

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 14
2018
№ 2 (158)
февраль

Издается с января 2005 г.

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

Председатель редакционного совета

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

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

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

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
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.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:
И.Н. МЫМИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

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.

Факс: (499) 269-48-97.
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

- Бабичев А.П., Иванов В.В., Попов С.И., Донцов Н.С.** Особенности механизма формирования вибрационного химико-механического цинкового покрытия 51
- Лебедев В.А., Соколов В.Д., Давыдова И.В., Санамян Г.В.** Прогнозирование физико-механических характеристик качества поверхностного слоя, модифицированного ППД 54
- Тихонов Ал.А., Тихонов Ан.А., Соляник А.Р.** Формирование установившейся шероховатости в процессе гидроабразивной обработки 59



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

- Берберов С.А., Берберова Н.И., Гаврилов А.А.** Технологические возможности процесса калибрования шлицевых отверстий фасонными дорнами 63
- Попов М.Е., Попов А.М., Эль Дакдуки А.** Математическое моделирование соударения тел рабочей среды и обрабатываемых деталей при виброволновой обработке 66
- Прокопец Г.А., Прокопец А.А.** Повышение надежности технологической системы механической обработки деталей путем управления точностью ее наладки 71
- Тамаркин М.А., Мельников А.С., Тищенко Э.Э.** Исследование надежности технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования 76
- Атоян Т.В.** Модели оптимизации параметров процесса вибрационной обработки деталей в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом 80
- Бутенко В.И.** Особенности проявления и управление технологической наследственностью при отделочно-упрочняющей обработке поверхностей деталей машин 83



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

- Анкудимов Ю.П., Садовая И.В.** Совмещенный процесс нанесения композиционных цинк-алюминиевых покрытий и упрочнения методом ВиМТО 88



ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

- Азарова А.И.** Алгоритмизация процесса оптимизации многоступенчатой обработки деталей свободными абразивами 92

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: 05.02.00 — Машиностроение и машиноведение; 05.05.00 — Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.16.00 — Металлургия и материаловедение, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 14
2018
№ 2 (158)
February

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council

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

Editorial Assistant

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

Chairman Assistants:

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

Editorial council:

Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
V.A. ZEMSKOV
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. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

CONTENTS



GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

- Babichev A.P., Ivanov V.V., Popov S.I., Dontsov N.S.** Features of the mechanism of chemical-mechanical vibrating zinc coating formation 51
- Lebedev V.A., Sokolov V.D., Davydova I.V., Sanamyan G.V.** Prediction of physical and mechanical characteristics of quality of surface layer, modified by surface plastic deformation 54
- Tikhonov A.I.A., Tikhonov An.A., Solyanik A.R.** Formation of the steady-state roughness in the process of hydroabrasive processing 59



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

- Berberov S.A., Berberova N.I., Gavrilov A.A.** Technological capabilities of the process of spline-holes calibration with shaped burnishers 63
- Popov M.E., Popov A.M., El Dakduk A.** Mathematical modeling of the impact of the working environment bodies and the work piece when vibrowave processing 66
- Prokopets G.A., Prokopets A.A.** Improving the reliability of the technological system of mechanical processing of parts by management the accuracy of its adjustment 71
- Tamarkin M.A., Melnikov A.S., Tishchenko E.E.** Research of reliability of technological processing of details by dynamic methods of superficial plastic deformation 76
- Atoyan T.V.** Optimization of process parameters vibrating processing of parts in the working chamber with hinged lever actuator 80
- Butenko V.I.** Features of manifestation and management of technological heredity when finishing-strengthening of machines details surfaces 83



PROCESSING BY COMBINED METHODS

- Ankudimov Yu.P., Sadovaya I.V.** Combined process of drawing composite zinc-aluminum coverings and hardening by vibration mechanoheat treatment method 88



PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

- Azarova A.I.** Algorithmization of process of optimization of multistage processing of details by free abrasives 92

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: 05.02.00 — Mechanical engineering and machinery science; 05.05.00 — Transport, mining and building mechanical engineering; 05.16.00 — Metallurgy and materials science,
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

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

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



УДК 621.9.048.6:621.794

А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.И. Попов, Н.С. Донцов
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: vivanov_dstu@mail.ru

Особенности механизма формирования вибрационного химико-механического цинкового покрытия

Представлены основные особенности механизма формирования вибрационных химико-механических цинковых покрытий, получаемых на поверхности металлов в процессе химико-механического синтеза, реализуемого с использованием виброволновых технологических систем. Показаны преимущества этого способа нанесения цинковых покрытий по сравнению с традиционными методами.

Ключевые слова: вибрационная обработка, цинковое покрытие, вибрационное химико-механическое покрытие, виброволновая технологическая система, механическое покрытие.

Presented the main features of the mechanism of formation of vibrational chemical mechanical zinc coatings, obtained on metal surfaces in the chemical-mechanical synthesis, implemented in terms vibrowave technology systems. Shown the advantages of this method of applying zinc coatings in comparison with traditional methods.

Keywords: vibration treatment, zinc coating, vibration chemical-mechanical coating, vibrowave technological system, mechanical coating.

Введение

Формирование химико-механического цинкового покрытия на поверхности металла с использованием виброволновых технологических систем (ВТС) представляет собой сложный процесс, являющийся результатом совместного воздействия механической составляющей и химической реакции. При нанесении покрытия химико-механическим способом обеспечивается один из основных показателей качества поверхности — отсутствие наводороженного слоя.

Механизм образования цинковых покрытий характеризуется наличием между металлом и раствором двойного электрического слоя с установленным равновесным потенциалом. Восстановление ионов цинка (Zn^{++}) на металле возможно при сдвиге потенциала относительно равновесного значения в отрицательную область. В условиях динамической нагрузки резко повышается активация поверхности металла, ионов, атомов, молекул — всех составляющих, участвующих в образовании покрытия. При активации молекулы и атомы приобретают дополнительную энергию, способствующую преодолению потенциального

барьера, влияющего на скорость химических реакций. Сущность процесса активации при вибрационной химико-механической обработке (ВиХМО) состоит в придании поверхности материала каталитических свойств по отношению к реакции восстановления ионов цинка. Увеличению концентрации ионов цинка в граничном слое способствует циркуляция рабочей среды, при которой повышается скорость подвода разряжающихся ионов к поверхности металла [1–3].

Нанесение вибрационных химико-механических цинковых покрытий (ВиХМЦП) происходит при высокой активации и концентрации ингредиентов в граничном слое, электродный потенциал по отношению к равновесному смещается до величин, при которых становится возможным реакция восстановления ионов цинка.

Вывод подтверждается результатами эксперимента по осаждению покрытия во времени, а также уравнением Нернста

$$E_p = E^0 + \frac{2,3RT}{nF} \lg a_m^{n+},$$

где E_p — равновесный электродный потенциал; E^0 — стандартный электродный потенциал; R —

универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; n — число электронов, принимающих участие в реакции; F — число Фарадея (96 493 Кл на моль электронов); a_m^{n+} — активность ионов металла в растворе.

Из приведенного уравнения следует, что активность ионов может существенно влиять на величину равновесного потенциала.

Учитывая, что процесс ВиХМО сопровождается высокой активацией и концентрацией ионов, находящихся в граничном слое, а также условие, при котором цинк из простых солей осаждается при незначительном перенапряжении, определяем активность ионов железа и цинка при сдвиге потенциала. Расчет показал, что активность ионов цинка при данном значении потенциалов в 10^{12} раз больше активности ионов железа, следовательно, имеется сдвиг равновесных потенциалов [4].

Несмотря на отсутствие некоторых данных о кинетике и механизме процесса из-за сложности их получения, можно считать установленным факт формирования цинкового покрытия на стальных деталях. Общим условием для этого является виброволновое воздействие, обеспечивающее в каждом конкретном случае адекватный сдвиг равновесного потенциала.

Теория процесса образования начальной фазы покрытия (зародышей) при кристаллизации металлов основывается на положении образования новой фазы в системе раствор—твердое тело. Под зародышем цинкового покрытия следует понимать кристаллик, который состоит из минимального числа атомов, необходимого для построения одной элементарной кристаллической ячейки. Согласно теории Гиббса для образования новой фазы необходимо определенное пресыщение раствора по отношению к равновесному значению потенциала. При ВиХМО пресыщение связано с активацией и концентрацией реагентов в граничном слое, обеспечивающих сдвиг потенциала.

В соответствии с классической теорией радиус трехмерного зародыша критического размера r_3 описывается уравнением Томсона

$$r_3 = 2\sigma_m V / (n_3 F \eta_{кр}),$$

где σ_m — удельная межфазная энергия Гиббса границы металл—раствор; V — молекулярный объем металла; n_3 — число зародышей; F — число Фарадея; $\eta_{кр}$ — перенапряжение кристаллизации,

$$\eta_{кр} = E - E_p = \frac{2,3RT}{nF} \lg \frac{C}{C_p},$$

C — поверхностная концентрация, C_p — равновесная концентрация.

Изменение энергии системы при образовании зародыша кристаллического размера связано с возникновением поверхности раздела фаз зародыш—раствор и образованием объема новой фазы. Выражение для изменения энергии Гиббса ΔG_3 при образовании трехмерного зародыша имеет вид

$$\Delta G_3 = 16\pi\sigma_m^3 V^2 / (3n^2 F^2 \eta \eta_{кр}^2).$$

Скорость возникновения зародышей связана с энергией ΔG_3 их образования соотношением

$$\frac{dN}{d\tau} = K_c e^{-G_3/(RT)},$$

где N — число зародышей; K_c — константа скорости.

Таким образом, для скорости образования трехмерных зародышей получаем уравнение

$$\frac{dN}{d\tau} = K_3 \exp\left(-\frac{K_3}{\eta \eta_{кр}^2}\right).$$

Этим уравнением устанавливается связь между числом образующихся зародышей и перенапряжением [5].

Согласно теории Гиббса образование новой фазы аналогично образованию новой атомной плоскости. Картину роста кристаллов при формировании ВиХМЦП можно представить следующим образом.

Между кристаллами образующегося покрытия и поверхностью покрываемого металла возникает электродвижущая сила (поле микроэлементов), которая оказывает существенное влияние на дальнейший ход образования покрытия. В условиях высокой активности образование кристаллических зародышей происходит не только на выступах микронеровностей, но и на их гранях. В результате металл покрывается равномерно, кристаллы смыкаются, образуя сплошное мелкокристаллическое покрытие. Этот начальный слой является подложкой для последующего роста покрытия. При росте покрытия происходит срастание небольших групп кристаллов, распространяющихся вдоль поверхности металла. Под влиянием виброволнового воздействия происходит соударение рабочей среды и поверхности металла, микро/наночастицы цинкового порошка, находящиеся в растворе, уплотняются, образуя сплошное покрытие.

Конвекционное движение приводит к уменьшению толщины двойного электрического слоя, что позволяет снизить диффузионные ограничения и повысить скорость процесса. Экспериментальными исследованиями показано, что образование большого числа микро/нанокристаллов обеспечивает более полное перекрытие основного

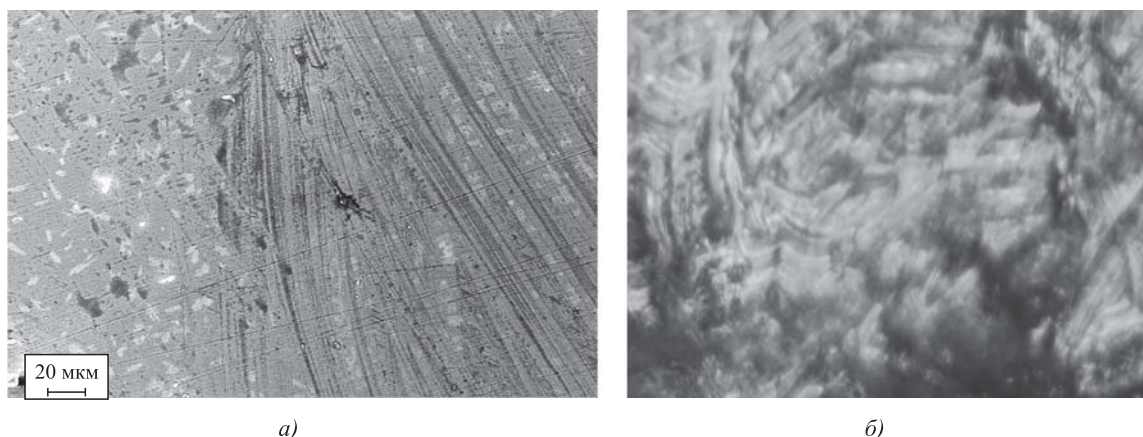


Рис. 1. Исходная поверхность стали Ст3 (а) и отпечаток площадки контакта окисленной поверхности стали Ст3 (б) после внедрения фарфорового шара ($\times 240$)

металла. В результате достигаются меньшая пористость, высокая коррозионная стойкость и адгезионная прочность покрытия [6]. Рассмотренные химические процессы, имеющие место при формировании ВиХМЦП, сопровождаются упруго-пластическим деформированием поверхностных слоев металла в условиях многократного динамического контакта частиц рабочей среды с деталью.

На рис. 1 показаны исходная поверхность стали Ст3 и отпечаток, полученный при внедрении фарфорового шара диаметром 10 мм в поверхностный слой покрытия при относительной скорости деформации, равной $43\,750\text{ с}^{-1}$ [7]. Анализ поверхности образца показал, что в области контактов шаров с поверхностью наблюдается большое число кристаллов цинкового покрытия, слившихся между собой. По их границам отмечаются отдельные зерна цинкового порошка. Образовавшиеся кристаллы цинкового покрытия на поверхности металла расположены хаотично.

Имеющие место поры и дислокации являются результатом виброволнового воздействия системы. На исследуемой поверхности видны мелкие углуб-

ления и продольные равномерные риски разнообразных формы и размеров, что является следствием прямых и косых ударов. Способ получения цинковых покрытий — это основной фактор, определяющий их структуру и свойства. На рис. 2 приведены микроструктуры цинковых покрытий, полученных гальваническим способом и с использованием ВТС. Гальваническое цинковое покрытие характеризуется наличием резкой границы между стальным основанием и слоем цинка (рис. 2, а), т. е. при данном способе цинкования основной металл и покрытие между собой образуют соединение на молекулярном уровне, так как процесс идет при низкой температуре, не достаточной для интенсивной диффузии. Представленное для сравнения электроосажденное покрытие (рис. 2, а) отличается пористостью, резкой границей металл—подложка, наличием наводороженного слоя, что ухудшает его эксплуатационные свойства по сравнению с ВиХМЦП [8, 9].

Вибрационное химико-механическое покрытие, как видно на рис. 2, имеет беспористую структуру и резкую границу между металлом и покрытием, что объясняет его повышенные коррозионные свойства и является отличительной чертой ВиХМП и несомненным преимуществом по сравнению с гальваническими покрытиями [10].

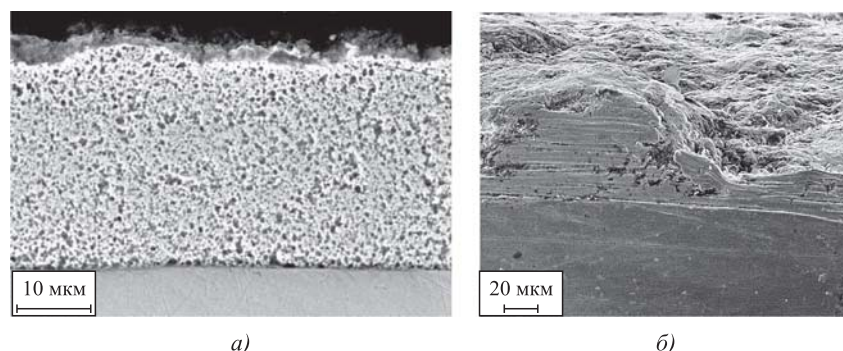


Рис. 2. Шлиф цинкового покрытия: а — гальваническое цинковое покрытие при электрохимическом воздействии; б — ВиХМЦП

Выводы

1. Цинковое покрытие, полученное с использованием виброволновых технологических систем, обладает рядом преимуществ, таких как отсутствие наводороженного слоя,

малая пористость, высокая коррозионная прочность.

2. Технология нанесения покрытий не требует специальных оборудования и помещений, высококвалифицированных специалистов, специального оборудования для очистки и утилизации отходов.

3. Применение рассмотренного способа нанесения цинковых покрытий целесообразно для деталей без глубоких отверстий в машиностроении, на крупных автотранспортных и авторемонтных предприятиях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2008. 694 с.
2. **Исследование** микро/нанопрофиля цинкового покрытия при вибрационной механохимической обработке углеводистых сталей / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, В.Э. Булакова, О.С. Филипчук // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 7. С. 46—49.
3. **Вибрационная** механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин / А.П. Бабичев, В.В. Иванов, С.Н. Шудалей // Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2012.

4. **Ivanov V.V., Lebedev V.A., Pinahin I.A.** Improving Wear Resistance of Surface by Depositing Vibrational Mechanochemical MoS₂ Coating // Journal of Friction and Wear. 2014. Vol. 35. No. 4. P. 339—342. DOI: 10.3103/S1068366614040059.

5. **Иванов В.В.** Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий (цинкование). Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2010.

6. **Lebedev V.A., Ivanov V.V., Fedorov V.P.** Morphological analysis of galvanized coating applied under vibrowave process system conditions // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. DOI: 10.1088/1757-899X/124/1/012160.

7. **Смоленцев В.П., Грицюк В.Г., Юхневич С.С.** Технология изготовления высокоресурсных биметаллических деталей // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты / под. ред. А.В. Киричека. В 5 т. М.: Спектр, 2014.

8. **Орлова Т.Н., Кулик О.Г., Шумячер В.М.** Основы коррозионных процессов и защитные покрытия металлов. Волгоград, ВГАСУ, 2016. 116 с.

9. **Dontsov N.S., Kirichek A.V.** Mechanical Zinc Coating Procedure under Conditions of Vibration Mechanical-Chemical Impact // Key Engineering Materials, 2017. Vol. 736. P. 105—109. DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.105.

10. **Popov S.I., Kirichek A.V.** Qualitative Characteristics of MoS₂ Solid-Lubricant Coating Formed by Vibro-Wave Impact of Free-Moving Indenters // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 736. P. 18—22. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.18.

УДК 621.787.6

В.А. Лебедев, В.Д. Соколов, И.В. Давыдова

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону),

Г.В. Санамян

(Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: va.lebidev@yandex.ru

Прогнозирование физико-механических характеристик качества поверхностного слоя, модифицированного ППД

Представлены расчетные зависимости, позволяющие с позиций энергетического подхода оценить физико-механические характеристики качества поверхностного слоя, модифицированного в процессе упрочняющей обработки динамическими методами пластического поверхностного деформирования (ППД). Показано, что энергетические параметры упрочненного ППД поверхностного слоя можно довольно просто определить по известным значениям твердости материала в исходном состоянии.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, упрочнение, энергия, качество поверхностного слоя, твердость.

Presented calculation dependences that allow one to evaluate the physico-mechanical characteristics of the quality of the surface layer modified in the process of hardening by dynamic methods of surface plastic deformation (SPD) from the standpoint of the energy approach. It is shown that the energy parameters of a hardened SAP surface layer can be fairly easily determined from the known values of the hardness of the material in the initial state.

Keywords: surface plastic deformation, hardening, energy, surface layer quality, hardness.

Постановка задачи

Результаты энергетического подхода к рассмотрению процесса пластического поверхностного

деформирования (ППД), изложенные в работах [1—3], позволяют предложить качественно новые методы прогнозирования технологических закономерностей протекания процесса ППД, физи-

ко-механических характеристик поверхностного слоя, формируемого в процессе ППД, а также влияния методов ППД на повышение эксплуатационных свойств поверхности деталей машин.

Рассмотрим технологическую задачу, связанную с оценкой физико-механических характеристик качества поверхностного слоя

Расчет микротвердости

Основным параметром для оценки качества поверхностного слоя материалов после упрочняющих обработок, оказывающим наиболее существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхности деталей машин, является его твердость. Однако, как следует из многочисленных исследований, для каждого материала существует оптимальная твердость наклепанного материала, после достижения которой дальнейшее упрочнение является нецелесообразным. Из этого следует, что для предотвращения образования трещин и обеспечения повышенной работоспособности упрочненных поверхностей изделий требуется применение комплексного подхода к оценке новых структурных состояний. В частности, требуется оценка локальной предельной деформации упрочненных слоев, связанной с релаксационной способностью, дефектностью, кинетикой распада разных метастабильных структур во времени и т. д.

Под предельной твердостью поверхностного слоя понимается максимально возможная твердость, достигаемая в процессе его упрочнения, при которой плотность накопленной в локальных объемах поверхностного слоя обрабатываемого материала скрытой энергии достигает предельной величины, а создаваемая при этом степень перенапряжения межатомных связей не приводит к их разрушению.

Знание предельной твердости поверхностных слоев, сформированных в процессе упрочняющей обработки, позволяет на стадии конструкторско-технологической подготовки производства прогнозировать эффективность ее влияния на эксплуатационные свойства деталей машин. Применение для обоснования предельной твердости способа индентирования, например по Виккерсу, связано с проведением серии экспериментальных исследований, связанных с подготовкой образцов из материала детали, их обработкой и последующим определением микротвердости на специальном приборе, анализом полученных в процессе исследований кривых индентирования. Проведение этих исследований требует наличия соответствующего оборудования, специалистов, времени и средств, что затрудняет применение данной методики в условиях реального производства.

Накопленный к настоящему времени теоретический и экспериментальный материал по исследованию влияния методов упрочняющей обработки на изменение физико-механических характеристик поверхностного слоя различных материалов позволяет предложить расчетно-аналитический подход к оценке предельной твердости упрочненных поверхностных слоев и таким образом устранить этот недостаток.

Сущность этого подхода заключается в следующем. Современные достижения физики, многочисленные теоретические и экспериментальные исследования механических методов упрочняющей обработки потоками свободнотелесущих инденторов позволяют дать структурно-энергетическую интерпретацию процессу упрочнения, положив в его основу термодинамическую теорию прочности и разрушения твердых тел, из которой следует, что ответственной за упрочнение поверхностного слоя является потенциальная (скрытая) энергия, накапливаемая в нем в процессе обработки.

О связи между твердостью, напряжениями и деформациями говорит тот факт, что при измерении твердости вдавливанием выявляется не особое механическое свойство материала, а сопротивление поверхностного слоя пластической деформации, упрочненного ППД или при других видах деформирования. К настоящему времени получены экспериментальные данные о связи между твердостью и напряжениями течения в условиях простейших напряженных состояний — растяжения, сжатия, кручения [4—6], что позволяет установить корреляционную связь и предложить метод оценки структурных параметров упрочненного ППД поверхностного слоя по твердости и наоборот.

В соответствии с энергетическими представлениями процесса ППД и термодинамической теорией прочности и разрушения твердых тел [7] основными параметрами, характеризующими структурное состояние материала, его наследственные свойства — предысторию нагружения, являются начальная плотность скрытой энергии E_0 материала в исходном (до деформирования) состоянии и степень перенапряжения на межатомных связях, оцениваемая коэффициентом k_c . Знание этих структурных параметров необходимо для расчетно-аналитической оценки (прогнозирования) физико-механических характеристик поверхностного слоя, упрочненного методами ППД.

Для оценки по твердости исходной плотности скрытой энергии E_0 необходимо установить зависимость интенсивности напряжения σ_i от твердости. Статистическая обработка экспериментальных данных, проведенная в работах [4—6], позво-

ляет представить обобщенную зависимость между твердостью и интенсивностью напряжения в виде

$$\sigma_i = 0,067 \text{ HV}^{1,2}, \quad (1)$$

где HV — твердость материала по Виккерсу.

О высокой степени универсальности формулы (1) свидетельствует высокий коэффициент корреляции: $r = 0,956$ [7].

Установленный характер зависимости интенсивности напряжений от твердости HV представляет интерес с позиций возможности прогнозирования повреждаемости поверхностного слоя при ППД, а также для определения предельного значения твердости упрочненного слоя HV^* , при которой достигается наибольший эффект упрочнения с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей.

