовления детали. Способность покрытия повышать эксплуатационные свойства детали и сохранять их в период всего срока службы во многом зависит от правильной подготовки ее поверхности, которая может выполняться с применением различных технологий. К числу таких технологий, нашедших широкое применение в машиностроении, относятся методы обработки в гранулированных абразивных средах.

При обработке в гранулированных абразивных средах, находящихся в свободном состоянии, зерна используют свои режущие способности, так как происходит равномерное распределение их режущих кромок относительно обрабатываемых поверхностей, а также переориентация и перемещение в процессе обработки. Такие методы позволяют при сравнительно простых кинематических схемах оборудования осуществлять обработку деталей сложной конфигурации из различных материалов. Особенностью процессов обработки в гранулированных абразивных средах является одновременная обработка большого количества деталей без закрепления, возможность обработки деталей различных размеров (от нескольких миллиметров до нескольких метров), а также деталей малой жесткости. Температурный режим процесса низкий, так как скорости резания меньше, чем при других методах обработки, в том числе шлифовании. Это позволяет получать высокое качество обработанной поверхности без прижогов, микротрещин и нежелательных структурных изменений, что особенно важно при дальнейшем нанесении на поверхность детали покрытия. Для получения качественного покрытия шероховатость поверхности детали должна быть анизотропной и иметь специфический микрорельеф, глубина впадин которого позволяет осуществлять хорошее сцепление покрытия с поверхностью детали [1, 2].

Широкие технологические возможности методов обработки в гранулированных абразивных средах позволяют осуществлять операции шлифования, полирования, удаления заусенцев и облоя, скругления острых кромок и подготовить деталь к нанесению качественного покрытия.

Обработка с использованием абразивной среды проводится в основном в пределах профиля исходной шероховатости, т.е. является "безразмерной", однако при необходимости удаления дефектного слоя (после литья, штамповки и т.п.) можно снимать большой припуск за счет увеличения времени обработки.

При исследовании основных технологических параметров различных методов обработки в гранулированных абразивных средах одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия абразивных частиц с поверхностью обрабатываемой детали. Общая особенность этих методов обработки — режущий инструмент формируется непосредственно в процессе обработки как среда с особыми свойствами и определенными внутренними связями. При многократном взаимодействии частиц среды с поверхностью детали часть соударений приводит к микрорезанию. В результате воздействия гранул образуются абразивные царапины с поперечной шероховатостью, копирующей эффективный режущий профиль. Образование микрорельефа поверхности в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения абразивных царапин, оставляемых абразивными телами. Очевидно, что в первую очередь абразивный инструмент будет контактировать с выступами исходной шероховатости, при этом будет происходить постепенное скругление выступов. В процессе обработки высотные параметры профиля исходной шероховатости будут уменьшаться, а шаговые параметры будут изменяться незначительно до



достижения шероховатости, параметры которой не изменяются, а воспроизводятся с течением времени, т.е. установившейся шероховатости.

Для описания механизма формирования свойств поверхностного слоя можно применить общий подход, заключающийся в определении количественных параметров единичного взаимодействия абразивных гранул с поверхностью детали и их оценке с использованием вероятностных методов, позволяющих рассчитать количество взаимодействий в единицу времени на единице площади детали. В соответствии с этим максимальная глубина внедрения частицы среды при обработке в гранулированных абразивных средах [1–5]:

$$h_{\max} = 2v_{\text{эф}} R \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ч}}}{3k_R c \sigma_{\text{т}}}}, \quad (1)$$

где  $v_{\text{эф}}$  — эффективная скорость движения частицы;  $R$  — радиус частицы;  $\beta$  — угол контакта частицы с поверхностью детали;  $\rho_{\text{ч}}$  — плотность материала частицы;  $c$  — коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности;  $\sigma_{\text{т}}$  — предел текучести материала детали;  $k_R$  — коэффициент, учитывающий влияние зернистости абразивной частицы на фактическую площадь контакта, который определяется по зависимости

$$k_R = \sqrt[3]{\frac{48\rho_{\text{ч}}}{c\sigma_{\text{т}}} \left( \frac{k_p v_{\text{эф}} \sin \beta \chi Y(\alpha) (1 - \varepsilon_3) \bar{x}}{\alpha^2 (\bar{x}^2 + 3\sigma^2)} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $k_p$  — коэффициент, определяющий число абразивных зерен, вступивших в контакт с поверхностью детали при внедрении частицы;  $\chi$  — доля, занимаемая абразивными частицами в единице объема частицы;  $\alpha$  — коэффициент формы зерна;  $Y(\alpha)$  — функция, зависящая от  $\alpha$ ;  $\varepsilon_3$  — коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке;  $\bar{x}$  — средний размер абразивных зерен;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение размера зерен.

След единичного взаимодействия представляет собой эллипсоид с полуосями:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}; \quad a = \frac{\pi}{2} (\text{ctg} \beta - f) h_{\max} + b, \quad (3)$$

где  $f$  — коэффициент пропорциональности.

Образование микрорельефа в процессе обработки происходит путем многократного наложения и пересечения единичных следов. В результате на поверхности детали образуется новый специфический микрорельеф, который характеризуется однородностью свойств по всем направлениям. Для расчета параметров профиля шероховатости обработанной поверхности использована методика, предложенная профессором А.В. Королёвым [6] для описания теоретико-вероятностного процесса формирования профиля шероховатости поверхности детали при абразивной обработке. Среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости обработанной поверхности при обработке в гранулированных абразивных средах можно определить по формуле

$$Ra_{\text{уст}} = K \sqrt{\frac{h_{\max} l_{\text{ед}}}{z_0}}, \quad (4)$$

где  $K$  — эмпирический коэффициент (определен для различных методов обработки в гранулированных абразивных средах);  $l_{\text{ед}}$  — единичная длина;  $z_0$  — номинальное число вершин зерен над единицей поверхности связки.

Снижение высотных параметров исходной шероховатости при обработке в гранулированных абразивных средах имеет сложный характер. Изменение шероховатости поверхности носит экспоненциальный характер [1–5]. Скорость образования нового рельефа снижается от максимального значения в начальный период до значений, мало отличающихся от нуля к моменту образования установившейся шероховатости, что свидетельствует о формировании непрерывно воспроизводимого рельефа поверхности. Каждой комбинации технологических параметров соответствует такая удельная плотность взаимодействий и такой уровень энергии частиц среды, которые однозначно определяют как продолжительность периода достижения установившейся шероховатости, так и высотные параметры установившегося микрорельефа, причем последние зависят от исходной шероховатости. Это обстоятельство важно для правильной аппроксимации зависимости  $Ra(t)$ . Вышеуказанным условиям удовлетворяет выражение:

$$Ra(t) = (Ra_{\text{исх}} - Ra_{\text{уст}}) e^{-k_{\text{и}} t} + Ra_{\text{уст}}, \quad (5)$$

где  $Ra_{\text{исх}}$  — среднее арифметическое отклонение профиля исходной шероховатости;  $k_{\text{и}}$  — коэффициент интенсивности уменьшения шероховатости;  $t$  — время обработки.

Если определить значение  $k_{\text{и}}$  и  $Ra_{\text{уст}}$  для конкретных условий обработки, то подставляя в уравнение (5) вместо  $Ra$  заданное значение этого параметра  $Ra_{\text{зад}}$  при условии  $Ra_{\text{зад}} > Ra_{\text{уст}}$ , получаем требуемую продолжительность обработки для изменения параметра шероховатости от  $Ra_{\text{исх}}$  до  $Ra_{\text{зад}}$ .

Время достижения заданного значения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости обрабатываемой поверхности  $Ra$  можно определить следующим образом:

$$t = -\frac{1}{k_{\text{и}}} \ln \frac{Ra_{\text{зад}} - Ra_{\text{уст}}}{Ra_{\text{исх}} - Ra_{\text{уст}}}. \quad (6)$$

Коэффициент  $k_{\text{и}}$ , входящий в зависимости (5) и (6), не представляется возможным получить теоретически, однако есть возможность его экспериментального определения. Для различных методов обработки в гранулированных абразивных средах получены банки данных таких коэффициентов. Это позволяет сравнивать различные варианты сочетаний технологических параметров и режимов для достижения соответствующих значений  $k_{\text{и}}$  при обработке деталей из различных материалов, снижать время обработки и оптимизировать технологический процесс.

Представленные теоретические зависимости прошли комплексную экспериментальную проверку при обработке деталей из различных материалов в гранулированных абразивных средах.

