

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

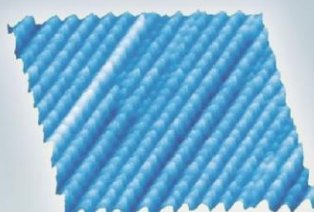
ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

7(145)
2023

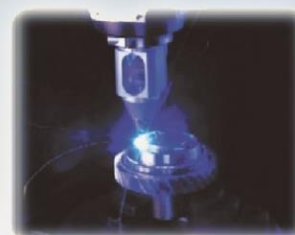
**ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ
И КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



**НАНОТЕХНОЛОГИИ
В МАШИНОСТРОЕНИИ**



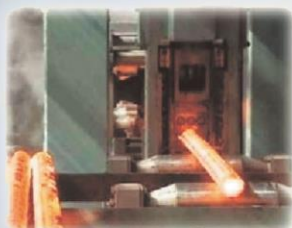
**ЛАЗЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**



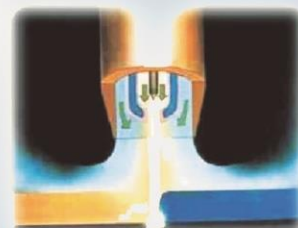
**ТЕХНОЛОГИИ
ПРОТОТИПИРОВАНИЯ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗАГОТОВИТЕЛЬНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВАРОЧНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ**



**ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ
ЗАГОТОВОК НА СТАНКАХ С ЧПУ
И ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**



НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

№ 7 (145)

2023

Издается с июля 2011 г.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит при содействии Ассоциации технологов-машиностроителей

Главный редактор

Заслуженный деятель науки и техники РФ
д.т.н., проф. СУСЛОВ А.Г. (г. Москва)

Зам. главного редактора

д.т.н., доцент ШАЛЫГИН М.Г. (г. Брянск)

Председатель редакционного совета

д.т.н., чл.-корр. РАН ПРИХОДЬКО В.М.
(г. Москва)

Зам. председателя редакционного совета

д.т.н., проф. ГРИГОРЬЯНЦ А.Г. (г. Москва)

Редакционный совет:

д.т.н., проф. БАЗРОВ Б.М. (г. Москва)

д.т.н., проф. БУЯНОВСКИЙ И.А. (г. Москва)

д.н., доктор инженер ВАЛЬДЕНМАЙЕР Т.

(г. Штутгарт, Германия)

д.т.н., проф. ГУСЕЙНОВ Г.А. (г. Баку,
Азербайджан)

д.т.н., проф. ДЁМИН В.А. (г. Москва)

д.т.н., проф. КАВАЛЕК А.А. (г. Ченстохова,
Польша)

д.н., магистр наук КРЕХЕЛЬ Р. (г. Капушан,
Словакия)

д.т.н., проф. КУКСЁНОВА Л.И. (г. Москва)

д.т.н., доц. ЛАРИН С.Н. (г. Тула)

д.т.н., акад. РАН ЛЫСАК В.И. (г. Волгоград)

д.т.н., проф. МАКАРОВ В.Ф. (г. Пермь)

д.т.н., проф. МАЛИКОВ А.А. (г. Тула)

д.т.н., проф. МИХАЙЛОВ А.Н. (г. Донецк)

д.т.н., проф., акад. НАН Беларуси

МЫШКИН Н.К., (г. Гомель, Беларусь)

д.т.н., проф. ОВЧИННИКОВ В.В. (г. Москва)

д.т.н., проф. ПЕТРОВА Л.Г. (г. Москва)

д.т.н., проф. СМОЛЕНЦЕВ В.П. (г. Воронеж)

д.т.н., проф. ФЕДОНИН О.Н. (г. Брянск)

д.т.н., проф. ХЕЙФЕЦ М.Л. (г. Минск, Беларусь)

д.т.н., проф. ЧИГИРИНСКИЙ Ю.Л. (г. Волгоград)

к.т.н., доц. ШОХИЁН А.Н. (г. Куляб, Таджикистан)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

Журнал распространяется по подписке,
которую можно оформить по интернет-
каталогу "Пресса по подписке".

Подписной индекс: **Э79195**.

Тел. редакции: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: editntm@yandex.ru

<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

Журнал зарегистрирован Федеральной
службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
26 апреля 2019 года
рег. номер ПИ № **ФС77-75524**

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Чудин В.Н. Технологические режимы раздачи и обжима при локальном
нагреве. 3

ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Бочкарев П.Ю. Развитие технологического обеспечения методов
обработки с использованием несвязанного абразива 8

Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Николаев А.Ю., Тимофеев С.А.
Исследование отклонений формы изделий из быстрорежущей
стали при точении фрезерованием на станках с ЧПУ. 15

ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ И КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ

Петрова Л.Г., Вдовин В.М., Сергеева А.С. Модифицирование
поверхности быстрорежущего инструмента совместным
насыщением вольфрамом и азотом. 24

КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ, ТРЕНИЕ И ИЗНОС ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Бреки А.Д. Аналитическое представление зависимостей силы трения от
температуры при фрикционном взаимодействии пространственно
структурированных каучуков со стальной поверхностью. 33

НАУКОЁМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕМОНТЕ, ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ И НАНЕСЕНИИ ПОКРЫТИЙ

Пряхин Е.И., Трошина Е.Ю. Сравнительный анализ качества
маркировки полимерной и кремнийорганической пленки при
обработке волоконным наносекундным лазером 39

*Журнал входит в перечень изданий ВАК, утвержденных для соискателей
ученых степеней по научным специальностям: 2.5.3 - Трение и износ в
машинах; 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки; 2.5.6 - Технология машиностроения; 2.5.7 -
Технология и машины обработки давлением; 2.5.8 - Сварка, родственные
процессы и технологии; 2.6.17 - Материаловедение (по отраслям)
(технические науки).*

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов,
публикуемых в журнале «Научно-технические технологии в машиностроении»,
допускаются со ссылкой на источник информации и только
с разрешения редакции.

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN MECHANICAL ENGINEERING

№ 7 (145)

2023

Publishes from July 2011

MONTHLY SCIENTIFIC TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

Comes out with assistance of Engineering Technologists Association

Editor-in-chief

Honoured Scientist and Engineer of Russia
d.en.s., prof. SUSLOV A.G. (Moscow)

Deputy chief editor

d.en.s., assoc. prof. SHALYGIN M.G. (Bryansk)

Chairman of Editorial Committee

m.-corr. RAS PRIKHODKO V.M. (Moscow)

Chairman Assistant

d.en.s., prof. GRIGORYANTS A.G. (Moscow)

Editorial Committee:

d.en.s., prof. BAZROV B.M. (Moscow)

d.en.s., prof. BUYANOVSKII I.A. (Moscow)

PhD., Dr. Engineer WALDENMAIER T.
(Stuttgart, Germany)

d.en.s., prof. HUSEYNOV H.A. (Baku,
Azerbaijan)

d.en.s., prof. DEMIN V. A. (Moscow)

d.en.s., prof. KAWALEK A.A. (Czestochowa,
Poland)

PhD., Msc. KREHEL R. (Kapusany, Slovakia)

d.en.s., prof. KUKSENOVA L.I. (Moscow)

d.en.s., assoc. prof. LARIN S.N. (Tula)

d.en.s., Acad. RASLYSAK V.I. (Volgograd)

d.en.s., prof. MAKAROV V.F. (Perm)

d.en.s., prof. MALIKOV A.A. (Tula)

d.en.s., prof. MIKHAILOV A.N. (Donetsk)

d.en.s., prof. MYSHKIN N.K. Acad. of NAS
Belarus (Gomel, Belarus)

d.en.s., prof. OVCHINNIKOV V.V. (Moscow)

d.en.s., prof. PETROVA L.G. (Moscow)

d.en.s., prof. SMOLENTSEV V.P. (Voronezh)

d.en.s., prof. FEDONIN O.N. (Bryansk)

d.en.s., prof. KHEIFETZ M.L. (Minsk, Belarus)

d.en.s., prof. TCHIGIR INSKY Ju.L. (Volgograd)

c.en.s., assoc. prof. SHOHYON A.N. (Kulob,
Tajikistan)

DOI:10.30987/issn.2223-4608

The magazine is distributed by subscription,
which can be issued through the online catalog
"Subscription Press".
Subscription index: **379195**.

Editorial office Ph: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.
E-mail: editntm@yandex.ru
<https://www.tu-bryansk.ru/info/zhurnaly>

**The journal is registered by the Federal
service for supervision of communications,
information technologies and mass
communications (Roskomnadzor)
26.04.2019 registration number
print publication № FS77-75524**

CONTENTS

TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF METAL PROCESSING BY PRESSURE

Chudin V.N. Technological modes of expansion and pressing under
selective heating 3

TECHNOLOGIES OF MECHANICAL PROCESSING OF WORKPIECES

Bockarev P.Yu. The development of engineering support for loose abrasive
working methods 8

Matlygin G.V., Savilov A.V., Nikolaev A.Yu. Timofeev S.A. Investigation of form
deviations of high-speed steel (HSS) products under turning-milling operation using
automatically programmed tools 15

TECHNOLOGIES OF ELECTROMACHINING AND COMBINED PROCESSING

Petrova L.G., Vdovin V.M., Sergeeva A.S. Modification of a high-speed cutting
tool surface by combined tungsten steel and nitrogen saturation. 24

SURFACE LAYER QUALITY, CONTACT INTERACTION, FRICTION AND WEAR OF MACHINE PARTS

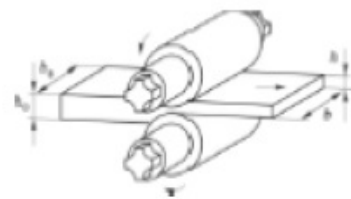
Breki A.D. Analytic representation of the friction force -temperature relations
under the conditions of frictional interaction of spatially-ordered rubbers
having steel surface 33

SCIENCE INTENSIVE TECHNOLOGIES IN COATING, PARTS REPAIR AND RECOVERY

Pryakhin E.I., Troshina E.Y. Comparative test for polymer and organosilicon
film quality marking in nanosecond fiber laser processing 39

The journal is included in the list of publications of the HAC approved for applicants of
academic degrees in scientific specialties: 2.5.3 - Friction and wear in machines;
2.5.5 - Technology and equipment of mechanical and physico-technical processing;
2.5.6 - Mechanical engineering technology; 2.5.7 - Technology and pressure treatment
machines; 2.5.8 - Welding, related processes and technologies; 2.6.17 - Materials
Science (by industry) (technical sciences).

**Reprint is possible only with the reference to the journal
«Science intensive technologies in mechanical engineering»**



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №7 (145). С.3-7.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 3-7.

Научная статья

УДК 621.983:539.374

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-3-7

Технологические режимы раздачи и обжима при локальном нагреве

Владимир Николаевич Чудин, д.т.н.

МИИТ, г. Москва, Россия

vladimir-chudin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8757-9411>

Аннотация. Рассмотрены процессы раздачи и обжима с нагревом заготовок в условиях вязко-пластичности. Получено соотношение для расчета напряжений сил операций, повреждаемости материала заготовок. В отраслях специального машиностроения используются высокопрочные сплавы на основе титана и алюминия. Данные сплавы имеют анизотропию механических свойств. Обработка этих сплавов затруднительна. По этой причине операцию обработки давлением производят с нагревом зоны деформаций. Материал в зоне деформаций проявляет вязкие свойства. Происходит одновременно деформационное упрочнение и разупрочнение (релаксация напряжений) материала, причём, разупрочнение тем больше, чем меньше скорость деформирования. В этой связи принято уравнение состояния, отображающее эти процессы. Фактор упрочнения и разупрочнения создает условия для снижения силового режима операций обработки давлением и повышение степени формоизменения исходной заготовки. Учёт релаксации напряжений с помощью аналитических зависимостей необходим на этапе разработки процессов раздачи и обжима. Расчетные соотношения записаны в функции скорости этих операций. При этом учитывается заданная деформация (степень формоизменения), которые корректируются в зависимости от скорости и механических характеристик анизотропии исходного материала. Расчетные соотношения получены при плоской схеме напряжений, что соответствует раздаче и обжиму. Использовано уравнение равновесия в напряжениях и условие текучести анизотропного материала. Совместные решения этого уравнения и условия текучести устанавливает величины меридиональных и окружных напряжений, возникающих в материале заготовки. Величины напряжений позволяют рассчитать силы операций. Показано, что скорость раздачи и обжима и анизотропия механических свойств влияют на повреждаемость материала деформируемой заготовки. Зависимости для расчёта повреждаемости получены на основе энергетического и деформационного критериев прочности. Данные зависимости позволяют прогнозировать качество изделий. Показано также, что анизотропия влияет на технологические режимы раздачи и обжима. При увеличении коэффициента анизотропии напряжения и силы операций уменьшаются. Произведены расчёты напряжений, сил и повреждаемости материала при раздаче анизотропного титанового сплава BT14 при 875 °С.

Ключевые слова: анизотропия, вязко-пластичность, скорость, деформации, напряжения, сила, повреждаемость материала

Для цитирования: Чудин В.Н. Технологические режимы раздачи и обжима при локальном нагреве // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 3–7. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-3-7

Technological modes of expansion and pressing under selective heating

Vladimir N. Chudin, D.Eng.

MIIT, Moscow, Russia

vladimir-chudin@yandex.ru

Abstract. The processes of spread and reduction of a heated rough piece under visco-plasticity conditions are viewed. The ratio for force stress calculating in operations, damage to the material of the rough pieces is obtained. In the branches of special engineering, high-strength alloys based on titanium and aluminum are used. These alloys have mechanical properties anisotropy. Processing of these alloys is difficult. For this reason, the pressure treatment operation is performed with heating of the deformation zone. The material in the deformation zone exhibits viscous properties. Deformation hardening and softening (stress relaxation) of the material take place simultaneously. Besides, the lower the deformation rate, the greater the softening. In this regard, a constitutive equation representing these processes is found. The factor of hardening and softening creates conditions for reducing the power mode of pressure treatment operations and increasing the degree of primary part forming. Stress relaxation calculation with the help of analytical dependencies is necessary at the stage of expansion and pressing development. The calculated ratios are recorded as a function of the speed of these operations. In this case, the specified deformation (the change in the degree of forming) is taken into account, adjusted depending on the speed and mechanical characteristics of the bearing alloy anisotropy. The calculated ratios are obtained under conditions of a flat voltage scheme, which corresponds to expansion and pressing. Stress equilibrium equation and yield condition of anisotropic material are used. The joint solutions of this equation and yield conditions determine values of the meridional and circumferential stresses arising in the piece part material. The values of the stresses allow calculating the forces of operations. It is shown that the speed of expansion and pressing and mechanical properties anisotropy affect the damage to the material of the «green body». Dependences for the calculation of damage are obtained on the basis of energy and deformation strength criteria. These dependencies allow predicting the quality of products. It is also shown that anisotropy affects the technological modes of expansion and pressing. As the anisotropy coefficient increases, the stresses and forces of operations decrease. Calculations of stresses, forces and material damage in the process of expansion of anisotropic titanium alloy VT14 at 875 °C are made.

Keywords: anisotropy, visco-plasticity, velocity (speed), deformations, stresses, strength, material damage

For citation: Chudin V.N. Technological modes of expansion and pressing under selective heating / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 3–7. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-3-7

Введение

Процессы раздачи и обжима труб применяются в обработке давлением [1, 2]. Заготовки из высокопрочных материалов обрабатывают при изотермическом нагреве зоны деформаций с регламентированной скоростью формоизменения [3]. При этом материал заготовки проявляет вязкие свойства [4, 5], деформационное упрочнение сопровождается разупрочнением (релаксацией напряжений). Релаксация увеличивается при низких скоростях операций, что приводит к уменьшению силового режима раздачи и обжима. Скорость формоизменения заготовки и анизотропия механических характеристик материала являются одними из факторов технологии, влияющими на режим операции в части допустимых степеней формоизменения, сил, повреждаемости материала заготовки [6 – 8]. Учёт этих факторов позволяет проектировать оптимальные процессы обработки металлов давлением.

Материалы и методы решения задачи с нагревом

Рассмотрим расчеты технологических режимов раздачи и обжима с нагревом. Схемы этих процессов приведены на рис. 1.

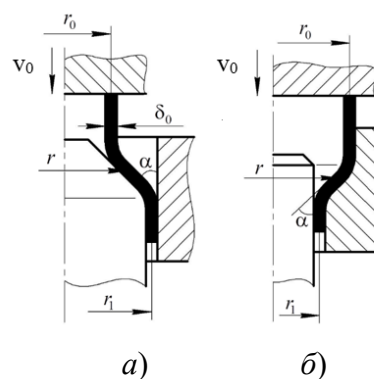


Рис. 1. Схемы процессов:

а – раздача; б – обжим

Fig. 1. Process diagrams:

а – expansion; б – pressing

При плоском напряженном состоянии анизотропного материала на конусе оснастки эквивалентные деформация, скорость деформаций и напряжение выражаются соотношениями [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= \pm \lambda f n \frac{r}{r_0}, \\ \xi_e &= \pm \frac{d\varepsilon_e}{dt} = \pm \lambda_1 \frac{v_r}{r}, \\ \sigma_e &= A \varepsilon_e^m \cdot \xi_e^n = A \lambda_1^{m+n} \cdot r_0^{nf} \cdot r^{-n(1+f)} \cdot \left(\ln \frac{r}{r_0} \right)^m \cdot v_0^n. \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь скорость движения точек конуса заготовки по оправке определяется:

$$v_r = \pm v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^f, \quad (2)$$

где знак «+» соответствует раздаче; «-» – обжиму;

$$\lambda_1 = \left[\frac{2(2+R)}{3(1+R)} \right]^{\frac{1}{2}}; \quad f = \frac{R}{1+R} \quad - \text{коэффициенты,}$$

учитывающие анизотропию материала заготовки; R – коэффициент анизотропии; r_0, r – радиус заготовки и текущий радиус на конусе; v_0 – скорость раздачи; A, m, n – константы материала, связанные с деформационным упрочнением и разупрочнением при вязко-пластическом деформировании.

Рассмотрим операцию раздачи, где меридиональное и окружное напряжения соответственно $\sigma_r < 0$, $\sigma_\phi > 0$. Система из уравнения равновесия и условия текучести анизотропного материала имеет вид [11]:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\phi &= 0, \\ \sigma_\phi - \sigma_r &= \gamma \sigma_e. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$(4)$$

Подстановка условия (4) в уравнение (3) позволяет установить радиальные и окружные напряжения в виде:

$$\sigma_r = -\frac{\gamma K}{\eta} (r^\eta - r_1^\eta) v_0^n; \quad (5)$$

$$\sigma_f = \sigma_r + \gamma K v_0^n. \quad (6)$$

Здесь при учете выражений (1), (2)

$$K = \lambda_1^{m+n} \cdot A r_0^{nf} \cdot \left(\ln \frac{r_1}{r_0} \right)^m; \quad \eta = -n(1+f);$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{2}} \left(\frac{1+R}{1+2R+\mu_\sigma^2} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где γ – коэффициент, учитывающий анизотропию материала [10];

$$\mu_\sigma = -\frac{\sigma_f + \sigma_r}{\sigma_f - \sigma_r},$$

где μ_σ – коэффициент вида напряженного состояния.