В соответствии с теорией дислокаций [8] между плотностью скрытой энергии E и интенсивностью напряжений σ_i существует взаимосвязь:

$$\sigma_i^2 = \frac{6GE}{k_\sigma^2}, \quad (2)$$

где G — модуль сдвига.

Учитывая, что интенсивность напряжений σ_i связана с твердостью HV выражением (1), а k_σ с достаточной степенью точности определяется по формуле [7]

$$k_\sigma = \frac{1}{1,2 \cdot 10^{-3} + 6,47 \cdot 10^{-6} \text{HV}},$$

выражение (2) можно представить в виде

$$E = K_{\text{пр}} \text{HV}_{\text{пс}}^{2,4}, \quad (3)$$

где $K_{\text{пр}}$ — коэффициент, характеризующий прочностные свойства упрочняемого материала, $K_{\text{пр}} = \frac{1}{6G} \left(\frac{1}{1,2 \cdot 10^{-3} + 3,87 \cdot 10^{-6} \text{HV}} \right)^2$; $\text{HV}_{\text{пс}}$ — твердость поверхностного слоя, формируемого в процессе обработки.

С помощью выражения (3) может быть определена начальная плотность скрытой энергии E_0 , если подставить значение твердости ПС в исходном до деформирования состоянии:

$$E_0 = \frac{1}{6G} \left(\frac{0,067 \text{HV}_{\text{пс}}^{1,2}}{1,2 \cdot 10^{-3} + 3,87 \cdot 10^{-6} \text{HV}} \right)^2. \quad (4)$$

Согласно структурно-энергетический интерпретации процесса ППД [2] наибольший эффект упрочняющей обработки обеспечивается, когда плотность накопленной в поверхностном слое обрабатываемого материала скрытой энергии E достигает предельной величины E^* . Тогда по уравне-

нию (3) предельно допустимое значение твердости упрочненного слоя с точки зрения его влияния на эксплуатационные свойства деталей будет определяться выражением

$$\text{HV}_{\text{пс}}^* = (E^*/K_{\text{пр}})^{0,42}. \quad (5)$$

В работе [9] установлено, что критическое значение плотности скрытой энергии E^* хорошо коррелирует с известной термодинамической характеристикой металлов

$$\Delta H = H_{\text{ТС}} - H_{293},$$

определяемой как разность энтальпии данного материала в твердом состоянии при температуре плавления и энтальпии при температуре 293 К. Поэтому выражение для оценки предельно допустимой твердости упрочненного в процессе ППД поверхностного слоя можно представить в виде

$$\text{HV}_{\text{пс}}^* = 3,87[\Delta H/K_{\text{пр}}]^{0,42}. \quad (6)$$

Расчет глубины упрочненного слоя

Для обоснования корреляционной связи между твердостью по Виккерсу и глубиной упрочненного слоя $h_{\text{н}}$ были проанализированы результаты экспериментальных исследований [10], устанавливающих взаимосвязь глубины упрочненного слоя с изменениями микротвердости поверхности образцов из различных сталей и материалов, сформированной в процессе ППД свободнотелесными инденторами. Статистическая обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов позволила установить связь между микротвердостью и глубиной упрочненного слоя при обработке деталей динамическими методами ППД со скоростями соударения обрабатываемой среды с обрабатываемой поверхностью от 1 до 100 м/с в виде аппроксимирующего уравнения

$$h_{\text{н}} = \gamma H_{\mu}^c, \quad (7)$$

где H_{μ} — относительный прирост микротвердости при определенном числе циклов силового взаимодействия индентора с обрабатываемой поверхностью, $H_{\mu} = \frac{\text{HV}_{\text{пс}} - \text{HV}}{\text{HV}}$, а также определить параметры γ и c , входящие в уравнение (7): $\gamma = 0,45$ мм; $c = 0,25$. При этом коэффициент корреляции близок к единице (0,957), что свидетельствует о тесной параболической корреляционной связи между $h_{\text{н}}$ и HV, т. е.

$$h_{\text{н}} = 0,45 \left(\frac{\text{HV}_{\text{пс}} - \text{HV}}{\text{HV}} \right)^{0,25}. \quad (8)$$

С учетом (6) выражение для оценки максимально достигаемой в процессе ППД свободно-движущимися инденторами глубины упрочненного слоя будет иметь вид

$$h_n^* = 0,45 \left(\frac{3,87[\Delta H / K_{пр}]^{0,42} - HV}{HV} \right)^{0,25}. \quad (9)$$

Расчет величины остаточных напряжений

Аналитическое описание связи сжимающих остаточных напряжений σ_o с физико-механическими характеристиками упрочненного поверхностного слоя, формируемого в процессе ППД динамическими методами, а также с геометрическими параметрами обрабатываемой детали наиболее объективно представлено следующей зависимостью, предложенной в работе [11] и получившей хорошее экспериментальное подтверждение:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{дт}}{h_n} \left[2\bar{h} - h_n - (S - h_n) \ln \frac{S}{S - h_n} \right], \quad (10)$$

где \bar{h} — глубина залегания локального микрообъема от поверхности; S — расстояние от упрочняемого поверхностного слоя до центра масс детали; $\sigma_{дт}$ — динамический предел текучести материала.

Соотношение (10) получено исходя из предположения, что пластическая деформация материала в процессе ППД свободно-движущимися инденторами носит в каждый момент времени локальный характер и протекает в условиях циклического нагружения. Однако при достаточной длительности процесса обработки характер деформированного состояния поверхностного слоя оказывается таким же, как и при квазистатическом монотонном нагружении.

Обобщенная зависимость (1) между твердостью и интенсивностью напряжений позволяет прогнозировать как значение физического предела текучести материала по исходному значению твердости, так и значение динамического предела текучести упрочненного в процессе ППД поверхностного слоя:

$$\sigma_{дт} = 0,067 HV_{пс}^{1,2}. \quad (11)$$

В условиях предельно допустимого с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей упрочнения методами ППД значение максимального динамического предела текучести, используя зависимость (6), можно прогнозировать с помощью следующего выражения:

$$\sigma_{дт}^* = 0,067 [3,87(\Delta H / K_{пр})^{0,42}]^{1,2}. \quad (12)$$

Из зависимости (10) следует, что величина остаточных напряжений возрастает с увеличе-

нием напряженного состояния упрочненного поверхностного слоя $\sigma_{дт}$ и имеет максимум у поверхности упрочненного слоя детали ($\bar{h} \rightarrow 0$), что согласуется с результатами многочисленных экспериментальных исследований, проведенных в этом направлении. Таким образом, для локальных микрообъемов поверхностного слоя, расположенных на глубине $\bar{h} \approx 0$, остаточную величину их напряженного состояния можно оценить как

$$\sigma_o^* \approx -\sigma_{дт}^*,$$

а с учетом (12)

$$\sigma_o^* \approx -0,067 [3,87 \Delta H / K_{пр}]^{0,5}. \quad (13)$$

Проверка адекватности предложенных расчетных зависимостей

Проверку приемлемости предложенных выше расчетных зависимостей для прогнозирования физико-механических характеристик качества поверхностного слоя, модифицированного в результате ППД, осуществляли путем сравнительного анализа экспериментальных данных, представленных в научно-технической литературе, посвященной исследованию технологических возможностей динамических методов ППД, и расчетов данных, выполненных для условий, соответствующих выбранным для анализа экспериментальным исследованиям.

На рис. 1 приведены результаты экспериментальных исследований влияния виброударной обработки на изменение микротвердости по глубине упрочненного слоя образцов из стали

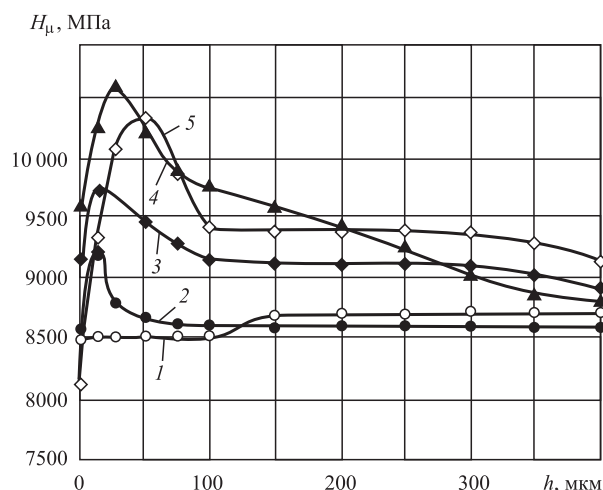


Рис. 1. Изменение микротвердости по глубине упрочненного слоя h ($A = 2,5$ мм; $f = 33$ Гц; $D_n = 6$ мм):

1 — исходная; 2 — после виброударной обработки в течение времени $t = 60$ мин; 3 — $t = 90$ мин; 4 — $t = 120$ мин; 5 — $t = 180$ мин; A — амплитуда колебаний; f — частота колебаний; D_n — диаметр индентора

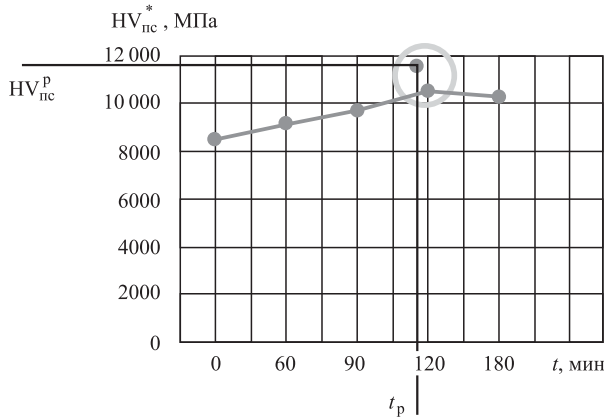


Рис. 2. Изменение максимальной микротвердости в зависимости от продолжительности виброударной обработки

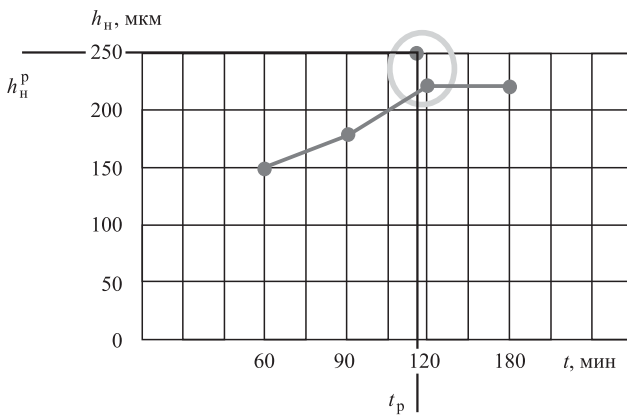


Рис. 3. Изменение максимальной глубины упрочнения в зависимости от продолжительности виброударной обработки

16ХЗНВМФБ (8500 HV) [10]. На их основании были построены графики изменения максимальной микротвердости (рис. 2) и максимальной глубины упрочнения (рис. 3) в зависимости от продолжительности обработки t .

Результаты сравнительного анализа экспериментальных и расчетных данных по оценке эффективной продолжительности виброударной обработки и достигаемых при этом предельной микротвердости и глубины упрочнения для образцов из стали 16ХЗНВМФБ

Время обработки, мин:	
эксперимент t_3	110...130
расчет t_p	118
Микротвердость, МПа:	
эксперимент HV_{nc}^3	10 600
расчет HV_{nc}^p	11 525
Погрешность оценки микротвердости δ , % ...	8,7
Глубина упрочненного слоя, мкм:	
эксперимент h_n^3	0,22
расчет h_n^p	0,25
Погрешность оценки глубины упрочненного слоя δ , %	12

Расчетные значения продолжительности обработки и достигаемой при этом микротвердости и глубины упрочнения показаны на рис. 2, 3.

Выводы

Проведенные исследования показали, что параметры упрочненного ППД поверхностного слоя E_0 , E^* , k_σ можно довольно просто определить по известным значениям твердости материала HV в исходном состоянии, используя формулы (3)...(5).

Установление корреляционных связей между плотностью скрытой энергии E , накапливаемой в упрочненном поверхностном слое, и твердостью HV, твердостью и физико-механическими характеристиками упрочняемого поверхностного слоя дает возможность с позиций энергетического подхода прогнозировать физико-механические качества поверхности и, как следствие, эксплуатационные свойства деталей, подвергаемых в процессе изготовления упрочняющей обработке динамическими методами ППД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2006. 183 с.
2. Лебедев В.А. Энергетические аспекты упрочнения деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2007. 156 с.
3. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.
4. Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: Машиностроение, 1955. 444 с.
5. Дель Г.А. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. М.: Машиностроение, 1971. 199 с.
6. Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1976. 189 с.
7. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во ФАН, 1979. 168 с.
8. Катрелл А.Х. Дислокация и пластические течения в кристаллах. М.: Металлургия, 1958. 242 с.
9. Лебедев В.А., Подольский М.А. Оценка эффективности упрочнения деталей методами ППД на основе термодинамических представлений процесса // Вестник машиностроения. 2004. № 6.
10. Бабичев А.П. Основы вибрационной обработки. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 1999. 620 с.
11. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

Формирование установившейся шероховатости в процессе гидроабразивной обработки

Представлены результаты исследования процесса гидроабразивной обработки. Предложена геометрическая схема формирования профиля установившейся шероховатости. Определены параметры установившейся шероховатости.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, шероховатость поверхности, единичное взаимодействие, влияние зернистости.

The results of studying the process of hydroabrasive processing are presented. A geometrical scheme for the formation of a profile of steady roughness is proposed. The parameters of the steady roughness are determined.

Keywords: hydroabrasive processing, surface roughness, single interaction, influence of graininess.

В современном машиностроении перспективным является метод гидроабразивной обработки поверхностей деталей машин.

В процессе гидроабразивной обработки происходит перекрытие царапин, оставленных абразивными частицами, в результате чего ширина зоны контакта каждой частицы с обрабатываемой поверхностью неодинакова, а края царапин расположены на различном уровне (рис. 1). Схема образования профиля установившейся шероховатости при обработке свободными абразивами с учетом неполных срезов металла, совершаемых абразивными частицами, аналогичная схемам образования шлифовальной поверхности, предложена А.В. Королевым [1].

Глубина внедрения соседних частиц также неодинакова. Это обуславливает сложность описания функции распределения глубин внедрения частиц в обрабатываемую поверхность. В работе [1] установлено, что небольшая доля от частиц, участвующих во взаимодействии, будет оставлять следы глубиной, близкой к h_{\max} . Аппроксимируем их функцию распределения степенной зависимостью:

$$z_i = 0,5z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k \quad \text{при } 0 \leq h_i \leq H_0, \quad (1)$$

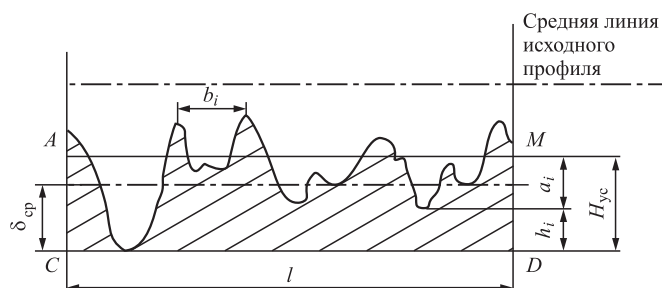


Рис. 1. Схема образования профиля шероховатости поверхности при обработке свободными абразивами

где z_i — число лунок на уровне l_i от отпечатка наибольшей глубины h_{\max} ; z_0 — номинальное число взаимодействующих частиц над квадратом упаковки рабочей среды; H_0 — разность глубин следов; k — показатель распределения глубины отпечатков.

Величина H_0 соответствует глубине залегания половины из всех царапин, измеренной от дна наиболее глубокой царапины.

Для описания процесса образования профиля шероховатости поверхности при гидроабразивной обработке в качестве критерия предлагается параметр H_{yc} — условная высота неровностей обрабатываемой поверхности и рассматривается методика определения стандартных параметров шероховатости поверхности при его использовании.

Пусть в процессе обработки через нормальное сечение профиля шероховатости поверхности детали прошло некоторое число абразивных частиц. Каждая i -я частица оставляет царапину глубиной a_i и шириной b_i . Царапины частично перекрывают царапины от предыдущих частиц, в результате частицы осуществляют неполные срезы. При этом происходит постепенное смещение профиля, в процессе которого удаляются выступы исходной шероховатости. При формировании профиля установившейся шероховатости (см. рис. 1) его впадины представляют собой дно наиболее глубоких царапин, а выступы образуются пересечением боковых сторон царапин от отдельных частиц.

Под условной высотой микронеровностей обработанной поверхности будем понимать расстояние от средней линии AM , проведенной между вершинами неровностей в нормальном сечении детали, до уровня самых глубоких впадин CD , имеющих на этой поверхности.

Учитывая, что края царапин от частиц примерно равномерно смещаются вверх и вниз от линии AM , за глубину внедрения частиц в приведенном

на рис. 1 поперечном сечении будем принимать глубину, отсчитанную от этой линии.

В работе [1] установлено, что отношение ширины b_i абразивных царапин к их глубине a_i слабо зависит от размеров частиц:

$$b_i \approx 3,8a_i.$$

Учитывая экспоненциальный характер изменения высотных параметров шероховатости поверхности детали при обработке свободными абразивами, можно разработать математическую модель изменения значений этих параметров (Ra) в зависимости от времени обработки t . Для получения такой модели необходимо прежде всего разработать методику расчета установившейся шероховатости для конкретных значений исходных данных (технологических факторов), что позволит определить асимптоту экспоненциальной функции $Ra = f(t)$.

Нормальное сечение шероховатости поверхности детали после обработки свободным абразивом представляет собой совокупность абразивных царапин, оставляемых частицами.

Царапины частично налагаются друг на друга и поэтому имеют неровные края (см. рис. 1), однако если бы частицы делали только полные срезы, то на некотором уровне нормального сечения детали сумма ширины всех полных срезов была бы равна ширине обрабатываемого участка:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = L_{ед}, \quad (2)$$

где $z_{сеч}$ — число частиц, оставивших свой след в данном нормальном сечении детали, а вершины всех неровностей в сечении $AMDC$ располагались бы на одной линии; $L_{ед}$ — единичная длина (1 мм).

В действительности за счет перекрытия царапин по ширине вершины неровностей смещаются вверх и вниз от линии AM , а так как они смещаются от этой линии вверх и вниз примерно равномерно, то эту линию можно рассматривать как среднюю между вершинами всех неровностей.

Таким образом, средняя линия между вершинами всех неровностей в данном нормальном сечении детали находится на том уровне, где сумма ширины всех частиц, прошедших через данное сечение детали, равна ширине обрабатываемого участка. Дальнейшие расчеты будем проводить на единичной длине нормального сечения детали, так как величины $z_{сеч}$ и $L_{ед}$ связаны между собой.

Исследования, проведенные многими авторами [1, 2], позволили установить, что при различных процессах абразивной обработки профиль царапин имеет специфическую форму, не зависящую от радиуса скругления вершин частицы. Это явление можно объяснить общей природой хрупкого разрушения различных абразивных материалов и спецификой процессов абразивного резания. В работе [1] установлено, что форму абразивной

царапины, оставленной одной частицей, можно аппроксимировать функцией вида

$$b_i = na_i^m, \quad (3)$$

где b_i , a_i — ширина и глубина царапины соответственно.

При этом показатель аппроксимирующей функции m не зависит от глубины внедрения частиц в обрабатываемую поверхность и равен в среднем 0,54. Коэффициент n с уменьшением глубины врезания снижается. Одновременное уменьшение a_i и n приводит к сильному изменению величины h_i , при этом увеличение отношения глубины царапины к радиусу скругления частицы a_i/r_3 с 0,01 до 0,123 (т. е. в 12 раз) практически не изменяет значения отношения b_i/a_i , так что

$$b_i \approx 3,8a_i. \quad (4)$$

То есть отношение ширины абразивных царапин к глубине слабо зависит от размеров частиц.

Учитывая соотношение (4), для уровня $H_{уc}$ можно записать соотношение

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = \sum_{i=1}^{z_{сеч}} 3,8a_i = 3,8 \sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = L_{ед}. \quad (5)$$

Для нахождения глубины царапины a_i в рассматриваемом нормальном сечении детали обратимся к форме единичного следа при обработке свободными абразивами (рис. 2).

За расчетную глубину внедрения a_i частицы можно взять произведение максимально возможной глубины h_{max} — h_i на вероятность $P_{вн}$ внедрения частицы с этой глубиной. Исходя из геометрической вероятности случайного события искомая вероятность равна отношению площади, ограниченной продольной траекторией данной частицы при ее внедрении, к площади, ограниченной продольной траекторией движения частицы с максимальной глубиной внедрения:

$$P_{вн} = \frac{L_{сл}(h_{max} - h_i)}{L_{сл}h_{max}} = \frac{h_{max} - h_i}{h_{max}};$$

$$a_i = \frac{(h_{max} - h_i)^2}{h_{max}} = h_{max} \left(1 - \frac{h_i}{h_{max}} \right). \quad (6)$$

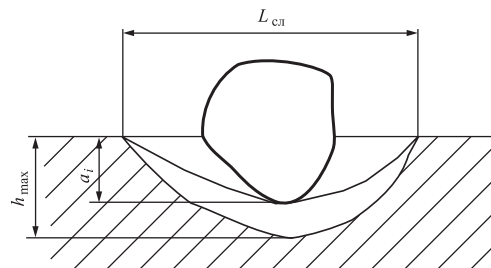


Рис. 2. Схема продольного сечения единичного следа абразивной частицы

Тогда сумма глубин всех царапин, оставленных частицами в нормальном сечении $AMDC$,

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = h_{\max} \sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2, \quad (7)$$

где $z_{сеч}$ — общее число всех частиц, контакт которых возможен с данным нормальным сечением детали.

При достаточно большом значении $z_{сеч}$ (при прохождении нескольких частиц через данное нормальное сечение детали) от суммирования можно перейти к интегрированию. Для этого выразим величину h_i через соответствующее число частиц z_i , контакт которых возможен с сечением $AMDC$ на глубине h_i . При этом воспользуемся зависимостью (1). После преобразований получим

$$h_i = H_0 \left(2 \frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = \int_0^1 \left(1 - \frac{H_0}{h_{\max}} \left(2 \frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}}\right)^2 dz_i. \quad (9)$$

Проведем замену

$$\frac{H_0}{h_{\max}} \left(2 \frac{z_i}{z_0}\right)^{\frac{1}{k}} = \psi, \quad (10)$$

где z_0 — число частиц, проходящих через единичную длину в единицу времени.

После соответствующих преобразований получим

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = kz_{сеч} \int_0^1 (1 - \psi) \psi^{k-1} d\psi.$$

Интеграл представляет собой бета-функцию. Выразим ее через гамма-функцию:

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} \left(1 - \frac{h_i}{h_{\max}}\right)^2 = kz_{сеч} \frac{\Gamma(3)\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)} = 2kz_{сеч} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)}.$$

Подставив это выражение в (7), получим

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} a_i = 2kz_{сеч} h_{\max} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)}. \quad (11)$$

С учетом ранее полученных зависимостей

$$\sum_{i=1}^{z_{сеч}} b_i = 7,6kz_{сеч} h_{\max} \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)} = L_{ед}. \quad (12)$$

При этом на уровне AM (см. рис. 1) $z_{сеч}$ определяется следующим образом:

$$z_{сеч} = 0,5z_0 \left(\frac{H_{yc}}{H_0}\right)^k.$$

Подставив это выражение в (11), получим

$$3,8kz_0 \left(\frac{H_{yc}}{H_0}\right)^k \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+3)} = L_{ед}.$$

Учитывая, что значения показателя степени k для всех видов абразивной обработки лежат в пределах $1 \leq k \leq 3$ [1], сделаем допущение, что при гидроабразивной обработке можно принять $k = 2$. При этом

$$7,6z_0 \left(\frac{H_{yc}}{H_0}\right)^2 \frac{\Gamma(2)}{\Gamma(5)} h_{\max} = L_{ед}.$$

После соответствующих преобразований получим зависимость

$$H_{yc} = H_0 \sqrt[3]{\frac{L_{ед}}{0,32h_{\max}z_0}}. \quad (13)$$

Зная величину H_{yc} , можно определить относительную опорную длину профиля. Установлено [1, 2], что для различных видов абразивной обработки опорная кривая профиля обработанной поверхности хорошо описывается уравнением

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{yc}}\right)^{f_0}}, \quad (14)$$

где δ_i — уровень сечения профиля от линии впадин; $\sum L_i$ — сумма длин отрезков, отсекаемых на уровне δ_i в материале профиля линией, эквидистантной средней линии, в пределах базовой длины; $f_0 = k + m + 0,5$ при $t_{рез} > H_{yc}$, $f_0 = k + m + 1,5$ при $t_{рез} < H_{yc}$, $t_{рез}$ — глубина резания (царапин).