При изготовлении образцов использовали материалы, применяемые в различных отраслях машиностроения для деталей, которым необходимо дальнейшее нанесение на поверхность покрытия: стали, алюминиевые сплавы, цветные металлы. Установлено формирование улучшенных параметров поверхностного слоя и повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке в гранулированных

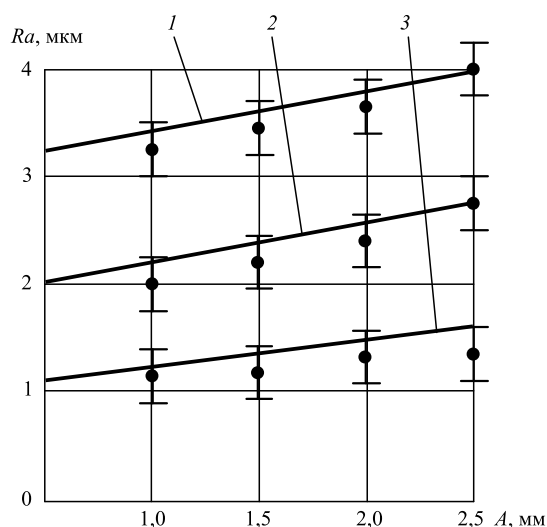


Рис. 1. Зависимость параметра шероховатости от амплитуды колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке в среде абразива. Материал детали — сталь 45, частота колебаний камеры — 26 Гц, рабочие среды: 1 — призмы ПТ 25×25 (зернистость 25); 2 — конуса (зернистость 16); 3 — призмы ПТ 15×15 (зернистость 12)

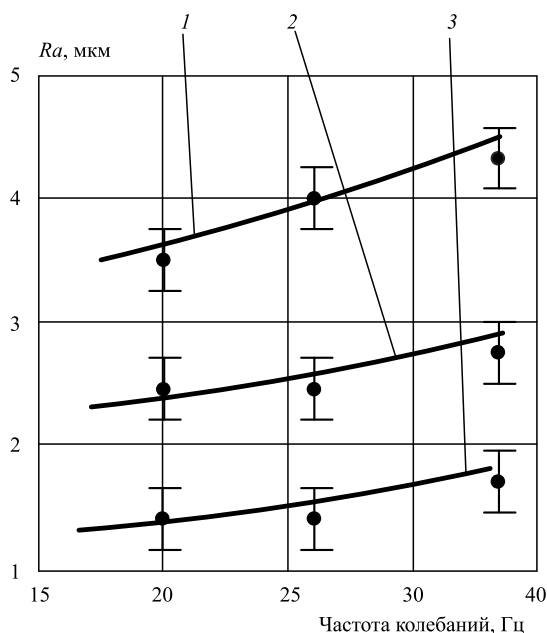


Рис. 2. Зависимость параметра шероховатости от частоты колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке в среде абразива. Материал детали — сплав АВТ, амплитуда колебаний камеры — 2,5 мм, рабочие среды: 1 — призмы ПТ 25×25 (зернистость 25); 2 — конуса (зернистость 16); 3 — призмы ПТ 15×15 (зернистость 12)

абразивных средах. Экспериментально определены значения установившейся шероховатости для различных исследуемых методов. Выполнено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. На рис. 1—4 теоретические зависимости установившегося параметра шероховатости поверхности от параметров обработки построены с помощью программы Mathcad и выполнены сплошной линией. Использовались банки данных коэффициентов, полученные исследователями процессов. Точками обозначены экспериментальные значения. Доверительные интервалы построены с доверительной вероятностью 95 %.

Установлена высокая сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований. Расхождение не превышает 20 %, что свидетельствует об адекватности полученных зависимостей и возможности осуществления правильных расчетов по ним. Полученная система моделей может быть использована для проектирования технологических процессов.

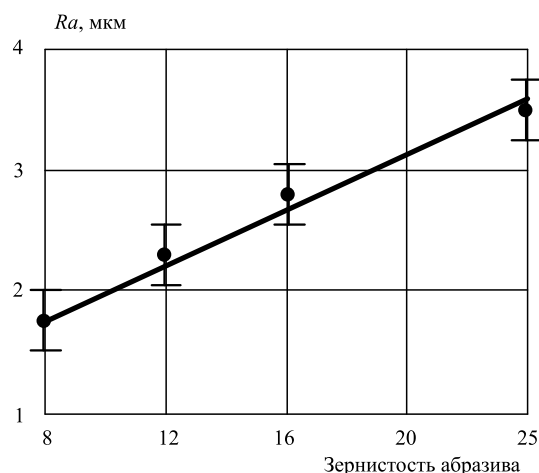


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости поверхности от зернистости при центробежно-ротационной обработке в среде абразива. Материал детали — ХВГ, частота колебаний камеры — 10 Гц

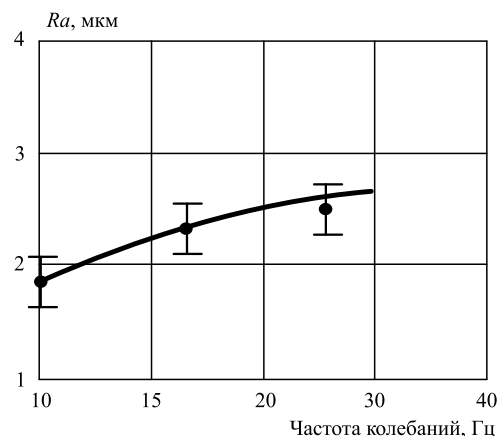


Рис. 4. Зависимость параметра шероховатости поверхности от частоты колебаний камеры при центробежно-ротационной обработке в среде абразива. Материал детали — сталь 45, среда — фарфоровые шары

При моделировании процессов обработки в гранулированных абразивных средах рассмотрено влияние исходных факторов на основные показатели обработки (технологические режимы, исходную шероховатость поверхности обрабатываемой детали, размеры частиц среды). Это позволило провести ранжирование технологических факторов, выбрать основные, которые оказывают существенное влияние, определить, какие из них следует задавать одним значением, а какие — массивом чисел для формирования множества проектных решений [1, 2].

Разработана методика оптимизации технологических процессов обработки деталей в гранулированных абразивных средах и САПР ТП в виде САМ модуля, который позволяет по характеристике детали выбрать возможные методы обработки в гранулированных абразивных средах (в порядке предпочтительности), для каждого из них определить технологические режимы и характеристики рабочих сред, обеспечивающие минимальное время обработки, необходимое для получения заданной шероховатости, рассчитать потребное количество станков и рабочих сред для выполнения годовой программы и путем экономического сравнения выбрать оптимальный вариант технологического процесса.

Приведенные результаты исследований прошли промышленную апробацию и успешно используются на машиностроительных предприятиях региона.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995.
2. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э.** Основы оптимизации процессов обработки деталей свободным абразивом / Saarbrücken / Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015.
3. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Рожненко О.А.** Исследование формирования съема металла при абразивной обработке фасонных поверхностей деталей // СТИН. 2012. № 10. С. 25—30.
4. **Tamarkin M.A., Tikhonov A.A.** Metal removal in hydroabrasive machining // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. Iss. 3. P. 175—177.
5. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Vyalikov I.L.** Increased efficiency of vibroabrasive machining in the presence of ultrasound // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35. Iss. 10. P. 740—744.
6. **Королёв А.В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. 191 с.

УДК 621.048

DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-9-419-423

**М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, Т.С. Сосницкая, С.А. Новокрещенов**  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: tehn\_rostov@mail.ru

## Обеспечение надежности технологических процессов обработки деталей динамическими методами ППД

*Представлены результаты исследований процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД) с учетом обеспечения их надежности. Выявлены зависимости для определения шероховатости поверхности, глубины упроченного слоя и степени деформации для различных динамических методов обработки ППД. Определено время обработки. Выполнены исследования надежности рассматриваемых технологических процессов по технологическим параметрам. Даны технологические рекомендации по проектированию технологических процессов и применению результатов исследований.*

**Ключевые слова:** обработка поверхностным пластическим деформированием, шероховатость поверхности, глубина упроченного слоя, степень деформации, надежность технологического процесса.

*The results of parts processing processes by dynamic methods of surface plastic deformation taking into account their reliability are presented. Dependencies are identified to determine surface roughness, depth of the hardened layer and degree of deformation for various dynamic methods of surface plastic deformation treatment. Processing time is defined. Studies of the considered technological processes reliability by technological parameters are carried out. Technological recommendations on design of technological processes and application of research results are given.*

**Keywords:** surface plastic deformation treatment, surface roughness, depth of hardened layer, degree of deformation, reliability of technological process.

Формирование эксплуатационных свойств происходит на протяжении всех этапов изготовления детали, в особенности, на операциях финишной обработки. В связи с этим выбор метода окончательной

обработки поверхности очень важен. В современном машиностроении все более широкое применение находят методы поверхностного пластического деформирования (ППД), которые разделяют на две

большие группы: статические и динамические. Статические методы, на сегодняшний день, исследованы наиболее полно. Широкое внедрение в производство динамических методов ППД сдерживается недостаточно глубокой проработкой вопросов формирования параметров качества поверхностного слоя и отсутствием их обобщенных теоретических моделей.

Для динамических методов ППД характерны высокие производительность и качество поверхности обработанных деталей из различных материалов, что позволяет использовать их на операциях полирования, поверхностного упрочнения, скругления острых кромок и т.п. Однако сложность явлений, происходящих в зоне обработки, большое число факторов, влияющих на результаты процесса (характеристики рабочих сред, режимы обработки, конструктивные параметры оборудования, механические свойства обрабатываемых материалов), затрудняют проектирование технологических процессов, гарантированно обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя обработанных деталей [1–9].

К динамическим методам ППД относят вибрационную отделочно-упрочняющую обработку, центробежно-ротационную отделочно-упрочняющую обработку, обработку дробью и др. [1–9]. В качестве среды, как правило, используются стальные полированные шарики.