При обжиме трубы напряжения $\sigma_r < 0$; $\sigma_\phi < 0$. Условие текучести:

$$\sigma_\phi = -\gamma \sigma_e \quad (7)$$

при подстановке в уравнение (3) приводит к неоднородному уравнению:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r = -\gamma \sigma_e,$$

решение которого получим в виде:

$$\sigma_r = -\frac{\gamma K}{\eta r} (r^\eta - r_1^\eta) v_0^n, \quad (8)$$

где $\eta = 1 - n(1+f)$.

Увеличение меридионального напряжения вызывает трение заготовки на конусе инструмента. Контактное нормальное напряжение можно определить по формуле равновесия Лапласа [3]:

$$\frac{\sigma_r}{\rho} + \frac{\sigma_\phi}{r} \cos \alpha = -\frac{\sigma_k}{\delta_0}. \quad (9)$$

При этом $\rho = \infty$ – меридиональный радиус заготовки; σ_k – контактное давление; δ_0 – толщина стенки трубы; α – угол конуса изделия. Из формулы (9) следует, что

$$\sigma_k = -\frac{\delta_0}{r} \sigma_\phi \cos \alpha.$$

Дополнительное напряжение в связи с трением определим как

$$\sigma_{\text{доп}} = -\mu \sigma_k = -\frac{\mu \delta_0}{r} \sigma_\phi \cos \alpha, \quad (10)$$

где μ – коэффициент трения.

Учитывая выражения (8) и (10), запишем суммарное меридиональное напряжение в виде:

$$(\sigma_r)_\Sigma = \sigma_r + \sigma_{\text{доп}}. \quad (11)$$

Максимальная сила операций может быть рассчитана по выражению:

$$F = 2\pi r_0 \delta_0 (\sigma_r)_\Sigma \cdot \sin \alpha \quad (12)$$

при $r = r_0$; $|\mu_\sigma| = 1$.

Напряжения и сила зависят от степени деформирования и скорости операции. В соответствии с условием несжимаемости материала заготовки

$$\xi_r + \xi_\phi + \xi_z = \frac{dv_r}{dr} + \frac{v_r}{r} + \frac{v_r d\delta}{\delta dr} = 0$$

получим соотношение для расчета толщины стенки конуса изделия, т. е.

$$\delta_{кр} = \delta_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-f} \quad (13)$$

Рассчитаем повреждаемость материала исходной заготовки по уравнениям кинетики повреждаемости [3, 8, 11]. Используем выражения (1) и (2) для конической части заготовки. По деформационному уравнению получим:

$$\omega = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{епр}} = \frac{\lambda}{\varepsilon_{епр}} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (14)$$

По энергетическому уравнению

$$\omega = \frac{1}{A_{пр}} \int \sigma_e \xi_e dt = \frac{\lambda_1}{\eta A_{пр}} K v_0^n \cdot r_0^\eta \left[\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^\eta - 1 \right], \quad (15)$$

где $1 \geq \omega \geq 0$ – повреждаемость материала на свободном крае конуса изделия; $\varepsilon_{епр}$, $A_{пр}$ – предельные константы разрушения.

Разрушение материала краевой части заготовки возможно при $\omega = 1$. Соотношения (14), (15) позволяют установить критические условия операций по степени деформирования или скорости.

Результаты расчета

Расчетные данные получены для раздачи краевой части трубы из титанового сплава BT14 при 875 °С. Константы материала: $A = 70$ МПа; $m = 0,1$; $n = 0,07$; $A_{пр} = 630$ МПа. Приняты размеры: $r_0 = 50$ мм, $r_1 = 70$ мм, $\delta_0 = 2$ мм; $\alpha = 45^\circ$. Расчетные максимальные сжимающие напряжения, силы раздачи и повреждаемости края заготовки в зависимости от скорости операции приведены в табл. 1.

1. Расчетные результаты 1. Calculated results

R	v_0 , мм/мин	σ_r , МПа	$\sigma_{доп}$, МПа	$(\sigma_r)_\Sigma$, МПа	F , кН	ω
1,0	10	25,2	0,6	25,8	11,5	0,020
	10^2	30,6	0,8	31,4	13	0,023
2,0	10	20,3	0,5	20,8	9	0,038
	10^2	24,6	0,7	25,3	11	0,044

Обсуждение результатов

Расчетом показано, что напряжения и силы при раздаче и обжиме уменьшаются на 15...20 % в принятом диапазоне скоростей. Снижение силового режима операций связано с релаксацией напряжений, что является проявлением вязких свойств горячего деформируемого материала при медленных внешних нагрузках. При этом снижается повреждаемость материала, что влияет на качество

изделий. Увеличение коэффициента анизотропии также способствует уменьшению силы. Относительная толщина края заготовки после раздачи составила $\delta_{кр} / \delta_0 = 0,8$ при $R = 1$ и $\delta_{кр} / \delta_0 = 0,9$ при $R = 2$. Край утоняется в меньшей степени при увеличении коэффициента анизотропии.

Процессы раздачи и обжима труб отработаны при изготовлении промышленных

изделий из титановых и алюминиевых сплавов. Образцы изделий приведены на рис. 2.

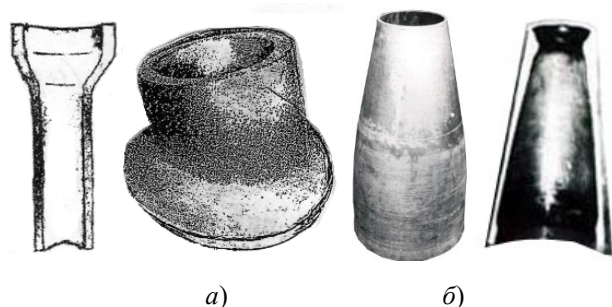


Рис. 2. Образцы изделий:

a – арматура трубопроводов (раздача); *б* – корпуса (обжим)

Fig. 2. Test parts:

a – pipeline fittings (expansion); *b* – bodies (pressing)

Вывод

Технологические режимы раздачи и обжима с нагревом в части напряжений, сил, степеней формообразования зависят от упрочнения и ползучести материала заготовок. Фактор ползучести, связанный с релаксацией напряжений, проявляется при низких скоростях операций тем больше, чем меньше скорость формообразования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ковка и штамповка:** Справочник под. ред. Семенова Е.И.: в 4 т. Т. 4. Листовая штамповка // М.: Машиностроение, 2010. 732 с.
2. **Попов Е.А.** Основы теории листовой штамповки // М.: Машиностроение, 1978. 278 с.
3. **Изотермическое формоизменение анизотропных материалов в режиме ползучести** / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин и др. М., Машиностроение. 2009. 412 с.
4. **Малинин Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов. М.: Юрайт. 2020. 402 с.
5. **Романов К.И.** Механика горячего формоизменения металлов. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.
6. **Чудин В.Н.** Процесс горячей раздачи при вязкопластическом деформировании // Заготовительные производства в машиностроении. 2017. № 5. С. 217–220.
7. **Платонов В.И.** К расчёту напряжений при раздаче в условиях вязкопластичности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 497–500.

8. **Чудин В.Н.** Раздача и обжим труб при вязкопластическом деформировании // Вестник машиностроения. 2023. № 4. С. 349–352.

9. **Чудин В.Н.** Вязкопластическое растяжение отверстия при отбортовке нагретого листа // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 10. С. 10–13.

10. **Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А.** Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинёв: Квант, 1997. 330 с.

11. **Теория обработки металлов давлением.** В.А. Голеньков, С.П. Яковлев, С.А. Головин и др. / М. Машиностроение. 2009. 442 с.

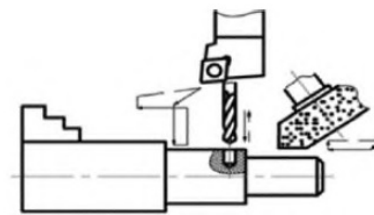
12. **Колмогоров В.А.** Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург. Уральский государственный технический университет. 2001. 836 с.

REFERENCES

1. Forging and stamping: Handbook, in 4 volumes. Vol. 4: Sheet-metal forming / ed. by E.I. Semenov. Moscow: Mashinostroenie, 2010. 732 p.
2. Popov E.A. Fundamentals of sheet stamping theory. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 278 p.
3. Isothermal shaping with a rigid tool of high-strength anisotropic materials / S.S. Yakovlev, V.N. Chudin et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 412 p.
4. Malinin N.N. Creep in metal working. Moscow: Yurayt, 2020, 402 p.
5. Romanov K.I. Mechanics of Hot Forming of Metals. Moscow: Mashinostroenie, 1993, 240 p.
6. Chudin V.N. Hot expansion under viscoplastic deformation. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyeni*, 2017, no. 5, pp. 217219.
7. Platonov V.I. To the calculation of stresses during distribution under conditions of visco-plasticity/ *Proceedings of Tula State University. Technical sciences*, 2022, no. 8, pp. 497–500.
8. Chudin V.N. Pipe expansion and pressing under visco-plastic deformation / *Vestnik mashinostroyeniya*, 2023, no. 4, pp. 349–352.
9. Chudin V.N. Viscous-plastic hole extension when flanging a heated sheet / *Science intensive technology in mechanical engineering*, 2022, no. 10. pp. 10–13.
10. Iakovlev S.P., Iakovlev S.S., Andreichenko V.A. Forming anisotropic materials. Kishinev, Kvant publ., 1997. 331 p.
11. Theory of pressure metal treatment / ed. Golenkova V.A., Yakovleva S.P. et al. Moscow: Mashinostroenie, 2009, 442 p.
12. Kolmogorov V.A. The Mechanics of Metal Processing under Pressure: Textbook, UGTU-UI, Ekaterinburg, 2001, 836 p.

Статья поступила в редакцию 19.04.2023; одобрена после рецензирования 27.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 19.04.2023; approved after reviewing 27.04.2023; assepted for publication 11.05.2023.



Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. №7 (145). С.8-14.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 8-14.

Научная статья

УДК 621.923

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-8-14

Развитие технологического обеспечения методов обработки с использованием несвязанного абразива

Петр Юрьевич Бочкарев, Д.Т.Н.

Камышинский технологический институт – филиал
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,
Камышин, Волгоградская область, Россия;

ФГБОУ ВО Саратовский государственный университет генетики,
биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова, Саратов, Россия
bpy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0587-6338>

Аннотация. Представлены на основе анализа известных методов обработки с использованием несвязанного абразива тенденции их развития. Отмечены наряду с широкими технологическими возможностями и относительно низкой себестоимостью существующие недостатки методов, устранение которых обеспечит перспективность развития операций обработки деталей с использованием свободного абразива. Предложен подход, заключающийся в формировании структуры баз данных способов обработки по конструктивно-технологическим признакам и проведении генерации групп способов, отличающихся однородными проектными процедурами их разработки с использованием математического аппарата кластерного анализа. В статье описаны и приведены схемы разработанных способов обработки наружных и внутренних поверхностей типа тел вращения уплотненным слоем абразивной среды. Они позволяют формировать однородные качественные характеристики при обработке поверхностей детали путем формирования в камере области абразивного материала, равномерно уплотненного в местах взаимодействия обрабатываемой поверхности и абразивных зерен, обеспечить условия выравнивания контактных давлений на обрабатываемой поверхности. На основе выполненных исследований и апробации представленных способов определены научно-технические задачи, решение которых позволит реализовать технологическое обеспечение их эффективного применения. С целью снижения сложности создаваемых моделей и объемов экспериментальных исследований предложена стратегия проведения исследовательских работ на основе унификации отдельных проектных процедур технологической подготовки производства. Полученные результаты позволили теоретически обосновать системный подход к формированию среды автоматизированного планирования операций, выполняемых с использованием несвязанного абразива, заключающийся в создании формализованных однородных проектных процедур для сгруппированных методов обработки

Ключевые слова: механообрабатывающие производства, технологическая подготовка производства, обработка несвязанным абразивом, технологическая операция, проектные процедуры разработки технологических процессов

Для цитирования: Бочкарев П.Ю. Развитие технологического обеспечения методов обработки с использованием несвязанного абразива // Научно-технические технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 8–14.
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-8-14

The development of engineering support for loose abrasive working methods

Pyotr Yu. Bochkarev, D. Eng.

Kamyshinsky Technological Institute, Branch school of the Volgograd State Technical University

Abstract. The trends of working methods development based on the analysis of certain working methods using loose abrasive are given. Along with wide technological capabilities and relatively low cost, the existing irregularities of methods are noted. The elimination of them will ensure prospective viability for the development of machining operations with the use of loose abrasive. An approach was suggested. It consists in forming the structure of databases of working methods according to structural and technological features and generating groups of methods differing in homogeneous design procedures for their development using a mathematical tools technique of cluster analysis. The article describes and provides diagrams of the developed methods of external and internal surfacing of rotation body type using a compacted layer of abrasive medium. They make it possible to get not varying qualitative characteristics, finishing through forming an area of abrasive material in the chamber with equal compaction in the places of interaction of the treated surface and abrasive grains, and to provide conditions for equalization of contact pressures on the working surface. Based on the performed research and testing of the presented methods, scientific and technical tasks have been identified, the solution of which will make it possible to implement the technological support of their effective application. For the purpose of reducing the complexity of the created models and the volume of experimental research, a strategy for conducting research based on the unification of individual project procedures for technological preparation of production is proposed. The obtained results allowed making theoretical substantiation of a systematic approach to the formation of an environment for automated planning of operations using loose abrasive, which consists in the creation of formalized homogeneous design procedures for grouped working methods.

Keywords: machining industries, technological preparation of production, loose abrasive finishing, technological operation, design procedures for technological processes development

For citation: Bockarev P.Yu. The development of engineering support for loose abrasive working methods / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 8–14. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-8-14

Введение

Доминирующими направлениями развития современных производств являются широкое внедрение информационных технологий и использование новых материалов, обладающих разнообразными физико-механическими и механическими характеристиками. Работы в данных направлениях невозможны без серьезных исследований, затрагивающих все аспекты технологической подготовки механообрабатывающих производств [1]. В первую очередь – это вопросы формализации этапов разработки и реализации технологий. Учитывая многообразие подходов, связанных с выполнением заданий по изготовлению конкретных изделий и, как следствие, формирование многоплановых подходов к их решению, в настоящее время возникла необходимость четкой научно-обоснованной структуризации всех элементов проектных процедур планирования технологических процессов.

Применительно к разработке операционных технологий создание высокоэффективных автоматизированных систем невозможно без детального анализа имеющихся методик и накопленного опыта для каждого из видов обработки. Формирование связей между методами обработки и конструктивными характеристиками

обрабатываемых поверхностей, технологическими возможностями оборудования и оснастки, позволяет реализовать создание формализованных моделей, объединяющих методы обработки в отдельные группы с позиции однородности выполнения проектных процедур [2]. Такой подход позволяет системно разрабатывать универсальные программные модули технологического обеспечения для широкого использования в условиях различных машиностроительных производств, основанные на экспертно обоснованных моделях.

Другим результатом использования данного подхода является информация по отсутствию или недостаточному вниманию со стороны исследователей к отдельным аспектам и особенностям рассматриваемых методов обработки, так как структуризация наглядно позволяет определить сформировавшиеся пробелы.

В статье приводится взгляд с этих позиций на методы, связанные с обработкой поверхностей деталей с использованием в качестве обрабатывающего инструмента несвязанного абразива и отдельные направления развития этих методов. К наиболее известным и используемым в практике методам относятся: струйно-абразивная обработка; обработка свободным абразивом; турбоабразивная обработка; вибрационная

обработка; магнитно-абразивная обработка. Различие этих методов связано с решением обширных задач, целями которых является финишная обработка и полировка, удаление острых кромок, снятие заусенцев, подготовка поверхности для нанесения защитных покрытий и т. д. В связи с этим на выбор соответствующего метода в первую очередь влияет конструкция обрабатываемых деталей и производственные условия, в которых реализуется операция.

Данные аспекты исторически предопределили направления в развитии как самих методов обработки с использованием несвязанного абразива, так и оборудования, средств технологического оснащения, особенностей их использования на различных этапах технологического процесса изготовления деталей. Наиболее известными научными школами с позиций временного измерения и объемов выполненных научно-производственных работ выделяются коллективы, основоположниками которых являются А.П. Бабичев и А.Н. Мартынов. Области их исследований во многом связаны с заказами конкретных производств и спецификой обрабатываемых деталей, преимущественно – вибрационная обработка и обработка свободным абразивом, уплотненным инерционными силами, которые имеют наиболее глубокую методическую проработку и в настоящее время более близки к комплексной автоматизации процессов из проектирования.

Дополнительный интерес к методам обработки с использованием несвязанного абразива вызван растущими требованиями к качеству изделий, повышению производительности и эффективности производства, решение которых возможно за счет создания новых схем обработки, ведущих к упрощению конструкции технологического оборудования, сокращения трудоемкости его наладки и обслуживания. Обработка несвязанным абразивом обладает широкими технологическими возможностями, относительно низкой себестоимостью и не имеет ряда недостатков, присущих обработке закрепленным абразивом обусловленным постоянным положением абразивных зерен на периферии круга: высокие температуры; ограничения по форме обрабатываемых поверхностей; сложности наладки и правки инструмента. Кроме этого, серьезно значимым преимуществом рассматриваемых методов является возможность вести

обработку с формированием меньшего, по сравнению с другими известными методами механической обработки, глубинами дефектного поверхностного слоя за счет эффективного проникновения смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания и расширения возможностей отвода тепла.

Представленные преимущества позволяют сделать заключение о перспективности развития методов обработки с использованием свободного абразива особенно применительно к поверхностям деталей, которые имеют форму в виде тел вращения, как наиболее ответственным, имеющим широкое разнообразие конструктивных форм, большой удельный вес среди поверхностей другого вида и имеющих повышенные требования к характеристикам поверхностного слоя. Проанализировав известные методы, связанные с обработкой поверхностей типа тел вращения несвязанным абразивом, в качестве основного их недостатка выступает низкая производительность, а часто и невозможность получения заданных характеристик, связанная с недостаточным контактным давлением абразивных частиц на обрабатываемую поверхность [3, 4].