При обработке свободными абразивами, когда $t_{рез} = h_{\max} > H_{yc}$, для профиля установившейся шероховатости уравнение опорной кривой будет иметь вид

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{yc}}\right)^{k+m+0,5}}. \quad (15)$$

Учитывая принятое допущение, что $k = 2$, и приняв для гидроабразивной обработки в среднем $m = 0,54$, можно записать

$$\frac{\sum L_i}{L} = e^{-\left(\frac{\delta_i}{H_{yc}}\right)^3}. \quad (16)$$

Теперь можно перейти к определению среднего арифметического отклонения профиля Ra при гидроабразивной обработке. Установлено [1, 2], что параметры Ra и H_{yc} характеризуют вид опорной кривой шероховатости поверхности. Действительно, в формулу (14) входят величины H_{yc} и f_0 , которая определяется отношением H_{yc}/Ra .

Известны данные [3] о получении адекватных теоретических зависимостей для описания кривых опорных поверхностей после шлифования, точения, суперфиниширования, хонингования

при помощи формулы (14), а также зависимость значений отношения H_{yc}/Ra от f_0 (табл. 1). Распространив эту зависимость на процесс гидроабразивной обработки при $f_0 = 3$, можно принять $H_{yc}/Ra = 6,4$. Используя соотношение (7), после преобразований получим зависимость для опре-

Таблица 1

Значения отношения H_{yc}/Ra в зависимости от f_0

f_0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
H_{yc}/Ra	3,25	4,26	5,36	6,36	7,32	8,12	9,0	10,1	10,9

Таблица 2

Значения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$, мкм, при гидроабразивной обработке в зависимости от давления струи $P_{дин}$ ($L = 60$ мм, $\alpha = 90^\circ$)

$P_{дин}$, МПа	Медь М06 ($\sigma_T = 70$ МПа)	Сталь 45 ($\sigma_T = 350$ МПа)
0,1	4,19	2,75
0,2	4,98	3,28
0,3	5,51	3,62
0,4	5,92	3,89

Значения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$, мкм, при гидроабразивной обработке в зависимости от расстояния до обрабатываемой поверхности L ($P_{дин} = 0,4$ МПа, $\alpha = 90^\circ$)

L , мм	Сталь 12X18H10T ($\sigma_T = 230$ МПа)	Алюминий Д16 ($\sigma_T = 90$ МПа)
30	3,99	4,91
60	4,13	5,02
90	4,01	4,79
120	3,77	4,61

Таблица 3

Значения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости $Ra_{уст}$, мкм, при гидроабразивной обработке в зависимости от угла обработки α ($P_{дин} = 0,4$ МПа, $L = 60$ мм)

α°	Латунь Лс59 ($\sigma_T = 133$ МПа)	Сталь 45 ($\sigma_T = 350$ МПа)
20	3,23	2,37
45	4,64	3,40
65	5,25	3,85

Таблица 4

деления среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости

$$Ra = \frac{H_0}{3,6} \sqrt{\frac{L_{ед}}{h_{max} z_0}} \quad (17)$$

Для проведения расчетов по формулам (13) и (17) необходимо определить разновысотность активных частиц H_0 . При гидроабразивной обработке значение H_0 не может быть определено экспериментально. Однако величина H_0 зависит от зернистости абразивных частиц, режимов обработки и механических свойств материала обрабатываемой детали, т. е. от тех же параметров, что и h_{max} . При этом согласно определению ее значение должно быть меньше h_{max} . Для проведения теоретических расчетов, учитывая данные, приведенные в работе [4], сделаем допущение, что при гидроабразивной обработке

$$H_0 = \frac{h_{max}}{3} \quad (18)$$

Тогда формулы для расчета условной высоты и среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости будут выглядеть следующим образом:

$$H_{yc} = 0,58 \sqrt{\frac{h_{max} L_{ед}}{z_0}};$$

$$Ra = 0,09 \sqrt{\frac{h_{max} L_{ед}}{z_0}}.$$

Так как z_0 — это число частиц, проходящих через единичную длину в единицу времени, а λ — число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки, то через сторону квадрата упаковки $2R$ будет проходить $\sqrt{\lambda}$ ча-

стиц, а через единичную длину будет проходить в $L_{ед}/(2R)$ больше частиц:

$$H_{yc} = 0,84 \sqrt{\frac{h_{max} R}{\sqrt{\lambda}}}, \quad (19)$$

$$Ra = 0,13 \sqrt{\frac{h_{max} R}{\sqrt{\lambda}}}. \quad (20)$$

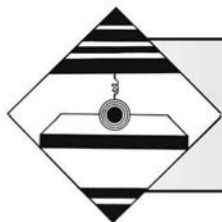
Для анализа влияния размеров обрабатываемой среды, динамического давления пульпы и механических свойств материала детали на величину Ra при гидроабразивной обработке провели расчеты по зависимости (20). Их результаты приведены в табл. 2...4.

Анализ результатов теоретических расчетов, позволяет сделать следующие выводы:

1. Применение обрабатываемой среды (частиц) меньшего размера, а также уменьшение давления струи позволяет получить шероховатость поверхности с меньшим значением Ra .
2. При обработке более мягких материалов образуется более грубая шероховатость.
3. Полученные результаты имеют физический смысл и не противоречат установившимся представлениям о процессе гидроабразивной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Королев А.В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975. 191 с.
2. **Королев А.В., Новоселов Ю.К.** Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1989. 320 с.
3. **Богомолов Н.И.** О работе трения в абразивных процессах // Труды ВНИИАШ, 1965. С. 27—29.
4. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д., 1995. 285 с.



УДК 621.7.075

С.А. Берберов, Н.И. Берберова, А.А. Гаврилов

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: natela-56@mail.ru

Технологические возможности процесса калибрования шлицевых отверстий фасонными дорнами

Рассмотрена конструкция твердосплавного инструмента, предназначенного для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях. Предложенная конструкция инструмента и оптимальная геометрия заборного конуса обеспечивают получение шлицевых отверстий с высокой точностью. В то же время отверстия упрочняются. Этот инструмент позволяет повысить износостойкость поверхности шлицевых отверстий в термообработанных деталях.

Ключевые слова: калибрование, шлицы, отверстие, деталь, точность, деформирование, метод обработки.

The design of hard-alloy tool intended for calibrating spline holes in the heat-treated parts is considered. The proposed design and optimum tool geometry of inlet cone provide reception spline holes with high precision, at the same time opening hardening. This method allows you to increase the wear resistance of the surface of the slotted holes in the heat-treated parts.

Keywords: calibration, splines, hole, detail, precision, straining, processing method.

Введение

Развитие современного машиностроения характеризуется повышением скоростей и мощностей выпускаемых машин, точности и надежности приборов при непрерывно ужесточающихся условиях их эксплуатации: увеличиваются мощности, давления, температуры, скорости рабочих процессов, усложняется сортамент материалов, применяемых в машинах, и т. д. При этом все больше возрастает значение повышения качества и долговечности деталей современных машин.

Одним из многих технологических мероприятий, направленных на повышение долговечности деталей машин, являются исследования и широкое внедрение в производство новых высокопроизводительных отделочных процессов, отличающихся высокими качественными показателями.

На качество и долговечность деталей машин большее влияние оказывает метод обработки поверхностного слоя детали. Существующие методы окончательной чистовой обработки поверхностей деталей машин резанием уже не могут удовлет-

ворить все возрастающим требованиям по долговечности, предъявляемым к деталям. В связи с этим в последнее время все более широкое применение во всех отраслях машиностроения получают методы чистовой обработки поверхностей деталей машин пластическим деформированием, имеющим существенные преимущества перед методами чистовой обработки поверхностей резания. К одному из таких методов и относится калибрование шлицевых отверстий. Этот метод обеспечивает увеличение производительности обработки, высвобождение дорогостоящего режущего инструмента, исключение брака при обработке, повышение эксплуатационных свойств детали, позволяет получить весьма высокие технико-экономические показатели [1–3].

При калибровании шлицевых поверхностей фасонными дорнами происходит уменьшение высоты шероховатости поверхности обработанного отверстия за счет смятия и выглаживания микрогребешков поверхностного слоя металла. Выравнивание микрогребешков поверхности в процессе калибрования в термообработанных де-

талях происходит в основном за счет радиального смятия нормальными силами гребешков микронеровностей и заполнения их впадин, а также поверхностного течения металла, вызванного силами трения, возникающими при перемещении инструмента относительно детали.

Калибрование фасонных отверстий является новым, прогрессивным методом получения шлицевых отверстий высокого качества. Этот процесс наиболее широко внедряется на производстве. Для широкого внедрения процесса калибрования шлицевых отверстий необходима разработка новых, высокопроизводительных конструкций дорнов.

Предлагаемая конструкция дорна

В ДГТУ на кафедре "Технология машиностроения" разработаны новые конструкции твердосплавных сборных шлицевых дорнов, стойкость которых значительно выше, чем у всех созданных ранее. Одна из таких конструкций представлена на рис. 1.

Дорн проталкивается через шлицевое отверстие на прессе с помощью оправки 5. Длина хвостовой оправки должна быть на 5 мм больше высоты детали со шлицевым отверстием. Конструкция дорна позволяет проводить калибрование шлицевых отверстий при помощи рабочих органов в виде твердосплавных пластин 3. Пластины 3 изготовлены из твердых сплавов ВК6, ВК8 по ГОСТу для отрезных резцов. Сепаратор 2 представляет собой вал со шлицами, заниженными по наружному диаметру и боковым поверхностям на 1...2 мм, что позволяет легко входить в обрабатываемое шлицевое отверстие, и служит направляющей для дорна.

Эта конструкция имеет преимущество перед ранее разработанными. Закрепление всех твердо-

сплавных пластин осуществляется при помощи одной детали — сепаратора 2, который закрепляет все пластины при помощи гайки 7 и шайбы 8. Конструкция дорна позволяет отдельно, вне корпуса, оформить боковые рабочие поверхности пластины на универсальном заточном станке. Наружные рабочие поверхности (наружный диаметр, ширина ленточки, заборные и обратные углы) шлифуются либо на круглошлифовальном, либо на универсальном заточном станке.

Таким образом, такая конструкция дорна благодаря твердосплавным пластинам имеет высокую износостойкость и технологична в изготовлении.

Результаты исследований и их анализ

Одними из важнейших элементов, определяющих форму рабочей поверхности дорна, являются углы заборного конуса α и α_6 . Заборной частью осуществляется основная деформация обрабатываемого металла, и от нее в значительной степени зависят усилие дорнования P и качество поверхности. Важно определить значения углов α и α_6 аналитическим методом, вытекающим из предельных условий деформаций металла в зоне заборных конусов. Исследования показали, что правильный выбор геометрических параметров фасонных дорнов имеет большое практическое значение, так как от геометрии дорнов в значительной степени зависят величина тяговых усилий при дорновании и шероховатость обработанной поверхности отверстия. Были найдены оптимальные значения углов рабочих поверхностей дорнов, при которых получаются наименьшие тяговые усилия: угол заборного конуса $\alpha = 5...8^\circ$, угол обратного конуса $\alpha_1 = 5...8^\circ$, угол заборного конуса по боковой по-

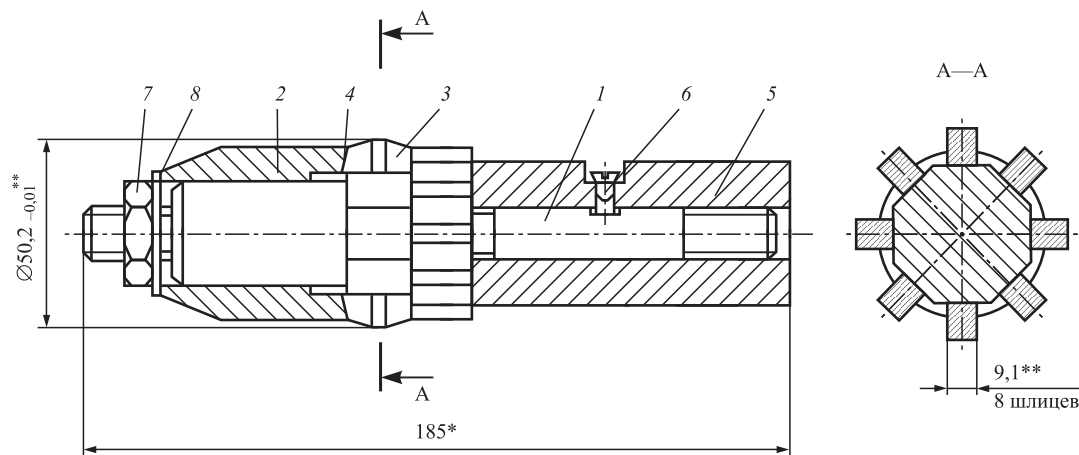


Рис. 1. Прошивка для калибрования шлицевых отверстий:

1 — корпус; 2 — сепаратор; 3 — пластина; 4 — прокладка; 5 — втулка; 6 — винт; 7 — гайка; 8 — шайба

верхности зуба $\alpha_6 = 4...6^\circ$, угол обратного конуса по боковой поверхности зуба $\alpha_{61} = 5...8^\circ$. Также найдены углы рабочих поверхностей дорнов, при которых получается наилучшая шероховатость поверхности шлицевого отверстия: $\alpha = 5...7^\circ$, $\alpha_1 = 4...6^\circ$, $\alpha_6 = 1...5^\circ$, $\alpha_{61} = 4...6^\circ$. Ширину калибрующей ленточки зубьев фасонных дорнов для обработки шлицевых втулок из любых сталей рекомендуется принимать равной 1,5 мм.

При правильном выборе углов заборных конусов шлицевых дорнов тяговое усилие будет минимальным, высота неровностей профиля поверхности обрабатываемого отверстия также будет получаться наименьшей ввиду преимущественно радиального течения металла.

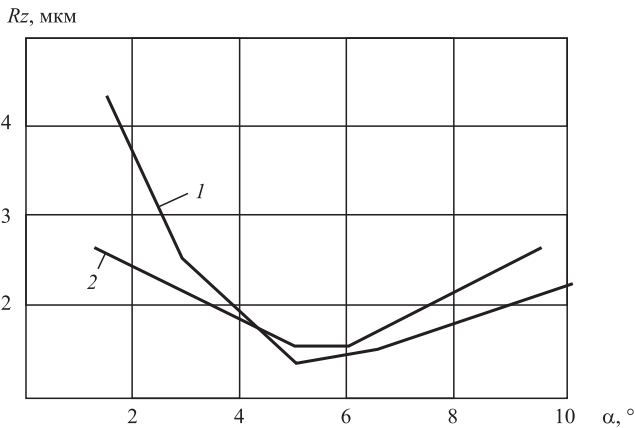


Рис. 2. Зависимость высоты неровностей профиля поверхности Rz от угла заборного конуса α (эксперимент): 1 — сталь 20X, цементованная и закаленная до 58...62 HRC; 2 — сталь 40X, закаленная до 48...52 HRC

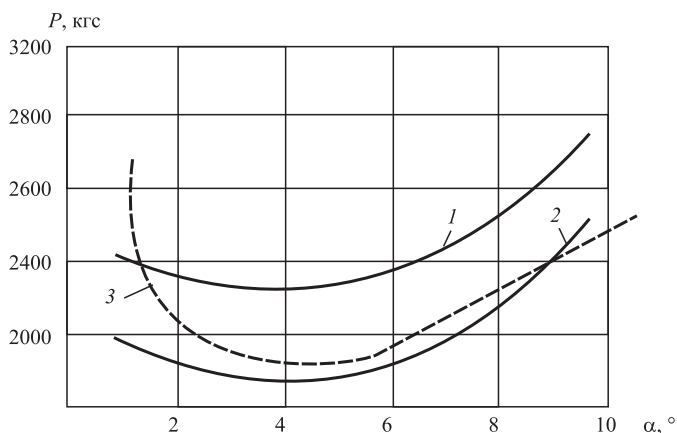


Рис. 3. Зависимость тягового усилия P от угла заборного конуса α : 1 — сталь 20X, цементованная и закаленная до твердости 58...62 HRC, эксперимент; 2, 3 — сталь 40X, закаленная до твердости 48...52 HRC, эксперимент и расчет соответственно

На рис. 2, 3 показаны полученные на испытательной машине УММ-50 графики зависимостей высоты неровностей профиля поверхности Rz и тягового усилия P шлицевых отверстий втулок, обработанных фасонными дорнами, от угла заборного конуса α . Обрабатываемые материалы — стали марок 20X, цементованная и закаленная до твердости 58...62 HRC, и 40X, закаленная до твердости 48...52 HRC.

На шероховатость обработанной калибровкой поверхности шлицевого отверстия термообработанных деталей значительное влияние оказывает натяг калибрования. При его увеличении происходит интенсивное выглаживание микронеровностей поверхностного слоя металла. Однако при достижении некоторой величины натяга, при которой микропрофиль поверхности получает значительное упрочнение, дальнейшее его увеличение не вызывает значительного уменьшения шероховатости металла.

В процессе калибрования шлицевых отверстий фасонными дорнами в обрабатываемой детали появляются упругие и пластические деформации по профилю шлицевого отверстия. Большое практическое значение имеет учет упругих и остаточных деформаций, появляющихся по профилю шлицевого отверстия после прохода фасонного дорна с определенным натягом, так как эти деформации оказывают значительное влияние на точность размеров шлицевых отверстий. Зная величины остаточных деформаций по профилю шлицев, можно правильно подобрать натяги калибрования и обеспечить получение шлицевых отверстий в деталях в пределах необходимой точности.

Величина остаточной деформации поверхности шлицевого отверстия при калибровании зависит от натягов по наружному диаметру i_D и боковой поверхности шлицев i_6 , физико-механических свойств обрабатываемого материала, толщины стенки втулки, схемы деформирования поверхностей отверстия.

Исследования показали, что зависимость остаточных деформаций металла по поверхности наружного диаметра шлицевого отверстия $(\delta_{D1})_{ост}$ от натяга калибрования i_D имеет примерно прямолинейный характер.

Зависимость остаточных деформаций по наружному диаметру шлицевого отверстия от натяга при калибровании свидетельствует о том, что остаточная деформация намного меньше натяга калибрования. Следовательно, упругие деформации в этом случае имеют наибольшее значение в общей суммарной абсолютной деформации (натяге калибрования i_D).

Выводы

Процесс калибрования шлицевых отверстий происходит без снятия стружки и отличается высокой производительностью. Он не нуждается в каких-либо трудоемких наладках оборудования, так как необходимые точность и качество обработки поверхностей достигаются при использовании режимов, заложенных в самой конструкции инструмента. За один-два прохода можно получить весьма точные и чистые отверстия. Одновременно происходит упрочнение металла. Это дает калиброванию важное технико-экономическое преимущество перед другими технологическими процессами.

Оптимальная геометрия калибрующего инструмента должна обеспечивать наивысшее качество обработанной поверхности шлицевого отверстия и наименьшее тяговое усилие калибрования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Берберов С.А., Берберова Н.И., Кешишьян К.С. Повышение качества шлицевых отверстий в термообработанных деталях // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 8 (128). С. 10–13.
2. **Повышение** точности шлицевых отверстий в термообработанных деталях / С.А. Берберов, Н.И. Берберова, Ш.Г. Хведелидзе, В.В. Палкин // Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: Сб. трудов ДГТУ, Ростов-н/Д., 2017. С. 167–172.
3. **Берберов С.А., Лебедев В.А.** Применение фасонных дорнов для калибрования шлицевых отверстий в термообработанных деталях // Научно-технические технологии в машиностроении. 2017. № 9 (75). С. 38–41.

УДК 621.9.048.6:539.422

М.Е. Попов, А.М. Попов, А. Эль Дакдуки*(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)**E-mail: mepop@yandex.ru*

Математическое моделирование соударения тел рабочей среды и обрабатываемых деталей при виброволновой обработке

Рассмотрена задача моделирования физики движения и столкновений твердых тел рабочей среды и обрабатываемых деталей при виброударной и виброволновой обработке. Представлены алгоритм обнаружения точки коллизии и расчет дальнейшей траектории движения тел. Предложены формулы для расчета линейной и угловой скоростей тел после столкновения.

Ключевые слова: виброударная обработка, виброволновая обработка, точка коллизии, столкновение твердых тел.

The paper considers the problem of modeling the physics of the movement and collisions of solids bodies of a working environment and machined parts when the vibration impact and vibrowave processing. Presented the point of collision detection algorithm and the calculation of the future trajectory of bodies. Formulas for calculation of linear and angular velocities of bodies after collision are offered.

Keywords: vibration impact processing, vibrowave processing, point of conflict, collision of solid bodies.

Введение

Вибрационные технологии успешно применяются для повышения качества и эксплуатационных свойств деталей машин. Виброволновая и виброударная обработка сопровождается съемом частиц металла и его оксидов с обрабатываемой поверхности, а также пластическим деформированием тонкого поверхностного слоя за счет контактного

воздействия инструмента, совершающего в процессе работы сложные колебательные или волновые движения [1]. Процесс носит виброударный характер и сопровождается дискретным нанесением инструментом под различными углами к обрабатываемой поверхности большого числа микроударов. В качестве инструмента могут выступать как кинематически связанные, так и свободно движущиеся твердые тела, обрабатываемые среды.

Постановка задачи

Виброволновое и виброударное воздействие обусловлено действием направленных колебаний по различным технологическим схемам. Базовой схемой является виброобработка в рабочей камере с обрабатываемой гранулированной средой в виде твердых тел (рис. 1).

В рабочую камеру, заполненную гранулированной средой требуемой характеристики (являющейся в этом случае инструментом), загружаются обрабатываемые детали. Поскольку рабочая камера установлена на пружинных опорах, она может колебаться в различных направлениях. В качестве привода обычно используют инерционный (или другого вида) вибратор. Он сообщает рабочей камере колебания с частотой 50...100 Гц и амплитудой 0,5...5,0 мм.

В процессе обработки по базовой схеме заготовки и рабочая среда непрерывно подвергаются переменным по знаку ускорениям, осуществляют интенсивное относительное движение, совершая два вида движения — колебания и медленное вращение всей массы (циркуляционное движение). От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающим слоям рабочей среды, которые передают ее следующим слоям и т. д.

Виброударная обработка, используемая для достижения упрочняющего или стабилизирующего эффекта, осуществляется преимущественно в среде металлических и твердосплавных тел. Получение упомянутого технологического эффекта, возможность управления процессом определяются состоянием обрабатываемой среды и характерными ее параметрами. В числе последних рассматриваются эквивалентная масса вибрирующей среды; коэффициент восстановления; параметры силовых связей; динамический зазор между ча-

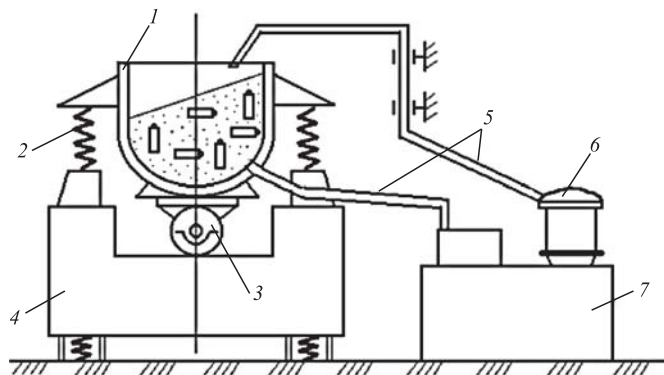


Рис. 1. Схема вибродинамической установки:

1 — рабочая камера; 2 — пружина; 3 — вибратор; 4 — основание; 5 — шланги для подачи и слива раствора; 6 — насос; 7 — бак-отстойник

стицами среды; диссипативные и квазиупругие свойства среды.