Для описания механизма формирования свойств поверхностного слоя при использовании динамических методов ППД можно применить общий подход, заключающийся в определении количественных параметров единичного взаимодействия частиц среды с поверхностью детали и оценке с использованием вероятностных методов числа таких взаимодействий в единицу времени на единице площади детали. Максимальная глубина внедрения шарика в поверхность детали:

$$h_{\max} = 2v_{\text{эф}} R \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_{\text{ш}}}{3K_s c \sigma_T}}, \quad (1)$$

где  $v_{\text{эф}}$  — эффективная скорость движения шарика;  $R$  — радиус шарика;  $\beta$  — угол контакта шарика с поверхностью детали;  $\rho_{\text{ш}}$  — плотность материала шарика;  $K_s$  — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта;  $\sigma_T$  — предел текучести материала детали;  $c$  — коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности.

След единичного взаимодействия представляет собой эллипсоид с полуосями:

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h_{\max})^2}; \quad a = \frac{\pi}{2} (\text{ctg} \beta - f) h_{\max} + b, \quad (2)$$

где  $f$  — коэффициент трения скольжения шарика по материалу обрабатываемой детали.

Параметр шероховатости поверхности детали изменяется по экспоненциальной зависимости, достигая установившегося значения, которое можно определить по формуле

$$Ra_{\text{уст}} = K K_{\text{т.ж}} \sqrt{\frac{h_{\max} a b l_{\text{ед}}}{R^2}}, \quad (3)$$

где  $K$  — коэффициент, характерный для каждого метода отделочно-упрочняющей обработки динамическими методами ППД (для вибрационной отделочно-упрочняющей обработки  $K = 0,0022$ , для центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки  $K = 0,006$ );  $K_{\text{т.ж}}$  — коэффициент, учитывающий влияние объема подаваемой технологической жидкости;  $l_{\text{ед}}$  — единичная длина, введенная для сохранения размерности.

Определение рационального времени обработки деталей при отделочно-упрочняющей обработке динамическими методами ППД играет важную роль в процессе формирования качества их поверхностного слоя. Необходимо избегать такого явления, как перенаклеп, который приводит к снижению прочности, отслаиванию, шелушению поверхностного слоя металла и появлению трещин в нем. Образование перенаклепа обработанной поверхности способно негативно влиять на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей. Перенаклеп является необратимым явлением, при котором невозможно восстановление качества поверхностного слоя металла, даже при использовании термообработки. Для наиболее точного прогнозирования и планирования технологического процесса необходимо знать и уметь определять расчетное время обработки до появления перенаклепа. На основании проведенных исследований получена зависимость для определения времени обработки для динамических методов ППД [1]:

$$t_F = \frac{4h_{\max} F R^2}{V_s f_b}, \quad (4)$$

где  $F$  — число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности (варьируется от 10 до 20 для различных динамических методов обработки ППД);  $V_s$  — объем деформируемого металла при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью;  $f_b$  — частота циклов воздействия шарика на поверхность детали.

При решении технологических задач обработки деталей динамическими методами ППД важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочненного слоя  $h_n$  и степени деформации  $\varepsilon$  [1–9]. От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей, например сопротивление усталости и долговечность. Если при внедрении шарика в поверхность детали в зоне контакта возникает остаточная вмятина (пластический отпечаток), то вокруг нее всегда имеется пластически деформированная область, распространяющаяся на некоторую глубину  $h_n$ , определяющую зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокаций кристаллической решетки, образованные в результате приложения внешней нагрузки. Параметр контакта  $h_n$  имеет существенное практическое значение, поскольку прямо или косвенно характеризует механическое

состояние (упрочнение, запас пластичности, остаточную напряженность) локальной пластической области при единичном контакте или поверхностного слоя детали, подвергнутого упрочнению [10].

Такой параметр упрочнения, как степень пластической деформации  $\varepsilon$ , также оказывает влияние на механическое состояние поверхностного слоя материала обрабатываемой детали. Аналитическое определение глубины упрочненного слоя и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и особенностей процесса обработки является очень сложной задачей. Известные технологические зависимости получены с учетом многочисленных допущений, что затрудняет расчет по ним. На основании исследований, приведенных в работах [1–6], получены формулы для расчета глубины упрочненного слоя и степени деформации

$$h_n = KK_{т.ж} R \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \sqrt{v_{эф} \sin \beta} \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{K_s c \sigma_T}}; \quad (5)$$

$$\varepsilon = KK_{т.ж} \sqrt{v_{эф}}^4 \sqrt{\frac{\rho_{ш}}{\eta HB^{1,12}}}, \quad (6)$$

где  $\eta$  — динамический коэффициент твердости; HB — твердость обрабатываемого материала по Бринеллю.

При получении зависимости (6) был учтен тот факт, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление материала вдавливанию в него шарика, т.е. повышается уровень твердости материала, вследствие чего пластическая твердость при динамическом нагружении, зависящая от скорости, оказывается больше пластической твердости при статическом нагружении. Количественной мерой увеличения твердости, обусловленной динамичностью нагрузки, служит динамический коэффициент твердости  $\eta$ :

$$\eta = 0,5 \left( 1 - \frac{137v_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250v_0}{HD}} \right), \quad (7)$$

где  $v_0$  — начальная скорость удара; HD — пластическая твердость при статическом нагружении ( $HB = 0,2HD^{0,89}$ ).

Представленные теоретические зависимости прошли комплексную экспериментальную проверку при обработке деталей из различных материалов динамическими методами ППД.

Исследовано влияние амплитуды рабочей камеры, размеров среды и твердости материала детали на формирование шероховатости при обработке динамическими методами ППД. На рис. 1–3 приведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Сплошной линией на графиках показаны теоретические зависимости, точками — значения параметров, полученные при экспериментальных исследованиях. Исследовано также влияние частоты колебаний рабочей камеры, размера среды и твердости по Бринеллю на формирование глубины упрочнения и степени деформации. Некоторые результаты представлены на рис. 4.

При осуществлении любого технологического процесса в основе лежит стремление обеспечить требуемый уровень качества и высокую производительность обработки. При этом технологический процесс должен быть надежным. Однако повышение производительности технологического процесса может привести к снижению качества или, наоборот, более высокое качество может быть получено за счет низкой производительности, т.е. эти две стороны часто вступают в противоречие друг с другом.

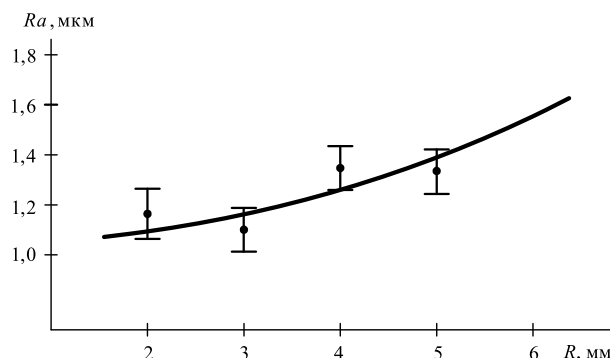


Рис. 1. Зависимость параметра шероховатости поверхности образца от размера частиц среды для вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (частота колебаний камеры — 30 Гц, амплитуда — 2 мм, материал — сталь ХВГ)

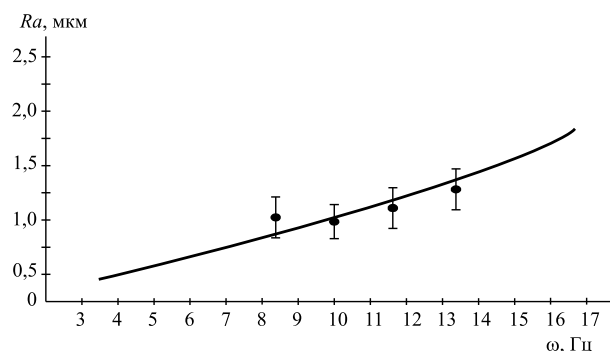


Рис. 2. Зависимость параметра шероховатости поверхности от частоты колебаний рабочей камеры для отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки при радиусе шарика 3 мм для стали 45

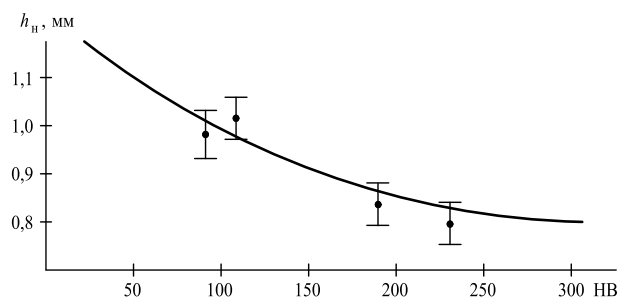
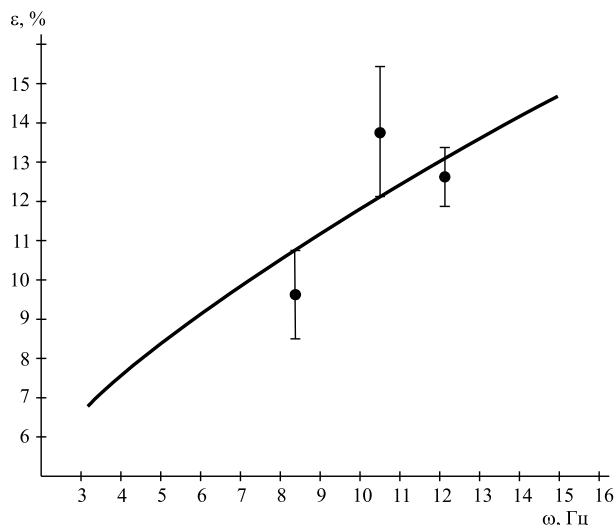


Рис. 3. Зависимость глубины упрочненного слоя от твердости для отделочно-упрочняющей вибрационной обработки (частота колебаний рабочей камеры — 26 Гц, амплитуда — 2 мм, радиус шарика — 5 мм)



**Рис. 4.** Зависимость изменения степени деформации от частоты колебаний рабочей камеры для отделочно-упрочняющей вибрационной обработки (радиус шарика — 6 мм для сплава Д16)

Отсюда надежность технологического процесса должна обеспечиваться как по качественным, так и по количественным показателям [6, 7, 11].