Выполненный анализ обработки наружных поверхностей деталей типа тел вращения позволил выделить наиболее часто упоминающиеся в научной литературе и имеющих практическую реализацию способы [5 – 7]. Однако их использование, в связи с недостаточной величиной контактных давлений абразивных зерен на участках обрабатываемого профиля детали, ограничено. Данный недостаток частично устранен известными способами [8] за счет установления детали в вертикальное положение, посредством вращения ротора и оправки, создающими уплотнение абразивной среды, и [9] вертикальным погружением деталей в цилиндрическую камеру, заполненную абразивным материалом, с эластичными стенками, уплотнением абразивной среды через стенки камеры, деформируя избыточным давлением локальные зоны стенки.

Промышленное использование данных способов имеет ограничения, связанные с низкой производительностью обработки, обусловленной тем, что обработка производится в недостаточно сжатой среде абразива, приводящей к снижению интенсивности воздействия частиц абразива с обрабатываемой поверхностью детали. Также ограничения связаны с требованием

наличия системы подачи рабочей жидкости под давлением со сложным управлением процесса взаимодействия частиц абразива с обрабатываемой поверхностью, низкой универсальностью в части формы обрабатываемых поверхностей, ограниченной определенным количеством локальных зон деформируемой стенки камеры.

Для снижения представленных недостатков предложен новый способ обработки деталей свободным абразивным материалом, обеспечивающий повышение качества, производительности и расширяющий технологические возможности обработки наружных поверхностей в форме тел вращения за счет упрощения схемы ее реализации (рис. 1). В способе обработки заготовку устанавливают горизонтально оси вращения ее обрабатываемых поверхностей в камеру, образуемую внутренней цилиндрической поверхностью барабана с горизонтальной осью. Ось вращения заготовки Od смещена относительно оси вращения барабана OD .

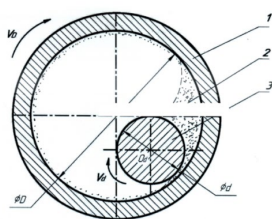


Рис. 1. Схема обработки уплотненной средой несвязанных абразивных зерен наружных поверхностей типа тел вращения:

1 – корпус камеры; 2 – зона абразивного слоя; 3 – обрабатываемая деталь

Fig. 1. Scheme of finishing through a compacted medium of loose abrasive grains for external surfaces of rotation bodies type:

1 – chamber body; 2 – abrasive layer zone; 3 – machined part

В камеру засыпают абразивный материал и обеспечивают вращение барабана и заготовки. Скорость вращения внутренней поверхности барабана должна быть не ниже скорости, обеспечивающей за счет центробежной силы, воздействующей на абразивные зерна, прижатие их к внутренней поверхности барабана. Скорость вращения заготовки должна быть не ниже условий, обеспечивающих микрорезание при обработке поверхности. Под действием центробежной силы абразив перемещается по направлению вращения барабана и за счет сужения (снижения площади сечения) в плоскости вдоль оси между обрабатываемыми поверхностями и внутренней

поверхностью барабана образуется область, заполненная абразивными зернами. При этом в нижней части данной области образуется уплотненная за счет давления верхних слоев зона. Также, в этой зоне происходит фиксация абразивных зерен, непосредственно контактирующих с обрабатываемой поверхностью под воздействием зерен, расположенных в верхних слоях создаваемой области. В связи этим возникает дополнительное давление, обеспечивающее условия микрорезания абразивным зерном обрабатываемой поверхности.

Объем засыпаемого абразивного материала должен обеспечивать формирование области слоя абразивных частиц. За счет эффекта сыпучести в верхних слоях области абразивных частиц создается равномерное заполнение ими образующихся полостей по всему объему формируемой области, и их распределение копирует профиль обрабатываемой поверхности, что обеспечивает равномерный сьем металла по всему контуру заготовки в зоне обработки. Возрастающие силы резания, возникающие при образовании площадок износа на абразивных зернах в процессе обработки, обеспечивают постоянное перемешивание и обновление абразивных зерен в местах контакта абразива и обрабатываемой поверхности.

Среди способов обработки внутренних поверхностей типа тел вращения, в том числе сложного профиля, в машиностроении и других отраслях промышленности свободным абразивным материалом известны абразивно-струйные методы обработки внутренних цилиндрических поверхностей заготовок с помощью формирования и подачи абразивно-воздушной или гидроабразивной смеси посредством сопел на обрабатываемую поверхность [10]. Размещение внутри обрабатываемой поверхности абразивного материала, подачу сжатого воздуха под давлением и образование абразивно-воздушной смеси в рабочей зоне [11], центробежно-планетарной обработки свободными абразивными частицами, уплотненными инерционными, преимущественно центробежными силами, при планетарном вращении контейнеров с установленными в них деталями [12 – 15]. Недостатки данных способов связаны с недостаточной величиной контактных давлений абразивных зерен на участках обрабатываемого профиля детали, низкая интенсивность воздействия частиц абразива на

обрабатываемую поверхность, снижающая производительность обработки, невозможностью обеспечения равномерной обработки и достижение стабильных характеристик качества рабочих поверхностей.

Как развитие представленных схем обработки предлагается два способа: при возможности обеспечения вращения детали с обрабатываемыми поверхностями (рис. 2, а) и при условии неподвижной ее установки, связанной с габаритами, конструктивными особенностями детали и др. (рис. 2, б).

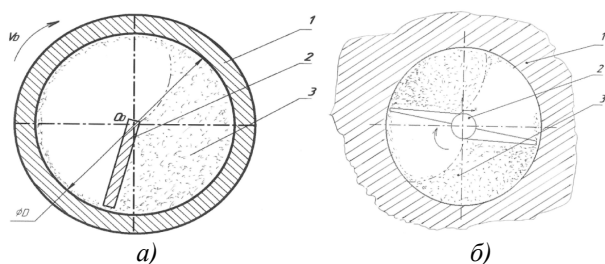


Рис. 2. Схемы обработки уплотненной средой несвязанных абразивных зерен внутренних поверхностей типа тел вращения:

1 – заготовка; 2 – конструктивный элемент; 3 – зона абразивного слоя

Fig. 2. Schemes of finishing with a compacted medium of loose abrasive grains of internal surfaces of rotation bodies type:

1 – rough piece; 2 – structural element; 3 – abrasive layer zone

В первом случае заготовку устанавливают горизонтально оси вращения ее обрабатываемых поверхностей. Во внутренней полости заготовки размещают конструктивный элемент (деталь или сборочную единицу, имеющую форму пластины, сферы и др.) создающий равный зазор с обрабатываемой поверхностью и располагающийся параллельно оси вращения обрабатываемых поверхностей типа тел вращения. Конструктивный элемент изготавливается из материала, имеющего большую абразивную износостойкость по сравнению с обрабатываемыми деталями.

В камеру, ограниченную внутренней полостью заготовки, засыпают абразивный материал и создают вращение заготовки в сторону, обеспечивающее в соответствии с формой и расположением неподвижного конструктивного элемента формирование области, заполненной абразивными зернами. Скорость вращения заготовки должна быть не ниже условий, обеспечивающих микрорезание при обработке

поверхности. Под действием центробежной силы абразив перемещается в направлении вращения заготовки и за счет сужения (снижения площади сечения в плоскости вдоль оси заготовки) между обрабатываемой поверхностью и неподвижным конструктивным элементом образуется область 3, заполненная абразивными зернами.

В случае неподвижной схемы установки детали предлагается способ абразивной обработки цилиндрических отверстий деталей, включающем горизонтальное расположение оси обрабатываемого цилиндрического отверстия заготовки с частично заполненной абразивным материалом внутренней полостью, при этом обработку ведут несвязанным абразивом, в полости заготовки размещают соосно с осью отверстия вращающийся конструктивный элемент, имеющий лопатку(и), форма и расположение которой(ых) обеспечивают формирование области(ей) заполненной(ых) абразивными зернами, уплотненной(ых) в зоне контакта абразива и обрабатываемой поверхности, а скорость его вращения устанавливают не ниже условий, обеспечивающих процесс микрорезания при обработке поверхности отверстия заготовки.

Описанные способы позволяют формировать однородные качественные характеристики при обработке поверхности детали путем формирования в камере области абразивного материала, равномерно уплотненного в местах взаимодействия обрабатываемой поверхности и абразивных зерен, обеспечить условия выравнивания контактных давлений на обрабатываемой поверхности. Схема обработки обеспечивает отсутствие локальных разно-температурных зон на обрабатываемых поверхностях, а также возможность за счет простых технических решений осуществлять отвод температуры. При этом появляются принципиально новые перспективные подходы к решению вопросов управления характеристиками формируемого поверхностного слоя обрабатываемых поверхностей.

Повышение производительности использования представленных способов обеспечивается за счет расширения технологических возможностей обработки, позволяющих устанавливать рациональные параметры и режимы обработки. К регулируемым технологическим параметрам и режимам процесса обработки относятся: форма, размеры и расположение

конструктивных элементов оборудования, величины зазора между обрабатываемыми поверхностями и элементами установки, частота вращения заготовки и вращающихся частей установки, материал и зернистость абразивных зерен, объем абразивного материала, время обработки. Несложность технической реализации способов, отсутствие необходимости использования пневмо и гидросистем в управлении процессом его реализации создает предпосылки для высокой степени универсальности применения и невысокие требования к квалификации персонала при наладке и обслуживании.

Проведенная апробация реализации представленных способов показала их работоспособность и определила круг первоочередных научно-технических задач, решение которых позволит реализовать технологическое обеспечение их эффективного применения. Среди них: установление характера воздействия уплотненного абразивного слоя на обрабатываемую поверхность; исследование режущей способности и стойкости зерен уплотненного слоя; динамические характеристики в отдельных зонах абразивного слоя и плотность контактирования в них частиц. Однако очевидна значительная сложность создаваемых моделей, проведение больших объемов экспериментальных исследований, которые являются основой создания программных средств технологической подготовки производства. С позиции выполнения совокупности данных исследований, ограничиваясь проработкой представленных в статье способов, видится нерациональным.

С целью избежания такой локальной направленности проведения научных работ предложена стратегия проведения исследований, базовым принципом которой является подход к созданию моделей, построенных на результатах анализа отдельных проектных процедур технологической подготовки производства с позиции объединения методов обработки в группы по однородности из выполнения. На основе формирования структуры баз данных методов обработки с использованием несвязанного абразива в качестве обрабатывающего инструмента по конструктивно-технологическим признакам, их заполнения и проведения генерации множеств методов с использованием математического аппарата кластерного анализа обеспечивается создание универсального методического,

алгоритмического и программного обеспечения автоматизированных подсистем для каждой проектной процедуры.

Заключение

Представлены результаты проведенных аналитических исследований современного состояния в области научных достижений и производственных практик технологического обеспечения способов обработки деталей с использованием в качестве инструмента несвязанного абразива. На примере обработки наружных и внутренних поверхностей типа тел вращения показаны возможные пути их развития и приведены примеры новых способов, обеспечивающих повышение производительности, снижение себестоимости реализации операций для широкого диапазона изготавливаемых деталей и требований к используемому техническому оснащению.

Описанные способы упрощают вопросы автоматизации обработки и позволяют на базе развития существующих моделей, описывающих процессы воздействия несвязанных абразивных зерен на обрабатываемую поверхность под действием различных факторов, и современного математического аппарата выполнить создание среды автоматизированного планирования рассматриваемых технологических операций. Предложен системный подход к формированию такой среды, заключающийся в разработке формализованных моделей отдельных сгруппированных по принципу однородности выполнения проектных процедур технологической подготовки операций, с применением несвязанного абразива, построенный на основе базы данных конструктивных характеристик обрабатываемых поверхностей и технологических параметров обработки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Справочник технолога** / под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение, 2019. 800 с.
2. **Малинин П.В., Бочкарев П.Ю., Ульянова Л.Д., Шалунов В.В.** Совершенствование технологической подготовки операций бесцентрового шлифования // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2022. № 4. С. 147–160.
3. **Корчак С.Н.** Производительность процесса шлифования стальных стале. М.: Машиностроение, 1974. 279 с.

4. Стратиевский И.Х., Юрьев В.Г., Зубарев Ю.М. Абразивная обработка: справочник. М.: Машиностроение, 2010. 352 с.

5. Авторское свидетельство №948637. Способ обработки деталей в среде свободного абразива / А.Н. Мартынов, П.И. Ящерицын, В.З. Зверовщиков, Н.А. Миронычев.

6. Авторское свидетельство №1579740. Способ абразивной обработки деталей / А.Н. Мартынов, В.М. Федосеев, В.А. Скрыбин.

7. Патент №2084327. Способ обработки деталей в псевдооживленном слое абразива и устройство для его осуществления / А.В. Королев, П.Ю. Бочкарев.

8. Авторское свидетельство №1803308 A1 (SU), М. кл. B24B31/104. Способ обработки деталей / А.Н. Мартынов, В.А. Лемин, В.А. Скрыбин, В.М. Федосеев, А.В. Сытников.

9. Патент №2302940(RU), М. кл. B24B31/108. Способ камерной абразивной обработки и устройство для его осуществления / В.З. Зверовщиков, А.Е. Зверовщиков, Е.А. Зверовщиков.

10. Патент RU 159216. Устройство для гидроабразивной обработки внутренних и наружных поверхностей трубных заготовок / Санинский В.А., Осадченко Е.Н., Носенко В.А., Сторчак Н.А., Александров А.А.

11. Патент RU 2558782. Способ обработки внутренних цилиндрических поверхностей свободным абразивом / Бочкарев П.Ю., Захаров О.В., Скляр И.А.

12. Патент RU 2703065C1. Способ центробежной абразивной обработки колец подшипников качения Зверовщиков В.З., Зверовщиков А.Е., Нестеров С.А., Зверовщиков А.В., Макарычев П.В.

13. Патент RU 2365484. Способ центробежной обработки деталей и устройство для его осуществления / Зверовщиков В.З., Зверовщиков А.В., Зверовщиков А.Е., Агейкин И.В.

14. Авторское свидетельство № 963829. Способ центробежно-планетарной обработки колец / Бондаренко И.Е., Фишбейн С.И., Ершов В.К., Лившиц Б.А., Фишбейн Е.И.

15. Авторское свидетельство СССР № 814683. Способ обработки изделий / Мартынов А.Н., Свирский М.М., Тарнопольский А.В., Зверовщиков В.З., Нечаев П.В., Долуда А.С.

REFERENCES

1. Technologist's Reference Book / under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Innovative Mechanical engineering, 2019, 800 p.

2. Malinin P.V., Bochkarev P.Yu., Ulyanova L.D., Shalunov V.V. Improving the technological preparation of centerless grinding operations/ Proceedings of Volgograd State Technical University, Volga region. Technical sciences, 2022, no. 4. pp. 147–160.

3. Korchak S.N. Productivity of process of grinding of steel details. Moscow: Mashinostroyeniye, 1974. 279 p.

4. Stratievsky I.H., Yuryev V.G., Zubarev Yu.M. Abrasive finishing: reference book. Moscow: Mashinostroyeniye, 2010, 352 p.

5. Author's certificate No. 948637. Method of processing free abrasive / A.N. Martynov, P.I. Lizarditsyn, V.Z. Zverovshchikov, N.A. Mironychev.

6. Author's certificate No. 1579740 Method of abrasive processing of parts / A.N.Martynov, V.M.Fedoseev, V.A.Scriabin.

7. Patent No. 2084327. Method of processing parts in a fluidized bed of abrasive and a device for its implementation / A.V. Korolev, P.Y. Bochkarev.

8. Author's certificate No. 1803308 A1 (SU), М. кл. B24B31/104. Method of processing parts / A.N. Martynov, V.A. Lamin, V.A. Scriabin, V.M. Fedoseev, A.V. Sytnikov.

9. Patent No. 2302940(RU), М. кл. B24B31/108. The method of chamber abrasive finishing and the device for its implementation / V.Z. Zverovshchikov, A.E. Zverovshchikov, E.A. Zverovshchikov.

10. Patent RU 159216. Device for waterjet treatment of internal and external surfaces of pipe billets / Saninsky V.A., Osadchenko E.N., Nosenko V.A., Storchak N.A., Aleksandrov A.A.

11. Patent RU 2558782. Method of processing internal cylindrical surfaces with a free abrasive / Bochkarev P.Yu., Zakharov O.V., Sklyarov I.A.

12. Patent RU 2703065C1. Method of centrifugal abrasive treatment of rolling bearing rings / Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.E., Nesterov S.A., Zverovshchikov A.V., Makarychev P.V.

13. Patent RU 2365484. The method of centrifugal processing of parts and the device for its implementation / Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.V., Zverovshchikov A.E., Ageykin I.V.

14. Author's certificate No. 963829. Method of centrifugal planetary processing of rings / Bondarenko I.E., Fishbein S.I., Ershov V.K., Livshits B.A., Fishbein E.I.

15. Author's certificate of the USSR No. 814683. The method of processing products / Martynov A.N., Svirsky M.M., Tarnopolsky A.V., Zverovshchikov V.Z., Nechaev P.V., Doluda A.S.

Статья поступила в редакцию 16.05.2023; одобрена после рецензирования 22.05.2023; принята к публикации 31.05.2023.

The article was submitted 16.05.2023; approved after reviewing 22.05.2023; assepted for publication 31.05.2023.

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 15-23.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 15-23.

Научная статья

УДК 621.914

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

Исследование отклонений формы изделий из быстрорежущей стали при точении фрезерованием на станках с ЧПУ

Георгий Валерьевич Матлыгин¹, аспирант

Андрей Владиславович Савилов², к.т.н.

Андрей Юрьевич Николаев³, к.т.н.

Сергей Анатольевич Тимофеев⁴, мл. науч. сотр.

^{1, 2, 3, 4} Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

¹ gmatlygin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5484-6250>

² saw@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-2028-4162>

³ andrnikolajev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3484-938X>

⁴ sevans@ex.istu.edu, <https://orcid.org/0000-0003-2412-4086>

Аннотация. Представлено исследование процесса формирования отклонений формы цилиндрических образцов из быстрорежущей стали, обработанных методом точения фрезерованием на токарном обрабатывающем центре с числовым программным управлением (ЧПУ) с дополнительной приводной осью. Технологическое обеспечение качества изделий из быстрорежущей стали, обработанных методом точения фрезерованием на токарном обрабатывающем центре с ЧПУ с дополнительной приводной осью путем снижения отклонения формы. Планирование эксперимента выполнено по методу Тагути с четырьмя факторами и тремя уровнями. Эксперимент проводился на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 с дополнительной приводной осью, позволяющей выполнять обработку вращающимся инструментом. Были использованы образцы из быстрорежущей стали Р6М5К5-МП. Обработка проводилась по схеме ортогонального точения фрезерованием. В качестве режущего инструмента была использована концевая твердосплавная фреза ФКЦ 4321. Отклонения от круглости (огранки) оценивалось оптическим методом. Измерение проводилось на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1. Измерения микронеровностей поверхности выполнялось оптическим сканированием поверхности. В результате оптического сканирования поверхности получено облако точек, повторяющее микронеровности цилиндрического профиля измеренного участка заготовки. Полученные данные позволили измерить огранку, возникающую при обработке методом ортогонального точения фрезерованием. Установлено влияние режимов резания на форму и размер максимальных пиков огранки. Наименьшая величина огранки наблюдается при ширине фрезерования a_e в диапазоне 3,5...5,5 мм при высоких значениях подачи на зуб f_z и низкой скорости резания v_c . Образование наибольшей высоты огранки наблюдается при средних значениях величин a_e , a_p , v_c . Показано, что оптический профилометр является эффективным средством измерения огранки. Полученные в работе результаты позволяют спрогнозировать отклонения формы обработанной заготовки из быстрорежущей стали методом точения фрезерованием на станках с ЧПУ. Результаты исследования могут быть использованы для повышения качества изготовления осевого режущего инструмента в инструментальном производстве.