Рассмотрение физической сущности процесса показывает, что он состоит в комплексном воздействии на обрабатываемые детали и их поверхность ряда факторов, вызванных вибрацией и наличием рабочей среды соответствующей характеристики:

1) множества микроударов частиц рабочей среды в различных направлениях, обеспечивающих равномерное и всестороннее воздействие на предметы, детали, материалы. В зависимости от характеристики частиц среды и ее состава создаются условия для протекания процессов микрорезания, многократного упругопластического деформирования, истирающе-сглаживающего действия;

2) переменных ускорений, вызывающих протекание ударно-волновых процессов, изгибные напряжения;

3) воздействия химически и поверхностно-активных веществ, вызывающих протекание физико-химических процессов;

4) интенсивного направленного перемешивания рабочей среды, обрабатываемых деталей, транспортируемых материалов.

В общем случае вибрационная обработка характеризуется следующими явлениями, определяющими ее технологические возможности:

динамическим воздействием обрабатываемой среды в виде множества соударений ее частиц с поверхностью обрабатываемой детали;

механохимическим взаимодействием среды и материала детали;

акустическим воздействием ударных волн.

Отсутствие жесткой связи детали и инструмента исключает возможность эффективного и регулируемого влияния на геометрические размеры и форму деталей. Поэтому процесс вибрационной обработки является безразмерным, т. е. не определяющим форму и размеры обрабатываемых деталей.

Однако отсутствие жесткой связи не только ограничивает, но и расширяет возможности вибрационной обработки. Так, отсутствие жесткой связи детали и инструмента (рабочей среды) и равномерная обработка всей поверхности, с которой контактирует рабочая среда, обеспечивают обработку различных деталей простой и сложной формы, а наличие перемешивания и "текучести" рабочей среды определяет условия для эффективного применения процесса при обработке кромок, заусенцев и облоя. Наличие постоянного воздействия на поверхность детали типа коленчатый вал является важным условием исключения или ослабления действия концентраторов напряжений и снижения поводки как при последующей обработке на станке, так и в процессе эксплуатации.

В работе рассматривается задача моделирования движения и столкновений твердых тел при виброударной и виброволновой обработке, а также алгоритм обнаружения точки коллизии и расчет дальнейшей траектории движения тел рабочей среды и обрабатываемых деталей. Определение коллизий объектов произвольной формы — трудная задача, имеющая высокую вычислительную сложность, поэтому широко применяется метод определения коллизий при помощи аппроксимирующих контейнеров [2, 3]. В этом случае формы виртуальных объектов описываются (аппроксимируются) различными геометрическими примитивами и задача определения коллизий самих объектов сводится к определению коллизий их аппроксимирующих контейнеров. Широкое распространение получили такие примитивы, как прямоугольные параллелепипеды и сферы.

Процесс столкновения тел можно разделить на три стадии: первая стадия — тела налетают друг на друга с постоянными скоростями и в какой-то момент соприкасаются друг с другом; вторая стадия (собственно соударение) — появляются силы взаимодействия между телами, которые действуют в течение некоторого промежутка времени; третья стадия — тела разлетаются с новыми неизменными во времени скоростями. Обычно формулировка задачи на соударение предполагает определение по заданным начальным скоростям тел их конечные скорости (или наоборот). При этом стадия собственно соударения фактически не рассматривается, а обсуждается лишь ее характер: удар упругий или неупругий, центральный или нецентральный и т. д.

В качестве примера рассмотрим упругий удар. Пусть небольшое тело произвольной формы налетает на другое тело. Придя в соприкосновение, тела начинают деформироваться. Возникающие упругие деформации передаются от одних частей тел к другим со скоростью распространения звука (т. е. достаточно быстро), причем различные части тел получают различные скорости. Наконец, импульсы деформации достигают противоположных границ тел, отражаются от них, и тела отскакивают друг от друга подобно сжатым пружинам. Что же при этом происходит с первоначальным запасом механической энергии тел?

Из-за неодинаковости скоростей движения различных частей тел возникают колебания. Они отбирают определенную энергию, которая при затухании колебаний превращается в тепло. Кроме того, всякое колеблющееся тело становится источником звуковых волн, которые тоже уносят часть энергии. Если удар нецентральный, т. е. если от-

носительная скорость соударяющихся тел не проходит по линии центров масс тел, тела начнут вращаться. Энергия, необходимая для этого, черпается тоже из кинетической энергии поступательного движения тел. Вращение могут вызвать также силы трения. Однако если отношение потерь к первоначальному запасу механической энергии мало, всеми необратимыми превращениями механической энергии в другие виды энергии пренебрегают и удар считают абсолютно упругим. Идеализированная картина такого удара состоит в следующем: кинетическая энергия поступательного движения налетающих тел частично переходит в потенциальную энергию упругих деформаций; потенциальная энергия растет до тех пор, пока не сравняются скорости движения обоих тел, а затем она переходит в кинетическую энергию разлетающихся тел. Таким образом, при абсолютно упругом ударе общая механическая энергия тел сохраняется.

Заметим, что при неупругом ударе в телах возникают неупругие деформации, которые частично сохраняются и после соударения тел. При этом внутренняя энергия тел изменяется, а значит, их полная механическая энергия не сохраняется.

Рассмотрим постановку задачи на примере двух тел [4, 5]. Оба тела заданы набором треугольников, координаты которых хранятся в трех массивах X , Y , Z . У тел известны векторы линейной и угловой скоростей и массы M_1 , M_2 . Требуется определить координаты точки коллизии, векторы линейной и угловой скоростей каждого тела после столкновения.

Предлагаемый метод решения задачи

Обнаружение точки коллизии. При соударении тела могут соприкоснуться как в одной точке, так и некоторой поверхностью. В любом случае данный алгоритм определяет точку, от которой впоследствии следует отсчитывать ударный импульс.

Первая фаза. Вокруг центра масс каждого тела описывается сфера радиусом, равным расстоянию между центром масс и максимально удаленной от него точкой фигуры. В момент, когда сферы начнут соприкасаться, т. е. расстояние между центрами масс станет меньше суммы радиусов сфер, происходит переход во вторую фазу.

Вторая фаза. Заметим, что в общем случае пересечение координат фигур по трем осям еще не означает, что тела действительно пересеклись. Зададим параметр ε — точность алгоритма. Будем считать, что тела пересеклись, если кратчайшее расстояние между ними не превосходит это число. Для определения точки столкновения возьмем один треугольник первого тела и все точки второго.

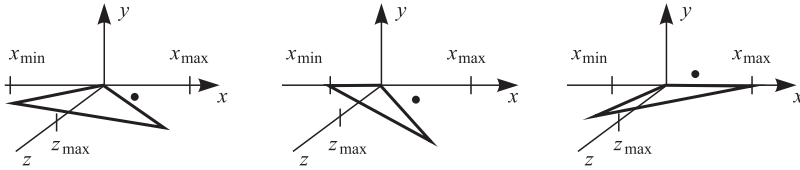


Рис. 2. Схема определения точки столкновения твердых тел

Шаг 1. Одну из точек данного треугольника сдвигаем в начало координат и разворачиваем его так, чтобы он лежал в одной из плоскостей координат. На рис. 2 треугольник лежит в плоскости xz . Указанные преобразования нетрудно проделать, используя матрицы поворота вокруг осей координат, так как углы поворота в данном случае известны, а при нормировке сторон треугольника будут известны синус и косинус углов поворота. На эти же полученные матрицы поворота умножаем все точки второго тела.

Шаг 2. После разворота второго тела проверяем все его координаты по оси y . В случае если имеются точки, отличающиеся по оси y от нуля не более чем на ϵ , будем далее проверять эти точки на пересечение с треугольником. Если таких точек несколько, то, возможно, тела соприкасаются поверхностью. На рис. 2 рассмотрена одна точка.

Шаг 3. Все последующие действия заключаются в том, чтобы развернуть треугольник и точку, подозрительную на пересечение, так, чтобы одна из сторон треугольника была параллельна оси Ox . В каждом случае проверяем неравенства $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$; $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$. Если хотя бы в одном случае они не выполняются, то пересечения нет.

В случае, когда имеется несколько точек, подозрительных на пересечение, определяем пересечение области с треугольником и точку коллизии находим посередине пересечения.

Шаг 4. Для того чтобы определить координаты данной точки в абсолютной системе координат,

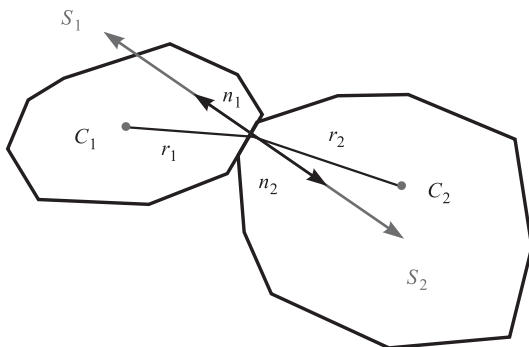


Рис. 3. Схема определения линейной и угловой скоростей после столкновения

проводим ее обратные преобразования, т. е. разворачиваем на те же самые углы, только со знаком "-". Для этого в матрице поворота достаточно изменить несколько знаков.

Также имеет смысл, используя имеющиеся матрицы поворота, построить нормаль к поверхности соударения, так как она понадобится для дальнейшего расчета линейных и угловых скоростей. На шаге 3 нормаль всегда будет иметь координаты $\{0, 1, 0\}$. Умножая этот вектор на матрицы обратного поворота, получим координаты вектора нормали в абсолютной системе координат.

Расчет линейной и угловой скоростей после столкновения. После того, как стали известны координаты точки коллизии и векторы нормалей к поверхностям, соединим точку столкновения с центрами масс каждого тела C_1 и C_2 и получим векторы r_1 и r_2 . Обозначим через v_1 и v_2 линейные скорости тел до столкновения, через V_1 и V_2 линейные скорости после столкновения. Угловые скорости обозначим через w_1 , w_2 и W_1 , W_2 соответственно. В данной задаче под взаимодействием тел понимается разлет тел в разные стороны после столкновения без учета деформации и раскола. Будем считать, что коэффициент восстановления E скорости тел после удара известен. Импульсы тел относительно главных осей инерции также известны и равны соответственно A_1 , B_1 , C_1 и A_2 , B_2 , C_2 .

Рассчитаем для каждого тела величины λ_x , λ_y , λ_z — проекции векторов λ , где

$$\lambda = r \times n = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ r_x & r_y & r_z \\ n_x & n_y & n_z \end{vmatrix} = \{r_y n_z - r_z n_y, r_z n_x - r_x n_z, r_x n_y - r_y n_x\}.$$

На рис. 3 изображены ударные импульсы тел S_1 и S_2 , равные по модулю и противоположные по направлению, направленные по нормальям к поверхности соударения. В расчетах нас интересует лишь модуль ударного импульса, который рассчитывается по формуле

$$S = -\frac{1+E}{G} (v_1 n_1 + v_2 n_2 + (w_1, \lambda_1) + (w_2, \lambda_2)),$$

где $G = \frac{M_1 + M_2}{M_1 M_2} + \frac{\lambda_{1x}^2}{A_1} + \frac{\lambda_{1y}^2}{B_1} + \frac{\lambda_{1z}^2}{C_1} + \frac{\lambda_{2x}^2}{A_2} + \frac{\lambda_{2y}^2}{B_2} + \frac{\lambda_{2z}^2}{C_2}$.

Таким образом, векторы линейных и угловых скоростей после соударения будут вычисляться по формулам

$$V_1 = v_1 + \frac{S}{M_1} n_1; V_2 = v_2 + \frac{S}{M_2} n_2;$$

$$W_{1x} = w_{1x} + S \frac{\lambda_{1x}}{A_1}; W_{1y} = w_{1y} + S \frac{\lambda_{1y}}{B_1};$$

$$W_{1z} = w_{1z} + S \frac{\lambda_{1z}}{C_1};$$

$$W_{2x} = w_{2x} + S \frac{\lambda_{2x}}{A_2}; W_{2y} = w_{2y} + S \frac{\lambda_{2y}}{B_2};$$

$$W_{2z} = w_{2z} + S \frac{\lambda_{2z}}{C_2}.$$

В случае соударения твердого тела с неподвижно закрепленным телом формула для расчета ударного импульса изменится:

$$S = -\frac{1+E}{G} (v_1 n_1 + (w_1, \lambda_1));$$

$$G = \frac{1}{M_1} + \frac{\lambda_{1x}^2}{A_1} + \frac{\lambda_{1y}^2}{B_1} + \frac{\lambda_{1z}^2}{C_1}.$$

Большой интерес представляет моделирование сложных физических объектов и взаимодействия их между собой, особенно в случае большого числа взаимодействующих объектов [6—8].

Множество взаимодействующих объектов влияет друг на друга, и через посредников по определенному закону распределяется давление. В результате этого множество шариков, насыпанных в ограниченный объем, после некоторого процесса стабилизации примет определенную характерную структуру. Двухмерный случай такой структуры показан на рис. 4 слева.

Удар шариком по этой структуре приводит к распределению по определенному закону импульса, который уходит вглубь и волной распространяется в стороны.

Распространение волн: в любых системах взаимодействующих тел закономерным образом распространяются волны. В связи с этим системы связанных тел ведут себя очень динамично, любой внешний импульс или колебание порождает соответствующую волну, распространяющуюся по всей системе.

Заключение

Все приведенные выше формулы следуют из теоремы о движении центра масс, теоремы об изменении количества движения и гипотезы Ньютона. Однако реализация предложенных алгоритмов является довольно трудоемкой задачей в случае большого числа взаимодействующих объектов, что имеет место при виброударной и виброволновой обработке деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2008. 624 с.
2. **Липанов А.М., Вахрушев А.В., Федотов А.Ю.** Исследование динамического взаимодействия твердых тел методами математического моделирования // Вестник ЮУрГУ. Сер. Математическое моделирование и программирование. 2015. Т. 8. № 1. С. 53—65.
3. **Трушин А.М.** Определение коллизий аппроксимирующих сфер и прямоугольных параллелепипедов в системах трехмерного моделирования // Программные продукты и системы / Software & Systems. 2015. № 4 (112). С. 105—109.
4. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики. В 2 т. М.: Наука, 1979. 272; 574 с.
5. **Демская А.П.** Моделирование физики движения и столкновений твердых тел // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: Материалы конференции / под ред. В.П. Гергеля. Н. Новгород: Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 2009. 527 с.
6. **Трушин А.М.** Обработка коллизий виртуальных объектов с помощью метода последовательных импульсов // Труды НИИСИ РАН. Т. 4. № 2. Математическое и компьютерное моделирование сложных систем: теоретические и прикладные аспекты. 2014. С. 95—105.
7. **Михайлюк М.В., Торгашев М.А.** Система "GLVIEW" визуализации для моделирующих комплексов и систем виртуальной реальности // Вестник РАЕН. 2011. № 2. С. 20—28.
8. **Попов М.Е., Попов А.М., Хашаш О.** Моделирование движения и столкновений рабочих тел и обрабатываемых деталей при виброударной и виброволновой обработке // Сб. трудов Междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей "Перспективные направления развития финишных методов обработки: виброволновые технологии". Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2016.

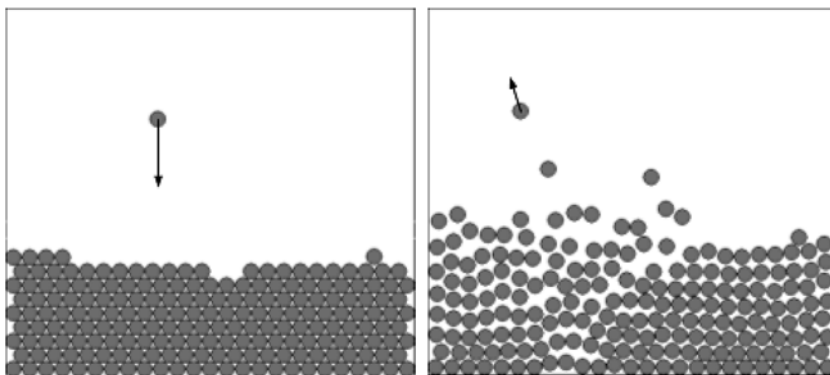


Рис. 4. Двухмерный пример установившейся структуры шариков (слева) и распространение импульса вглубь этой структуры и в стороны (справа)

Г.А. Прокопец, А.А. Прокопец

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: Zerrod0@yandex.ru

Повышение надежности технологической системы механической обработки деталей путем управления точностью ее наладки

В обеспечении качества изделий машиностроения очень большую роль играет надежность технологических процессов. В работе выполнен анализ надежности технологического процесса и показано, что управлять надежностью технологической системы можно через систему допусков на ее управляемые элементы при наладке и подналадке. Правильное назначение этих допусков и соотношения их частей позволит оптимизировать процесс по производительности и снизить технологическую себестоимость детали. Рассмотрен пример формирования системы допусков на составляющие элементы наладки при вибрационной абразивной обработке.

Ключевые слова: технологическая система, вибрационная обработка, надежность, допуск, наладка, подналадка.

In ensuring the quality of engineering products a very important role is played the reliability of technological processes. In work the analysis of reliability of technological process is made and it is shown that control the reliability of the technology is possible through a system of tolerances for its managed elements when setting up and recovery of its parameters. The correct purpose of those tolerances and the ratio of their parts will allow to optimize the process performance and to reduce the technological cost of the part. An example of formation of system tolerances on the adjustment components at vibration abrasive treatment is reviewed.

Keywords: technological system, vibrating processing, reliability, tolerance, setting up, recovery.

В современных условиях жесточайшей конкурентной борьбы одним из факторов обеспечения конкурентоспособности изделий является снижение сроков их изготовления, что невозможно без повышения надежности технологических процессов.

Конструктор, проектируя изделие определенного служебного назначения, своими основными задачами полагает не только достижение им определенных технических характеристик, но и определенный ресурс работы этого изделия и, за некоторым исключением, ремонтпригодность. Однако любую замечательную идею, воплощенную в конструктивном информационном образе, можно испортить исполнением. Отсюда следует, что работа технолога чрезвычайно важна для обеспечения жизнеспособности и конкурентоспособности изготавливаемого изделия.

Естественно, что даже идеально спроектированная технология должна быть подтверждена идеальным исполнением при производстве, а в дальнейшем — при хранении, техническом обслуживании и ремонте. Степень идеальности технологических процессов может быть определена (или оценена) показателями надежности.

Вопрос обеспечения надежности изготовления любого изделия необходимо, в первую очередь, рассматривать с точки зрения управления этой надежностью. Однако механизмы управления отдельными составляющими технологического процесса различны. Например, нельзя использовать одни и те же механизмы при управлении надежностью технических средств и, скажем, функционирования оператора как элемента технологической системы (человеческого фактора).

Согласно [1] технологический процесс — это "часть производственного процесса, содержащая целенаправленные действия по изменению и (или) определению состояния предмета труда". Конкретизируем это определение с учетом специфики рассматриваемой проблемы.

Так как в общем виде процессом является последовательная смена состояний объекта во времени, то технологическим процессом назовем управляемую строго определенную последовательность смены состояний объекта производства во времени посредством воздействия на него исполнительных элементов технологической системы в целях формирования заданных эксплуатационных свойств этого объекта производства. Таким образом, на

входе технологического процесса имеем исходный объект (заготовку, составляющие сборочной единицы и пр.), на выходе — готовый объект (деталь, сборочную единицу, готовое изделие и пр.), между ними — функционирующую в строго регламентированном информационном пространстве технологическую систему.

Изложенное позволяет сделать вывод, что для обеспечения надежности технологического процесса механической обработки в целом необходимо, во-первых, обеспечить надежность заготовки по значимым параметрам (т. е. параметрам заготовки, которые в процессе реализации технологического процесса трансформируются в параметры детали), во-вторых, обеспечить стабильность параметров процесса во времени (например, стабильность режима обработки), в-третьих, максимально исключить влияние человеческого фактора как элемента, надежность которого наиболее сложно поддается как прогнозированию, так и обеспечению.

Конкретизируя изложенное, можно сформулировать основные задачи, которые необходимо поставить и решить последовательно на каждом этапе обеспечения надежности технологического процесса:

1. Установление связи между эксплуатационными свойствами изделия и состояниями объекта (технологического процесса). На основании этих связей технолог проектирует соответствующий технологический процесс.

2. Определение числа и последовательности смены состояний объекта (технологического процесса) во времени до обеспечения эксплуатационных свойств изделия. Например, наладка технологической системы — функционирование (обработка) — подналадка.

3. Численное, функциональное или алгоритмическое описание содержания и характеристик каждого состояния объекта и технологической системы на начальный момент времени (например, номиналы и допуски на параметры заготовки, схемы и количественное описание элементов наладки технологической системы и др.).

4. Определение допустимых отклонений значений характеристик каждого состояния от принятых на начальный момент времени, т. е. стабильности процесса во времени (допуск на параметры наладки). Не имея, например, допуска на наладку, связанного функционально с эксплуатационными характеристиками изделия, нельзя оценить ни стабильность процесса, ни момент подналадки и т. д.

5. Выявление системы показателей для контроля или контроля и управления ходом техно-

логического процесса (управление надежностью технологического процесса). Как известно, только наблюдаемая и управляемая система может быть надежной.

Естественно, каждый параметр технологического процесса должен быть увязан с параметрами изделия, формируемыми на этой операции. Мало того, должен быть определен допуск на этот параметр с учетом его динамики. При этом необоснованное увеличение числа характеристик каждого состояния и показателей для контроля или управления технологическим процессом снижает его надежность и может привести к неуправляемости процесса.

В теории надежности надежность объекта оценивают по таким группам показателей, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или по сочетанию этих свойств [2]. Учитывая, что объектом является процесс с характеристиками, изменяющимися во времени, сущность этих показателей можно определить следующим образом:

безотказность — стабильность, т. е. способность обеспечивать с заданной вероятностью значения показателей качества изготавливаемого изделия в пределах технологического допуска на этот показатель в течение оговоренного промежутка времени (например, длительности операции, времени изготовления всей партии деталей и т. п.) при экономически обоснованном числе подналадок технологической системы;

долговечность — срок эксплуатации технологического процесса до момента его полного физического или морального устаревания, т. е. когда технологический процесс перестанет быть рентабельным или изготавливаемое изделие снимется с производства;

ремонтпригодность — здесь восстанавливаемость составляющих элементов технологического процесса или его параметров до значений, обеспечивающих формирование показателей качества изготавливаемого изделия в пределах допуска (например, путем замены изношенных элементов, допустим, инструмента); восстановление — как правило, осуществление подналадки технологической системы; особенностью технологического процесса является то, что он однозначно должен быть восстанавливаемым;

сохраняемость (для серийного и единичного производства) — возможность повторного (периодического) использования технологического процесса с одной и той же вероятностью обеспечения заданных показателей качества изготавливаемых изделий, что и при отладке его при первом запуске.

Отсюда видно, какую большую роль в обеспечении надежности технологического процесса играют подналадка как восстановление параметров до значений, установленных при первоначальной наладке технологического процесса, и корректный момент ее выполнения. Если наладку выполнять ранее, чем это обусловлено стабильностью технологического процесса, то это неоправданно увеличит трудоемкость изготовления изделий и их технологическую себестоимость; если позднее — то значительно возрастет риск выпуска брака.

При наладке и отладке технологического процесса устанавливаются определенные значения его показателей, которые должны находиться в пределах допуска на наладку. Именно они определяют значения показателей качества изготавливаемого изделия. Однако при функционировании на результат влияют факторы, стремящиеся нарушить стабильность процесса (например, износ инструмента), поэтому допуск на наладку должен разделяться на две неравные части: первую (меньшую), определяющую точность первоначальной настройки, и вторую (большую), определяющую момент подналадки технологической системы. Причем при определении допуска и соотношения его частей необходимо учитывать не только технические, но и экономические параметры, определяющие технологическую себестоимость детали.

Значения показателей надежности технологического процесса [3], величина их допуска и пропорции разделения на две указанные выше части будут определяться несколькими факторами, в том числе:

степенью критичности вероятных дефектов (для критических дефектов показатели надежности должны быть максимально близки к единице);

размером партии заготовок (в серийном производстве), числом изготавливаемых изделий (для единичного производства), экономически целесообразным временем между подналадками (для массового производства);

допусками на показатели качества изделия, формируемые в этом технологическом процессе;

степенью автоматизации технологического процесса и т. п.