Под надежностью технологической системы и осуществляемого ей технологического процесса (ТП) понимают его свойство обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах при условии сохранения на них промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах. Исследования надежности технологических процессов регламентируются ГОСТ 27.202—83 [11], согласно которому при контроле ТП по количественному признаку определяют значения показателей точности: коэффициентов запаса точности  $K_z(t)$ , мгновенного рассеяния  $K_p(t)$ , смещения  $K_c(t)$ , точности  $K_t$  по контролируемому параметру.

Наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на выходные параметры технологического процесса, которые необходимо учитывать при его проектировании с обеспечением надежности: факторы, связанные с заготовкой, поступающей на обработку (жесткость; твердость; предел текучести; коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; соответствие материала заготовки материалу, указанному в техническом задании); режимы обработки (объем загрузки рабочей камеры, частота колебаний или вращения, объем подаваемой технологической жидкости); характеристики рабочей среды (диаметры шаров, масса шаров); человеческий фактор.

В процессе анализа надежности технологических систем следует исходить из заданных показателей качества готового изделия и номинальных значений, которые заранее прописаны в конструкторской документации. Перед технологом стоит задача: без

рассмотрения технического уровня самих изделий оценить, насколько процесс изготовления обеспечивает соблюдение установленных требований.

В качестве объекта для исследования надежности выбраны технологические процессы обработки деталей динамическими методами ППД. Установлено, что их надежность в значительной мере определяется величиной допуска на контролируемый параметр качества обработки. Пользуясь комплексом моделей, представленных ранее, можно рассчитать показатели точности процесса на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность принятого к производству технологического процесса. Необходимо осуществить расчет коэффициентов в соответствии с ГОСТ 27.202—83. В случае, если коэффициент  $K_z(t)$  окажется больше нуля, технологический процесс обеспечивает надежность.

Проведено компьютерное моделирование влияния величины допуска контролируемого параметра на надежность технологических процессов динамических методов ППД. Чтобы определить значение коэффициентов, представленных в ГОСТ 27.202—83, примем следующую методику расчета: задаем возможный разброс технологических параметров обработки в пределах 5, 10 и 15 % и рассчитываем значения коэффициентов согласно стандарту для обработки деталей из различных материалов с разными физико-механическими свойствами.

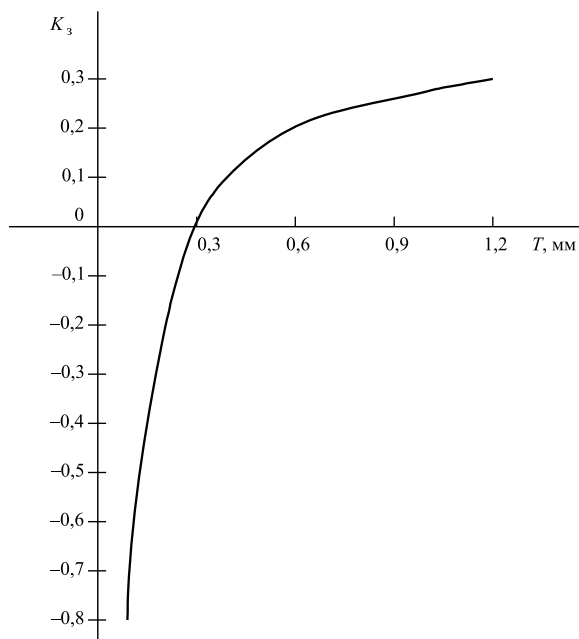
На рис. 5 и 6 представлены некоторые результаты исследований.

Анализируя результаты проведенных исследований, можно сделать вывод, что технологические процессы обработки деталей динамическими методами ППД обеспечивают получение требуемых параметров качества поверхности детали в ходе обработки в пределах поля допуска в определенном интервале изменения технологических режимов и характеристик рабочих сред.

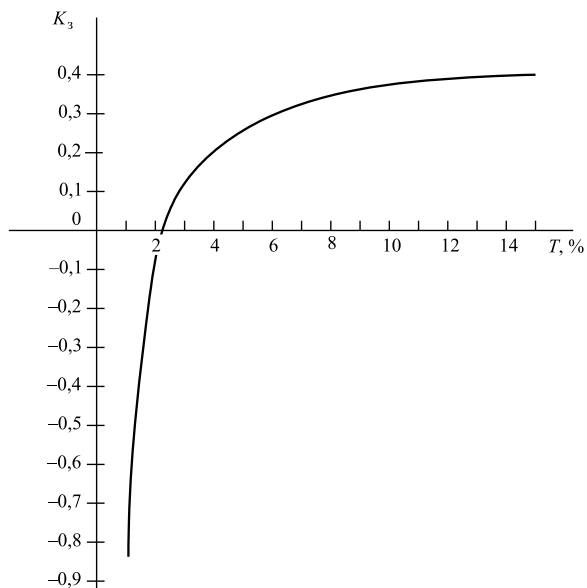
На основании результатов проведенных исследований разработана методика проектирования технологических процессов обработки деталей динамическими методами ППД, обеспечивающих требуемую надежность.

Поиск лучшего из всего множества проектных решений проводится на базе комплекса разработанных теоретических моделей процесса. Критерием рациональности являются минимальное время обработки и обеспечение значения коэффициента запаса точности  $K_z(t)$  больше нуля.

В качестве ограничительной функции, в зависимости от решаемых технологических задач, будет использоваться шероховатость поверхности, глубина упрочненного слоя, степень деформации или несколько параметров одновременно, рассчитываемых по полученным зависимостям (3), (5) и (6). Определяются поле рассеяния значений контролируемого параметра и среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса точности в соответствии с ГОСТ 27.202—83



**Рис. 5.** Влияние величины допуска на надежность технологического процесса центробежно-ротационной обработки (контролируемый параметр —  $h_n$ , диапазон изменения допуска 0,1...1,2 мм с шагом 0,1 мм, диаметр шарика — 4 мм, материал детали — сталь 45, частота колебаний рабочей камеры — 12 Гц)



**Рис. 6.** Влияние величины допуска на надежность технологического процесса при вибрационной отделочно-упрочняющей обработке (контролируемый параметр —  $\epsilon$ , диапазон изменения допуска 1...15 % с шагом 1 %, диаметр шарика — 6 мм, материал — сталь 45, частота колебаний рабочей камеры — 26 Гц)

[11]. В случае выполнения условия  $K_3(\tau) > 0$ , рассчитывается время обработки по зависимости (4) для каждого варианта сочетания технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий

минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

Результаты проведенных исследований внедрены в производство и используются для разработки технологических процессов, обеспечивающих надежность, на предприятиях машиностроительной отрасли региона, таких как ПАО "Роствертол", ООО "КЗ "Ростсельмаш" и др.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шведова А.С. Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами ППД: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Ростов н/Д., 2016. 146 с.
2. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Методика проектирования технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Вестник машиностроения. 2018. № 4. С. 78—83.
3. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Увеличение жизненного цикла деталей при обработке динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 403—408.
4. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Оптимизация процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // СТИН. 2018. № 3. С. 26—28.
5. Проектирование технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования с учетом увеличения их жизненного цикла / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, А.С. Шведова, С.А. Новокрещенов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 12 (156). С. 553—557.
6. Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Optimization of Dynamic Surface Plastic Deformation in Machining // Russian Engineering Research. 2018. No. 38 (9). P. 726—727.
7. Reliability of centrifugal-rotational finishing by steel shot / M.A. Tamarkin, E.E. Tishchenko, D.V. Kazakov, A.G. Isaev // Russian Engineering Research. 2017. No. 37 (4). P. 326—329.
8. Tamarkin M., Tischenko E., Kazakov D. The research process of the finishing strengthening centrifugal and rotary processing method of parts considering the reliability assurance of the technology process // International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC. 2017. P. 31—35.
9. Background Technology of Finish-Strengthening Part Processing in Granulated Actuation Media / M. Tamarkin, E. Tishchenko, A. Melnikov, E. Chernyshev // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. No. 983. P. 661—669.
10. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986.
11. ГОСТ 27.202—83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. 28 с.