Ключевые слова: точение фрезерованием, фреза, быстрорежущая сталь, огранка, некруглость, отклонения формы

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту Цифровые технологии производства изделий из порошковых и труднообрабатываемых материалов в рамках программы «Приоритет 2030», экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования научно-исследовательской лаборатории технологии высокопроизводительной механической обработки кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств института авиамашиностроения и транспорта, входит в состав научно-исследовательского проектного института «Авиамашиностроительные технологии» ИрННТУ.

Для цитирования: Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Николаев А.Ю., Тимофеев С.А. Исследование отклонений формы изделий из быстрорежущей стали при точении фрезерованием на станках с числовым программным управлением // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

Investigation of form deviations of high-speed steel (HSS) products under turning-milling operation using automatically programmed tools

Georgy V. Matlygin¹, PhD student

Andrey V. Savilov², PhD Eng.

Andrey Yu. Nikolaev³, PhD Eng.

Sergey A. Timofeev⁴, JRF

^{1, 2, 3, 4} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

¹ gmatlygin@mail.ru

² saw@istu.edu

³ andrnikolajev@gmail.com

⁴ sevans@ex.istu.edu

Abstract. Investigation of form deviations of cylindrical high-speed steel (HSS) products made under turning-milling operation by CNC-controlled lathe machining center (further CNC) with auxiliary drive axle is given. Technological support of high-speed steel products quality made by turning milling operation on a CNC lathe machining center with an auxiliary drive axle takes effect owing to the shape deviation reduction. Planning of experiments was carried out according to the Taguchi method for four factors and three levels. The experiment was conducted on a DMG NEF 400 lathe machining center having an auxiliary drive axle, which allows machining modes to be performed with a rotating tool. Samples of high-speed steel R6M5K5-MP were used. Machining operation was made according to the scheme of orthogonal turning by milling. A core carbide mill CCM 4321 was used as a cutting tool. Out-of-roundness (lobing) was estimated using optical method. All measurements were carried out on the Bruker Contour GT-K1 optical profilometer. Surface micro-dimensions were measured by optical scanning of the surface. Surface optical scanning resulted in a point cloud was obtained that mirrors micro-dimensions of the cylindrical profile of the piece partmeasured section. The obtained data obtained made it possible to measure a lobing that occurs under orthogonal milling turning method. The influence of cutting modes on the shape and size of the maximum peaks of the cut is proved. The smallest facet pattern value is observed for milling width a_e in the range of 3,5...5,5 mm with high feed values for the tooth f_z and low cutting speed v_c . The largest cut height is observed at the average values of a_e , a_p , v_c . It is an optical profilometer that is an effective means of measuring facet patterns or lobings. The results obtained in the work allow predicting form deviations of a blank made of high-speed steel under turning milling operations on CNC machines. The results of the study can be used to improve rotary cutting tools quality in the tool industry.

Keywords: turning-milling, milling cutter, high-speed steel, facet pattern, out-of-roundness, form deviation

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research on the project Digital technologies for the manufacture of products made of powder and hard-to-process materials within the framework of the «Priority 2030» program, experimental studies were conducted using the equipment of the research laboratory of High-performance machining Technology of the Department of Technology and Equipment of Machine-building Industries of the Institute aircraft engineering and transport, being a part of the research project institute «Aircraft Engineering Technologies» of IrNRTU.

For citation: Matlygin G.V., Savilov A.V., Nikolaev A.Yu., Timofeev S.A. Investigation of form deviations of high-speed steel (HSS) products under turning-milling operation using automatically programmed tools / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 15–23. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-15-23

Введение

Процесс точения фрезерованием был предметом интенсивных исследований в конце 1980-х годов, за которыми последовал ряд практических применений [1, 2]. Однако этот процесс не был исследован так широко, как другие традиционные процессы резания. Технологический метод точение фрезерованием характеризуется тем, что во время обработки вращается не только инструмент, но и деталь [3]. Данный метод механообработки относится к высокоэффективным и применяется при изготовлении осевых режущих инструментов и других изделий сложной формы. Он

позволяет повысить производительность обработки при обеспечении заданного качества изделия по сравнению с обычным точением [4, 5].

Реализация метода точения фрезерованием осуществляется в основном на многозадачных станках с ЧПУ. Однако, современные токарные обрабатывающие центры с приводным инструментом также могут использоваться для его реализации. Так как для токарно-фрезерных операций требуются два вращающихся шпинделя, а именно шпиндели инструмента и обрабатываемой детали, в случае отсутствия шпинделя инструмента, его можно заменить на приводную головку, устанавливаемую в

инструментальную револьверную головку токарного станка.

Ограничивающим фактором для широкого применения метода в условиях реального производства является отсутствие полноценных технологических математических моделей, позволяющих анализировать и оптимизировать процесс резания в виртуальной среде [6]. Предложенные рядом авторов математические модели точения фрезерованием позволяют прогнозировать силы резания, толщину стружки, вибрации, но при этом не дают возможность комплексно оценить параметры качества поверхности. Следует заметить также, что в ряде исследований отсутствует экспериментальное подтверждение полученных теоретических результатов [7]. В связи с этим, в настоящее время операции точения фрезерованием часто выполняются с опорой на опыт исследователей и дорогостоящие эксперименты. При этом в качестве обрабатываемого материала при проведении экспериментов в большинстве случаев используются конструкционные стали и алюминиевые сплавы [8, 9].

Одним из наиболее важных результатов процесса токарного фрезерования является качество поверхности готовой детали. В отличие от токарной обработки, токарно-фрезерный процесс приводит к получению огранки из-за одновременного вращения заготовки и режущего инструмента [10].

Целью данной работы является определение влияния параметров обработки на величину отклонения от круглости при точении фрезерованием быстрорежущей стали, применяемой для изготовления осевых режущих инструментов.

Материалы и методы исследования

Огранка – это отклонение от круглости, характеризующееся низким размером между двумя параллельными плоскостями или поверхностью и точкой, при котором реальный профиль представляет собой многогранную фигуру, как показано на рис. 1. Количественно огранка оценивается также, как и отклонение от круглости [11].



Рис. 1. Огранка, формируемая в процессе ортогональной токарно-фрезерной обработки

Fig. 1. Facet pattern formed in the orthogonal turning-milling operation

Согласно разработкам канадского исследователя Alptunc Comak из Университета Британской Колумбии максимальная высота пика огранки может быть рассчитана как [12]:

$$e_{c \max} = R_w^e \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} - 1 \right), \quad (1)$$

где R_w^e – фактический радиус заготовки; θ – угловая скорость инструмента.

Угловую скорость инструмента рассчитываем по формуле (2)

$$\theta = \frac{2\pi n_w}{n_t N_t} \quad (2)$$

где n_w – скорость вращения заготовки; n_t – скорость вращения инструмента; N_t – количество зубьев инструмента.

Для планирования эксперимента был выбран метод Тагучи, зарекомендовавший себя в исследованиях в качестве мощного инструмента для анализа параметров резания [13, 14]. В работе была использована ортогональная матрица Тагучи с четырьмя факторами и тремя уровнями для исследования влияния всех параметров обработки с помощью небольшого числа экспериментов, что позволяет сократить время и ресурсы для проведения экспериментальных исследований.

В качестве факторов, влияющих на формирование огранки поверхности определены следующие:

- f_z – подача на зуб, мм/зуб;
- a_p – осевая глубина фрезерования, мм;
- a_e – ширина фрезерования, мм;
- v_c – скорость резания, м/мин.

Верхние ($f_{z_{\max}}, a_{p_{\max}}, a_{e_{\max}}, v_{c_{\max}}$), ниж-
 ние ($f_{z_{\min}}, a_{p_{\min}}, a_{e_{\min}}, v_{c_{\min}}$) и основные ($f_{z_0}, a_{p_0}, a_{e_0}, v_{c_0}$) уровни факторов представ-
 лены в табл. 1.

1. Уровни факторов опыта

1. Levels of experience factors

Фактор	Интервал варьирования	Уровни факторов		
		Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
f_z , мм/зуб	0,01	0,08	0,09	0,1
a_p , мм	0,5	1	1,5	2
a_e , мм	2,0	2	4	6
v_c , м/мин	20	140	160	180

Метод предусматривает проведение девяти опытов. Матрица плана изображена в табл. 2.

2. Матрица плана опыта

2. Experience Plan Matrix

Номер опыта	f_z , мм/зуб	a_p , мм	a_e , мм	v_c , м/мин
1	0,08	1	2	140
2	0,08	1	4	160
3	0,08	1	6	180
4	0,09	1,5	2	160
5	0,09	1,5	4	180
6	0,09	1,5	6	140
7	0,1	2	2	180
8	0,1	2	4	140
9	0,1	2	6	160

Эксперимент проводился на токарном обра-
 батывающем центре DMG NEF400 с дополни-
 тельной приводной осью (рис. 2), благодаря кото-
 рой возможно выполнять как токарную обра-
 ботку, так и обработку вращающимся инструмен-
 том (фрезы, сверла, расточные головки и т.д.).



Рис. 2. Токарный обрабатывающий центр DMG NEF400

Fig. 2. Turning machining center DMG NEF 400

В качестве образца для эксперимента ис-
 пользовалась заготовка из материала Р6М5К5-
 МП (ДИ101-МП), представляющая собой
 предварительно проточенный пруток с проре-
 занными канавками для радиального фрезирования

фрезы (рис. 3). Быстрорежущая сталь Р6М5К5-
 МП, полученная методом порошковой метал-
 лургии, применяется для изготовления режу-
 щего инструмента такого как: фрезы, сверла,
 развертки, зенкеры для обработки среднелеги-
 рованных, легированных, коррозионностойких
 сталей, жаропрочных сталей и сплавов [15].



Рис. 3. Общий вид заготовки

Fig. 3. General view of the piece part

Механообработка выполнялась концевой
 фрезой для обработки нержавеющей сталей и
 жаропрочных сплавов ФКЦ 4321
 $16 \times 26 \times 82 \times 16$, диаметром $d = 16$; число режу-
 щих кромок $z = 4$ (рис. 4).

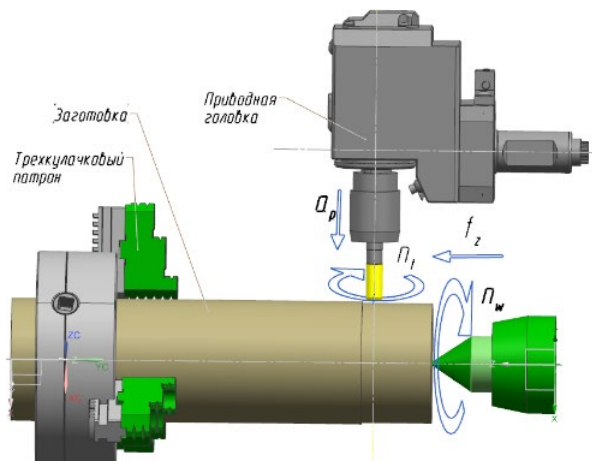


Рис. 4. Фреза ФКЦ 4321
Fig. 4. Milling cutter FCC 4321

Режимы резания назначались в соответствии с рекомендациями производителя инструмента для фрезерования; обработка производилась использованием приводной головки с применением смазочно-охлаждающей жидкости (рис. 5).



а)



б)

Рис. 5. Представление операции ортогональной токарно-фрезерной обработки

а – общий вид зоны обработки; б – схематическое представление

Fig. 5. Presentation of orthogonal turning and milling operation

а – general view of the processing zone; б – representation of the turning-milling operation

В то время как фреза установлена в высокоскоростной приводной головке (максимальная скорость вращения обусловленная

характеристиками приводной головки $n_{t\max} = 5000$ об/мин), заготовка зажимается во вращающемся гидравлическом трехкулачковом патроне, который вращается с меньшей скоростью, чем шпиндель приводной головки (см. рис. 5). Для осуществления процесса резания также необходимо перемещать инструмент вдоль оси вращения детали для создания движения поперечной подачи f_z . При этом скорость резания v_c будет зависеть от вращения детали n_w . Осевая глубина резания a_p регулируется величиной перемещения фрезы в радиальном направлении.

Основными методами оценки отклонения от круглости (огранки) являются:

- измерение на призме;
- измерение на кольце;
- оптический метод измерения.

Схема измерения огранки зависит в первую очередь от четности или нечетности числа граней. Огранку с четным числом граней измеряют по тем же схемам, что и овальность, и легко выявляют при повороте детали. Измерительные головки для этих измерений выбирают исходя из допустимого значения огранки. При контроле на призме (рис. 6, а) величина огранки определяется пересчетом показания отсчетной головки с учетом числа граней и угла призмы. Огранку детали можно измерить с помощью отверстия кольца диаметром, равным наибольшему предельному размеру детали (рис. 6, б). Для этого в условиях мелкосерийного производства рекомендуется использовать регулируемые кольца, а для крупносерийного и массового, приспособление с отверстием постоянного диаметра. Огранку также оценивают по наибольшей разности показаний измерительной головки.

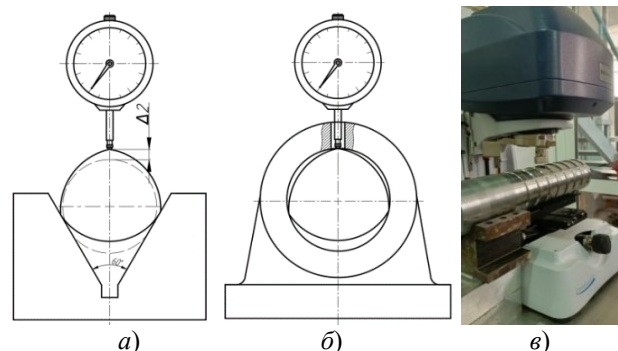


Рис. 6. Методика измерения огранки:

а – на призме; б – в кольце; в – оптический метод

Fig. 6. The method of measuring a facet pattern:

а – with a prism; б – in a ring; в – optical method

Однако в связи с большим количеством граней (расчётное количество пиков граней в зависимости от режимов резания и диаметра составляет 416...899 шт.), в целях оптимизации времени и повышения точности измерения огранки производились с использованием оптического профилометра Bruker Contour GT-K1 (рис. 6, в) на участках размерами 1,7×2,3 мм. Микронеровности были получены в виде облака точек, повторяющих цилиндрический профиль измеренного участка заготовки, из которого можно выявить пики огранки. Вершины пиков огранки на рис. 7 показаны штриховыми зонами. Для снятия показаний огранки в программном обеспечении Vision64 был применен фильтр «выравнивание» для компенсации цилиндричности, а также наклона заготовки, связанной с погрешностью установки.

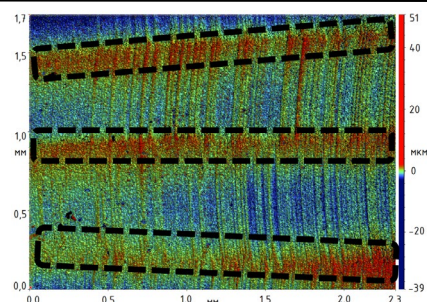


Рис. 7. Топография поверхности под пятикратным увеличением

Fig. 7. The topography of the surface under a fivefold magnification

Результаты и обсуждение

В результате выполнения оптических измерений были получены топографии поверхности, по которым построены графики микронеровностей поверхности, позволяющие обнаружить и измерить огранку, возникающую в процессе обработки точения фрезерованием (рис. 8).

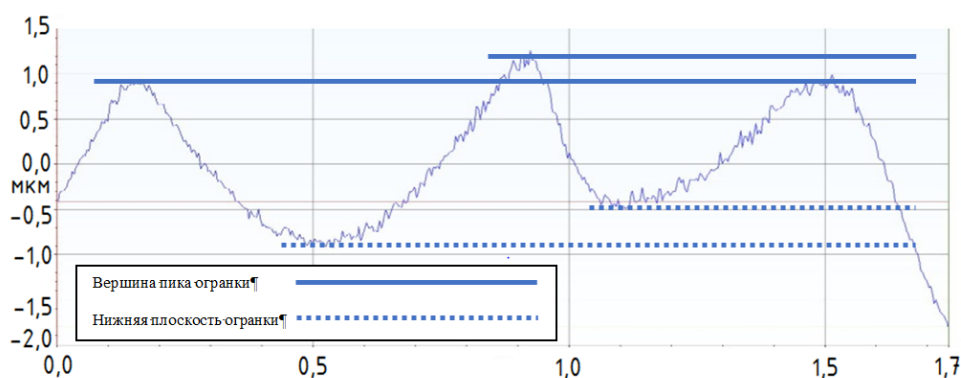


Рис. 8. График микрогеометрии обработанной заготовки

Fig. 8. Graph showing the microgeometry of the processed piece part

Для анализа воспроизводимости формулы (1) сопоставим измеренную высоту профиля огранки с прогнозируемой,

рассчитанной по формуле. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

3. Измеренные и прогнозируемые величины пиков огранки 3. Measured and predicted peak values of the facet pattern

Номер опыта	$e_{c \max 1}$, мм	$e_{c \max 2}$, мм
1	0,0020	0,0031
2	0,0019	0,0030
3	0,0015	0,0027
4	0,0009	0,0034
5	0,0010	0,0045
6	0,0016	0,0044
7	0,0008	0,0049
8	0,0008	0,0043
9	0,0003	0,0060

По полученным формулам (1, 2) построен график (рис. 9), отображающий зависимость высоты пика огранки $e_{c \max}$ от ряда факторов, и установлена степень влияния каждого из них.