Необходимо отметить, что правильное назначение общей величины допуска и соотношения его частей в значительной степени определяет трудоемкость обработки, а следовательно, влияет на технологическую себестоимость детали.

Рассмотрим формирование допуска на точность первоначальной настройки и стабильность технологического процесса на основе операции виброабразивной обработки (ВиАО), при котором

основным параметром качества является шероховатость обработанной поверхности.

ВиАО — это метод механической обработки со съемом материала, при котором в качестве инструмента применяется гибкая среда (далее рабочая среда), состоящая из не связанных между собой абразивных элементов. Обрабатываемые детали могут как находиться во взвешенном состоянии, так и быть закреплены. Движение масса загрузки (либо рабочая среда с деталями, либо только рабочая среда, если детали обрабатываются в закрепленном состоянии) получает от вибрирующих стенок рабочей камеры 3 (рис. 1). При этом с обрабатываемой поверхности детали снимается большое число малых частиц материала частицами рабочей среды, совершающей вместе с деталями циркуляционное движение под действием низкочастотных колебаний, создаваемых вибратором 5. Форма траектории движения массы загрузки определяется, в первую очередь, формой рабочей камеры, закрепленной на виброплатформе 4, которая установлена на упругих элементах 6, а также режимом обработки и характеристиками рабочей среды.

Как и любой метод обработки, ВиАО имеет свою специфику, определяющую оптимальную область ее использования. Основной специфической особенностью ВиАО является отсутствие жесткой связи между обрабатываемой заготовкой и рабочей средой (инструментом). Использование рабочей среды, состоящей из отдельных абразивных элементов, обеспечивает достаточно хорошую стабилизацию сил резания, так как отсутствуют упругие отжатия, температурная, диф-

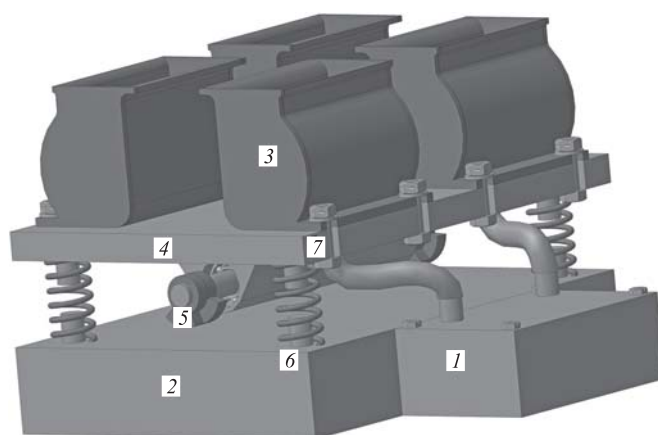


Рис. 1. Основные элементы технологической системы ВиАО (система подачи СОТС условно не показана):

1 — система очистки технологической жидкости; 2 — основание; 3 — рабочая камера; 4 — виброплатформа; 5 — вибратор; 6 — упругая подвеска; 7 — система крепления рабочей камеры

фузионная и адгезионная составляющие износа рабочей среды. Кроме того, ВиАО является безразмерной обработкой, т. е. не влияет на точность размеров обрабатываемой детали, а следовательно, даже при обработке в закрепленном состоянии точность изготовления приспособления для установки детали учитывать не требуется.

К достоинствам ВиАО можно также отнести, во-первых, гибкость технологической системы, т. е. возможность изменять в достаточно широких пределах структуру системы (например, состав и характеристики сменной наладки) и ее элементов (например, режим работы, характеристики рабочей среды, химический состав и концентрацию смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС)); во-вторых, присутствие свойства самоадаптации технологической системы при изменении условий (при наличии системы автоматического регулирования и частично без нее), в которых протекает технологический процесс, или адаптации за счет целенаправленных действий людей в целях обеспечения требуемого уровня надежности процесса.

К факторам, определяющим поле рассеяния формируемого показателя качества, в первую очередь, отнесем энергетическую характеристику частицы рабочей среды, которая определяется следующими составляющими элементами наладки:

размерными характеристиками абразива (приведенным диаметром частицы рабочей среды $d_{пр}$); амплитудой A и частотой ν колебаний рабочей камеры;

объемом V загрузки рабочей камеры;

массовым соотношением заготовки — рабочая среда ($M_{ср}/M_3$);

скоростью промывки $V_{СОТС}$ и химическим составом ω СОТС;

уравновешенностью вибрирующей части технологической системы — расположением центра масс (X_s, Y_s, Z_s).

Тогда часть допуска, выделяемая на первоначальную настройку (наладку), будет складываться из допусков на ее составляющие, перечень которых будет зависеть от назначения и структуры операции ВиАО, а именно, допусков на размерные характеристики абразива $Td_{пр}$, амплитуду TA и частоту $T\nu$ колебаний рабочей камеры, объем загрузки рабочей камеры TV , массовое соотношение заготовки — рабочая среда $T(M_{ср}/M_3)$, скорость промывки СОТС ($TV_{СОТС}$) и ее химический состав $T\omega$, расположение центра масс вибрирующей части технологической системы X_s, Y_s, Z_s . Допуск может назначаться не на все элементы, а только на те, которые имеют низкую надежность.

Соответственно, часть допуска формируемого показателя качества детали, которая определяет момент подналадки, будет в основном складываться из допусков на изменение характеристик составляющих наладки, включенных в состав, определяющий часть допуска на наладку, в том числе допуск на износ частицы абразива, включая допуск на изменение формы $T\Delta d_{пр}$, изменение объема загрузки рабочей камеры $T\Delta V$, допуск на изменение химического состава СОТС $T\Delta\omega$ и степень ее загрязнения $\Delta M_3/M_{СОТС}$, допуск на изменение положения центра масс вибрирующей части технологической системы $\Delta X_s, \Delta Y_s, \Delta Z_s$, например за счет изменения объема загрузки рабочих камер при многокамерной обработке.

В качестве примера рассмотрим зависимость допуска на объем загрузки рабочей камеры при вибрационной абразивной обработке от допуска на шероховатость при условии формирования полностью нового микрорельефа поверхности (т. е. исключаем из рассмотрения допуск на параметр шероховатости заготовки). Изменение объема загрузки в процессе обработки деталей, например по причине ее износа, приводит к изменению ее режущей способности, а следовательно, к увеличению поля рассеяния параметра шероховатости. Для стабилизации режущей способности рабочей среды (в той части, где она зависит от объема загрузки) необходимо поддерживать объем загрузки в пределах допуска. На рис. 2 приведен график зависимости параметра шероховатости Ra от объема загрузки при прочих равных условиях. Если на чертеже указано номинальное значение параметра шероховатости по ГОСТ 2789—73 $Ra 1,25$, в соответствии с которым допустимые предельные отклонения в процентах средних значений параметров шероховатости от номинального следует выбирать из ряда 10; 20; 40, отклонения могут быть односторонними и симметричными. Эти параметры выбирают исходя из условий эксплуатации детали.

Как указывалось выше, весь допуск разделяется на две части: допуск на наладку и допуск, определяющий момент подналадки технологической системы. Часть допуска на наладку определится погрешностью средства измерения, принятого для определения объема загрузки, но она должна быть не менее среднего объема одной частицы рабочей среды. Оставшаяся часть будет определять момент подналадки технологической системы.

Рассмотрим, как определяется весь допуск. Пусть погрешность составляет 10 % от номинального значения, отклонение одностороннее, т. е. параметр шероховатости Ra обработанной поверхно-

сти должен находиться в пределах 1,25...1,375 мкм. Тогда по графику, приведенному на рис. 2, а, определяем, что для получения шероховатости обработанной поверхности в пределах допуска объем за-

грузки рабочей камеры должен находиться в пределах 6,4...7 л (допуск $T\Delta V = 0,6$ л). Если погрешность составляет 20 % от номинального значения, отклонение одностороннее, то поле рассеяния Ra должно укладываться в пределы 1,25...1,5 мкм. Тогда по графику, приведенному на рис. 2, а, определяем, что допуск на объем загрузки рабочей камеры $T\Delta V = 2,1$ л или в пределах от 4,9 до 7 л.

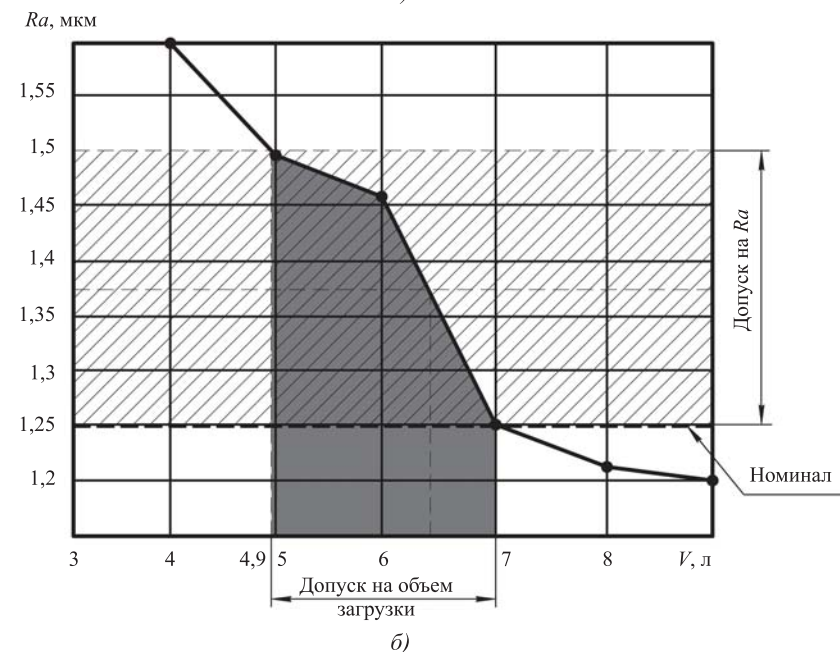
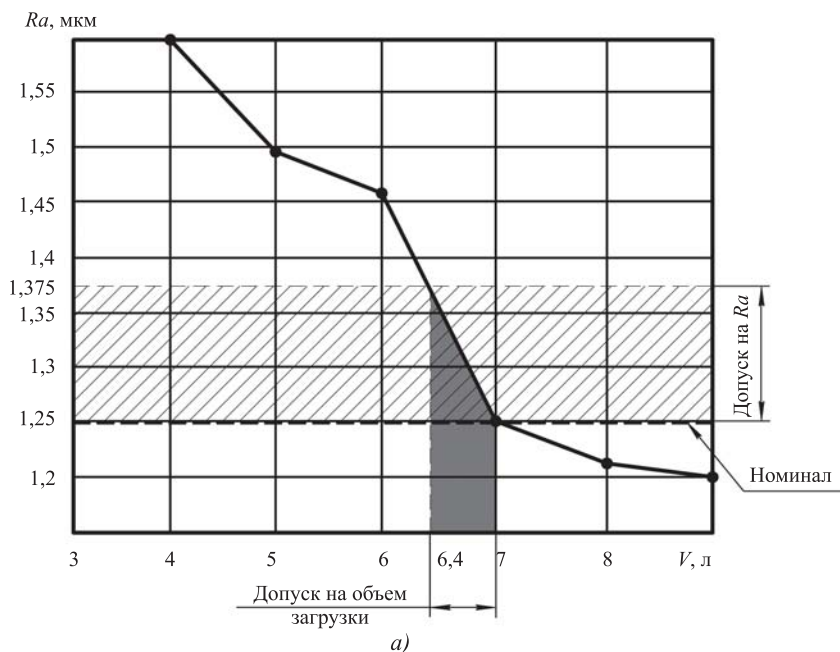


Рис. 2. Выявление предельных значений объема загрузки рабочей камеры для получения параметра шероховатости обрабатываемой поверхности Ra 1,25 мкм в пределах допуска, который составляет: а — 10 % от номинала; б — 20 % от номинала

Выводы

Для предупреждения брака при изготовлении изделия необходимо научиться управлять надежностью технологической системы. Для решения этой задачи требуется наличие соответствующих методик определения надежности и математического описания процессов, протекающих в технологических системах, поэтому исследования в этой области на данном этапе весьма актуальны. Управлять технологической системой можно через систему допусков на ее управляемые элементы. Правильное назначение этих допусков и соотношения их частей, определяющих точность наладки и момент подналадки, позволит оптимизировать процесс по производительности, а следовательно, в определенной степени снизить технологическую себестоимость детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 3.1109—82. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. М.: Стандартинформ, 2012.
2. ГОСТ Р 53480—2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010.
3. ГОСТ 27.004—85. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1986.

М.А. Тамаркин, А.С. Мельников, Э.Э. Тищенко
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: tehn_rostov@mail.ru

Исследование надежности технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования

Представлены результаты исследований процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД). Получен комплекс моделей формирования показателей надежности технологических процессов обработки динамическими методами ППД, позволяющих обеспечить повышение эффективности обработки и достижение заданной величины и стабильности параметров качества обрабатываемой детали. Установлены зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации, времени обработки. Пользуясь комплексом полученных моделей, можно рассчитать показатели точности на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надежность технологического процесса, принятого к производству.

Ключевые слова: обработка деталей динамическими методами ППД, качество поверхности, глубина упрочненного слоя, степень деформации, время обработки, обеспечение надежности технологического процесса.

Results of researches of processing of details by dynamic methods of superficial plastic deformation (SPD) are presented. The complex of models of formation of indicators of reliability of the technological processing by dynamic methods of SPD allowing to provide increase in efficiency of processing and achievement of the set size and stability of parameters of quality of the processed detail is received. Dependences for definition of an arithmetic average of a deviation of a profile of roughness of a surface, depth of hardening and extent of deformation, processing time are established. Using a complex of the received models, it is possible to calculate the size of indicators of accuracy on stages of technological design that will allow to predict reliability of the technological process accepted to production.

Keywords: processing of details by the SPD dynamic methods, quality of a surface, depth of the strengthened layer, extent of deformation, processing time, ensuring reliability of technological process.

Под надежностью технологических систем и осуществляемых ими технологических процессов (ТП) понимают их свойство обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемой обработкой заготовки на одном или нескольких этапах. При этом необходимо сохранение в процессе обработки промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах. Исследования надежности технологических систем и осуществляемых ими технологических процессов регламентируются ГОСТ 27.202—83 [1], согласно которому при контроле ТП по рассеянию размеров после обработки поверхности детали определяют значения показателей точности.

В качестве объекта для исследования надежности выбраны ТП обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД). По характеру прилагаемой нагрузки методы ППД подразделяют на статические и динамические [2]. При обработке статическими методами ППД деформирующий инструмент, воздействует на поверхность обрабатываемых деталей с некоторым постоянным усилием. При этом про-

исходит плавное перемещение инструмента и, соответственно, очага деформации под ним по всей поверхности детали, подлежащей обработке. При динамических методах ППД частицы среды воздействуют на поверхность обрабатываемых деталей многократными соударениями. При этом сила соударений изменяется в каждом цикле от минимального до максимального значения.

В современном машиностроении динамические методы ППД получили широкое применение. Обработка данными методами позволяет при сравнительно низких производственных затратах в несколько раз повысить усталостную прочность и долговечность, износостойкость, контактную жесткость и тем самым повысить эксплуатационные свойства обработанной детали. Результат упрочнения обусловлен формированием в поверхностном слое благоприятной картины сжимающих остаточных напряжений, увеличением микротвердости, глубины упрочненного слоя и степени деформации.

К динамическим методам ППД, исследуемым в настоящей работе, относятся вибрационная от-

делочно-упрочняющая обработка, центробежно-ротационная отделочно-упрочняющая обработка, центробежная обработка, обработка дробью и др. Такие методы обработки могут быть использованы для повышения долговечности деталей, в том числе работающих в условиях циклических нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред. Рассматриваемые методы обработки применяются на операциях упрочнения и отделки деталей, скругления острых кромок, подготовки деталей под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.). Большой интерес инженеров к динамическим методам обработки поверхностным пластическим деформированием объясняется не только их широкими технологическими возможностями, но и существенными технико-экономическими преимуществами по сравнению с другими отделочно-упрочняющими методами обработки.

Для анализа надежности технологических процессов используются коэффициенты надежности технологических процессов механической обработки деталей [1, 3]. При контроле технологических процессов по количественному признаку определяются следующие показатели точности (по контролируемому параметру): коэффициент точности, коэффициент мгновенного рассеяния, коэффициент смещения, коэффициент запаса точности. Зависимости для их расчета приведены в [3].

Для расчета параметров надежности проектируемых ТП обработки динамическими методами ППД необходимо прогнозировать рассеяние показателей качества изготавливаемых деталей. Результаты обработки динамическими методами ППД можно описать множеством критериев: глубиной и степенью деформации упрочненного слоя, шероховатостью поверхности, максимальной реализацией резервов упрочнения материала деталей [4]. Получены уравнения, учитывающие особенности динамического взаимодействия частиц среды с поверхностью детали. Эти зависимости позволяют рассчитать значение каждого из указанных критериев при различных сочетаниях технологических параметров, среди которых можно выделить управляемые (режимы обработки для соответствующего метода и характеристики рабочих сред) и неуправляемые (физико-механические характеристики обрабатываемого материала). Так, параметр шероховатости поверхности можно определить по зависимости [4, 5]

$$Ra_{уст} = k \sqrt{\frac{h_{max} a b l_{ед}}{R^2}},$$

где k — эмпирический коэффициент; h_{max} — максимальная глубина внедрения частицы среды в

поверхность детали при единичном соударении; a, b — большая и малая полуоси эллипса контакта; $l_{ед}$ — единичная длина, введенная для сохранения размерности; R — радиус частицы среды.

При решении технологических задач обработки деталей динамическими методами ППД важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочненного слоя h_n и степени деформации ϵ . От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей, например усталостная прочность и долговечность. Если при внедрении частицы среды 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 . Величина h_n определяет зону поверхностного слоя, в которой имеются остаточная деформация зерен и дислокации 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, подвергнутой упрочнению.

Такой параметр упрочнения, как степень пластической деформации ϵ , также оказывает влияние на механическое состояние поверхностного слоя материала обрабатываемой детали. Аналитическое определение глубины упрочнения и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. Известные технологические зависимости получены с учетом многочисленных допущений и с использованием таких величин, определение которых вызывает сложности. В связи с этим при выведении зависимостей для определения h_n и ϵ ставилась задача использовать параметры, которые легко вычислить при проведении аналитических исследований или определить при экспериментальных исследованиях.

На практике довольно часто прибегают к пересчету одних чисел твердости в другие. Данные пересчеты проводятся исключительно на основе эмпирических зависимостей, которые не полностью описывают внутренние связи между различными числами твердости. В работе [6] автор предлагает использовать одну из наиболее часто применяемых зависимостей для перевода твердости по Бринеллю в пластическую твердость

$$HB = 0,2HD^{0,89}.$$

При проведении исследований следует учитывать тот факт, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление материала вдавливанию в него инденторов, т. е. возрастает уровень твердости материала, вследствие чего пластическая твердость при динамическом нагружении HD_d , зависящая от скорости, оказывается больше пластической твердости при статическом нагружении HD . Количественной мерой возрастания твердости, которая обусловлена динамичностью нагрузки, служит динамический коэффициент твердости $\eta = HD_d/HD$ [6].

С достаточной для практики точностью зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали как для случая контакта сферы с плоскостью, так и для тел произвольных формы и кривизны получена в работе Ю.И. Сидякина [6]:

$$\eta = 0,5 \left(1 - \frac{137V_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250V_0}{HD}} \right),$$

где HD — пластическая твердость при статическом нагружении; V_0 — начальная скорость удара. Это выражение позволяет вычислять пластическую твердость при статическом нагружении сталей по их пластической твердости при динамическом нагружении и начальной скорости удара.

С учетом приведенной выше зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки—Мизеса [6] при описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка), получены следующие формулы для расчета глубины упрочнения [4]:

$$h_H = 3,8R \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \sqrt{V_{\text{эф}} \sin \alpha} \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{ш}}}{k_c c \sigma_T}}$$

и степени деформации:

$$\varepsilon = 0,8 \sqrt{V_{\text{эф}}} \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{ш}}}{\eta HB^{1,12} \cdot 10^6}},$$

где $V_{\text{эф}}$ — эффективная скорость соударения частицы среды с поверхностью детали; α — угол встречи частицы среды с поверхностью детали; $\rho_{\text{ш}}$ — плотность материала частицы среды; σ_T — предел текучести материала детали; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности; k_c — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; HB — твердость по Бринеллю.

Для наиболее точного прогнозирования результатов ТП необходимо знать и уметь определять расчетное время обработки. Поэтому рас-

смотрим теоретическую модель определения времени обработки деталей.

Рассмотрим процесс деформации поверхностного слоя деталей глубиной h_{max} . Вероятность P_1 события, что каждая точка поверхностного слоя детали толщиной h_{max} попадет в локальный деформированный объем за одно взаимодействие с индентором, можно определить, разделив деформируемый объем металла V при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью (либо объем V_s металла, заключенного в шаровой сегмент радиусом R и высотой h_{max}) на объем слоя металла толщиной h_{max} и площадью, равной квадрату упаковки частиц среды на поверхности детали [5]:

$$P_1 = \frac{V}{4R^2 h_{\text{max}}} \text{ или } P_1 = \frac{V_s}{4R^2 h_{\text{max}}}.$$

Для теоретико-вероятностных расчетов числа актов деформирования, приходящихся на единицу площади детали в единицу времени, для различных динамических методов обработки ППД введем переменную f_B — частоту циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали. Следует учесть то обстоятельство, что не все колебания рабочей камеры приводят к деформирующим ударам частицами среды. Вероятность события, что каждая точка поверхностного слоя детали толщиной h_{max} попадет в локальный деформированный объем за одну секунду обработки

$$P_1 = \frac{V_s}{4R^2 h_{\text{max}}} f_B.$$

Время однократного деформирования всего объема поверхностного слоя толщиной h_{max}

$$t_1 = \frac{4R^2 h_{\text{max}}}{V_s f_B}.$$

Время многократного (F раз) деформирования всего объема поверхностного слоя толщиной h_{max} будет определяться выражением

$$t_F = \frac{4h_{\text{max}} F R^2}{V_s f_B},$$

где F — число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности.

Согласно рекомендациям автора [6] выбор величины F при динамических методах обработки ППД зависит от твердости материала. Число повторяющихся ударов F варьируется от 10 до 20, большие значения назначаются для меньшей твердости обрабатываемого материала детали.

Учитывая, что превышение рационального времени обработки может привести к перенакле-

пу обрабатываемой поверхности, провели исследование по определению времени перенаклепа образцов из различных материалов в зависимости от режимов обработки и характеристик рабочих сред, что в дальнейшем позволило выбирать такие технологические параметры обработки динамическими методами ППД, при которых требуемое время обработки гарантированно не достигало бы времени образования перенаклепа.