**В.А. Лебедев, А.А. Кочубей, И.В. Давыдова, Г.В. Дёмин**  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: va.lebidev@yandex.ru

## Технологические особенности упрочнения деталей в устройствах с вращающимся электромагнитным полем

*Представлены устройства с вращающимся электромагнитным полем, и раскрыты физические эффекты, обуславливающие их применение на операциях упрочнения поверхностного слоя в процессе обработки ферромагнитными инденторами. Приведены результаты экспериментальных исследований, раскрывающие технологические возможности магнетодинамической обработки и область ее практического применения в технологии изготовления деталей.*

**Ключевые слова:** вращающееся электромагнитное поле, ферромагнитный индентор, вихревой слой, упрочнение, интенсивность обработки, качество поверхностного слоя.

*The rotating electromagnetic field devices are presented and the physical effects that determine their application in hardening of the surface layer during processing by ferromagnetic indenters are disclosed. The results of experimental studies are presented that reveal the technological capabilities of magnetodynamic processing and the field of its practical application in the technology of manufacturing parts.*

**Keywords:** rotating electromagnetic field, ferromagnetic indenter, vortex layer, hardening, processing intensity, surface layer quality.

Устройства с вращающимся электромагнитным полем (ВЭМП), классифицирующиеся как аппараты вихревого слоя (АВС) или установки активации процессов (УАП) [1, 2], благодаря своей относительно несложной конструкции получили достаточно широкое распространение в различных областях производства от обработки сельскохозяйственного и минерального сырья до переработки твердых бытовых отходов и очистки сточных вод.

Аппараты, использующие принцип вихревого слоя, позволяют интенсифицировать целый ряд технологических процессов за счет комплексного воздействия на обрабатываемые вещества интенсивного перемешивания и диспергирования, акустической и электромагнитной обработки, трения, высоких локальных давлений, электролиза и ударных взаимодействий. Потенциал аппаратов с вращающимся электромагнитным полем далеко не исчерпан на их сегодняшнем состоянии. Изучая теоретические предпосылки работы аппаратов с ВЭМП, удалось выявить их новые возможности.

В работах [1–4] показано, что если ферромагнитные неравноосные инденторы поместить в устройство, воспроизводящее вращающееся электромагнитное поле достаточной напряженности, то они приходят

в сложное хаотичное движение, создавая своеобразный вихревой слой. Хаотичное движение частиц во вращающемся электромагнитном поле приводит к большому количеству столкновений между частицами, частиц с обрабатываемыми изделиями, сопрождающихся как прямыми, так и скользящими ударами. Число таких соударений на каждую частицу достигает  $10^3 \dots 10^4$  в секунду. В результате ударно-импульсного взаимодействия происходит локальная пластическая деформация поверхности изделий, находящихся в рабочей зоне устройства. Таким образом, можно сделать вывод: устройства с ВЭМП можно успешно применять для отделочно-зачистной обработки и упрочнения поверхностного слоя деталей.

В целях оценки применимости подобного типа устройств для отделочно-упрочняющей обработки на базе статора 1,5 кВт трехфазного асинхронного электродвигателя неявнополюсного исполнения, обеспечивающего частоту вращения  $1600 \text{ мин}^{-1}$  была спроектирована и изготовлена опытно-экспериментальная установка (рис. 1). На вход через три лабораторных автотрансформатора (ЛАТР), соединенных звездой, подавали напряжение 45 В, при котором по показаниям амперметра потребление тока составило 5 А.



В качестве ферромагнитных инденторов использовали стальные стержни диаметром 1...1,5 мм и длиной 15 мм (рис. 2).

Экспериментально подтверждено [3], что движение ферромагнитных инденторов начинается при достижении индукции в рабочей зоне не менее 0,08 Тл. Характер движения инденторов зависит от частоты вращения и напряженности магнитного поля, создаваемого индуктором, массы, формы, размеров и магнитных свойств инденторов и др. Инденторы, намагничиваясь, притягиваются друг к другу и образуют цепочки, вытянутые в направлении вектора напряженности магнитного поля и вращающиеся за полем вокруг общей оси (рис. 3).

Ввиду неуравновешенности слоя цепочки существуют доли секунды, разрушаясь при столкновении друг с другом и группируясь вновь. Крупные цилиндрические частицы, как правило, цепочек не образуют, каждая из них движется отдельно от других.

Статистическая обработка большого количества экспериментальных данных позволила выявить, что радиальная и тангенциальная составляющие скорости движения ферромагнитной частицы подчинены нормальному закону распределения. Направление вектора радиальной составляющей скорости частицы равновероятно, тангенциальная составляющая скорости преимущественно направлена в сторону вращения поля, т.е. имеет место вращение всего слоя в целом.

Основными технологическими факторами, определяющими интенсивность покрытия обрабатываемой поверхности пластическими отпечатками  $P$  и, как следствие, производительность процесса, как показали исследования, являются массоразмерные соотношения инденторов обрабатываемой среды, обрабатываемой среды и рабочей зоны устройства, индукции вращательного электромагнитного поля  $B$ , от которых зависят энергосиловые параметры ферромагнитных инденторов.

Результаты исследований позволили установить следующее.

Как показано на рис. 4, *а*, масса загрузки в рабочую зону устройства инденторов, образующих магнитооживленный вращающийся слой, не должна превышать трех радиально расположенных кольцевых слоев, соизмеримых с длиной индентора  $l$ . Увеличение индукции магнитного поля свыше критической, ниже которой обрабатываемая среда находится в "твердой" фазе, приводит к повышению интенсивности процесса и, как следствие, к росту производительности обработки (рис. 4, *б*). Оптимальное соотношение геометрических размеров ферромагнитных инденторов (отношение длины к диаметру  $l/d$ ), при котором достигается наилучший эффект обработки, находится на уровне  $l/d = 10$  (рис. 4, *в*).

На рис. 5 представлены зависимости изменения среднearифметической высоты профиля микронеровностей, из которых следует, что с увеличением

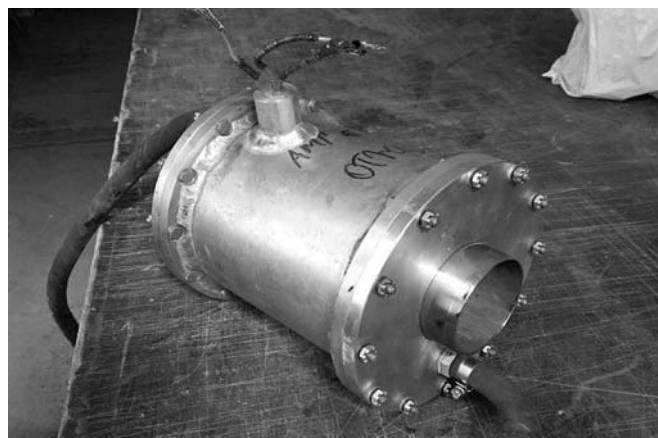


Рис. 1. Устройство с вращающимся электромагнитным полем



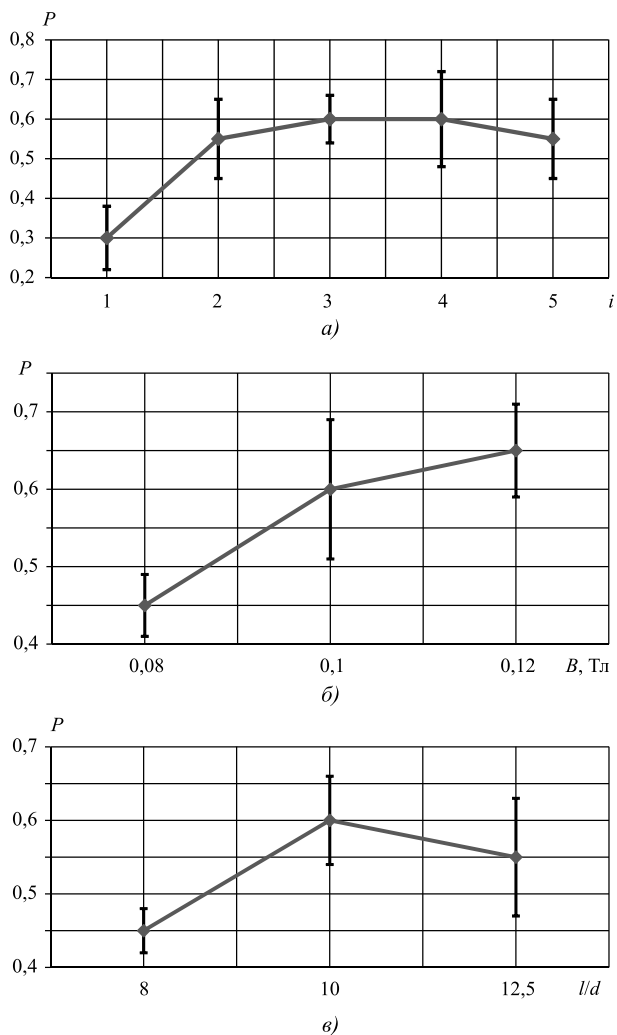
Рис. 2. Обрабатываемая среда — стальные цилиндры: *а* — ШХ15 (ГОСТ 801—78); *б* — 50ХФА (ГОСТ 14959—2016)



Рис. 3. Характер движения ферромагнитных частиц во вращающемся электромагнитном поле

продолжительности обработки высота профиля микронеровностей уменьшается до достижения определенного значения, соответствующего установившейся шероховатости.