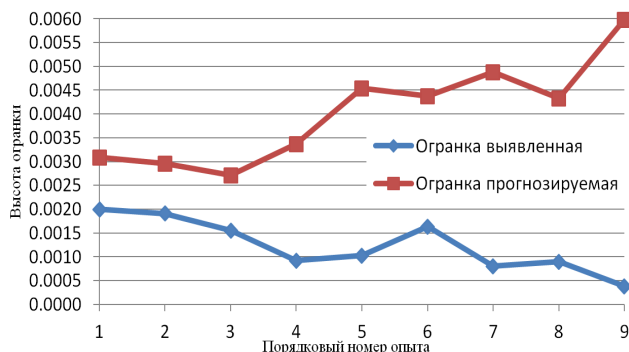


Рис. 9. График сходимости огранки поверхности
Fig. 9. Graph of the convergence of the surface cut

Наблюдается частичная сходимость предсказанных значений с экспериментальными данными. Начиная с 4 и по 9 опыт наблюдаются видимые расхождения в пределах от 0,001 до 0,005 мм. В результате того, что в расчетной формуле не отражено влияние геометрии режущего инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого материала, на процесс формирования максимальной высоты пика огранки.

Анализ полученных зависимостей показывает, что зависимость высоты пика огранки от подачи линейная при ее увеличении (рис. 10, а, б, в), однако, имеются зоны, где влияние осевой глубины фрезерования $a_p=1,6...2,0$ мм не существенно (рис. 10, а). Наименьшая величина огранки наблюдается при ширине фрезерования a_e в диапазоне 3,5...5,5 мм (рис. 10, б, в) при высоких значениях подачи на зуб f_z и низкой скорости резания v_c . Однако при средних значениях величин a_e , a_p , v_c (рис. 10, г, д, е) наблюдаются зоны образования наибольшей высоты огранки, вероятно связанной с образованием наклепа на режущую кромку инструмента.

В результате исследования огранки определено наибольшее влияние на ее возникновение ширины фрезерования a_e при значениях $a_e > 2,5$ мм, однако при увеличении a_e свыше $\frac{1}{2}$ диаметра инструмента, возможно возникновение вибраций приводящих к повышенному износу режущей кромки.

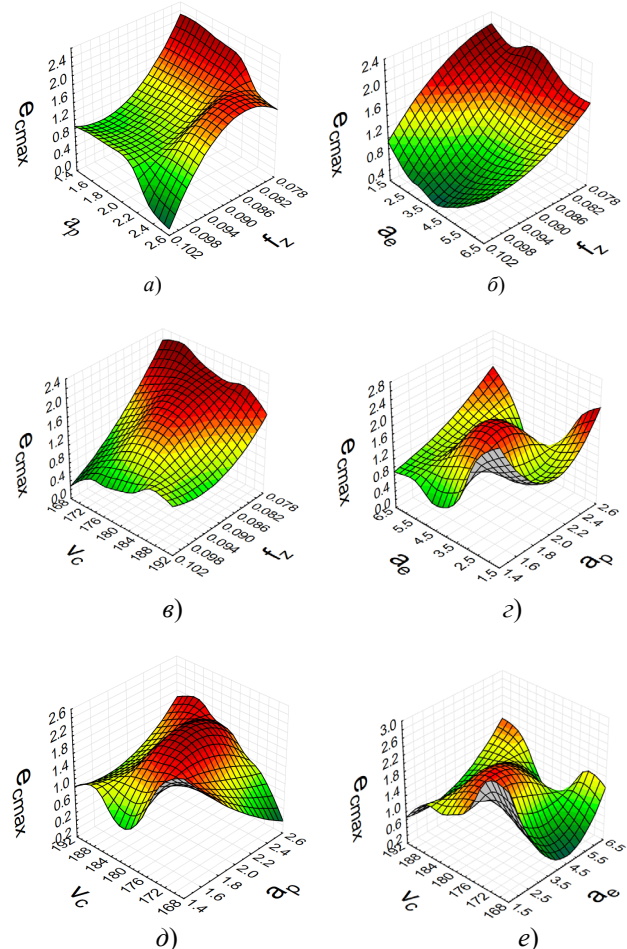


Рис. 10. Зависимости отклонения параметров высоты пика огранки $e_{c \max}$:

а – от осевой глубины фрезерования a_p и подачи на зуб f_z ; б – от ширины фрезерования a_e и подачи на зуб f_z ; в – от скорости резания v_c и подачи на зуб f_z ; г – от ширины фрезерования a_e и осевой глубины фрезерования a_p ; д – от скорости резания v_c и осевой глубины фрезерования a_p ; е – от скорости резания v_c и ширины фрезерования a_e

Fig. 10. Dependences of the deviation of the parameters of the height of the facet pattern peak $e_{c \max}$:

а – on the axial depth of milling a_p and feed to the tooth f_z ; б – on the width of milling a_e and feed to the tooth f_z ; в – on the cutting speed v_c and feed to the tooth f_z ; г – on the milling width a_e and the axial depth of milling a_p ; д – on the cutting speed v_c and the axial depth of milling a_p ; е – on the cutting speed v_c and the milling width a_e

Закключение

Проведено исследование процесса образования огранки при точении фрезерованием образцов из быстрорежущей стали Р6М5К5-МП на токарном обрабатывающем центре с приводным управлением. Определено влияние составляющих подачи инструмента, таких как собственно минутная подача фрезы и

подача, определяемая частотой вращения заготовки на формирование огранки поверхности. Показано, что оптический профилометр является эффективным средством измерения огранки, позволяющим получить объективные результаты с минимальной трудоёмкостью. Достигнутое в ходе проведения опытных работ максимальное значение величины пика составляет 0,002 мм, что является удовлетворительным результатом т.к. соответствует третьей степени точности допуска цилиндричности, круглости профиля продольного сечения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Захаров А.Д., Родин П.Р., Татаренко В.Н.** Обработка фасонных поверхностей охватывающим фрезерованием // Резание и инструмент. 1984. № 3. С. 7–11.
2. **Neagu C.** Studiul geometriei functionale a sculei la prelucrarea arborilor netezi prin frezare frontală // Study of Tool's Functional Geometry in Machining Straight Shafts by Face Milling, The 5th Conference on Friction, Lubrication and Wear, Bucharest, 1987.
3. **Schulz H.** High Speed Turn Milling A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces // CIRP Ann Manuf Technol, 1990, vol. 39, P. 107–109. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61013-0.
4. **Savas V, Ozay C.** Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // J Mater Process Technol 2007. vol. 186. P. 279–283. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040.
5. **Choudhury SK, Bajpai JB.** Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish // Journal of Materials Processing Techn. 2005. vol. 170:3. P. 487–493. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010.
6. **Armarego E.J.A., Karri V., Smith J.R.** Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes-I. theoretical investigation // Int. J. Mach. Tools Manuf. 1994. vol. 34 (6) P. 785–801. DOI:10.1016/0890-6955(94)90059-0.
7. **Солянкин Д.Ю., Ямников А.С., Ямникова О.А.** Методика расчета сил резания при фрезерочении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. № 3. С. 287–292.
8. **Zhibing L, Xibin W.** Characteristic of surface profile and roughness in micro turn-milling of aluminum alloy 2A12 // Technology and Innovation Conference (ITIC 2009), International. 2009. P. 1–4. DOI:10.1049/cp.2009.1424.
9. **Rafai N.H., Islam M.N.** An Investigation into Dimensional Accuracy and Surface Finish Achievable in Dry Turning // Machining Science and Technology. 2009. vol. 13 (4). P. 571–589.
10. **Karagüzel U., Uysal E., Budak E., Bakkal M.** Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2015. vol. 91. P. 24–33.

11. **Муцянюк В.И.** Бесцентровое шлифование. Л.: Машиностроение, 1967. 116 с.
12. **Comak A.** Mechanics, dynamics and stability of turn-milling operations (T). University of British Columbia. 2018. DOI:10.14288/1.0368954.
13. **Ozay C., Savas V.** The Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Tangential Turnmilling using Taguchi Method // Advances in Natural and Applied Sciences. 2012. vol. 6. P. 866–874.
14. **Yildiz T., Gür A.K.** The Optimization of Abrasive Wear Behavior of FeCr Coating Composite with Taguchi Method // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011. vol. 5 (12). P. 2394–2402.
15. **Матлыгин Г.В., Савилов А.В., Пятых А.С., Ушаков В.А.** Технологические аспекты применения точения фрезерованием при изготовлении режущих инструментов // Вестник современных технологий. 2022. № 1 (25). С.16–22.

REFERENCES

1. **Zakharov A.D., Rodin P.R., Tatarenko V.N.** Processing of shaped surfaces by hollow milling // Cutting and tools, 1984, no. 3, pp. 7–11.
2. **Neagu C.** Studiul geometriei functionale a sculei la prelucrarea arborilor netezi prin frezare frontală // Study of Tool's Functional Geometry in Machining Straight Shafts by Face Milling. Proceedings of the 5th Conference on Friction, Lubrication and Wear, Bucharest, 1987.
3. **Schulz H.** High Speed Turn Milling. A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces // CIRP Ann Manuf. Technol, 1990 vol. 39, P. 107–109. DOI:10.1016/S0007-8506(07)61013-0.
4. **Savas V, Ozay C.** Analysis of the surface roughness of tangential turn-milling for machining with end milling cutter // J Mater Process Technol 2007, vol. 186, pp. 279–283. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2006.09.040.
5. **Choudhury SK, Bajpai JB.** Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish // Journal of Materials Processing Techn. 2005, vol.170:3, pp. 487–493. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.12.010.
6. **Armarego E.J.A., Karri V., Smith J.R.** Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes-I. theoretical investigation // Int. J. Mach. Tools Manuf. 1994. vol. 34 (6). P. 785–801
7. **Solyankin D.Yu., Yamnikov A.S., Yamnikova O.A.** Methodology of estimation of cutting forces during milling // Izvestiya TulSU. Technical sciences, 2011, no. 3, pp. 287–292
8. **Zhibing L, Xibin W.** Characteristic of surface profile and roughness in micro turn-milling of aluminum alloy 2A12 // Technology and Innovation Conference (ITIC 2009), International. 2009, pp. 1–4. DOI:10.1049/cp.2009.1424.

9. Rafai, N.H., Islam M.N. An Investigation into Dimensional Accuracy and Surface Finish Achievable in Dry Turning // *Machining Science and Technology*, 2009, vol. 13 (4), pp. 571–589.

10. Karagüzel, U., Uysal, E., Budak, E., Bakkal, M. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015, vol. 91, pp. 24–33.

11. Mutsyanko V.I. Centerless grinding. Leningrad: Mashinostroenie, 1967, 116 p.

12. Comak A. Mechanics, dynamics and stability of turn-milling operations (T). University of British Columbia. 2018. DOI:10.14288/1.0368954.

13. Ozay C., Savas V. The Optimization of Cutting Parameters for Surface Roughness in Tangential Turnmilling using Taguchi Method // *Advances in Natural and Applied Sciences*. 2012. vol. 6. pp. 866–874.

14. Yildiz T., Gür A.K. The Optimization of Abrasive Wear Behavior of FeCr Coating Composite with Taguchi Method // *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2011. vol. 5 (12). pp. 2394–2402.

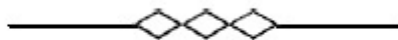
15. Matlygin G.V., Savilov A.V., Pyatykh A.S., Ushakov V.A. Technological aspects of the application of turn-milling in the manufacture of cutting tools // *Bulletin of Modern technologies*, 2022, no. 1 (25), pp.16–22.

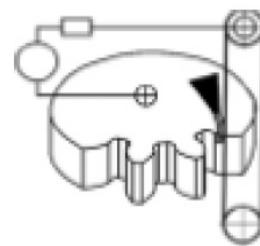
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 18.04.2023; принята к публикации 28.04.2023

The article was submitted 13.04.2023; approved after reviewing 18.04.2023; accepted for publication 28.04.2023





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №7 (145). С.24-32.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 24-32.

Научная статья
УДК 621.785.53.062
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Модифицирование поверхности быстрорежущего инструмента совместным насыщением вольфрамом и азотом

Лариса Георгиевна Петрова¹, д.т.н.
Виктор Максимович Вдовин², аспирант
Александра Сергеевна Сергеева³, к.т.н.

^{1, 3} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

²АО «НПО Лавочкина, Химки, Россия

¹ petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>

² vdovin_viktor@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0004-2225-3559>

³ sergeevamadi@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7897-6714>

Аннотация. Актуальность проводимого исследования обусловлена ужесточением требований к производительности быстрорежущего инструмента при повсеместном внедрении автоматических линий и станков с числовым программным управлением. Повышение ресурса работы инструмента необходимо также в целях снижения потребления дорогостоящих легирующих элементов, в первую очередь, вольфрама. Решение этих задач требует применения технологий упрочнения режущих поверхностей. Свою эффективность при поверхностном упрочнении различных сталей показали комбинированные процессы химико-термической обработки (ХТО), сочетающие диффузионное поверхностное легирование с насыщением азотом. В настоящей работе поставлена цель исследования процесса совместного поверхностного насыщения быстрорежущей стали вольфрамом и азотом для повышения стойкости малоразмерного инструмента. Экспериментальные исследования проводились на образцах и сверлах малого диаметра из стали Р6М5. Для лабораторных экспериментов по комбинированному процессу ХТО использовали установку для азотирования в многокомпонентных средах. Металлизацию вольфрамом осуществляли шликерным методом с параллельным азотированием инструмента в тлеющем разряде. Для определения режима, обеспечивающего необходимые температуры для насыщения вольфрамом и азотом, был проведен замер температур контрольных образцов стали на поверхности и в сердцевине при различных длительностях импульса тока в фазе прогрева. Металлографическим анализом установлено, что в результате ХТО в стали Р6М5 формируется поверхностный модифицированный слой толщиной 10...15 мкм. Структура слоя представляет собой зону внутреннего азотирования, которая состоит из твердого раствора вольфрама и азота в железе и дисперсных включений нитридов вольфрама. Дисперсионное и твердорастворное упрочнение обеспечивает двукратное повышение микротвердости модифицированного W-N слоя по сравнению с основой сплава. Под упрочненным слоем выявлена переходная диффузионная зона азотистого мартенсита, которая создает плавный градиент микротвердости от слоя к сердцевине, что предохраняет его от охрупчивания, отслаивания и выкрашивания. Методом металлофизического моделирования по разработанной ранее методике проведен расчет показателя упрочнения модифицированного слоя (прироста предела текучести), который показал, что с увеличением концентрации вольфрама в слое растет доля компонента дисперсионного упрочнения частицами W₂N. Натурные испытания в условиях производства установили, что инструмент с упрочненным слоем обладает повышенной стойкостью. Стойкость сверл, определяемая по количеству просверленных отверстий до выхода из строя, повышается в 2,2 раза при сверлении по стали 30ХГСА и более чем в 7,0 раз при сверлении по титановому сплаву BT-23.

Ключевые слова: быстрорежущие стали, инструмент, диффузионная металлизация, азотирование

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2020-0011 (2019-1342), экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования МАДИ.

Для цитирования: Петрова Л.Г., Вдовин В.М., Сергеева А.С. Модифицирование поверхности быстрорежущего инструмента совместным насыщением вольфрамом и азотом // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 24–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Modification of a high-speed cutting tool surface by combined tungsten steel and nitrogen saturation

Larisa G. Petrova¹, D.Eng.

Viktor M. Vdovin², PhD student

Alexandra S. Sergeeva³, PhD Eng.

^{1,3} Moscow Automobile and Road State Technical University (MADI), Moscow, Russia

² JSC "SPA Lavochkina, Khimki, Russia

¹ petrova_madi@mail.ru,

² vdovin_viktor@bk.ru,

³ sergeevamadi@yandex.ru

Abstract. Research significance is contingent on the requirement strengthening for high-speed cutting tools performance and widespread introduction of automatic lines and NC-machines. An increase of the tool service life is also necessary for the reduction of putting expensive alloying elements to use, primarily, tungsten. The solution of these problems requires the use of technologies for hardening cutting surfaces. Combined processes of thermochemical treatment processes, uniting diffusive surface alloying with nitrogen saturation have shown their effectiveness in the surface hardening of various steels. Now the aim is to study the process of combined surface tungsten and nitrogen saturation of high-speed steel for increasing small-sized tool durability. Experimental studies were carried out on samples and small-diameter drills made of P6M5 steel. For laboratory experiments connected with combined process of thermochemical treatment an installation for nitriding in multicomponent media was used. Metallization with tungsten was carried out by the slip method with parallel nitriding of the tool in a glow discharge. To determine the regime that provides the necessary temperatures for oxygen and nitrogen saturation, the temperatures of the control steel samples were measured on the surface and in the core at different durations of the current pulse in the heating phase. Metallographic analysis proved that thermochemical treatment resulted in a modified surface layer with a thickness of 10...15 microns, formed in P6M5 steel. The structure of the layer is an internal nitriding zone, which consists of a solid tungsten and nitrogen solution in iron and dispersed inclusions of tungsten nitrides. Dispersion and solid solution hardening provide a two-fold increase in the microhardness of the modified W-N layer compared to the alloy base. A transitional diffusion zone of nitrogenous martensite has been revealed under the hardened layer, creating a smooth microhardness gradient from the layer to the core, protecting it from embrittlement, peeling and staining. Using a metallographical simulated test in predeveloped methodology, the calculation of the hardening index of the modified layer (yield point increase) was made. It showed that with increase in the concentration of tungsten in the layer, the proportion of the component of the dispersion hardening by W2N particles also increases. Full-scale tests in production conditions showed that the tool with a hardened layer had increased resistance. The durability of drills, determined by the number of drilled holes made before its dropping-out, increases by 2,2 times when drilling on 30XGSA steel and by more than 7,0 times when drilling a titanium alloy VT-23.

Keywords: high-speed steels, tool, diffusion metallization, nitriding

Acknowledgements: the material was prepared within the framework of scientific research under the project No. FSFM-2020-0011 (2019-1342), experimental studies were conducted using the equipment of the MADI collective use center.

For citation: Petrova L.G., Vdovin V.M., Sergeeva A.S. Modification of a high-speed cutting tool surface by combined tungsten steel and nitrogen saturation / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 24–32. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-24-32

Введение

Быстрорежущие инструментальные стали применяют для производства сверл, резцов, фрез, метчиков; изготовления режущих кромок инструмента, в том числе, съемных

пластин. К таким сталям предъявляются повышенные требования по теплостойкости, твердости, износостойкости. В процессе работы инструмент из быстрорежущей стали должен сохранять заданный размер и форму, выдерживать серьезные динамические нагрузки и

высокие температуры. Для изготовления быстрорежущего инструмента наиболее распространены вольфрамовые и вольфрамомолибденовые стали (P9, P12, P18, P6M3, P6M5, P8M3), которые используют для обработки черных цветных металлов, а также пластмасс [1]. Эти стали являются наиболее подходящим материалом для изготовления малоразмерного инструмента, в частности, сверл малого диаметра (менее 3,0 мм), поскольку обладают высокой технологической пластичностью.