Для проверки достоверности предложенных теоретических моделей формирования шерохо-

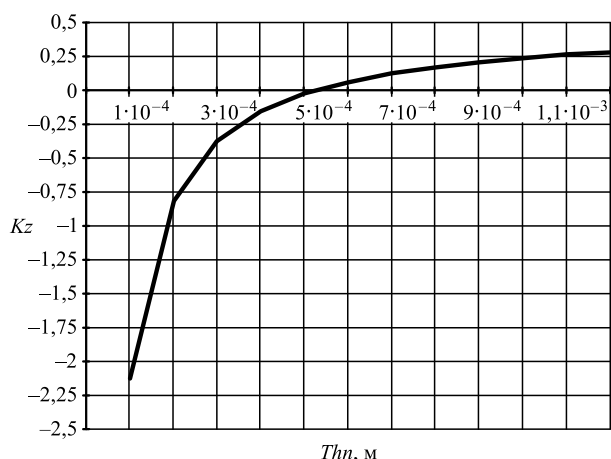


Рис. 1. Влияние зависимости глубины упроченного слоя Th_n от величины допуска на надежность ТП вибрационной отделочно-упрочняющей обработки. Контролируемый параметр — глубина упроченного слоя. Диапазон изменения допуска 0,1...1,2 мм с шагом 0,1 мм; диаметр шарика 8 мм; амплитуда 2,5 мм; частота 26,7 Гц; материал детали — сталь 45. Разброс 5 %

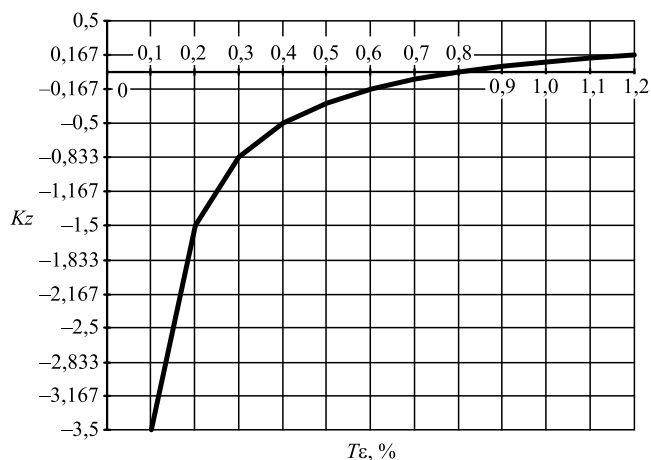


Рис. 2. Влияние зависимости степени деформации T_ε от величины допуска на надежность ТП центробежно-ротационной обработки. Контролируемый параметр — степень деформации ε . Диапазон изменения допуска 0,1...1,2 % с шагом 0,1 %; диаметр шарика 10 мм; частота вращения ротора 12 Гц; материал детали — сталь 20. Разброс 10 %

ватости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при обработке динамическими методами ППД проведены комплексные экспериментальные исследования.

Исследовано влияние технологических режимов обработки, размеров частиц среды и твердости материала детали по Бринеллю на формирование шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации.

Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Разница между результатами не превышает 20 %.

Полученный комплекс теоретических моделей, прошедший экспериментальную проверку, может быть использован для аналитического прогнозирования обеспечения надежности технологических процессов. Были проведены расчеты параметров надежности ТП по приведенным выше зависимостям при возможном разбросе частоты и амплитуды колебаний в пределах 5...15 % и возможном разбросе диаметров частиц среды в пределах 5...15 % при обработке деталей из различных материалов. Некоторые результаты представлены на рис. 1 и 2.

Разработаны методика проектирования технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки с учетом обеспечения их надежности и элементы САПР в виде программного модуля. Рассчитываются показатели точности исследуемого процесса по формулам, полученным выше. Далее пользователем вводятся поля рассеяния исходных величин (технологических режимов и физико-механических свойств материала детали). Определяются поля рассеяния значений контролируемого параметра, среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса точности по зависимости, представленной в [3]. В случае если коэффициент запаса точности K_z (по контролируемому параметру) больше нуля, рассчитывается время обработки для каждого варианта сочетаний технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

Результаты проведенных исследований и методика проектирования ТП позволят обеспечить надежность процессов обработки динамическими методами ППД.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.202—83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к мето-

дам оценки надежности по параметрам производительности. 28 с.

2. **ГОСТ 18296—72.** Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. 11 с.

3. **Дубровский П.В.** Обеспечение надежности технологических процессов: учеб. пособие. Ульяновск, УлГТУ, 2000. 124 с.

4. **Reliability** of centrifugal-rotational finishing by steel shot / М.А. Tamarkin, Е.Е. Tishchenko, D.V. Kazakov,

A.G. Isaev // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37, Iss. 4. P. 326—329.

5. **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.

6. **Сидякин Ю.И.** Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.06. М., 2002. 34 с.

УДК 621.9.048.6:681.5.015.23

Т.В. Атоян

(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: atoyan@yandex.ru

Модели оптимизации параметров процесса вибрационной обработки деталей в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом

Рассмотрен один из методов финишной обработки — вибрационная обработка деталей в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом, описан принцип процесса. Представлены модели оптимизации параметров шероховатости поверхности и износа абразивной среды в зависимости от режимов обработки.

Ключевые слова: вибрационная обработка, шероховатость поверхности, износ абразивной среды, параметры процесса, режимы обработки.

The article describes the final processing method — vibroabrasive working. One of his species — processing in the working chamber with a lever actuator. Presented optimization model of parameters of surface roughness and abrasive environment wear depending on the processing modes.

Keywords: vibroabrasive working, surface roughness, wear of abrasive environment, process parameters.

На современном этапе развития машиностроения требуются разработка и внедрение высокоэффективной техники и прогрессивной технологии. При этом важнейшими задачами являются интенсификация и оптимизация процесса обработки, к главным критериям которых относятся повышение производительности, качества, надежности, улучшение товарного вида.

Одним из высокопроизводительных методов отделочно-зачистной обработки является вибрационная обработка (ВиО). Сущность ВиО состоит в последовательном нанесении на поверхность обрабатываемых деталей большого числа микроударов множеством частиц рабочей среды при их взаимном соударении и скольжении. Удары вызваны действием направленных вибраций, сообщаемых рабочей камере, в которой размещены обрабатываемые заготовки и рабочая среда. Основой процесса яв-

ляется механический или механохимический съем мельчайших частиц металла и его оксидов с обрабатываемой поверхности, а также сглаживание микронеровностей путем их пластического деформирования частицами рабочей среды, совершающими в процессе работы колебательное движение [1].

Разновидностью ВиО является вибрационная обработка в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом. Метод состоит в том, что абразивная среда и обрабатываемые заготовки размещаются в рабочей камере, которой сообщаются с помощью шарнирно-рычажного механизма колебания от вращающегося эксцентрикового диска [2].

На рис. 1 представлена схема станка с шарнирно-рычажным приводом. От вращающегося привода через эксцентриковый диск 1 с эксцентриситетом e , вращающийся вокруг оси O , на котором установлен ведущий палец 2, сообщается колеба-

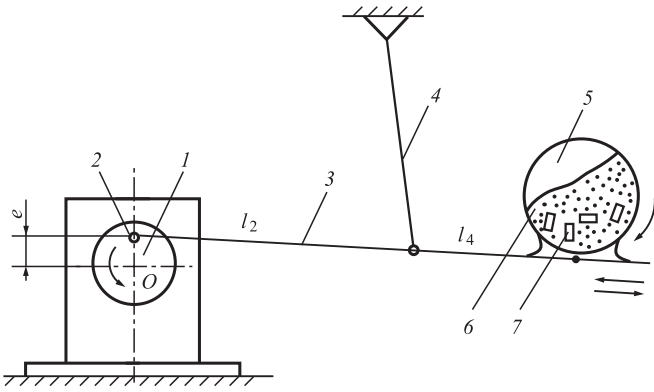


Рис. 1. Схема станка с шарнирно-рычажным приводом: 1 — эксцентриковый диск; 2 — ведущий палец; 3 — траверса; 4 — подвеска; 5 — рабочая камера; 6 — абразивная среда; 7 — обрабатываемые заготовки

тельное движение траверсе 3, которая соединена шарнирно с подвеской 4. На противоположном конце траверсы установлена рабочая камера 5, в которой размещены абразивная среда 6 и обрабатываемые заготовки 7.

Повышение интенсивности обработки при рассматриваемом методе ВиО достигается благодаря сообщению рабочей среде колебаний значительно больших амплитуд, чем при иных схемах обработки. Это обеспечивается тем, что рабочей камере сообщаются колебания заданных параметров, которые определяются размерами звеньев траверсы и их соотношением (l_2/l_4), а также частотой вращения эксцентрикового диска f .

При этом создается условие, когда абразив и обрабатываемые заготовки за время одного цикла колебания рабочей камеры, движущейся по замкнутому овалу, из состояния плотной среды переходят в состояние движущегося циркуляционного потока. Этот поток уплотняется в нижней части рабочей камеры. Процессы перехода абразива и обрабатываемых заготовок из состояния плотной среды в состояние движущегося потока и обратно чередуются в непрерывном режиме, обеспечивая обработку деталей.

Данный механизм позволяет в значительной степени интенсифицировать процесс обработки путем изменения размеров звеньев траверсы и их соотношения l_2/l_4 , частоты вращения эксцентрикового диска f , величины эксцентриситета e .

Основными показателями процесса ВиО является шероховатость поверхности и износ рабочей абразивной среды. Для управления процессом ВиО и выявления факторов, на него влияющих, а также реализации корректирующих и улучшающих мероприятий по выбору режимов обработки целесообразно использовать современные методы планирования эксперимента.

Шероховатость поверхности обрабатываемых деталей и интенсивность износа абразивной среды, получаемые в результате ВиО в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом, зависят от многочисленных факторов, между которыми существуют отношения типа причина—следствие (результат). Путем составления модели планирования эксперимента можно определить степень значимости этих многофакторных отношений.

Среди многочисленных факторов, влияющих на интенсивность износа абразивной среды, можно выделить следующие: частоту колебаний камеры f , Гц (X_1); соотношение длин плеч траверсы l_2/l_4 (X_2); величину эксцентриситета e , мм (X_3); зернистость абразивной среды N_3 (X_4); грануляцию абразивной среды d , мм (X_5).

В результате проведенного пятифакторного планирования эксперимента полиномом второй степени было выявлено влияние указанных выше факторов на показатели шероховатости поверхности и интенсивности износа рабочей среды при ВиО в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом. Эксперимент был поставлен по программе центрального композиционного ротатбельного плана второго порядка. Реализованные 16 опытов были дополнены 10 опытами в "звездных" точках и 6 опытами в центре плана [2].

Таким образом, получены уравнения регрессии в результате ротатбельного планирования второго порядка для шероховатости поверхности Y_{Ra} и для износа абразивной среды Y_I .

Уравнение регрессии для шероховатости поверхности Y_{Ra} имеет вид

$$Y_{Ra} = 0,593858 - 0,204168X_1 - 0,40167X_2 - 0,148335X_3 + 0,106668X_4 + 0,035389X_1X_3 + 0,089737X_1X_5 + 0,05182X_2X_3 - 0,117543X_2X_4 + 0,102376X_3X_4 + 0,298852X_1^2 + 0,2735738X_2^2 + 0,073874X_3^2 + 0,137070X_4^2 + 0,181307X_5^2. \quad (1)$$

Адекватность полученной модели проверяли с помощью критерия Фишера. При его расчетном значении F_p , меньшем табличного F_p , полученная модель считается адекватной при принятом уровне значимости [3].

Путем аналогичной математической обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии для износа абразивной среды Y_I

$$Y_I = 9,498254 + 2,834189X_1 + 0,549171X_2 + 4,2092X_3 + 1,885015X_4 + 0,835007X_5 + 1,660765X_1X_3 + 0,637006X_1X_4 + 1,16658X_2X_3 - 0,668603X_2X_4 + 0,605408X_2X_5 + 0,88473X_3X_4 + 0,738118X_3X_5 + 0,561172X_4X_5 + 0,406189X_1^2 + 0,455482X_2^2 + 1,452715X_3^2 - 1,190142X_5^2. \quad (2)$$

Проверка гипотезы адекватности модели показала, что модель адекватна.

Математические модели ротатбельного планирования второго порядка отражают влияние основных технологических параметров процесса ВиО в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом на шероховатость поверхности обрабатываемых деталей и износ абразивной среды.

На основании полученных уравнений можно сделать вывод, что на шероховатость поверхности и интенсивность износа абразивной среды наибольшее влияние оказывают величина эксцентриситета и частота колебаний рабочей камеры [3].

С помощью данных моделей решается задача определения условий процесса, обеспечивающих получение заданной шероховатости поверхности при рациональном износе абразивной среды, т. е. нахождения условного минимума функции Y_I при ограничениях, наложенных функцией Y_{Ra} [4].

Решение этой задачи осуществляли графическим способом, основанным на рассмотрении двумерных сечений поверхности отклика Y_{Ra} , совмещенных с двумерными сечениями поверхности отклика Y_I , и выборе условных экстремумов.

Было рассмотрено построение контурных кривых, образующихся в результате сечений поверхности отклика Y_{Ra} плоскостями, параллельными плоскости системы координат $X_1 - X_4$. Построение контурных кривых проводили для случая $X_2 = 1$ ($l_2/l_4 = 0,6$); $X_3 = 1$ ($e = 20$ мм); $X_5 = 1$ ($d = 15$ мм).

В результате преобразований получили уравнение эллипса в каноническом виде

$$\frac{X_1^2}{0,15419} + \frac{X_4^2}{0,33617} = 1. \quad (3)$$

Значения полуосей a и b эллипса выражены кодированными величинами факторов X_1 и X_4 соответственно.

По уравнению (3) построена контурная кривая I на рис. 2. Контурные кривые для других значений шероховатости поверхности обозначены 2...10; контурные кривые поверхности отклика для износа абразивной среды — I, ..., IV.

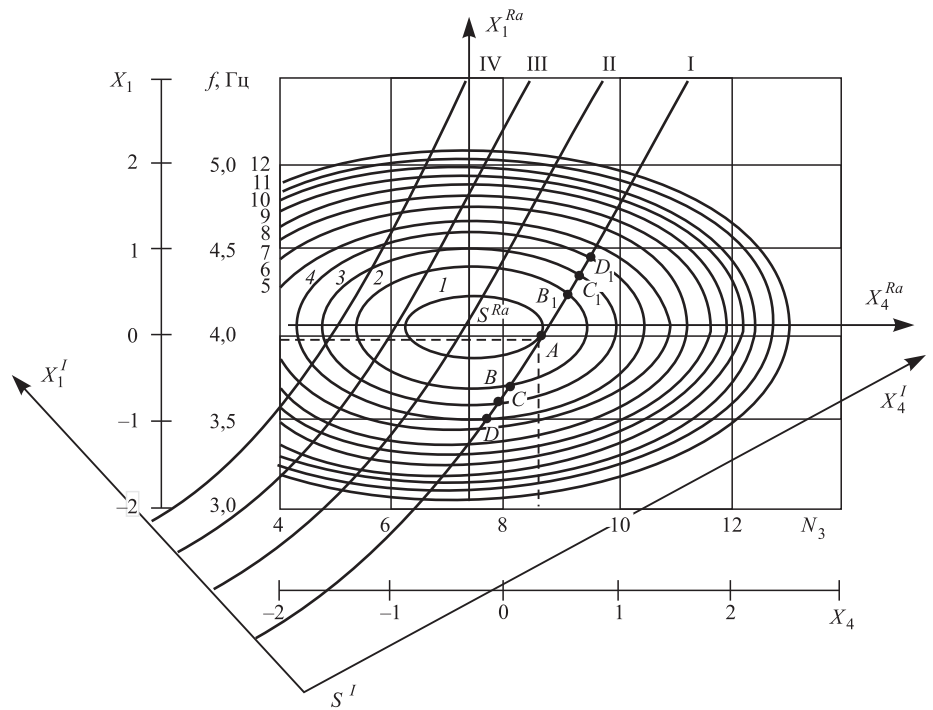


Рис. 2. Сечения поверхностей откликов Y_{Ra} и Y_I

В результате пересечения контурных кривых 1...10 (система координат $S^{Ra} X_1^{Ra} X_4^{Ra}$) и I...IV (система координат $S^I X_1^I X_4^I$) получены точки, отражающие параметры процесса. На рис. 2 точке A соответствуют $f = 3,9$ Гц, $N_3 = 8$. Координатам точек B, C, D, B_1, C_1, D_1 соответствуют другие значения параметров процесса.

С помощью совмещенных двумерных сечений поверхности откликов Y_{Ra} и Y_I можно назначать режимы обработки, обеспечивающие получение заданной шероховатости поверхности при рациональном износе абразивной среды в процессе обработки. Так, например, режим, при котором достигаются параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,65$ мкм и минимальный износ абразивной среды $I = 7$ %/ч, обеспечивается при соотношении длин плеч траверсы $l_2/l_4 = 0,6$ (X_2); величине эксцентриситета $e = 20$ мм (X_3); грануляции абразивной среды $d = 15$ мм (X_5) [5].

Полученные модели оптимизации позволяют при установившемся режиме обработки определить расчетным путем ожидаемые шероховатость поверхности и износ абразивной среды. Эти модели позволяют путем построения двумерных сечений и их анализа установить режимы процесса ВиО в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом, обеспечивающие получение заданной шероховатости поверхности при минимальном износе абразивной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 1999. 98 с.
2. **Атоян Т.В.** Совершенствование вибрационной обработки в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом путем оптимизации параметров процесса // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информации: сб. науч. тр. по материалам 13-й Междунар. науч.-практ. конф. М., МГУПИ, 2010.
3. **Атоян Т.В., Давыдова И.В.** Оптимизация параметров процесса центробежно-ротационной обработки деталей // Перспективные направления развития фи-

нишных методов обработки деталей; виброволновые технологии: сб. тр. по материалам Междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов н/Д., 14—17 сентября 2016 г.

4. **Атоян Т.В.** Методы оптимизации параметров объектов стандартизации // Вопросы вибрационной технологии: межвуз. сб. науч. ст. Ростов н/Д., ДГТУ, 2012.

5. **Атоян Т.В., Давыдова И.В.** Влияние режимов вибрационной обработки деталей в рабочей камере с шарнирно-рычажным приводом на параметры процесса // Виброволновые процессы в технологии обработки деталей высокотехнологических изделий: сб. тр. по материалам Междунар. науч. симпозиума технологов-машиностроителей. Ростов н/Д., 3—7 ноября 2017 г.

УДК 621.9.04:621.787

В.И. Бутенко

(Южный федеральный университет, г. Таганрог)

E-mail: mkk@egf.tsure.ru

Особенности проявления и управление технологической наследственностью при отделочно-упрочняющей обработке поверхностей деталей машин

Рассмотрены особенности проявления и возможности управления технологической наследственностью при различных способах отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин. Выявлена роль процесса дислокационной реструктуризации материала поверхностного слоя на финишных операциях механической обработки деталей и предложен критерий ее оценки в виде коэффициента дислокационной реструктуризации, зависящего не только от способа предыдущей обработки поверхности детали, но и от принятого способа ее отделочно-упрочняющей обработки. Приведены значения коэффициента дислокационной реструктуризации для некоторых железо-углеродистых сплавов при различных способах упрочняющей обработки поверхностей деталей после предварительного чистового точения, которые могут быть использованы при выборе способа финишной обработки с учетом технологической наследственности.

Ключевые слова: деталь, поверхность, структура, технологическая наследственность, отделочно-упрочняющая обработка, дислокационная реструктуризация.

Features of manifestation and management of technological heredity for the different methods of finishing-strengthening processing of surfaces of details of machines are considered. Revealed the role of the process of dislocation restructuring of the material of the surface layer at the finish machining operations of the parts and offered the criterion of its evaluation as a ratio of the dislocation of restructuring depends not only on the method of the preceding processing of the workpiece surface, but also the accepted method of finishing-strengthening processing. Given the values of the coefficient of dislocation restructuring for some iron-carbon alloys at various ways of strengthening processing of surfaces of details after prefinish turning, which can be used when choosing the method of finishing taking into account technological heredity.

Keywords: detail, surface, structure, technological heredity, finishing-strengthening processing, dislocation restructuring.

Введение

Состояние поверхностного слоя детали формируется при ее изготовлении в результате различных технологических операций, последовательность назначения которых определяется концепцией функционального единства структуры

технологического процесса механической обработки [1]. Из анализа работ [2—4] следует, что по ходу технологического процесса и последующей эксплуатации в материале поверхностного слоя детали происходит постоянное накопление деформаций и исчерпание запаса пластичности в очаге деформации, которые являются наследуемыми

параметрами поверхностного слоя. При этом каждое последующее воздействие на материал поверхностного слоя стартует с накопленного (или наследуемого) значения степени деформации и степени исчерпания пластичности.

В работе [5] приведена методика оценки склонности обрабатываемого материала детали к технологической наследственности (ТН), в основу которой положен показатель сохраняемости микротвердости материала поверхностного слоя во времени. Зная этот показатель, можно с высокой степенью точности прогнозировать эксплуатационные показатели деталей и назначать такие технологии их обработки, которые обеспечивали бы создание узлов машин с равнонадежными деталями [1, 5]. Однако в современной технической литературе, описывающей технологии финишной обработки поверхностей деталей машин, не приводится информация о влиянии способов предыдущей обработки на окончательное формирование свойств материала поверхностного слоя в процессе того или иного вида отделочно-упрочняющей обработки (ОУО).

Постановка задачи

Для обеспечения эффективности ОУО деталей необходимо выявить степень влияния ТН на процесс формирования эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя при выполнении финишных упрочняющих операций. В связи с этим задачей настоящих исследований являются изучение особенностей проявления ТН при ОУО поверхностей деталей машин и определение возможностей управления ею при назначении таких способов финишной обработки, как алмазное выглаживание, обкатка упрочняющим роликом, обработка шарико-стержневым упрочнителем (ШСУ) [6], виброобработка в среде закаленных шариков, фрикционная обработка. В качестве предыдущих способов обработки поверхностей деталей машин были приняты чистовое точение, однократное шлифование и обкатка роликом после чернового точения.

Методы проведения исследований

Для выявления общих закономерностей влияния ТН на окончательное формирование эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя деталей при ОУО предварительно выполнили исследования, в которых в качестве финишной обработки назначали алмазное выглаживание. Алмазное выглаживание осуществляли на цилиндрических бесступенчатых деталях длиной 120 мм, имеющих после предыдущей обработки наружный диаметр $30 \pm 0,025$ мм и внутренний по-

сле развертывания — 24 мм. В качестве материалов для исследуемых деталей приняли стали 12Х3Н, 30ХГСА, 45 и сплав ЖС6У. Для обеспечения максимальной достоверности результатов исследований и чистоты экспериментов режимы чистового точения, однократного шлифования и обкатки упрочняющим роликом поверхностей исследуемых деталей, геометрия инструмента и условия обработки назначали такими, чтобы получаемая шероховатость поверхности перед алмазным выглаживанием имела следующие параметры: $Ra = 1,2 \dots 1,6$ мкм; $R_{max} = 4 \dots 5$ мкм; $Sm = 0,4 \dots 0,6$ мкм. Алмазное выглаживание поверхностей исследуемых деталей осуществляли с использованием выпускаемых промышленностью алмазных выглаживателей со стандартными вставками из синтетического алмаза марки АСПМ-3 со сферической рабочей частью радиусом $r = 2$ мм [7], которые устанавливали в резцедержателе токарного станка модели 1И611П. Алмазное выглаживание поверхностей деталей осуществляли на воздухе; при этом были приняты следующие режимы обработки: сила выглаживания $P = 300$ Н, скорость вращения обрабатываемой детали $V_d = 0,5$ м/с ($n_d = 315$ мин⁻¹), скорость возвратно-поступательного перемещения индентора $V_{ин} = 0,04$ м/с, число двойных проходов выглаживателя $n_{дв} = 1 \dots 4$ в зависимости от решаемой задачи.

Состояние материала поверхностного слоя детали оценивали по следующим показателям:

микротвердости H_v , определяемой с помощью портативного ультразвукового микротвердомера МЕТ-У1;

величине и знаку технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, определяемых по методике Н.Н. Давиденкова [8];

толщине упрочненного поверхностного слоя с измененными физико-механическими свойствами ΔH , определяемой с помощью устройства, описанного в работе [9];

показателю дислокационной насыщенности материала поверхностного слоя K_p , определяемому рентгеновским способом [10].

Согласно данным, приведенным в работе [10], между указанными эксплуатационными показателями качества поверхностного слоя детали и ее дислокационной структурой, характеризуемой показателем дислокационной насыщенности K_p , существует достаточно тесная корреляционная связь.

Достоверность полученных результатов исследований, при которых мощность критерия Стьюдента оказалась достаточной [11], достигалась вычислением среднего значения исследуемого показателя по десяти последовательно проведенным при одних и тех же режимах и условиях экспериментов. При этом из всей партии обработанных по тому или иному способу ОУО деталей отбирали такие, у которых параметры шерохова-

тости поверхностей находились в следующих диапазонах: $Ra = 0,4...0,6$ мкм, $R_{max} = 1,5...1,8$ мкм, $Sm = 0,15...0,20$ мкм.

Экспериментальные исследования особенностей проявления ТН при ОУО поверхностей деталей машин и разработку технологических мероприятий по управлению ею на финишных операциях проводили в производственных условиях: на ОАО "Ейский станкостроительный завод", ОАО "Гидропривод" (г. Шахты), ОАО ТАВИА, ОАО "Красный гидропресс", ООО "Завод Югмаш-деталь", ООО "МеталлПромИнвест" (г. Таганрог) с последующей обработкой полученных результатов, их обобщением и анализом в научно-исследовательских лабораториях Южного федерального и Донского государственного технического университетов.