Анализ зависимостей изменения физико-механических характеристик упрочненного поверхностного слоя, таких как микротвердость, глубина упрочненного слоя, остаточные напряжения первого рода (рис. 6) в функции от продолжительности обработки показал, что с увеличением времени обработки наблюдается рост этих характеристик до предельного значения. Дальнейшая обработка приводит к их

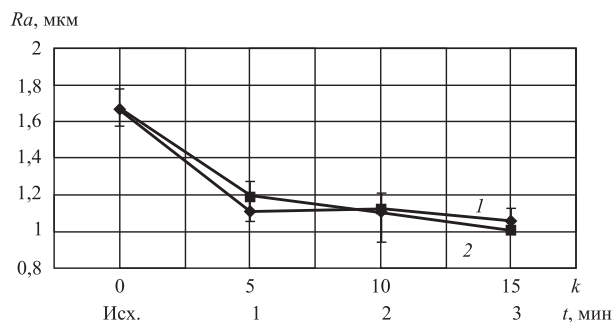


**Рис. 4. Зависимость изменения степени покрытия локального участка поверхности пластическими отпечатками  $P$  от различных параметров:**

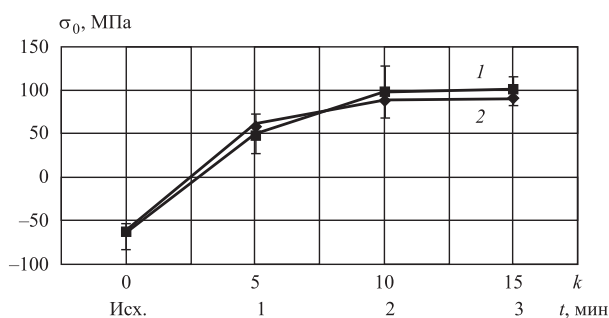
$a$  — число слоев загрузки инденторов  $i$  с соотношением  $l/d = 10$  при  $B = 0,1$  Тл,  $t = 10$  с;  $б$  — индукция магнитного поля  $B$  при  $i = 3$ ,  $l/d = 10$ ,  $t = 10$  с;  $в$  — соотношение размеров ферромагнитных инденторов  $l/d$  при  $i = 3$ ,  $B = 0,1$  Тл,  $t = 10$  с

снижению в результате перенаклепа, приводящего к разрушению поверхностного слоя.

Проведенные исследования позволяют предложить магнитодинамический метод обработки [4], основанный на создании конвективных потоков ферромагнитных инденторов в условиях вращающегося электромагнитного поля. Этот метод вполне обоснованно расширяет технологические возможности динамических методов ППД и имеет свое целевое технологическое назначение, связанное с применением его на операциях упрочнения деталей, обладающих выраженными парамагнитными свойствами. Наиболее эффективен магнитодинамический метод для упрочняющей обработки длинномерных деталей. К числу таких деталей относятся



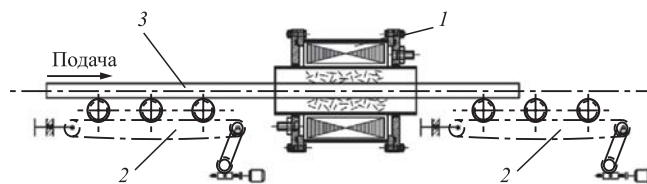
**Рис. 5. Изменение параметра шероховатости поверхности  $Ra$  в зависимости от кратности сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками  $k$  и продолжительности обработки  $t$  в устройствах с ВЭМП: 1 — эксперимент; 2 — расчет**



**Рис. 6. Изменение остаточных напряжений  $\sigma_0$  в зависимости от кратности сплошного покрытия поверхности пластическими отпечатками  $k$  и продолжительности обработки  $t$  в устройствах с ВЭМП: 1 — эксперимент; 2 — расчет**

тонкостенные трубы, стрингеры, пояса, лонжероны, которые широко применяются для изготовления летательных аппаратов.

Процесс магнитодинамической упрочняющей обработки длинномерных деталей может быть реализован на установках проходного типа, принципиальная схема которых показана на рис. 7. Магнитодинамическое упрочнение длинномерных деталей на подобных установках позволит снизить материалоемкость и энергоемкость оборудования до 8 раз, сократить технологическое время обработки, перекрыть вспомогательное время на установку и, как следствие, повысить производительность процесса упрочнения на 30 %, при этом обеспечив па-



**Рис. 7. Схема обработки длинномерных деталей: 1 — рабочий блок устройства с ВЭМП; 2 — приводной роликовый рольганг; 3 — деталь**

раметры качества поверхностного слоя, регламентируемые техническими требованиями.

Кроме того, этот метод обработки может быть использован на операциях подготовки поверхностей для сварки в среде инертных газов, нанесения антикоррозионных и других функциональных покрытий, а также улучшения качества уже сформированных на поверхности покрытий.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логвиненко Д.Д., Щеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев: Техника, 1976. 143 с.

2. Кочубей А.А., Лебедев В.А. Эффективность применения вращающегося электромагнитного поля для отделочно-упрочняющей обработки деталей летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации: сб. трудов XVI Всероссийской науч.-техн. конф. Пермь, 2015. С. 175—178.

3. Энергетические аспекты отделочно-упрочняющей обработки деталей в условиях вращающегося электромагнитного поля / В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров, А.А. Кочубей и др. // Научные технологии в машиностроении. 2016. № 6 (60). С. 35—42.

4. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле / А.А. Кочубей, В.А. Лебедев, Ю.М. Вернигоров и др. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. 135 с.

УДК 621.7.01

DOI: 10.36652/1813-1336-2020-16-9-427-432

**Е.П. Мельникова**

(Автомобильно-дорожный институт, г. Горловка, Донецкая область),

**Г.А. Прокопец, А.А. Прокопец**

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

E-mail: zerro00@yandex.ru

## Обеспечение качества изделий на основе обоснования метода финишной обработки и ее надежности

*Рассмотрены вопросы обеспечения стабильности эксплуатационных характеристик в начальный период эксплуатации и их связь с надежностью технологического процесса с учетом особой роли финишных операций, а также взаимосвязь и взаимопроникновение конструкторских, эксплуатационных и технологических факторов при обеспечении требуемого уровня надежности изделия. Рассмотрены основные виды отказов технологических систем финишной обработки на примере виброударной обработки.*

**Ключевые слова:** эксплуатационные свойства, технологическая операция, надежность, отказ, упрочнение, виброударная обработка.

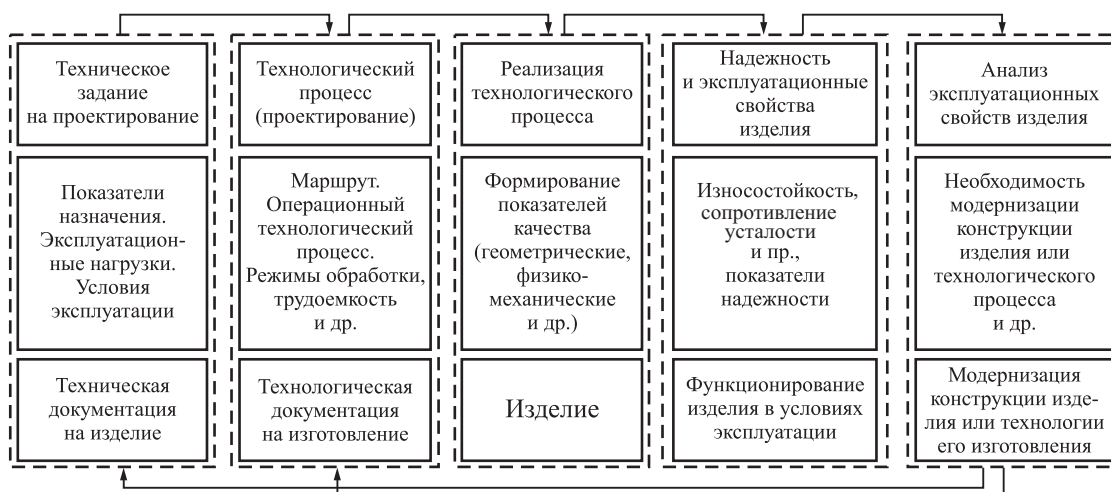
*The issues of operating characteristic stability in the initial period of operation and their connection with process reliability taking into account the special role of finishing operations, as well as the relationship and interpenetration of design, operational and technological factors while ensuring the required level of product reliability are considered. The main types of failures of technological finishing systems are considered on the example of vibration shock treatment.*

**Keywords:** service properties, technological operation, reliability, failure, hardening, vibration shock treatment.

Надежность изделий машиностроительного производства закладывается конструктором при его проектировании. При этом она обеспечивается эксплуатационными свойствами его элементов, уровень которых должен сохраняться в течение определенного времени эксплуатации. Необходимые эксплуатационные свойства деталей трансформируются конструктором в показатели качества, которые должны быть обеспечены технологом при проектировании технологического процесса (ТП) изготов-

ления этих деталей и дальнейшей его реализации. Технологические методы обеспечения надежности изделия имеют такое же значение, как конструктивные и эксплуатационные.