На сегодняшний день высокие темпы развития машиностроения, повсеместное внедрение автоматических линий и станков с числовым программным управлением ужесточают требования к надежности и производительности инструмента. Повышение ресурса работы инструмента необходимо в целях снижения потребления дорогостоящих компонентов и требует применения технологий упрочнения режущих поверхностей. Последнее особенно актуально для сверл малого диаметра, которые зачастую обладают пониженной стойкостью в силу технологических особенностей изготовления и существенного влияния структурных отклонений (карбидной неоднородности, размера зерна и т. п.) [2, 3].

Одним из подходов для решения задачи повышения ресурса инструмента является получение в режущей кромке мелкодисперсных нитридов вольфрама, что достигается методами химико-термической обработки (азотированием) [4 – 6]. Однако такая обработка не позволяет обеспечить высокую объемную долю нитридов, так как вольфрам в исходной стали в значительной степени связан в карбидную фазу. Представляет интерес использование метода диффузионной металлизации для дополнительного введения вольфрама в поверхностный слой стали, что в сочетании с азотированием позволит получить модифицированный слой, дисперсно-упрочненный нитридами. Данный подход предусматривает использование в качестве матричного материала экономолегированной вольфрамомолибденовой стали (P6M5 вместо P18), что способствует ресурсосбережению и снижению стоимости инструмента.

Комбинации процессов диффузионного поверхностного легирования с насыщением азотом показали свою эффективность при

поверхностном упрочнении различных конструкционных сталей [7 – 10]. В настоящей работе поставлена цель исследования процесса совместного насыщения быстрорежущей стали вольфрамом и азотом в тлеющем разряде для повышения стойкости малоразмерного инструмента.

Методика исследований

Исследования проводили на образцах и сверлах диаметром 1,0 мм из быстрорежущей инструментальной стали P6M5 в состоянии после стандартной термообработки, которая формирует структуру стали с дисперсными карбидами вольфрама в твердом растворе.

Для реализации эксперимента по диффузионному вольфрамиранию в сочетании с азотированием использовали лабораторную установку для ионного азотирования в многокомпонентных средах. Металлизацию вольфрамом проводили шликерным методом [10] из суспензии, содержащей нанодисперсный порошок оксида вольфрама WO_3 , хлористый аммоний и связующее вещество (цапонлак). Совместное насыщение стали вольфрамом и азотом осуществлялось в импульсном режиме электрического тока в атмосфере аммиака.

Методом металлофизического моделирования выполнено теоретическое обоснование эффективности дисперсионного упрочнения железной матрицы нитридами вольфрама. В качестве показателя упрочнения используется параметр прироста предела текучести. Для оценки этого параметра при поверхностном легировании железа вольфрамом и азотом применена методика расчета, разработанная для прогнозирования упрочнения в тройных системах Fe-Me-N [11].

Микроструктуру образцов и сверл после диффузионного насыщения изучали на поперечных микрошлифах методом металлографического анализа при помощи оптического микроскопа Axiovert 25 CA при увеличениях $\times 50 \dots \times 500$ крат. В качестве травителя использовали нитал: 10 % раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Для выявления тонкого строения отдельных участков азотированных слоев использовали метод растровой электронной микроскопии (РЭМ JEOL JSM-6480LV) с

аналитической приставкой (энергодисперсионным анализатором). Электронные изображения микрошлифов и изломов получали в режиме вторичных электронов, а также в характеристическом излучении элементов.

Микротвердость модифицированного слоя измеряли на поперечных микрошлифах на микротвердометре ПМТ-3 с нагрузкой 0,1 Н. Профили микротвердости по глубине получали путем измерения отпечатков с определенным шагом на расстоянии от поверхности.

Натурные испытания сверл проводили в производственных условиях АО «НПО Лавочкина» на станке Manford VH-610 с числовым программным управлением Fanouc. Стойкость инструмента определяли по количеству просверленных отверстий до выхода его из строя при сверлении по стали 30ХГСА (заготовка 38×46×182 мм) по ГОСТ 19903-74 и по титановому сплаву ВТ-23 (лист толщиной 4 мм) по ОСТ 1 90013. Параметры резания: скорость $v = 3$ м/мин; число оборотов $S = 455$ об./мин; подача $F = 14$ мм/мин; подача на оборот $Fz = 0,015$ мм/об.

Результаты и их обсуждение

При постановке эксперимента предполагали, что в результате диссоциации аммиака происходит восстановление атомарного вольфрама из оксида водородом, а градиент концентрации вольфрама на поверхности обеспечивает его диффузию в металлическую основу стали. Параллельно осуществляется диффузия образовавшихся ионов азота в металл с образованием модифицированного слоя.

Было учтено, что скорости диффузии вольфрама и азота в железе существенно различаются, что требует различных температур для эффективного насыщения. Как показывают ранние исследования [12], активное проникновение вольфрама в железо происходит при температурах не ниже 1050 °С, но нагрев сердцевин инструмента не должен превышать температуру отпуска стали (600 °С) во избежание ее разупрочнения. Таким образом, процесс должен обеспечить исключительно поверхностный прогрев образца на толщину не более 15 мкм. Эта задача реализуется в импульсном режиме тлеющего разряда с контролем параметра продолжительности импульса в фазах прогрева и остывания.

Для определения режима, обеспечивающего необходимые температуры на поверхности и в сердцевине, был проведен эксперимент по замеру температур в этих участках контрольных образцов стали при различных длительностях импульса в фазе прогрева. Общая продолжительность цикла «нагрев-остывание» была рассчитана в 2,51 мкс на основе известной формулы, связывающей частоту тока с заданной толщиной слоя при поверхностной закалке стали ТВЧ. Экспериментально установлено, что прогрев как поверхностного слоя, так и сердцевин недостаточен при малой длительности фазы прогрева (рис. 1, а). Показано, что выход на требуемые температурные режимы на поверхности и в сердцевине достигается за 45 с при длительности фазы прогрева 0,5 мкс (рис. 1, б). Импульсная смена температур обеспечивает насыщение стали вольфрамом в фазе прогрева и насыщение азотом в фазе остывания.

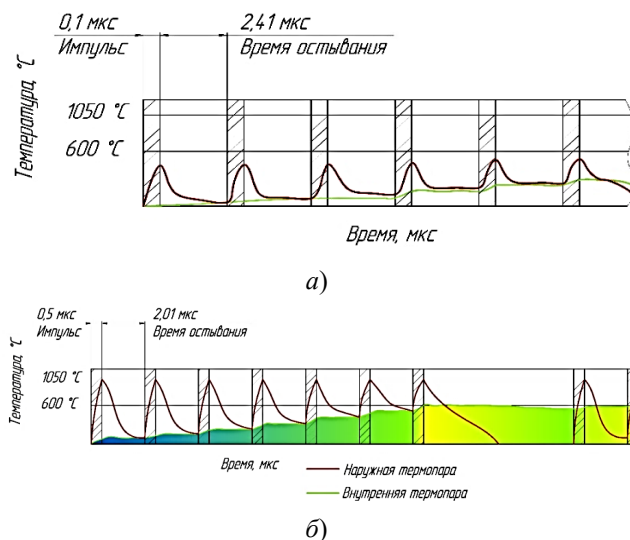


Рис. 1. Схема температурных условий на поверхности и в сердцевине изделия, подвергаемого импульсному нагреву в электрическом разряде при различных длительностях импульса в фазе прогрева: 0,1 мкс (а) и 0,5 мкс (б)

Fig. 1. Diagram of temperature conditions on the surface and in the core of a product subjected to pulsed heating in an electric discharge at different pulse durations in the heating phase: 0,1 ms (a) and 0,5 ms (b)

Исследования микроструктуры стали после совместного насыщения вольфрамом и азотом показали, что на поверхности образуется упрочненный слой искомой толщины (10...15 мкм), в котором присутствуют

дисперсные частицы, визуализируемые в характеристическом излучении азота (рис. 2).

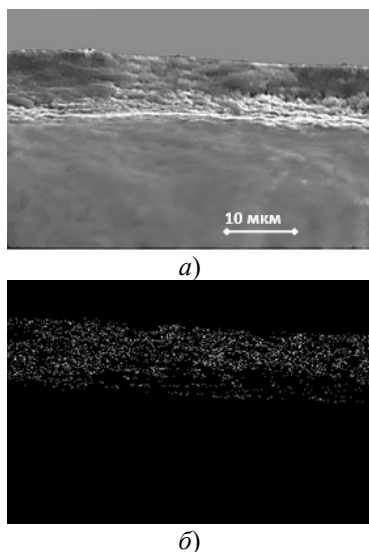


Рис. 2. РЭМ изображения модифицированного слоя в стали P6M5 во вторичных электронах (а) и в характеристическом излучении азота (б)
Fig. 2. SEM images of the modified P6M5 steel layer in secondary electrons (a) and in a characteristic nitrogen radiation (b)

Присутствие вольфрама в этих частицах подтверждается спектральным анализом (рис. 3), что позволяет идентифицировать их как нитриды вольфрама.

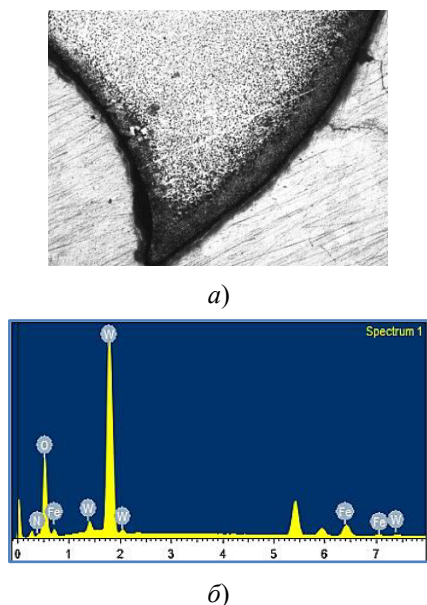


Рис. 3. Изображение режущей кромки сверла с модифицированным слоем, $\times 100$ (а) и спектр элементов в точке локализации дисперсной частицы в слое (б)
Fig. 3. Cutting edge image of a drill with a modified layer, $\times 100$ (a) and the spectrum of elements at the point of localization of a dispersed particle in the layer (b)

Таким образом, экспериментально установлено, что модифицированный слой формируется на базе зоны внутреннего азотирования, т. е. представляет собой твердый раствор вольфрама и азота в железе с дисперсными включениями нитридов вольфрама, что позволяет применить расчетную методику прогнозируемого упрочнения на основе металлофизической модели.

Как показано в работе [11], упрочнение зон внутреннего азотирования в сталях после комбинированной обработки, состоящей из диффузионной металлизации и азотирования, происходит преимущественно в результате суммарного действия механизмов твердорастворного упрочнения азотом и дисперсионного упрочнения нитридами легирующего металла. При этом уровень твердорастворного упрочнения железа легирующим металлом пренебрежимо мал. Согласно термодинамической оценке, наиболее стабильным соединением в системе Fe-W-N является ГЦК нитрид W_2N . Исходя из образования именно этого нитрида, для расчета прироста предела текучести вольфрамо-азотированного железа использовали соотношение:

$$\Delta\sigma_T = \Delta\sigma^N + \Delta\sigma^{W_2N}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma^N$ – параметр твердорастворного упрочнения системы Fe-W-N азотом; $\Delta\sigma^{W_2N}$ – параметр дисперсионного упрочнения нитридными частицами.

Используемая методика расчета предполагает зависимость каждой из компонент упрочнения в выражении (1) от концентрации металла в диффузионном слое (C_W), которая в свою очередь, перераспределяется между твердым раствором (C_W^α) и нитридной фазой $C_W^{W_2N}$. Соотношение между этими концентрациями описывается выражениями:

$$C_W^\alpha / C_W = \zeta_W \text{ и } C_W^{W_2N} / C_W = 1 - \zeta_W, \quad (2)$$

где ζ_W – коэффициент перераспределения, принимаемый $\zeta_W = 0,6$ для вольфрама.

Для расчета твердорастворного упрочнения азотистого феррита использовали классическую зависимость предела текучести от концентрации азота в твердом растворе C_N :

$$\Delta\sigma^N = k_N C_N, \quad (3)$$

где k_N – коэффициент твердорастворного упрочнения железа азотом, равный 4670 МПа.

Наличие легирующего элемента в железе оказывает влияние на количество растворенного азота через коэффициенты активности γ_{Me}^N , которые, в свою очередь, зависят от концентрации этого металла:

$$C_N = \frac{C_N^0}{\gamma_{Me}^N}; \lg \gamma_{Me}^N = -A C_{Me}^n, \quad (4)$$

где C_N^0 – равновесная концентрация азота в системе Fe-N (0,05 % по массе); A и n – индивидуальные индексы для данного легирующего металла.

Используя данные работы [11], для вольфрама получаем зависимость:

$$\lg \gamma_W^N = -0,118 C_W, \quad (5)$$

Путем комбинации выражений (3), (4) и (5) для расчета параметра твердорастворного упрочнения железа азотом в системах Fe-W-N получено уравнение:

$$\Delta\sigma^N = 233,5 \cdot 10^{-0,118 C_W}, \quad (6)$$

Для расчета параметров дисперсионного упрочнения нитридными выделениями применена формула Мотта-Набарро [11], которая связывает напряжения $\Delta\tau$, возникающие в металле с частицами, с их объемной долей f :

$$\Delta\tau_{MeN} = 2G_{Fe} \cdot \varepsilon \cdot \delta \cdot f, \quad (7)$$

где $2G_{Fe}$ – модуль сдвига железа, равный 82000 МПа.

В формуле (7) интегральный показатель ε связывает упругие константы матричного металла и нитридной частицы (объемный модуль K , модуль упругости E и коэффициент Пуассона ν), а параметр размерного несоответствия δ рассчитывается на основе разницы в периодах решеток металла-растворителя α_{Fe} и нитрида α_{W_2N} . Расчеты с использованием соответствующих констант дают значения безразмерных параметров для нитрида вольфрама: $\varepsilon_{W_2N} = 0,443$ и $\delta_{W_2N} = 0,359$.

Объемная доля частиц нитридов вольфрама пропорциональна концентрации вольфрама, связанного в нитриды $C_W^{W_2N}$:

$$f_{W_2N} = C_W^{W_2N} \cdot \frac{M_{W_2N} \rho_{Fe}}{100 M_W \rho_{W_2N}}, \quad (8)$$

где M_{W_2N} и M_W – молекулярные массы нитрида W_2N ($M_{W_2N} = 382$) и легирующего металла ($M_W = 184$); ρ_{Fe} – удельный вес железа ($\rho_{Fe} = 7,68$ г/см³), ρ_{W_2N} – удельный вес нитрида W_2N ($\rho_{W_2N} = 12,2$ г/см³).

Для того чтобы величину напряжений в параметр предела текучести применили известное соотношение: $\Delta\sigma = 2,75\Delta\tau$, включающее ориентационный множитель для объемно-центрированной кристаллической решетки железа.

В итоге связь параметра дисперсионного упрочнения ферритной матрицы нитридами вольфрама с базовой концентрацией металла в железе описывается выражением:

$$\Delta\sigma^{W_2N} = 374,5 C_W, \quad (9)$$

Для сравнения, рассчитанный по аналогичной методике коэффициент дисперсионного упрочнения железа карбидами вольфрама оказывается неизмеримо меньше ($\Delta\sigma^{W_2C} = 13,2 C_W$), что обусловлено гораздо более низким фактором размерного несоответствия решеток карбида и железа. Таким образом, проведенный расчет подтверждает более высокую прогнозируемую эффективность дисперсионного упрочнения нитридами вольфрама.

Проведенное сопоставление значимости механизмов твердорастворного упрочнения азотом и дисперсионного упрочнения нитридами системы Fe-W-N показало, что при низкой входной концентрации вольфрама C_W вклады этих механизмов примерно равны. Так, при $C_W = 1,0$ % по массе $\Delta\sigma^{W_2N}$ и $\Delta\sigma^N$ составляют, соответственно, 48,5 % и 51,5 % от общей величины упрочнения (рис. 4, а). Тогда как с увеличением этой концентрации значимость дисперсионного механизма увеличивается. При $C_W = 5,0$ % по массе вклад в общее упрочнение $\Delta\sigma^{W_2N}$ составляет уже 67 % против 33 % для $\Delta\sigma^N$ (рис. 4, б).

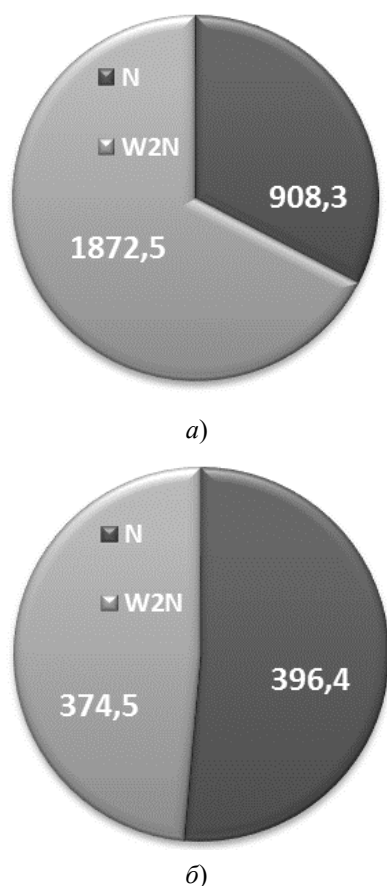


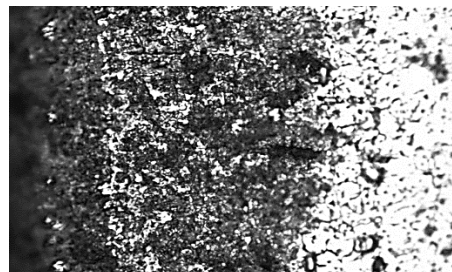
Рис. 4. Диаграмма вкладов прироста предела текучести (МПа) в суммарное упрочнение сплавов Fe-W-N при твердорастворном упрочнении вольфрамом («N») и дисперсионном упрочнении нитридами вольфрама («W₂N»): расчет для концентрации вольфрама в системе 1,0 % (а) и 5,0 % (б)

Fig. 4. Diagram of the yield point increase (MPa) contributions to the total hardening of Fe-W-N alloys under tungsten solid-solution hardening («N») and tungsten nitride dispersion hardening («W₂N»): calculation for the tungsten concentration in the system of 1,0 % (a) and 5,0 % (b)

Эксперименты подтвердили, что благодаря дисперсионному и твердорастворному упрочнению модифицированный W-N слой в быстрорежущей стали обладает повышенной микротвердостью, почти в два раза превышающей микротвердость основы (рис. 5, а). Под упрочненным слоем имеется переходная диффузионная зона азотистого мартенсита (см. рис. 3, а, рис. 5, б), что обусловлено продвижением азота на большую глубину по сравнению с диффузией атомов вольфрама. Переходная зона обеспечивает плавное изменение микротвердости от слоя к сердцевине, что предохраняет его от охрупчивания, отслаивания и выкрашивания.