Результаты исследований и их обсуждение

В табл. 1 приведены начальные значения эксплуатационных показателей качества поверхностного слоя деталей H_v , $\sigma_{ост}$, ΔH и Kp , полученные после выполнения соответствующего способа предыдущей обработки, и их значения после алмазного выглаживания. Из их анализа следует, что финишные значения H_v , $\sigma_{ост}$, ΔH и Kp зависят от физико-механических свойств обрабатываемого материала (в первую очередь от предела текучести σ_T), склонности его дислокационной структуры к реструктуризации [10] и принятого способа предыдущей обработки детали. При этом знак технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, полученных при выполнении предыдущей

обработки, не влияет на процесс дислокационной реструктуризации материала поверхностного слоя детали при выполнении операции ОУО.

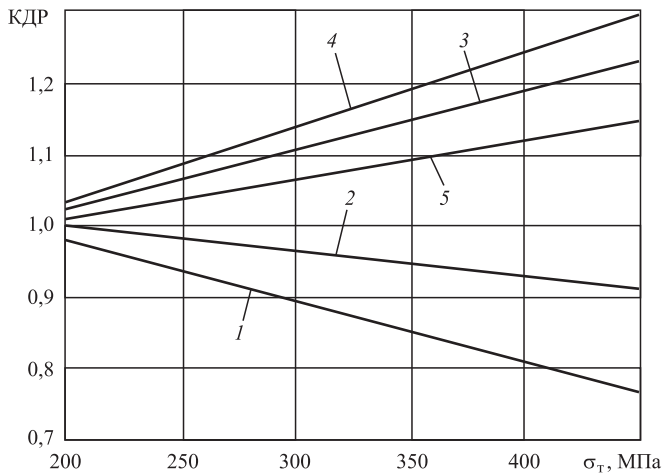
Следовательно, особенности проявления ТН при ОУО поверхностей деталей машин связаны с дислокационным механизмом пластической деформации материала, который может рассматриваться как результат поведения дислокаций, их зарождения, движения, взаимодействия и торможения на различного рода препятствиях, обусловленных структурой и составом обрабатываемых материалов деталей, и проявляется на всех этапах технологического процесса. В результате становится возможным согласование способов предварительной обработки со способом финишной ОУО деталей по склонности их материалов к реструктуризации дислокационной структуры в соответствии с концепцией функционального единства технологического процесса механической обработки деталей [1].

Исследования различных способов ОУО деталей из железуглеродистых сплавов показали, что дислокационная структура материала поверхностного слоя детали после упрочняющей обработки, при которой произошла реструктуризация дислокационной структуры [10], может быть оценена коэффициентом дислокационной реструктуризации КДР, зависящим только от предела текучести материала детали σ_T , полученного на предыдущей операции показателя дислокационной насыщенности $(Kp)_н$ и способа финишной упрочняющей обработки, и не зависит от знака технологических остаточных напряжений $\sigma_{ост}$, полученных на предыдущей операции. КДР вычисляется по формуле $KДР = (Kp)_к / (Kp)_н$.

Таблица 1

Значения показателей качества поверхностного слоя H_v , $\sigma_{ост}$, ΔH и Kp до и после алмазного выглаживания деталей

Материал детали	Способ предыдущей обработки	Значения показателей							
		Начальные				После алмазного выглаживания			
		H_v , ГПа	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔH , мм	$(Kp)_н$	H_v , ГПа	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔH , мм	$(Kp)_к$
Сталь 12ХЗН	Чистовое точение	2,2	260	0,23	70	2,3	250	0,20	80
	Однопроходное шлифование	2,4	300	0,30	90	2,6	280	0,27	95
	Обкатка роликом	2,8	340	0,50	90	2,9	330	0,45	85
Сталь 30ХГСА	Чистовое точение	2,3	280	0,25	80	2,4	270	0,23	85
	Однопроходное шлифование	2,5	310	0,35	90	2,6	295	0,32	100
	Обкатка роликом	2,9	330	0,45	95	3,0	340	0,48	90
Сталь 45	Чистовое точение	2,3	270	0,25	80	2,2	260	0,22	85
	Однопроходное шлифование	2,5	300	0,29	90	2,6	290	0,26	95
	Обкатка роликом	2,7	340	0,48	100	2,9	345	0,31	105
Сплав ЖС6У	Чистовое точение	2,4	280	0,25	90	2,3	275	0,24	95
	Однопроходное шлифование	2,8	340	0,40	105	2,7	330	0,38	110
	Обкатка роликом	3,1	350	0,60	115	3,2	360	0,65	110



Графики зависимости коэффициента дислокационной реструктуризации материала поверхностного слоя детали КДР от предела текучести материала детали σ_t :

1 — алмазное выглаживание; 2 — фрикционная обработка; 3 — обработка ШСУ; 4 — обкатка роликом; 5 — виброобработка закаленными шариками

Таблица 2

Значения КДР для железоуглеродистых сплавов при различных способах упрочняющей обработки поверхностей деталей после предварительного чистового точения

Обрабатываемый материал	Способ финишной обработки	КДР
Сталь 12Х3Н	Алмазное выглаживание	0,96
	Обкатка роликом	1,15
	Фрикционная обработка	0,98
	Обработка ШСУ	1,05
	Виброобработка закаленными шариками	1,07
Сталь 30ХГСА	Алмазное выглаживание	0,91
	Обкатка роликом	1,17
	Фрикционная обработка	0,97
	Обработка ШСУ	1,10
	Виброобработка закаленными шариками	1,06
Сплав ЖС6У	Алмазное выглаживание	0,84
	Обкатка роликом	1,18
	Фрикционная обработка	0,94
	Обработка ШСУ	1,10
	Виброобработка закаленными шариками	1,09
Сплав 45Х25Н20С2	Алмазное выглаживание	0,81
	Обкатка роликом	1,26
	Фрикционная обработка	0,93
	Обработка ШСУ	1,20
	Виброобработка закаленными шариками	1,12

На рисунке приведены зависимости коэффициента дислокационной реструктуризации материала поверхностного слоя детали от предела текучести материала детали, построенные по результатам 250 экспериментов (по 50 экспериментов для каждого способа обработки) для таких наиболее часто применяемых в производственных условиях способов упрочняющей обработки после чистового точения, как алмазное выглаживание, фрикционная обработка, обработка ШСУ, обкатка роликом и виброобработка закаленными шариками. В табл. 2 приведены значения КДР для некоторых железоуглеродистых сплавов при различных способах упрочняющей обработки поверхностей деталей после выполнения предварительного чистового точения на режимах, обеспечивающих заданные параметры шероховатости Ra , $Rmax$ и Sm .

В связи с тем что установлена корреляционная связь между Kp и эксплуатационными показателями качества поверхностного слоя детали H_v , $\sigma_{ост}$, ΔH [10], можно, зная значения $(H_v)_н$, $(\sigma_{ост})_н$, $(\Delta H)_н$, полученные на предыдущей обработке, прогнозировать их значения после финишной упрочняющей обработки $(H_v)_о$, $(\sigma_{ост})_о$, $(\Delta H)_о$, используя следующие зависимости, установленные по результатам экспериментальных исследований: $(H_v)_о = (H_v)_н \text{ КДР}$; $(\sigma_{ост})_о = (\sigma_{ост})_н \text{ КДР}$; $(\Delta H)_о = (\Delta H)_н \text{ КДР}$. В табл. 3 приведены расчетные и фактические значения эксплуатационных показателей качества материала поверхностного слоя в зависимости от способа финишной упрочняющей обработки деталей при условии, что предыдущей обработкой их поверхностей было чистовое точение. Сравнительный анализ представленных в табл. 3 важнейших эксплуатационных показателей качества показывает, что отклонения расчетных значений H_v , $\sigma_{ост}$, ΔH от их фактических значений не превышает 12 %, что вполне допустимо для производственной практики. Наибольшие отклонения показала микротвердость H_v , что, вероятно, связано с большим разбросом экспериментальных данных из-за неоднородности структуры материала поверхностного слоя обрабатываемой детали.

Выводы

Выполненные исследования показали, что ТН при всех способах ОУО проявляется через реструктуризацию материала поверхностного слоя, которая может быть учтена при выборе способа финишной упрочняющей обработки детали. Зная значения показателей качества поверхностного слоя детали, полученные при выполнении предыдущей обработки, и используя коэффициент дислокационной реструктуризации КДР, можно с

Расчетные и фактические значения показателей качества поверхностного слоя в зависимости от способа упрочняющей обработки

Обрабатываемый материал	Способ обработки	Значения показателей					
		Расчетные			Фактические		
		H_v , ГПа	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔH , мм	H_v , ГПа	$\sigma_{ост}$, МПа	ΔH , мм
Сталь 12ХЗН	Алмазное выглаживание	2,11	249,6	0,215	2,3	250	0,20
	Обкатка роликом	2,78	336,4	0,486	2,8	340	0,50
	Обработка ШСУ	2,61	309,5	0,348	2,6	310	0,35
Сталь 30ХГСА	Алмазное выглаживание	2,09	252,5	0,228	2,4	270	0,23
	Обкатка роликом	2,86	327,4	0,453	2,9	330	0,45
	Обработка ШСУ	2,66	315,3	0,359	2,7	320	0,37
Сплав ЖС6У	Алмазное выглаживание	2,02	235,2	0,210	2,3	275	0,24
	Обкатка роликом	2,99	348,6	0,592	3,1	350	0,60
	Обработка ШСУ	2,84	327,5	0,475	2,9	330	0,48
Сплав 45Х25Н20С2	Алмазное выглаживание	0,23	277,1	0,248	2,5	280	0,25
	Обкатка роликом	3,05	344,7	0,657	3,2	365	0,66
	Обработка ШСУ	2,92	336,3	0,489	3,0	340	0,50

достаточно высокой достоверностью прогнозировать эксплуатационные показатели качества поверхностей деталей после выполнения того или иного способа ОУО.

Выявленная зависимость ТН от склонности материала обрабатываемой детали к дислокационной реструктуризации дает возможность не только обоснованно выбирать способы предварительной обработки и ОУО поверхностей деталей, но и управлять ими путем назначения соответствующих режимов и условий выполнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутенко В.И. Научные основы функциональной инженерии поверхностного слоя деталей машин. Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2017. 481 с.
2. Блюменштейн В.Ю. Очаг деформации как основа преобразования механических представлений о формировании поверхностного слоя в технологические // Проблемы качества машин и их конкурентоспособности: Матер. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. 22–23 мая 2008 г. Брянск: Изд-во БГТУ, 2008. С. 158–159.
3. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием // Сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-техн. конф. "Новые материалы в машиностроении". Брянск: Изд-во БГИТА, 2005. Вып. 6. С. 7–12.

4. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования. Исчерпание ресурса пластичности при обработке резанием // Fundamental and Applied technological Problems of Machine Building "Technoqu—2000". International Conference 28–30 Sept., Orgul. Russia. 2000. Pt II. P. 111–114.

5. Кулинский А.Д., Бутенко В.И., Гусакова Л.В. Определение склонности материала к технологической наследственности при отделочно-упрочняющей обработке поверхностей деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 1 (145). С. 9–13.

6. Отделочно-упрочняющая обработка деталей многоконтактным виброударным инструментом / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко и др. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ. 2003. 192 с.

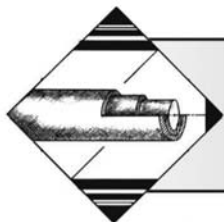
7. Бутенко В.И. Финишная обработка поверхностей деталей: способы, устройства, инструменты. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2016. 219 с.

8. Бутенко В.И., Гусакова Л.В. Повышение эффективности шлифования поверхностей деталей машин. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2012. 176 с.

9. Пат. РФ на полезную модель 76708, МПК G 01 В 7/06, G01В 27/16. Устройство для определения толщины поверхностного токопроводящего слоя изделия / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Л.В. Гусакова. 2008. Бюл. № 27.

10. Бутенко В.И. Формирование и изнашивание поверхностного слоя детали. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999. 193 с.

11. Солонин Н.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1972. 215 с.



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.9.048.6

Ю.П. Анкудимов, И.В. Садовая

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

E-mail: i_sagulenko@mail.ru

Совмещенный процесс нанесения композиционных цинк-алюминиевых покрытий и упрочнения методом ВиМТО

Представлены результаты исследований совмещенного процесса нанесения цинк-алюминиевого покрытия методом вибрационной механотермической обработки (ВиМТО) и упрочнения, позволяющего повысить сопротивление усталости и долговечность стальных деталей при циклическом нагружении.

Ключевые слова: цинк-алюминиевые покрытия, сопротивление усталости, вибрационная обработка.

Results of researches of the combined drawing process zinc-aluminum covering by method of vibration mechanoheat treatment and the hardening allowing to increase the fatigue durability and durability of steel details at cyclic loading are presented in article.

Keywords: zinc-aluminum coverings, fatigue durability, vibration processing.

Введение

Вибрационная обработка как отделочно-упрочняющая технология нашла широкое применение в промышленности благодаря многочисленным исследованиям, проведенным школой профессора А.П. Бабичева. Интерес к этому методу обусловлен его разнообразными технологическими возможностями влияния на параметры качества поверхностного слоя деталей самого разного назначения, изготовленных из различных материалов.

В связи с тем, что основную роль в формировании эксплуатационных свойств деталей играет именно поверхностный слой, актуальными являются исследования в области совершенствования существующих и создания новых финишных технологий, и вибрационных технологий в частности. Эти технологии, являющиеся частью виброволновых технологий, сочетают в себе воздействие на поверхность обрабатываемых деталей механическими ударами твердых гранулированных тел обрабатывающей среды, прохождение акустических волн в материале детали, возникновение различных физико-химических эффектов на границе рабочая технологическая среда — обрабатываемая поверхность.

Перспективным направлением в развитии процесса вибрационной обработки является его дополнение воздействием источниками энергии различной природы, в частности термической.

Вибрационная механотермическая обработка (ВиМТО)

Вибрационная механотермическая обработка характеризуется нагревом вибрирующей среды и детали до температур 150...500 °С и возможностью пластической деформации при указанных температурах. При этих условиях могут осуществляться операции упрочняющей, стабилизирующей, некоторых видов термической обработки и нанесения покрытий. Совмещение механического и теплового воздействий способствует более интенсивному протеканию процессов, приводящих к формированию заданных физико-механических свойств поверхности заготовки и повышает качество наносимых в процессе обработки металлических покрытий. Процесс реализуется на специальных вибрационных станках, имеющих рабочую камеру с нагревательными элементами и теплоизоляцией (рис. 1).

При вибрационной обработке наложение регулируемого температурного поля позволяет воздействовать на заготовки сочетанием низкоча-

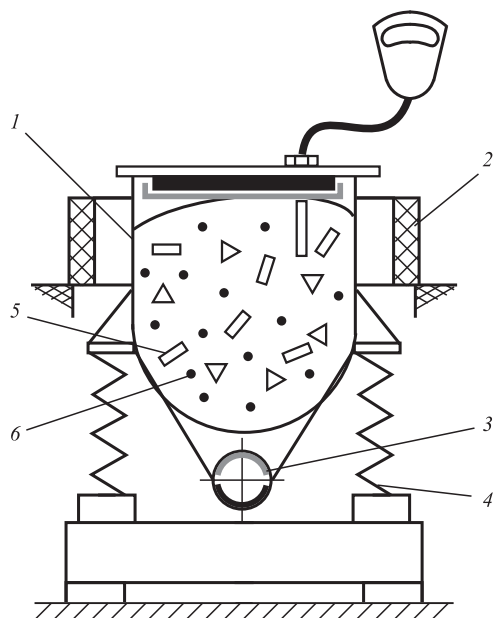


Рис. 1. Схема устройства для ВиМТО:

1 — рабочая камера; 2 — электронагреватель; 3 — вибратор; 4 — пружина; 5 — обрабатываемая деталь; 6 — обрабатывающая среда

стотной вибрации, поверхностно-пластического деформирования и нагрева.

Выполненные к настоящему времени исследования процесса ВиМТО отражают возможность образования этим методом алюминиевых, медных, цинковых, графитовых и других покрытий [1, 2].

Из металлических покрытий наиболее изучен процесс нанесения методом ВиМТО порошков цинка и алюминия на стальную подложку [3, 4].

Совмещенный процесс ВиМТО и цинкования осуществляется в герметично закрытой рабочей камере (без доступа воздуха). В качестве рабочей среды используются стальные и ситаловые шары, дробь и порошок цинка с добавлением в его состав 3...5 % об. хлористого аммония, при разложении которого вследствие нагрева образуется восстановительная атмосфера. Температура процесса 200...300 °С.

Совмещенный процесс ВиМТО и образования алюминиевого покрытия начинается при температуре выше 100 °С. Ниже этой температуры нет условий для выгорания органических веществ и испарения влаги, адсорбированных поверхностью деталей и частицами порошка и, как следствие, соединения порошка с поверхностью не происходит, а он измельчается, претерпевает качественные изменения и превращается в темно-серую пыль оксидных и органических соединений алюминия. Повышение температуры до 120...150 °С приводит к получению на поверхности светлого алюминиевого покрытия, толщина которого зависит от ампли-

тудно-частотных режимов, продолжительности обработки, а также количества порошка и способа его подачи в рабочую камеру. Большая стойкость порошка алюминия к окислению позволяет осуществлять процесс нанесения покрытия без герметизации рабочей камеры и без применения восстановительной или инертной газовой среды.

Образование цинк-алюминиевого покрытия

В работе [5] представлены результаты получения композиционных цинк-алюминиевых покрытий на стали. Отмечается, что данная композиция отличается лучшими эксплуатационными свойствами по сравнению с цинковыми и алюминиевыми покрытиями, причем это относится как к собственно композициям (30 % цинка, 70 % алюминия), так и к двухслойным покрытиям (нижний слой — цинк, верхний — алюминий).

Дальнейшие исследования в этой области показывают, что для образования прочных межзатомных связей между покрытием и основным металлом необходимо обеспечивать значительные контактные давления, превышающие предел текучести более пластичного из материалов в 4 раза. Кроме того, длительность контакта при ударе ограничена необходимой для образования металлических связей и релаксации напряжений величиной τ_{ϕ} .

Первое условие записывается в виде

$$p \geq 4\sigma_{\tau_n}, \quad (1)$$

где p — контактное давление, Па; σ_{τ_n} — предел текучести материала порошка при заданной температуре, Па.

Второе условие:

$$\tau_k \geq \tau_{\phi} = \tau_0 \exp \frac{U_c \sigma_{сд_n}}{k\theta p}, \quad (2)$$

где τ_k — продолжительность контакта при ударе, с; τ_{ϕ} — время формирования единой кристаллической структуры на границе физического контакта; τ_0 — период собственных колебаний атомов в кристаллической решетке, $\tau_0 = 10^{-13}$ с; k — постоянная Больцмана, $k = 8,3$ Дж/(моль·К); θ — температура в зоне контакта, К; $\sigma_{сд_n}$ — сопротивление материала порошка пластическому деформированию при данной температуре, Па; U_c — энергия связи, Дж/моль.

Можно считать, что $\sigma_{сд_n} \approx 3\sigma_{\tau_n} K_{дин}$, где $K_{дин}$ — коэффициент, учитывающий динамический характер нагрузок в зоне контакта.

Анализ данных зависимостей показывает, что помимо природы соединяемых материалов на качество покрытия влияют теплофизические и ме-

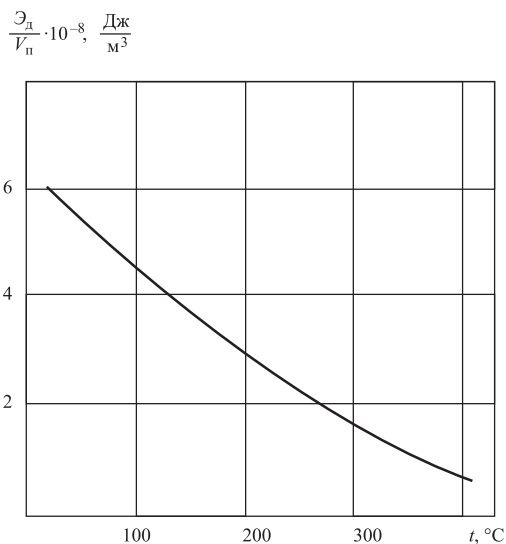


Рис. 2. Зависимость удельной энергии от температуры при нанесении алюминиевого порошка на сталь:

\mathcal{E}_d — энергия ударных тел рабочей среды, необходимая для образования покрытия; V_n — объем частицы порошка материала покрытия

ханические свойства материала порошка, его дисперсность, объемная и локальная температуры в зоне контакта. Последние факторы определяются энергией соударения рабочей среды (шаров) с обрабатываемой поверхностью.

Необходимая для образования покрытия энергия частиц рабочей среды зависит от температуры (рис. 2).

Анализ условий (1) и (2) показывает, что второе условие образования покрытия предполагает большее значение энергии. Удельная энергия рабочей среды \mathcal{E}_d/V_n при ВиМТО, необходимая для соединения частицы порошка алюминия ($\sigma_{Тн} =$

$= 80$ МПа) со стальной поверхностью, из условия (1) составляет $3 \cdot 10^8$ Дж/м³, а из условия (2) эта величина равна $5,8 \cdot 10^8$ Дж/м³. Это объясняется тем, что условие развития в зоне контакта давления $p \geq 4 \sigma_{Тн}$ лучше работает для статического сжатия. При ударных процессах, когда длительность контакта мала, необходимо прикладывать бóльшие давления.

Недостаточный энергетический уровень рабочей среды, определяемый амплитудно-частотными и температурными режимами, приведет к низкому качеству образующегося покрытия — его пористости, плохой адгезии, отслаиванию.

Для повышения энергетических характеристик рабочей среды и создания благоприятных динамических условий процесса разработано устройство для ВиМТО с дополнительным уплотнением рабочей среды (рис. 3).

В начале обработки торцевая стенка 2 рабочей камеры 1 находится в крайнем правом положении, отверстие питателя 6 открыто, а рабочая среда 4 свободно колеблется, получая импульсы от стенок рабочей камеры. Через отверстие питателя в рабочую камеру подается порошок материала покрытия 3, который соединяется с поверхностью деталей под совместным действием теплоты, вырабатываемой электронагревателями 5, и ударов рабочей среды. В конце процесса обработки торцевая стенка рабочей камеры движется к крайнему левому положению, постепенно сжимая рабочую среду и детали. Сжатие загрузки приводит к обкатыванию поверхности деталей частицами рабочей среды с силой, пропорциональной прикладываемому давлению. Это увеличивает деформированность частиц покрытия, равномерность их слоя, уменьшает пористость (рис. 4).

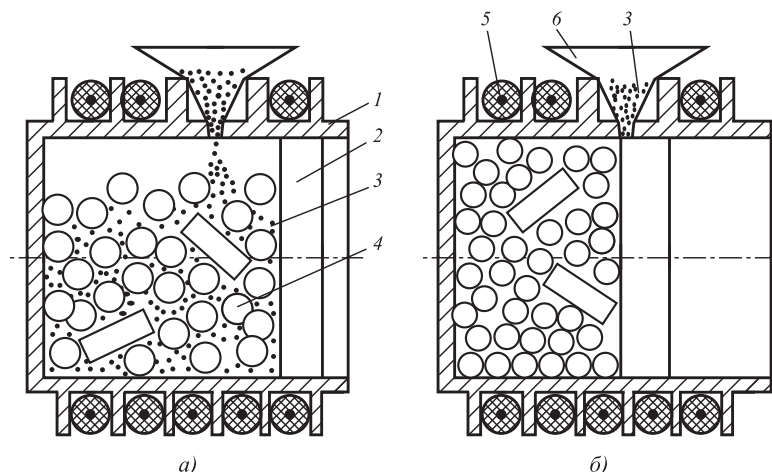


Рис. 3. Схема устройства для нанесения покрытия ВиМТО с уплотнением рабочей среды:

a — начало процесса; *б* — конец процесса

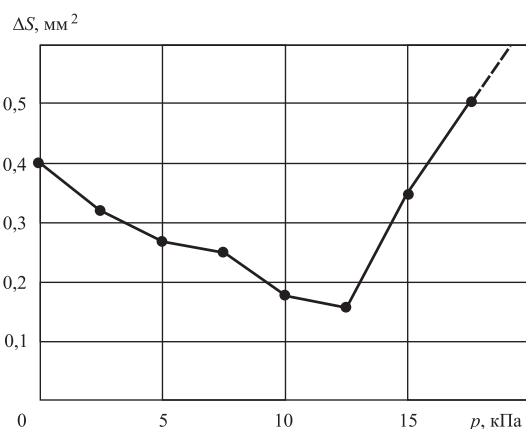


Рис. 4. Влияние рабочей среды на зернистость покрытия:

ΔS — суммарная площадь сквозных пор покрытия на 1 см² поверхности

Пластическая деформация затрагивает не только материал покрытия, но и приповерхностный слой основного материала, распространяясь на глубину до 0,1 мм. Это подтверждается замерами микротвердости, а также ростом зерен феррита после рекристаллизационного отжига.