Перед технологом ставится задача выбора метода (или методов) обработки детали для формирования указанных в конструкторской документации показателей качества детали и проектирования соответствующих технологических операций (ТО), выполняемых в определенной последовательности. В конструктор-



**Рис. 1. Обобщенная схема взаимосвязи и взаимопроникновения конструкторских, эксплуатационных и технологических факторов при обеспечении требуемого уровня надежности изделия**

ской документации, как правило, заданы номинальные значения и показатели качества готового изделия уже с учетом обеспечения его эксплуатационных свойств после этапа приработки. Технолог должен дать запас этих показателей качества по надежности, учитывающий величину приработки.

На рис. 1 представлена обобщенная схема, показывающая взаимосвязь и взаимопроникновение конструкторских, эксплуатационных и технологических факторов при обеспечении требуемого уровня надежности изделия с точки зрения технолога. Из анализа этой схемы видно, что вопросы обеспечения стабильности эксплуатационных свойств изделий должны решаться совместно технологом и конструктором, и недостатки, выявленные при эксплуатации изделия, в ряде случаев могут быть устранены не усовершенствованием конструкции, а изменением технологии изготовления изделия. Это обусловлено, в частности, тем, что при выборе методов обработки, как правило, существуют несколько методов, позволяющих обеспечить заданные показатели качества. Можно привести примеры, когда одинаковые детали, выполненные в точном соответствии с технической документацией, обладают различными значениями эксплуатационных свойств и, соответственно, разными показателями надежности при изготовлении их по различным ТП, особенно при финишной обработке.

Особое внимание к финишным операциям связано с тем, что при эксплуатации поверхностный слой исполнительных поверхностей деталей подвергается интенсивному воздействию как эксплуатационных нагрузок, так и зачастую со стороны окружающей среды. Поэтому к поверхностному слою ответственных деталей предъявляются обычно достаточно высокие требования, а следовательно, особое внимание должно уделяться проектированию финишных операций.

Обычно выбор метода финишной обработки детали проводится на основании опыта техноло-

га с учетом имеющегося в наличии оборудования, технологической оснастки и инструмента, ограничений по технологической себестоимости [1] или производительности ТО либо ТП в целом. При этом наличие некоторого числа доступных методов финишной обработки деталей, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства, ставит перед технологом задачу оптимизации такого выбора по некоторому критерию. Чаще всего таким критерием является технологическая себестоимость ТО, однако, так бывает далеко не всегда. Поэтому проектирование ТП — это, как правило, работа над задачей, имеющей несколько вариантов решения, из которых нужно выбрать оптимальный. При этом важно корректно определить критерий оптимальности и его значения (особенно в условиях значительного числа ограничивающих факторов). В каждом конкретном случае необходим индивидуальный подход, так как этот выбор зависит от многих факторов, например, требуемого уровня стабильности и состава формируемых показателей качества, наличия ограничений и др. Также имеет значение наличие или отсутствие взаимозависимости и взаимного влияния показателей качества обрабатываемых деталей, которые обеспечивают эксплуатационные свойства поверхностей. При этом должны быть учтены не только технические и технологические факторы и ограничения, но и экономические. Дополнительные трудности при выборе связаны еще и с тем, что многие из методов финишной обработки появились сравнительно недавно и еще недостаточно изучены.

Например, упрочнение поверхности детали может быть обеспечено обкатыванием (накатыванием), дробеструйной обработкой, чеканкой, центробежно-шариковым наклепом, виброударной обработкой (ВиУО), обработкой многоконтактным виброударным инструментом и др. [2–4]. Методы поверхностного пластического деформирования обеспечива-

ют "повышение износостойкости, сопротивления усталости, контактной выносливости и других эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей на 20...50 %, а в некоторых случаях — в 2—3 раза" [5]. Однако микроструктура упрочненного слоя, остаточные напряжения в материале, шероховатость поверхности при этом будут отличаться. То есть при выборе финишных методов обработки технологю необходимо учитывать, что каждый из них приводит к получению состояния поверхности или поверхностного слоя, отличного по параметрам от состояния, формируемых при других способах обработки или параметрах ТО.

При этом технолог опирается только на техническую документацию, и ему непросто обосновать, как результаты такого выбора скажутся на стабильности полученных показателей качества во времени при достаточно длительной эксплуатации. Тем более, что попытка учета такого влияния нередко приводит к увеличению трудоемкости изготовления детали или необходимости дополнительных материальных затрат, что входит в противоречие с требованиями к экономичности ТП. Также необходимо при проектировании практически любой ТО учитывать значения значимых (влияющих на формируемые в проектируемой ТО показатели качества) показателей качества детали, которые обеспечиваются на предыдущих операциях, т.е. должна учитываться технологическая наследственность (допустим, твердость поверхности поступающих на упрочняющую обработку деталей выше (ниже) принятой при определении параметров операции упрочнения). Для снижения влияния технологической наследственности на результаты выполнения финишных операций могут применяться определенные меры, например, стабилизирующая термическая обработка перед обработкой ППД, применение специальных средств технологического оснащения, системы стабилизации технологических факторов в определенных пределах и др.

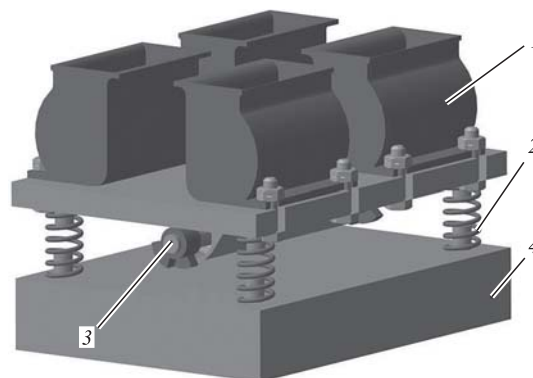
Любая ТО является динамической системой. При этом она должна быть всегда управляемой, иначе она теряет свою надежность, и возникают отказы. Под безотказностью ТО понимается вероятность нахождения ее технологических параметров в допустимых пределах в течение рассматриваемого периода времени, в качестве которого наиболее целесообразно использовать трудоемкость конкретной ТО. К основным отказам ТО можно отнести следующие: недостаточный запас надежности ТО в целом (поле рассеяния одного или более показателей качества детали оказывается равно или больше операционного допуска на эти показатели); недостаточная надежность отдельных элементов технологической системы (ТС); технологическая наследственность; изменение показателей качества при эксплуатации (обусловленное технологией изготовления и неучтенное при проектировании ТП); ошибки, связанные с проектированием технологии и технологического оснащения (человеческий фактор).

Проиллюстрируем рассматриваемые положения на примере ВиУО. ВиУО предназначена для формирования на детали упрочненного поверхностного слоя, т.е. слоя с определенными микротвердостью (в том числе законом изменения ее по глубине), остаточными напряжениями (в том числе глубиной залегания максимума и знаком), микрогеометрией поверхности, микроструктурой поверхностного слоя и др. Физический смысл упрочнения металла — это изменение параметров дислокационной структуры в направлении ее оптимизации. Формируемые при ВиУО параметры в зависимости от условий эксплуатации обеспечивают износостойкость, коррозионную стойкость, сопротивление усталости, комбинацию этих свойств и др.

В общем случае ВиУО характеризуется динамическим (ударно-импульсным) воздействием рабочей среды (РС) на поверхность детали. ТП ВиУО — это сложная динамическая система, в которую в зависимости от назначения и требуемой степени механизации и автоматизации могут включаться самые разнообразные элементы, в том числе основное и вспомогательное оборудование, технологическая оснастка, средства управления и контроля, люди, проектирующие, осуществляющие и управляющие ТП и др.

При ВиУО обрабатываемые детали загружаются в рабочую камеру 1 (рис. 2), заполненную РС требуемой характеристики. Рабочая камера смонтирована на упругих элементах, в рассматриваемом случае на пружинах 2, дающих ей возможность колебаться в различных направлениях. Она получает колебания заданной частоты от вибратора 3. Амплитуда колебаний формируется настройкой инерционного вибратора. Под действием вибраций РС технологическая жидкость и детали (масса загрузки) совершают два вида движений: колебательное и циркуляционное. Как правило, в ТС ВиУО также присутствует система подачи и очистки технологической жидкости. В качестве РС (инструмента) для ВиУО применяются в основном стальные закаленные полированные РС (шары, дроби и др.).

При обеспечении стабильности эксплуатационных свойств поверхностей деталей в приработочный



**Рис. 2. Схема процесса вибрационной обработки:**  
1 — рабочая камера; 2 — пружины; 3 — дебалансный вибратор; 4 — основание

период наиболее вероятен отказ, состоящий в недостаточном запасе надежности ТО. При ВиУО формируются специфическая микрогеометрия поверхности (шероховатость) и микроструктура поверхностного слоя, обеспечивающие формирование соответствующих физико-механических свойств, в том числе изменяются микротвердость, остаточные напряжения и др. Упрочнение при этом рассматривается как функция суммарного сопротивления движению дислокаций за счет плотности заторможенных дислокаций и удаления или аннигиляции легкоподвижных (низкоэнергетических) дислокаций.