а)

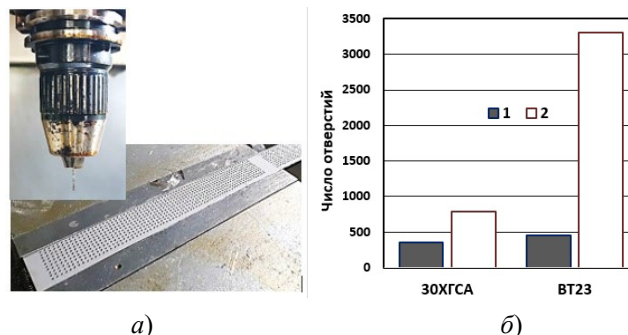


б)

Рис. 5. Распределение микротвердости по толщине слоя в стали P6M5 (а) в сопоставлении с его микроструктурой (б)

Fig. 5. Distribution of microhardness over the layer thickness in steel P6M5 (a) comparing to its microstructure (b)

Натурные испытания сверл с модифицированным диффузионным W-N слоем (рис. 6, а) показали существенное увеличение их стойкости при сверлении конструкционной стали 30ХГСА (в 2,2 раза) и кратное (более чем в 7,0 раз) увеличение стойкости при сверлении отверстий в титановом сплаве BT-23 (рис. 6, б). Количество отверстий при сверлении по титану инструментом с полученным слоем на 25 % превышает число отверстий, просверленных инструментом с нанесенным CVD-покрытием нитрида вольфрама.



а)

б)

Рис. 6. Натурные испытания по сверлению титанового сплава BT-23 (а) и их результаты: сравнительная диаграмма стойкости необработанных сверл и сверл с модифицированным W-N слоем (б)

Fig. 6. Full-scale drilling tests of titanium alloy VT-23 (a) and their results: comparative resistance diagram of unworked drills and drills with modified W-N layer (b)

Заключение

Исследованный процесс поверхностного модифицирования быстрорежущей стали Р6М5 совместным насыщением вольфрамом и азотом позволяет сформировать диффузионный слой толщиной 10...15 мкм на базе зоны внутреннего азотирования – азотистого мартенсита с дисперсными частицами нитридов вольфрама. Подтвержденными экспериментально расчетами по металлофизической модели установлено, что упрочнение модифицированного слоя, выражающееся в повышении микротвердости, обусловлено дисперсионным и твердорастворным механизмами.

Натурные испытания малоразмерных (1,0 мм в диаметре) сверл с модифицированным диффузионным слоем показали существенное увеличение их стойкости, определяемой по числу просверленных отверстий до их выхода из строя. При сверлении по конструкционной стали 30ХГСА стойкость повышается в 2,2 раза, при сверлении по титановому сплаву ВТ-23 стойкость увеличивается более чем в 7,0 раз.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Адаскин А.М. Быстрорежущие стали нового поколения / А.М. Адаскин, Л.С. Кремнев, И.Ю. Сапронов // Перспективные материалы. 2014. № 2. С. 48–54.
2. Григорьев С.Н., Черкасов П.М., Сгибнев Р.В. Технологические особенности вакуумно-плазменной обработки осевого мелкогабаритного инструмента // Материалы Всероссийской научно-практической конференции и выставки «Технологии и оборудование для нанесения износостойких, твердых и коррозионностойких покрытий». Москва: РХТУ, 2004. С. 54–55.
3. Поletaев В.А. Упрочнение сверл из быстрорежущей стали импульсной магнитной обработкой // Novainfo.ru. 2017. Т. 1. № 73. С. 43–47.
4. Александров В.А. Азотирование инструмента из высокохромистых и быстрорежущих сталей / В.А. Александров, К.В. Богданов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 5. С. 14–20.
5. Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 1 (127). С. 3–10. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10.
6. Belashova I. S., Petrova L. G., Aleksandrov V. D., Demin P. E. Improving the Properties of Low-Alloy and Carbon Steel Tools by Cyclic Nitriding // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 1. P. 53–56. DOI 10.3103/S1068798X18010057

7. Малахов А.Ю., Александров В. А., Перекрестова В. А. Комбинирование процессов металлизации и низкотемпературного азотирования // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 46-7. С. 36–43. DOI 10.18411/lj-01-2019-130.

8. Александров В.А., Петрова Л.Г., Сергеева А.С. [и др.]. Повышение стойкости режущего инструмента методом модифицирования поверхности с нанесением покрытий из соединений вольфрама в высокочастотном разряде // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 1(157). С. 30–35.

9. Демин П. Е., Барабанов С. И., Малахов А. Ю., Александров В. А. Упрочнение штамповых сталей металлокерамическими покрытиями, получаемыми способом газового азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 2 (128). С. 17–21. DOI 10.30987/2223-4608-2022-2-17-21.

10. Petrova L.G., Demin P.E. Surface modification techniques for steel components working in wear and corrosion conditions/ Key Engineering Materials. 2022. Т. 909 KEM. С. 108–114.

11. Петрова Л.Г. Оценка прогнозируемого упрочнения железа при поверхностном легировании металлом в сочетании с азотированием // Технология металлов. 2022. № 8. С. 41–52. DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-8-41-52.

12. Aleksandrov V.A., Petrova L.G., Sergeeva A.S., Aleksandrov V.D., Akhmetzhanova E.U. Production of tool coatings by chemicothermal plasma methods // Russian Engineering Research. 2019. Т. 39. № 8. С. 693–695. DOI 10.3103/S1068798X19080033

REFERENCES

1. Adaskin A.M. High-speed steels of a new generation / A.M. Adaskin, L.S. Kremnev, I.Yu. Sapronov // Perspective materials, 2014, no. 2. pp. 48–54.
2. Grigoriev S.N., Cherkasov P.M., Shibnev R.V. Technological features of vacuum-plasma processing of axial small-size tools // Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference and exhibition "Technologies and equipment for the application of wear-resistant, hard and corrosion-resistant coatings". Moscow: RChTU, 2004, pp. 54–55.
3. Poletaev V.A. Hardening of high-speed steel drills using pulsed magnet treatment / V.A. Poletaev // Novainfo.ru. 2017, vol. 1, no. 73, pp. 43–47.
4. Alexandrov V.A. Nitriding of tools made of high-chromium and high-speed steels / V.A. Alexandrov, K.V. Bogdanov // Hardening technologies and coatings, 2005, no. 5. pp. 14–20.
5. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Increasing the durability of high-speed steel tools during nitriding with controlled nitrogen potential// Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 1 (127), pp. 3-10. DOI 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10.
6. Belashova I. S., Petrova L. G., Aleksandrov V. D., Demin P. E. Improving the Properties of Low-Alloy and Carbon Steel Tools by Cyclic Nitriding // Russian Engineering Research. 2018. Vol. 38, No. 1. P. 53–56. DOI 10.3103/S1068798X18010057.

7. Malakhov A.Yu., Alexandrov V. A., Perekrestova V. A. Combination of metallization and low-temperature nitriding processes // Trends in the development of science and education, 2019, no. 46-7, pp. 36–43. DOI 10.18411/lj-01-2019-130.

8. Alexandrov V.A., Petrova L.G., Sergeeva A.S. [et al.]. Increasing the durability of cutting tools by surface modification with coating of tungsten compounds in high-voltage discharge // Hardening technologies and coatings, 2018, vol. 14, no. 1(157). pp. 30–35.

9. Demin P. E., Barabanov S. I., Malakhov A. Yu., Alexandrov V. A. Hardening of stamped steels with metal-ceramic coatings obtained by gas nitriding method // Science-intensive technologies in mechanical engineering,

2022, no. 2 (128), pp. 17–21. DOI 10.30987/2223-4608-2022-2-17-21.

10. Petrova L.G., Demin P.E. Surface modification techniques for steel components working in wear and corrosion conditions/ Key Engineering Materials. 2022. vol. 909 KE M. pp. 108–114.

11. Petrova L.G. Evaluation of the predicted hardening of iron during surface alloying with metal in combination with nitriding // Technology of metals, 2022, no. 8. pp. 41–52. DOI 10.31044/1684-2499-2022-0-8-41-52.

12. Aleksandrov V.A., Petrova L.G., Sergeeva A.S., Aleksandrov V.D., Akhmetzhanova E.U. Production of tool coatings by thermochemical plasma methods // Russian Engineering Research, 2019, vol 39, no 8. pp. 693–695. DOI 10.3103/S1068798X19080033.

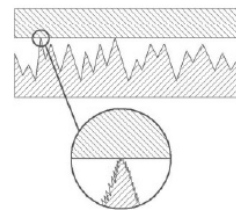
Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 27.04.2023; принята к публикации 11.05.2023.

The article was submitted 13.04.2022; approved after reviewing 27.04.2022; assepted for publication 11.05.2023.





Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 33-38.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 33-38.

Научная статья

УДК 539.621

doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-33-38

Аналитическое представление зависимостей силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии пространственно структурированных каучуков со стальной поверхностью

Александр Джалюльевич Бреки^{1, 2}, д.т.н.

¹ Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

² Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
albreki@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4452-3896>

Аннотация. В статье реализован анализ известных зависимостей характеристик трения от температуры. Проанализирована математическая модель зависимости коэффициента внешнего трения Ф.Ф. Линга и Э. Сайбела от температуры, энергий активации формирования и разрушения фрикционных связей и других факторов, разработанная с использованием уравнений абсолютных скоростей химических реакций. Реализована аппроксимация данной модели для случая независимости сдвигового сопротивления по Боудену и Тейбору от температуры. Предложена математическая модель, описывающая зависимости силы трения скольжения от температуры при фрикционном взаимодействии пространственно структурированных каучуков со стальной поверхностью. Отличительной особенностью предложенной математической модели является то, что она может описывать одновременно участки постоянства, линейного и криволинейного изменения силы трения при изменении температуры. Реализована проверка разработанной математической модели посредством оцифровки и обработки экспериментальных данных, полученных при фрикционном взаимодействии брусков из пространственно структурированного натурального каучука и пространственно структурированного каучука СКС-50 с призмой из стали ст.3. При анализе аппроксимирующих зависимостей установлено, что для пространственно структурированного натурального каучука максимальное значение силы трения составляет 2,0 кГс при температуре приблизительно $-37,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а среднее значение коэффициента трения равно 0,987, для структурированного каучука СКС-50 максимальное значение силы трения составляет 1,84 кГс при температуре приблизительно $31,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а среднее значение коэффициента трения равно 0,853. Введены новые триботехнические характеристики, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие в системе «каучук-сталь» при изменении температуры.

Ключевые слова: математическая модель, трение скольжения, пространственно структурированный каучук, температура, фрикционное взаимодействие

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда по приоритетному направлению деятельности Российского научного фонда «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований отдельными научными группами» научного проекта: «Применение цифрового моделирования и больших данных для повышения эффективности механической обработки титановых лопаток паровых турбин и их эксплуатации в условиях каплеударной эрозии» № 22-19-00178.

Для цитирования: Бреки А.Д. Аналитическое представление зависимостей силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии пространственно структурированных каучуков со стальной поверхностью // 2023. № 7 (145). С. 33–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-33-38

Analytic representation of the friction force-temperature relations under the conditions of frictional interaction of spatially-ordered rubbers having steel surface

Alexander D. Breki^{1,2}, D. Eng.

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

² Institute of Problems of Machine Science of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
albreki@yandex.ru

Abstract. The analysis of the known friction-temperature laws is carried out in the article. A mathematical model of external friction of F.F. Ling and E. Seibel coefficient dependence on temperature, activation energies of formation and destruction of friction bonds and other factors, developed using the equations of absolute rates of chemical reactions, is analyzed. An approximation of this model is implemented in temperature independence case for Bowden and Tabor shear strength. A mathematical model, describing sliding friction force-temperature relation under frictional interaction of spatially ordered rubbers having steel surface, is proposed. A distinctive feature of the proposed mathematical model is that it can simultaneously describe areas of constancy, friction force linear and nonlinear scaling under temperature changes. The testing and verification of the developed mathematical model is fulfilled through digitizing and processing experimental data, obtained by the frictional interaction of bars, made of spatially ordered natural rubber and spatially ordered rubber SCS-50 with a prism made of steel st.3. Analyzing the approximating dependencies, it is found, that for spatially ordered natural rubber, the maximum value of the friction force is 2,0 kgf under the temperature of approximately 37,6 °C, and the average value of the friction coefficient is 0,987, for spatially ordered natural rubber, the maximum value of the friction force is 1.84 kgf under the temperature of approximately 31,4 °C, while the average value of the coefficient of friction is 0,853. New tribotechnical characteristics have been introduced making possible to give a more detailed characterization of the frictional interaction in the rubber-steel system for the cases of temperature changes.

Keywords: mathematical model, sliding friction, spatially ordered rubber, temperature, frictional interaction

Acknowledgements: the work was supported by a grant from the Russian Scientific Foundation for the priority activity of the Russian Scientific Foundation «Conducting fundamental scientific research and exploratory scientific research by individual scientific groups» of the scientific project: «Application of digital modeling and big data to improve the efficiency of mechanical processing of titanium blades of steam turbines and their operation in the conditions of impact erosion» No. 22-19-00178.

For citation: Breki A.D. Analytic representation of the friction force -temperature relations under the conditions of frictional interaction of spatially-ordered rubbers having steel surface / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 7 (145). P. 33–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-33-38

Каучуки активно используются в качестве материалов триботехнического назначения. При этом известно, что изделия из данных материалов используются в очень широком диапазоне температур. Температура внешней среды может существенно влиять на физические и химические процессы на фрикционном контакте, а соответственно и на характеристики трения. Согласно академику С. И. Губкину зависимость коэффициента трения от температуры имеет вид [1, стр.37]:

$$f = f_0 \cdot \exp(\pm \alpha_T \cdot (T - T_0)), \quad (1)$$

где f – коэффициент трения; f_0 – коэффициент трения при температуре T_0 ; α_T – температурный коэффициент; T – температура.

Исследователи Ф.Ф. Линг и Э. Сайбел [2, стр.17] рассматривают трение скольжения несмазанных поверхностей как процесс формирования и разрушения фрикционных связей с

учётом влияния температуры [3]. Скорости процессов образования и разрушения фрикционных связей авторы рассчитывают, используя уравнения абсолютных скоростей реакций [4, 5]. Константа скорости формирования фрикционных связей [3]:

$$k_g = C_g \cdot \exp\left(-\frac{U_g}{RT}\right), \quad (2)$$

константа скорости разрушения фрикционных связей [3]:

$$k_{de} = C_{de} \cdot \exp\left(-\frac{U_{de}}{RT}\right), \quad (3)$$

где U_g и U_{de} – энергия активации процесса формирования и разрушения фрикционных связей соответственно. Также авторы принимают равенство:

$$C_g = C_{de} = C. \quad (4)$$

Принимая время протекания процесса равным отношению среднего расстояния между неровностями l_r , при котором повторяется

процесс, к скорости скольжения v , после ряда преобразований авторы получили зависимость [3]:

$$f = \frac{\tau_{fr}/p_r}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} - \frac{\frac{\tau_{fr}}{p_r} \cdot \exp\left[-\frac{l_r C}{v} \cdot \left(\exp\left(-\frac{U_g}{RT}\right) + \exp\left(-\frac{U_{de}}{RT}\right)\right)\right]}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)}, \quad (5)$$

где τ_{fr} – сдвиговое сопротивление (по Боудену и Тейбору) [3], p_r – фактическое давление.

Умножая уравнение обе части (5) на нормальную нагрузку $F_N = p_a A_a$ (произведение номинальной площади и номинального давления) и учитывая (2) и (3) получим:

$$F_f = \frac{(\tau_{fr} p_a A_a) / p_r}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} - \frac{\frac{\tau_{fr} p_a A_a}{p_r} \cdot \exp\left[-\frac{l_r}{v} \cdot (k_g + k_{de})\right]}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)}. \quad (6)$$

И.В. Крагельский отметил, что использование формулы (5) затруднительно, поскольку нет данных об энергии активации процесса формирования и разрушения фрикционных связей [3]. Функция (5), соответственно и (6) в промежутке $(0; \infty)$ имеет вид, близкий к

сигмоидальному (при грубом допущении, что τ_{fr} слабо зависит от температуры на этапе перехода и некотором интервале после его завершения) и очень быстро приближается к своему пределу (асимптоте):

$$C_f = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{(\tau_{fr} p_a A_a) / p_r}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} - \frac{\frac{\tau_{fr} p_a A_a}{p_r} \cdot \exp\left[-\frac{l_r}{v} \cdot (k_g + k_{de})\right]}{1 + \exp\left(-\frac{1}{RT}(U_{de} - U_g)\right)} \right]. \quad (7)$$

Соответственно (6) хорошо аппроксимируется функцией логистического типа:

$$F_f \cong \frac{C_f}{1 + \exp(-\psi_T(T - T_\Omega))}, \quad (8)$$

Параметры модели (8) взаимосвязаны с физическими величинами модели (6) и выражают резкость и степень роста силы трения при изменении температуры. Формулы (8) и (1) имеют схожие выражения под экспонентой, но существенно по-разному описывают зависимость характеристик трения от температуры.

С другой стороны, сила трения в случае изменения температуры в зоне трения каучука с металлом может изменяться по более сложным зависимостям по сравнению с (1), (6) и (8), для

которых в настоящее время ещё не создано соответствующих математических моделей. В частности, имеется зависимости $\tau_{fr} = \tau_{fr}(T)$, которая очень неоднозначна. В связи с этим, в границах данной работы, предложена новая математическая модель, описывающая закономерности влияния температуры на трение скольжения стали по каучукам.

В работах [6 – 8 и др.] предложена следующая функция, которая была использована для описания динамики изменения силы трения:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{C_{i,1}x + C_{i,2}}{1 + \exp(-\psi_i(x - x_{\Omega i}))}. \quad (9)$$

Анализ данных работы [9] позволил предположить, что зависимость силы трения от температуры, при трении каучуков по стали может

быть представлена с использованием функции (9), по аналогии с работой [10]:

$$F_f = F_{f0} + \frac{C_{f1}}{1 + \exp(-\psi_{T1}(T - T_{\Omega1}))} - \frac{C_{f2}T + C_{f3}}{1 + \exp(-\psi_{T2}(T - T_{\Omega2}))}. \quad (10)$$

где ψ_{Ti} – резкость изменения силы трения при i -м качественном изменении состояния фрикционного контакта; F_{f0} – начальное значение силы трения до температурного фрикционного перехода; C_{fi} – эмпирические коэффициенты, характеризующие уровень и интенсивность повышения или снижения силы трения; T – температура; $T_{\Omega i}$ – значения температуры, соответствующие максимальной (минимальной) интенсивности изменения силы трения. Формула (10) обобщает (8), а соответственно и (6).