Сопротивление усталости

В связи с тем, что традиционные методы нанесения цинковых и алюминиевых покрытий, как правило, отрицательно влияют на прочностные свойства поверхностного слоя деталей, разупрочняя его вследствие высоких температур или новодороживания, были проведены исследования сопротивления усталости образцов с их покрытием в процесс ВиМТО. На рис. 5 представлены графики усталостной прочности стали 40Х при испытании образцов по схеме консольного изгиба с вращением, которые показывают, что наибольшим пределом выносливости — 380 МПа обладают образцы, прошедшие упрочнение при температуре 160...170 °С. Вибрационная механотермическая обработка при температуре 20 °С также повышает предел выносливости образцов ($\sigma_{-1} = 317$ МПа) по сравнению с исходным состоянием — после отжига ($\sigma_{-1} = 300$ МПа).

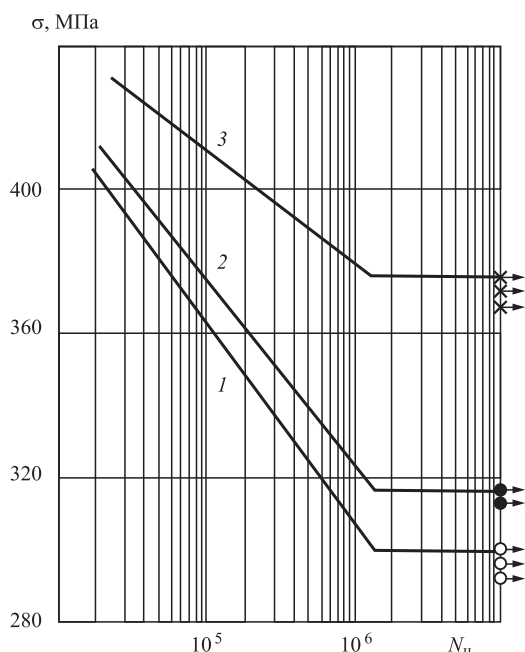


Рис. 5. Сопротивление усталости образцов из стали 40Х: 1 — исходные образцы; 2 — виброупрочненные при температуре 20 °С; 3 — виброупрочненные ВиМТО при температуре 160...170 °С; $N_{ц}$ — число циклов нагружения до разрушения; σ — напряжение нагружения

Дальнейшие исследования показали, что качественное и количественное изменение сопротивления усталости стали после вибрационной обработки в интервале температур 20...350 °С зависит от ее структурного состояния.

Заключение

Механотермическое воздействие на поверхность стальных деталей в процессе ВиМТО обеспечивает комплексное изменение ее свойств.

Установлено, что при достижении требуемого минимального уровня воздействующей энергии возникает соединение порошкообразных цинка и алюминия со стальной поверхностью и образуется цинк-алюминиевое покрытие. При этом повысить энергию можно за счет как механических факторов (амплитудно-частотных режимов, уплотнения рабочей обрабатываемой среды), так и тепловых (объемной и локальной температур в зоне контакта).

Основным преимуществом нанесения цинк-алюминиевых покрытий методом ВиМТО является упрочнение основного материала обрабатываемой поверхности.

Модифицированный поверхностный слой обладает повышенными прочностными свойствами — сопротивлением усталости и долговечностью работы при циклическом нагружении.

Представленные результаты могут представлять интерес для специалистов, работающих в области антикоррозионной защиты изделий, а также работников промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д.: Изд. центр ДГТУ, 2008. 694 с.
2. **Complex change in superficial layer properties of specimen obtained by metallurgical powder under vibration process method / K. Hamouda, T. Sayah, J.P. Ankudimov, P.J. Ankudimov, A.P. Babichev et al.** // Defect and Diffusion Forum. 2010. Vol. 297—301. P. 1103—1108.
3. **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.
4. **Бабичев А.П., Анкудимов Ю.П., Садовая И.В.** Образование модифицированного слоя на стальной поверхности при вибрационной механотермической обработке // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 52—56.
5. **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.



УДК 621.9.048.6

А.И. Азарова

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

E-mail: azarovaai@mail.ru

Алгоритмизация процесса оптимизации многоступенчатой обработки деталей свободными абразивами

Рассматривается проблема оптимизации параметров обработки свободными абразивами.

Ключевые слова: оптимизация, автоматизация, свободные абразивы.

The problem of optimization of the parameters of the free abrasives processing is considered.

Keywords: optimization, automation, free abrasives.

Важнейшей задачей современного машиностроения является создание, освоение и внедрение в производство новой высокоэффективной техники и технологии, обеспечивающей рост производительности труда, снижение материалоемкости и энергоемкости, улучшение качества и эксплуатационных характеристик выпускаемой продукции, повышение ее конкурентоспособности в условиях рынка. Актуальность этой задачи связана с тем, что в условиях возрастания трудоемкости и сложности конструкторских и технологических работ традиционные методы проектирования технологических процессов не могут обеспечить своевременную и качественную технологическую подготовку производства новых изделий. Сократить сроки и стоимость этих работ возможно с помощью систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП).

При выполнении отделочных операций рост производительности труда с одновременным улучшением качества продукции обеспечивает обработка свободными абразивами. Широкие технологические возможности методов обработки свободными абразивами при обработке деталей разной конфигурации из различных материалов, высокие технико-экономические показатели, а также возможность механизации и автоматизации позволяют им занимать важное место среди отделочных операций.

При решении сложных технологических задач в области отделочной обработки, когда необходимо получить высокое качество обрабатываемой

поверхности детали при грубой исходной шероховатости, применяется многоступенчатая обработка свободными абразивами. Это позволяет в ряде случаев существенно сократить время обработки деталей, т. е. повысить ее производительность, обеспечивает требуемую точность и качество деталей, позволяет улучшить их эксплуатационные характеристики. Зачастую многоступенчатая обработка свободными абразивами является единственной возможностью получить заданную шероховатость поверхности.

В настоящее время разработано несколько методик проектирования многоступенчатых технологических процессов размерной обработки деталей. Одна из них, основанная на применении метода последовательных уточнений, сформулирована в работе [1]. В ней в качестве показателя качества (ПК) используется допуск на обрабатываемую поверхность, а уточнение ϵ определяется как отношение допуска заготовки к допуску детали.

Поскольку обработка свободными абразивами является безразмерной, т. е. не обеспечивает определенный размер обрабатываемой детали, нами предложено в качестве ПК использовать среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности Ra . Однако в метрологии не установлены допуски на параметры шероховатости поверхности. Поэтому в качестве полей допусков нами предложено использовать значение интервалов Ra обрабатываемой поверхности по классам и подклассам ГОСТ 2789—73. Это позво-

ляет однозначно определить величину уточнений ПК в соответствии с предлагаемым алгоритмом:

1. Выбираются метод обработки (МО) и технологическая система (ТС), которые обеспечивают достижение заданного ПК поверхности детали: $\omega Ra_{дет} \leq TRa^{зад}$, где $\omega Ra_{дет}$ — поле рассеяния параметра шероховатости детали $Ra_{дет}$; $TRa^{зад}$ — допуск заданного параметра шероховатости детали. Выбранная таким образом ТС будет работать последней, и ей присваивается номер N .

2. По формуле $\omega Ra^{исхN} = TRa^{зад\varepsilon_{ТС}}$, где $\varepsilon_{ТС}$ — уточнение, максимально достигаемое в ТС, определяется ориентировочное значение исходного параметра шероховатости поверхности для последней, N -й ТС $Ra^{исхN}$. Если $\omega Ra^{исхN} < \omega Ra$, где Ra — параметр шероховатости заготовки, то необходима многоступенчатая обработка.

3. Определяется параметр исходной шероховатости поверхности N -й ступени, которая одновременно является результатом обработки на $N - 1$ -й ступени, т. е. $\omega Ra^{исхN} = \omega Ra^{задN-1}$. Таким образом, выбираются МО и ТС, которые могут обеспечивать достижение шероховатости поверхности, удовлетворяющей условию $\omega Ra^{исхN} \geq \omega Ra^{задN-1}$.

4. Вычисляется ориентировочное значение шероховатости поверхности детали, являющееся условно исходным для $N - 1$ -й ступени и достигаемое для $N - 2$ -й:

$$\omega Ra^{детN-2} = \omega Ra^{исхN-1} = TRa^{N-1\varepsilon_{ТС}^{N-1}}.$$

Если

$$\omega Ra^{исхN-1} \geq \omega Ra^{исх}, \quad (1)$$

то весь процесс достижения заданной шероховатости поверхности детали может быть реализован двумя последовательно работающими ТС, т. е. $N = 2$.

Если же условие (1) не выполняется, то выбирается еще одна ТС, и так до тех пор, пока выполнение условия типа (1) не будет достигнуто.

При обработке свободными абразивами каждой ступени обработки может соответствовать несколько уточнений ε и каждому из них — набор МО и ТС, обеспечивающих в конечном итоге заданный параметр шероховатости поверхности $Ra^{зад}$.

Перебор всех уточнений ε и соответствующих им МО и ТС представляет собой трудоемкую задачу, которая может быть решена оптимизационными методами.

Каждому сочетанию технологических параметров обработки соответствует функция $Ra(t)$, имеющая граничные значения, характеризующие технологические возможности обработки детали в заданных условиях. Известно, что эта функция имеет экспоненциальный характер:

$$Ra(t) = (Ra^{исх} - Ra_{уст})e^{-k_{и}t} + Ra_{уст}, \quad (2)$$

где $Ra_{уст}$ — среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости; $k_{и}$ — коэффициент интенсивности изменения шероховатости; t — время обработки.

Для однозначного определения коэффициента $k_{и}$ нами предложено понятие условной исходной шероховатости ($Ra^{исх ус}$), которое позволяет более точно определить время обработки, используя строго определенную часть экспоненты в интервале от $Ra^{исх}$ до $Ra_{уст}$.

При проектировании процесса многоступенчатой обработки необходимо использовать весьма точные зависимости для расчета $k_{и}$ и времени обработки t . Оценка шероховатости в работах [2—4] базировалась на том, что изменение микронеровностей на обрабатываемой поверхности обуславливается процессом взаимодействия абразивных частиц с поверхностью детали, при этом использовалась плоская геометрическая схема взаимодействия, которая не отражала объемный характер выступов шероховатости поверхности.

Анализ зависимостей для расчета параметра шероховатости и времени достижения заданной шероховатости при обработке свободными абразивами показал, что при решении задач контактного взаимодействия необходимо пользоваться ее трехмерным представлением — микро топографией шероховатости поверхности, описанной в работах [5—7]. В них получены зависимости для расчета среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности Ra , относительной опорной площади поверхности η_u , объема шероховатой поверхности V_u , расположенного выше уровня u , числа "выбросов" поверхности N_u за уровень u .

Пользуясь микро топографической моделью шероховатости и представляя пятно контакта абразивной частицы с поверхностью детали в виде эллипса при глубине внедрения частицы h_{max} и среднем угле взаимодействия частицы с обрабатываемой поверхностью β объем удаляемого металла без учета коэффициента стружкообразования можно определить как объем "выбросов" над пятном контакта.

Ввиду трудоемкости использования трехмерной модели шероховатости поверхности, полученной при анализе, с учетом малого числа "выбросов" над пятном контакта предложена упрощенная зависимость для инженерных расчетов [4]

$$V_{ед} = 15,5k_c \frac{R^3 k_3}{k_s^{3/4}} \left(k_m V_0 \sin \beta \sqrt{\frac{\rho_ч}{3c_{\sigma T}}} \right)^{5/2} (\text{ctg} \beta - f), \quad (3)$$

где $V_{ед}$ — объем металла, удаляемый при единичном взаимодействии абразивной частицы с обрабатываемой поверхностью; k_c — коэффициент стружкообразования; R — характерный размер абразивной частицы; k_3 — коэффициент, учитывающий влияние зернистости на площадь контакта; k_s — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости обрабатываемой поверхности; k_m — коэффициент, учитывающий влияние соседних частиц; V_0 — скорость частицы; ρ_d — плотность материала частицы; c — коэффициент для оценки несущей способности контактной поверхности; σ_T — предел текучести материала детали; f — коэффициент пропорциональности.

Величиной, определяющей k_s , предложено считать относительную опорную длину профиля на уровне h_{max} .

Рассмотрены особенности взаимодействия свободных абразивов и детали при различных методах обработки.

Для разработки методики расчета съема металла Q в известную зависимость

$$Q = N_p V_{ед} \rho_d, \quad (4)$$

где N_p — число взаимодействий, приводящих к микрорезанию; ρ_d — плотность материала детали, введем коэффициент $k_{пр}^0$, учитывающий микротопологию шероховатости поверхности,

$$k_{пр}^0 = \frac{V_{проф}}{V_{слоя}}, \quad (5)$$

где $V_{проф}$ — объем действительной поверхности выше заданного уровня; $V_{слоя}$ — условный объем сплошного слоя поверхности. Тогда

$$Q = N_p V_{ед} \rho_d k_{пр}^0. \quad (6)$$

Подставляя в формулу (6) выражение для N_p , методика определения которого предложена в [4], после преобразований получим

$$Q = P_1 P_2 f_v t V_{ед} \rho_d k_{пр}^0 \frac{S_{слоя}}{4R^2}, \quad (7)$$

где P_1 — геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за один цикл воздействия абразивных частиц; P_2 — вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие приведет к микрорезанию; f_v — частота циклов воздействия абразивных частиц на поверхность детали.

Для достижения установившейся шероховатости при обработке свободными абразивами необходимо полностью удалить профиль исходной шероховатости. При этом объем металла, удален-

ного над площадью квадрата упаковки, с учетом микротопографической модели можно рассчитать с помощью зависимости

$$W = k_{пр}^0 \cdot 2Ra^{исх} \cdot 4R^2. \quad (8)$$

После преобразований получим выражение для времени достижения установившейся шероховатости

$$t_{Ra_{уст}} = \frac{8k_{пр}^0 Ra^{исх} R^2}{P_1 P_2 f_v V_{ед}}. \quad (9)$$

Время обработки, необходимое для изменения шероховатости от исходной до заданной, можно определить из зависимости (2):

$$t = -\frac{1}{k_i} \ln \left(\frac{Ra^{зад} - Ra_{уст}}{Ra^{исх} - Ra_{уст}} \right). \quad (10)$$

При этом коэффициент интенсивности определяется зависимостью

$$k_i = \frac{P_1 P_2 f_v V}{8k_{пр}^0 Ra^{исх} R^2} \ln \left(\frac{Ra^{зад} - Ra_{уст}}{Ra^{исх} - Ra_{уст}} \right).$$

Параметры установившейся шероховатости можно определить по методике, предложенной в работе [4], используя новые зависимости для определения параметров единичного соударения.

Для комплексной проверки адекватности теоретической модели удаления металла с поверхности детали провели сравнение результатов теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований при вибрационной обработке. При этом установили, что теоретическая модель процесса удаления металла правильно отражает влияние режимов обработки и характеристик абразивных гранул на производительность обработки и позволяет достаточно точно (погрешность в пределах 20 %) прогнозировать удаление металла с поверхности детали.

Для проверки используемых выше гипотез об изменении шероховатости поверхности провели серию экспериментов на специальных образцах из различных материалов в нескольких рабочих средах.

Провели комплексные исследования изменения параметра шероховатости поверхности Ra , среднего угла наклона сторон неровностей профиля θ , опорных кривых, нормированных корреляционных функций профиля шероховатости. Образцы имели по три участка с различной исходной шероховатостью поверхности.

Установили, что теоретическая модель формирования профиля установившейся шероховатости правильно отражает влияние режимов обработки, характеристик рабочих сред и механических свойств материала детали на высотные параметры профиля и параметры установившейся шероховатости. Теоретическая модель позволяет достаточно точно (погрешность в пределах 25 %) рассчитать среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости.

В связи с тем, что получение характеристик трехмерной шероховатости поверхности путем профилографирования — процесс достаточно трудоемкий и требует в каждом случае построения микрокарты шероховатости поверхности, для которой необходимо снятие нескольких десятков профилограмм в продольном и поперечном направлениях, решалась задача оценки объема, лежащего выше произвольного уровня профиля p , и, следовательно, площади сечения профиля шероховатости поверхности на этом уровне по результатам 1—2 профилографирований.

В связи с изложенным была разработана методика проведения машинного эксперимента. Его задача сводится к определению объема металла, лежащего выше заданного уровня p .

Полагая, что профилограмма снимается на достаточной базовой длине и дает представительные оценки высотных и шаговых параметров, устанавливается связь между опорной площадью $S(u)$ и объемом металла $V(u)$ выше уровня u и результатами нескольких профилографирований.

В результате исследований установили, что для оценки площадей эллипсов в наибольшей степени подходит бета-распределение. Анализ результатов исследований позволил определить возможность вычисления опорных площадей на заданном уровне по значениям опорной длины и оценки объема металла, находящегося выше заданного уровня, по результатам нескольких профилографирований. При этом оценка опорных площадей и лежащих выше заданного уровня объемов дается с достаточной для практических расчетов точностью. Дисперсия оценки составляет для изотропных поверхностей 5...10 %, для анизотропных поверхностей — 30...40 %;

Провели комплексные экспериментальные исследования по определению коэффициента интенсивности при различных условиях обработки. Для определения $k_{\text{и}}$ по экспериментальным значениям $Ra(t)$ разработали программу для ЭВМ, аппроксимирующую эти функции методами Чебышева и наименьших квадратов.

Установили, что расчетные значения $k_{\text{и}}$ имеют достаточно хорошую сходимость с результатами экспериментальных исследований.

На основании результатов исследований и теоретических расчетов сформировали банк данных $k_{\text{и}}$ для различных методов обработки свободными абразивами, предназначенный для использования в САПР ТП многоступенчатой обработки.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработали методику оптимизации многоступенчатых технологических процессов обработки свободными абразивами. В качестве критерия оптимизации выбрали минимальное время обработки. В качестве ограничений использовали заданную шероховатость поверхности либо необходимый радиус скругления острой кромки. Таким образом, при выборе и анализе вариантов различных сочетаний МО, их технологических режимов и характеристик рабочих сред будут приниматься во внимание лишь такие проектные решения, которые удовлетворяют заданным технологическим условиям. Оптимальным будет решение, при котором общая производительность обработки будет максимальной, несмотря на дополнительные затраты времени при переходе от одной ступени к другой.

Сложность проектирования технологических процессов, многовариантность технологических решений, большая трудоемкость определения оптимального варианта обуславливают необходимость использования САПР ТП.

Разработанная САПР ТП содержит следующие основные блоки: модуль заставки и защиты, главное меню, блок выбора метода обработки, блок расчета оптимальных технологических параметров обработки, включая и расчет многоступенчатых технологических процессов, блок выбора моделей оборудования с расчетом его потребного количества, рабочих камер и сред, экономический блок, осуществляющий расчет материальных затрат на реализацию выбранного варианта технологического процесса, сервисный блок, осуществляющий формирование бланков технологической документации, работу по корректировке и пополнению баз данных, работу с базами в режиме просмотра в целях получения справочной информации и т. д.

В рассматриваемой системе САПР ТП наиболее важным, ключевым, блоком является расчетный блок. Именно в расчетном блоке определяются основные технологические параметры обработки: режимы обработки и время, необходимое для достижения заданных показателей качества.

В качестве исходных данных, необходимых для начала расчета, вводятся значения параметров исходной и заданной шероховатости поверхности, предел текучести материала и предполагаемый метод обработки. Затем согласно условию $\omega Ra_{дет} \leq TRa^{зад}$ подбираются технологические параметры (амплитуда колебаний A и частота колебаний $\omega_{р.к}$ рабочей камеры, зернистость абразивной среды N_3), обеспечивающие выполнение данного условия обработки. Подбор проводится с использованием исходной базы данных (IBD), где хранится информация о возможных сочетаниях параметров обработки (A , $\omega_{р.к}$, N_3), а также соответствующие им значения параметра установившейся шероховатости. При выборке из исходной базы данных программа формирует рабочую базу данных (RBD), куда вносятся сочетания технологических параметров, удовлетворяющих условию обработки. В дальнейшем программа работает именно с рабочей базой данных. Если условию $\omega Ra_{дет} \leq TRa^{зад}$ не соответствует ни одно сочетание параметров, то обработка невозможна и программа выдает соответствующее сообщение.

Из всех выбранных сочетаний параметров программой отбираются только те варианты, при которых выполняется условие $\omega Ra^{исх} \leq TRa^{исх ус}$, т. е. необходимо чтобы параметр заданной шероховатости поверхности детали был меньше параметра условной исходной шероховатости, определяемой технологическими возможностями конкретного сочетания метода, режимов обработки и зернистости абразивной среды. Для выбранных вариантов рассчитывается время обработки. Рассчитанное время является временем одноступенчатой обработки.

Когда условию $\omega Ra^{исх} \leq TRa^{исх ус}$ не соответствует ни одно сочетание параметров, т. е. ни одна ТС не может выполнить обработку за одну ступень, очевидна необходимость многоступенчатой обработки. Однако расчет многоступенчатого варианта технологического процесса ведется для всех сочетаний значений параметров, записанных в рабочую базу данных, так как возможность осуществления одноступенчатого процесса не отра-

жает оптимальность выбора. Из исходной базы данных по условиям $k_i^N < k_i^{N-1}$, $\omega Ra_{уст}^{N-1} \leq TRa^{исх ус}$, $\omega Ra_{уст}^{N-1} > \omega Ra_{уст}^N$ выбираются сочетания значений технологических параметров для $N-1$ -й ступени. Вновь выбранные сочетания значений A , $\omega_{р.к}$, N_3 проверяются по условию $\omega Ra^{исх} \leq TRa^{исх ус}$. Если условие выполняется, то для выбранных сочетаний значений рассчитывается время обработки с учетом вспомогательного времени. В этом случае обработка будет двухступенчатой. Если же условие $\omega Ra^{исх} \leq TRa^{исх ус}$ не выполняется, то цикл подбора сочетаний параметров обработки будет продолжаться до его выполнения. Отсутствие выбора параметров обработки предыдущей ступени для всех записей рабочей базы по приведенным выше условиям является окончанием работы блока.

Описанный блок САПР ТП доведен до состояния алгоритмов и программ, позволяющих вести технологическое проектирование.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мельников А.С. Технология машиностроения: основы достижения точности детали. Ростов н/Д., ДГТУ, 1995. 128 с.
2. Бабичев А.П., Мишняков Н.Т. Теоретико-вероятностная модель процесса виброабразивной обработки плоской детали в случае эллиптических пятен контакта / Прогрессивная отделочно-упрочняющая технология: межвуз. сб. Ростов н/Д., 1981. С. 8—10.
3. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1989. 320 с.
4. Тамаркин М.А. Оптимизация технологических параметров процесса вибрационной обработки // Совершенствование процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей: межвуз. сб. Ростов н/Д., 1986. С. 24—28.
5. Лукьянов В.С., Рудзит Я.А. Параметры шероховатости поверхности. М.: Изд-во стандартов, 1979. 162 с.
6. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 214 с.
7. Хусу А.П., Витгенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 343 с.

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 04.12.2017 г. Подписано в печать 06.02.18 г. Формат 60×88 1/8.

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

Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

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

Сайт: www.aov.ru