Например, на рис. 3 представлено распределение микротвердости по толщине образца (обработка одной плоскости) из стали 30ХГСА после ВиУО. Из приведенного графика видно, что микротвердость изменяется не только у обработанного (упрочняемого) торца, но и у противоположного. Это связано с наличием определенного количества поверхностных (поверхностей раздела), формирующих деталь (образец), а также с динамическим характером взаимодействия частиц РС с обрабатываемой поверхностью. В результате при каждом соударении возникает пакет отраженных от пограничных поверхностей волн, которые в результате взаимодействия изменяют дислокационную структуру не только у обрабатываемых поверхностей, но у поверхностей, не контактирующих с частицами РС. Наличие микронеровностей на поверхности обрабатываемой детали увеличивает количество отраженных волн, а следовательно, перепады давлений у поверхностей раздела увеличиваются и создаются благоприятные условия для возникновения упругой и пластической деформации материала детали. Все это влечет за собой упрочнение или разупрочнение материала. Так, во всех исследованных образцах у стороны, противоположной обработанной, наблюдается подповерхностный минимум микротвердости, который на 10...12 % ниже исходной микротвердости.

Таким образом, если у упрочняемых деталей поверхности, противоположные упрочняемой стороне, испытывают одноименные с полученными при обработке напряжения, то это снижает ресурс рабо-

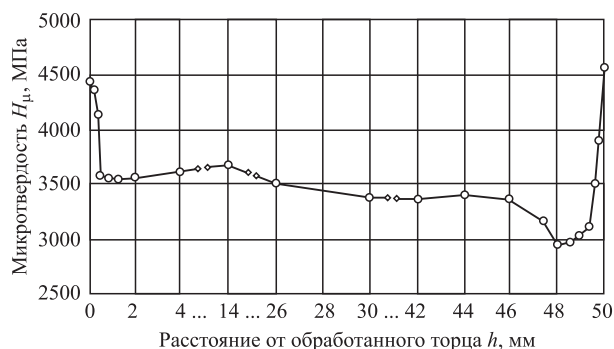


Рис. 3. Изменение микротвердости стали 30ХГСА по сечению образца после виброударной обработки

ты такой детали, если разноименные — то наоборот повышает.

Однако сформировавшаяся непосредственно после ВиУО структура неустойчива. Ее стабилизация происходит в процессе естественного старения. Если с ростом степени пластической деформации плотность дефектов достигает предельного значения, то дальнейшее деформирование связано с формированием новых каналов диссипации (с развитием фрагментированной структуры и пластическими поворотами), т.е. происходит процесс самоорганизации. В первую очередь аннигилируют легкоподвижные дислокации противоположных знаков, затем часть подвижных дислокаций переместится к границам зерен или частицам дисперсной фазы и при благоприятных условиях закрепится на них, формируется субзеренная структура, что в комплексе вызывает сначала падение микротвердости материала, а затем некоторый ее рост. Густая сеть дислокаций в процессе естественного старения перестраивается в границы субзерен, в результате чего наблюдается увеличение параметров прочности и снижение характеристик пластичности. Также после ВиУО в процессе естественного старения в материале выделяются дисперсные частицы вторичных фаз (например, вторичные карбиды), увеличивается равномерность структуры. Повышение равномерности увеличивает степень однородности развития деформационных процессов при эксплуатации изделия, повышается сопротивляемость материала внешним нагрузкам и т.д.

В результате старения, таким образом, изменяются параметры упрочненного слоя и, следовательно, изменяются эксплуатационные характеристики.

Другой причиной отказа может стать недостаточная надежность отдельных элементов ТС, например, износ инструмента, нестабильность режима обработки и т.п. Влияние надежности отдельных элементов на надежность ТО в целом можно условно разделить на две взаимосвязанные составляющие: соответствие показателей качества обработки указанному конструктором (уровень качества), и стабильность получаемого результата в течение заданного интервала времени (например, продолжительности ТО). Обе составляющие обеспечиваются одними и теми же составляющими ТО, но различными своими характеристиками. Проанализировав состав ТС и значимые факторы при ВиУО, можно выделить две группы (см. таблицу): элементы, определяющие уровень заданного показателя качества, и элементы, обеспечивающие стабильность формирования показателя качества.

Зачастую элементом ТС с наименьшей надежностью является инструмент. При ВиУО инструментом является РС. Особенность виброупрочняющей обработки в том, что частицы РС имеют в целом одинаковую форму и размеры. При виброударной обработке износ РС носит специфический характер. Размер-

ный износ ее элементов (даже в процессе обработки больших партий деталей) крайне мал. При ВиУО применяются в основном металлические термообработанные до высокой твердости среды. Поэтому износ РС в этом случае представляет собой снижение твердости материала ее элементов при многократных (циклических) динамических нагрузках, что приводит к изменению характеристик контакта частицы РС с поверхностью детали. Отсюда следует, что износ среды является функцией параметров наладки, режима обработки, параметров РС, параметров обрабатываемых деталей и др. Учет износа РС непосредственно в процессе обработки невозможен и требует контроля, периодичность которого зависит от многих факторов, в том числе от материала частиц РС, материала и массы обрабатываемых деталей, объема загрузки рабочей камеры, режима обработки, времени обработки и др.

К недостаточной надежности отдельных элементов ТС также можно отнести погрешность установки режима обработки (в том числе времени обработки), смещение центра масс вибрирующей части ТС, связанной со схемой установки рабочих камер (для многокамерных станков). Каждый из элементов на-

ладки вносит свою погрешность в процесс обработки и влияет на его надежность. Уменьшение влияния на надежность ТС изменения характеристик частично восстанавливаемых элементов может быть снижено путем проведения своевременных подналадок. А вот исключение влияния выхода параметров первичной наладки за допустимые значения непосредственно в процессе реализации ТО (нарушение стабильности ее протекания) возможно только при использовании адаптивных систем управления.

При таком отказе, как изменение показателей качества при эксплуатации, неучтенное при проектировании ТП, корректировка параметров ТО в целях учета изменения эксплуатационных свойств деталей возможна только в режиме диалога конструктора и технолога.

Таким образом, управление надежностью изделия при эксплуатации — это задача не только конструкторская, но и технологическая. При обеспечении требуемого уровня надежности изделия с учетом периодов приработки изделий необходимо учитывать возможность возникновения отказов ТС и создавать соответствующий запас надежности ТО или ТП. При прогнозировании надежности ТП

Элементы ТС ВиУО по составляющим надежности ТП

Элемент ТС	Основные факторы, влияющие на составляющие надежности	
	Уровень качества	Стабильность показателей качества
Рабочая камера	Диссипативные свойства покрытия рабочей камеры	Износ покрытия рабочей камеры
Привод колебаний	Частота вращения вала привода	Стабильность частоты вращения приводного вала
	Точность угла установки эксцентриков (грузов)	Надежность крепления эксцентриков
Упругая подвеска	Жесткость подвески (пружин)	Постоянство массы платформы с установленными на ней рабочими камерами (рабочей камерой)
	Уравновешенность массы платформы с установленными на ней рабочими камерами (рабочей камерой)	
Масса загрузки*	Размеры и форма частиц РС	Искажение формы и снижение твердости частиц РС в результате усталостного износа
	Объем загрузки рабочей камеры	Колебания параметров заготовки (твердости, остаточных напряжений и т.п., т.е. технологическая наследственность)
	Соотношение объема РС и деталей	
Технологическая жидкость	Состав технологической жидкости	Стабильность состава технологической жидкости
	Скорость промывки массы загрузки технологической жидкостью (гидродинамический эффект)	Стабильность количества технологической жидкости в массе загрузки
	Температура (охлаждение зоны деформации)	
Режим обработки	Первичная наладка	Стабильность параметров наладки во времени

\*Как правило, масса загрузки рабочей камеры включает в себя РС, обрабатываемые детали и технологическую жидкость. В связи с многообразием решаемых вибрационной обработкой задач состав и характеристики элементов массы загрузки могут изменяться в достаточно широких пределах.

необходимо также учитывать технологическую наследственность.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Прокопец А.А., Прокопец Т.Н.** Оптимизация уровня надежности элементов технологической системы вибрационной обработки по критерию технологической себестоимости изделия // Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: сб. тр. Междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов-на-Дону: Изд-во ДГТУ, 2017.

2. **Эффективность** применения дополнительной упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования для повышения уста-

лостной долговечности деталей / В.А. Лебедев и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 3 (171). С. 122—126.

3. **Шин И.Г.** Деформационное упрочнение поверхностного слоя деталей колеблющимся индентором// Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 10. С. 24—26.

4. **Попов М.Е., Хашаш О., Моргунов Д.Ю.** Виброударные и виброволновые методы упрочняющей и стабилизирующей обработки деталей горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 6. С. 107—111.

5. **Бафаев Д.Х.** Упрочнение поверхностного слоя деталей машин виброударной обработкой// Технические науки в России и за рубежом: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2016 г.). М.: Буки-Веди, 2016. С. 63—65.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

### "УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,  
тел.: (495) 785-6069,  
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

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

E-mail: utp@mashin.ru

Web-site: www.mashin.ru

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

Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 08.07.2020 г. Подписано в печать 27.08.2020 г. Формат 60×88 1/8.

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

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

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

Сайт: www.aov.ru