В работе [9] Бартеневым Г.М., Елькиным А.И. получены важные зависимости силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии ползуна из каучуков по полированной стальной поверхности. Условия испытаний: скольжение бруска из каучука по стальной плоскости со скоростью 1,0 мм/мин, при нагрузке 1,0 кГс при диапазоне изменения температуры от -200 до 100 °С. Образцы – бруски из пространственно структурированного натурального каучука (натуральный каучук является полимером изопрена $(C_5H_8)_n$) и пространственно структурированного каучука СКС-50 (бутадиенстирольный каучук получается при совместной полимеризацией бутадиена (C_4H_6) и стирола $(CH_2 = CH - C_6H_5)$). В зависимости от процентного содержания стирола каучук выпускают нескольких марок: СКС-10; СКС-30; СКС-50; пластина из стали 3.

Авторами [9] установлены зависимости силы трения от температуры в графическом виде, однако не было найдено их аналитического представления.

В данной работе реализована точная оцифровка графиков из работы [9] и осуществлена аппроксимация выявленных точек с использованием формулы (10).

На рис. 1 показаны точки, полученные при оцифровке графика [9] зависимости силы трения пространственно структурированного натурального каучука по стали 3 от температуры (в вакууме), и соответствующий график аппроксимирующей функции.

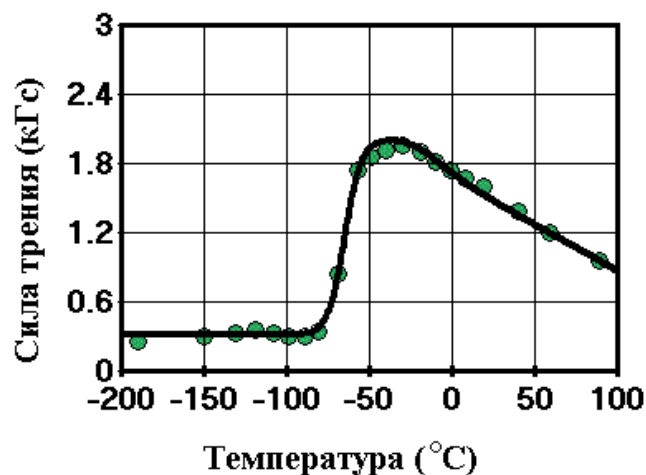


Рис. 1. График зависимости силы трения пространственно структурированного натурального каучука по стали 3 от температуры (в вакууме)

Fig. 1. Graph of friction force of spatially structured natural rubber on steel 3 versus temperature (in vacuum)

Аналитически, зависимость силы трения пространственно структурированного натурального каучука по стали 3 от температуры (в вакууме) выражается формулой:

$$F_f = 0,31 + \frac{1,7}{1 + \exp(-0,2(T + 65))} - \frac{0,008T + 0,34}{1 + \exp(-0,1(T + 18))}. \quad (11)$$

Исследование функции (11) показывает, что максимальное значение силы трения составляет 2,0 кГс при температуре приблизительно -37,6 °С. Интегрирование (11) по всему интервалу от -200 до 100 °С и деление полученного

результата на длину данного интервала температур даёт среднее значение силы трения, равное 0,987 кГс, соответственно средний коэффициент трения в этом случае равен 0,987.

На рис. 2 показаны точки, полученные при оцифровке графика [9] зависимости силы трения пространственно структурированного каучука СКС-50 по стали 3 от температуры (в вакууме), и соответствующий график аппроксимирующей функции.

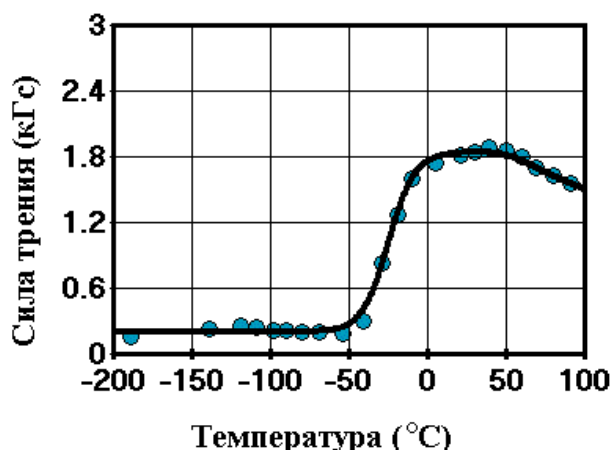


Рис. 2. График зависимости силы трения пространственно структурированного каучука СКС-50 по стали 3 от температуры (в вакууме)

Fig. 2. Graph of the dependence of the friction force of spatially structured rubber SKS-50 on steel 3 on temperature (in vacuum)

Аналитически, зависимость силы трения пространственно структурированного каучука СКС-50 по стали 3 от температуры (в вакууме) выражается формулой:

$$F_f = 0,2 + \frac{1,64}{1 + \exp(-0,12(T + 25))} - \frac{0,0054T - 0,2}{1 + \exp(-0,1(T - 55))}. \quad (12)$$

Исследование функции (12) показывает, что максимальное значение силы трения составляет 1,84 кГс при температуре приблизительно 31,4 °C. Интегрирование (12) по всему интервалу от -200 до 100 °C и деление полученного результата на длину данного интервала температур даёт среднее значение силы трения, равное 0,853 кГс, соответственно средний коэффициент трения в этом случае равен 0,853.

Резкость сигмоидального роста силы трения по (6) зависит от значений и разности энергий активации процесса формирования и разрушения фрикционных связей. Мы предполагаем, что в данном случае энергия активации разрушения фрикционных связей превышает энергию активации их образования у обоих материалов. У каучука СКС-50 разность энергий

активации меньше. Наличие экстремума и снижения силы трения можно связать с уменьшением среднего расстояния между неровностями l_r , обусловленным сближением поверхностей с ростом температуры и, при этом, уменьшением деформационной составляющей сдвигового сопротивления.

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Реализован анализ математической модели трения, разработанной на основе молекулярно-кинетических представлений, и предложено её приближение, удобное для аппроксимации экспериментальных данных.

2. Разработана математическая модель, учитывающая отклонения от молекулярно-кинетической модели трения для случая трения каучуков по стальной поверхности.

3. Проведённый анализ экспериментальных результатов показывает справедливость предложенной формулы (10), описывающей зависимость силы трения от температуры при фрикционном взаимодействии каучуков со стальной поверхностью.

4. В разработанной математической модели введены новые триботехнические характеристики, которые позволяют более детально охарактеризовать фрикционное взаимодействие в системе «металл-каучук».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Розов Ю.Г. Влияние характера распределения температур в объеме трубной заготовки на неоднородность поля сопротивления деформированию в операциях листовой штамповки // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 7. Ч. 2. С. 36–43.
2. Михин Н.М. Внешнее трение твердых тел / Н.М. Михин; АН СССР, Науч. совет по трению и смазкам, Ин-т проблем механики. М.: Наука, 1977. 221 с.
3. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбаров. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. Черепанов В. А. Химическая кинетика: [учеб. пособие] / В. А. Черепанов, Т. В. Аксенова ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 132 с.
5. Буданов В.В. Химическая кинетика: учебное пособие / В.В. Буданов, О.В. Лефедова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2011. 177 с.
6. Breki A.D. Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene / A. D. Breki, S. G. Chulkin, N. M. Dobrovolsky [et al.] // Chebyshevskii Sbornik . 2021.

Vol. 22, No. 1 (77). P. 378–389. DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-378-389.

7. **Бреки А.Д.** Математические закономерности изменения характеристик процесса трения пористого композиционного материала на основе меди, содержащего масло с частицами графена / А. Д. Бреки, С. Г. Чулкин, А. Г. Колмаков [и др.] // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22. № 1 (77). С. 390–402. DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-390-402.

8. **Breki A.D.** Semiempirical Mathematical Models of the Pivoting Friction of ShKh15 Steel over R6M5 Steel according to the Ball–Plane Scheme with Consideration of Wear / A. D. Breki, A. E. Gvozdev, A. G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 1008–1013. DOI 10.1134/S2075113319040075.

9. **Бартенев Г.М., Елкин А.И.** О механизме трения высокоэластичных материалов при высоких и низких температурах / Теория трения и износа: [Сборник статей] // Акад. наук СССР. Науч. совет по трению и смазкам. М.: Наука, 1965. С. 95–99.

10. **Бреки А. Д., Чулкин С.Г., Шалыгин М.Г.** Аналитическое представление зависимостей коэффициента трения от температуры при фрикционном взаимодействии стального шара с термопластами // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 6 (132). С. 27–32. DOI 10.30987/2223-4608-2022-6-27-32.

REFERENCES

1. Rozov Yu.G. The temperature distribution effect in the pipe stock volume on the heterogeneity of the deformation resistance field in sheet welding operations // Izvestiya TlSU. Technical sciences. 2013, Issue 7, part 2, pp. 36–43.

2. Mikhlin N.M. External friction of solids / N.M. Himin ; USSR Academy of Sciences, Scientific Council on friction and lubricants, Problems of mechanics institute. Moscow: Nauka, 1977, 221 p.

3. Kragelsky I.V. Basics of Calculations on Friction and Wear / I.V. Kragelsky, M.N. Dobychin, V.S. Kombalov. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p. (in Russian)

4. Cherepanov, V. A. Chemical kinetics: [study guide] / V. A. Cherepanov, T. V. Aksenova. Ministry of Education and Science of the Russian Federation. Ural Federal University. Ekaterinburg: Ural University Publishing House, 2016. 132 p. (in Russian).

5. Budanov V.V. Chemical kinetics: textbook / V.V. Budanov, O.V. Lefedova; Ivanovo State Chemical-Technological University, Ivanovo, 2011, 177 p. (in Russian).

6. Breki A.D. Mathematical regularities of the sliding friction process of a porous material based on iron impregnated with lubricating oil with dispersed particles of fluorinated graphene / A. D. Breki, S. G. Chulkin, N. M. Dobrovolsky [et al.] // Chebyshevskii Sbornik . 2021. Vol. 22, No. 1 (77). P. 378–389. DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-378-389.

7. Breki A.D. Mathematical regularities of changes in the characteristics of the friction process of a porous composite material based on copper containing oil with graphene particles/ A. D. Breki, S. G. Chulkin, A. G. Kolmakov, et al. / Chebyshevskii Sbornik. 2021, vol.22, no. 1 (77), pp. 390–402, DOI 10.22405/2226-8383-2021-22-1-390-402.

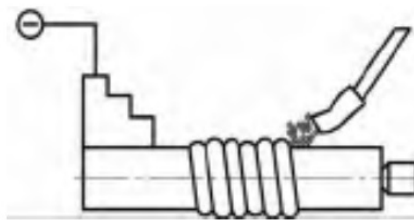
8. Breki A.D. Semiempirical Mathematical Models of the Pivoting Friction of ShKh15 Steel over R6M5 Steel according to the Ball–Plane Scheme with Consideration of Wear / A. D. Breki, A. E. Gvozdev, A. G. Kolmakov // Inorganic Materials: Applied Research. 2019. Vol. 10, No. 4. P. 1008–1013. DOI 10.1134/S2075113319040075.

9. Bartenev G.M., Elkin A.I. On the mechanism of friction of highly elastic materials under high and low temperatures / Theory of friction and wear: [Collection of articles] // Academy of Sciences of the USSR. Scientific Council on friction and lubricants. Moscow: Nauka, 1965, pp. 95–99.

10. Breki A.D., Chulkin S.G., Shalygin M.G. Analytic expression of slip coefficient dependences on temperature in frictional interaction of a steel ball with thermoplastics / Science intensive technologies in mechanical engineering, 2022, no. 6 (132), pp. 27–32. DOI 10.30987/2223-4608-2022-6-27-32

Статья поступила в редакцию 30.12.2022; одобрена после рецензирования 31.01.2023; принята к публикации 08.02.2023

The article was submitted 30.12.2022; approved after reviewing 31.01.2023; assepted for publication 08.02.2023



Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №7 (145). С.39-48.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 39-48.

Научная статья
УДК 62-419.8/620.22/681.7.013.84/621.373.826
doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-39-48

Сравнительный анализ качества маркировки полимерной и кремнийорганической пленки при обработке волоконным наносекундным лазером

**Евгений Иванович Пряхин¹, д.т.н.
Елена Юрьевна Трошина², аспирант**

^{1,2} Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹ e-p-mazernbc@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2372-2255>

² ivan.grey.90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Для идентификации продукции на всех этапах производства используют маркировку с помощью двумерных штрих-кодов DataMatrix. В связи с тем, что изделия имеют различные типы поверхностей, находит все большее применение маркировка с помощью самоклеящихся полимерных пленочных материалов, на которых информация записывается лазером методом DPM (Direct Part Marking). Эти пленки, называемые «лазерные пленки», часто используются на производствах, особенно в автомобильной промышленности, так как имеют ряд преимуществ перед другими носителями информации. Однако, такие пленки (tesa 6930, 3M 7847) в основном импортные и дорогостоящие, а также имеют ограничение по температуре эксплуатации до 250 °С, что бывает недостаточным. В статье рассматриваются зарубежные и отечественные пленки, включая полимерную НПМ012 и кремнийорганическую ЛП2. Пленки серии ЛП2 – это новая группа лазерных пленок на органосилоксановой основе, которые позволяют применять маркировку лазером для деталей, эксплуатирующихся до 1000 °С. В статье проводится сравнительный анализ маркировки полимерных пленок и кремнийорганической пленки в соответствии с международными стандартами технологий автоматической идентификации и сбора данных. Лазерная маркировка производится с помощью волоконного наносекундного лазера с мощностью 30 Вт и длиной волны 1,064 мкм. В качестве штрих-кода используется DataMatrix (GS1) по Российской системе маркировки и прослеживания товаров «Честный знак». Оценка качества маркировки осуществляется сканированием верификатором для проверки соответствия стандартам ISO/IEC. В статье описывается подбор технологических параметров лазерного нанесения штрих-кода для обеспечения качественной маркировки.

Ключевые слова: штрих-код, лазерная обработка, маркировка, контрастность, считываемость кодов, полимерные пленки, наносекундный лазер

Для цитирования: Пряхин Е.И., Трошина Е.Ю. Сравнительный анализ качества маркировки полимерной и кремнийорганической пленки при обработке волоконным наносекундным лазером // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 7 (145). С. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-39-48

Comparative test for polymer and organosilicon film quality marking in nanosecond fiber laser processing

Evgeny I. Pryakhin¹, D.Eng.

Elena Yu. Troshina², PhD student

^{1,2} Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹ e-p-mazernbc@yandex.ru,

² ivan.grey.90@mail.ru

Abstract. To identify products at all stages of production, a code mark is used by two-dimensional DataMatrix barcoding. Due to the fact that there are different types of surfaces, marking with the help of self-adhesive polymer film materials, where the information is recorded by a laser using the DPM (Direct Part Marking) method, is becoming increasingly popular. These films, called "laser films", are often used in manufacturing, especially in the automotive industry, as they have a number of advantages compared to other information carriers. However, such films (tesa 6930, 3M 7847) are mostly imported and expensive, and also have an operating temperature limit of up to 250 °C, which is sometimes insufficient. The article discusses foreign and domestic films, including polymer NPM012 and organosilicon LP2. LP series are a new group of organosiloxane-based laser films allowing the use of laser marking for parts operating up to 1000 °C. The article provides a comparative analysis of the labeling of polymer films and organosilicon films in accordance with international standards of automatic identification and data collection technologies. Laser marking is performed using a nanosecond fiber laser with a power of 30 watts and a wavelength of 1,064 microns. DataMatrix (GS1) is used as a barcode according to the Russian system of marking and keeping track of goods "Honest Mark". Marking quality assessment is carried out by scanning verifier to check the compliance validation for ISO/IEC standards. The article describes the adjustment of laser barcoding technological parameters for ensuring high-quality marking.

Keywords: barcode, laser processing, marking, contrast, code readability, polymer films, nanosecond laser

For citation: Pryakhin E.I., Troshina E.Y. Comparative test for polymer and organosilicon film quality marking in nanosecond fiber laser processing / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №7 (145). P. 39–48. doi: 10.30987/2223-4608-2023-7-39-48

Введение

В последнее десятилетие для идентификации продукции, как готовой, так и на этапе ее производства, применяется маркировка с использованием двумерных штрих-кодов. В основном маркировка наносится на бумажные и пластиковые этикетки, которые наклеиваются на изделие или его упаковку. Это дает возможность обеспечивать определенную защиту готовой продукции от фальсификации, а на этапе производства позволяет отслеживать серию и партию изделия [1, 2]. Но маркировка бумажными и пластиковыми этикетками не может гарантировать абсолютную защиту продукции от подделки, так как указанные виды этикеток могут быть заменены на другие с измененной информацией. Поэтому, всё чаще находит применение маркировка с использованием самоклеящихся этикеток из полимерных пленочных материалов – полиакрилатов и полиуретанов, предназначенных для обработки и записи информации с использованием лазера. Наклеенная на изделие этикетка из такой пленки не может быть заменена, так как при попытке ее снятия с изделия она разрушается, что обеспечивает гарантию подлинности размещенной на ней информации, а также позволяет идентифицировать готовое изделие.

Основные используемые для лазерной маркировки полимерные пленки являются импортными. Пользователи называют их «лазерная пленка». Основными производителями лазерной пленки являются компании «Tesa SE» (Германия) и «3M» (США) [3]. В России предлагается аналог: пленка НПМ012 компании

АО «Научные приборы». Перечисленные полимерные пленки имеют невысокую температуростойкость – до 250 °C.

В то же время существует необходимость маркировать лазерными пленками изделия и заготовки, работающие при более высоких температурах: от 300 °C до 1000 °C [4 – 6]. Например, рабочая температура двигателя вертолета может колебаться в диапазоне от 400 °C до 900 °C в зависимости от параметров эксплуатации и модели двигателя [7]. При этом детали двигателя также подлежат маркировке.

Для маркировки машиностроительных деталей, эксплуатирующихся в условиях высоких температур ООО «Лазерный центр» предлагает использовать опытную композитную лазерную пленку ЛП2. Пленки серии ЛП в основном состоят из кремнийорганических соединений и имеют температуростойкость до 1000 °C [8, 9]. Она хорошо обрабатывается комплексами лазерной маркировки (ИК и УФ излучения) по методу Direct Part Marking (DPM), обеспечивая контрастное изображение штрих-кодов [10 – 12].

Все марки лазерных пленок производятся в виде многослойных композитных гибких лент. Верхний тонкий слой имеет черный цвет, слой под ним – белый. Это принципиальная система для получения контрастных изображений посредством удаления лазером черного слоя и проявления белого.

Черный материал хорошо поглощает электромагнитное излучение благодаря взаимодействию энергии с молекулярными структурами материала. Эта энергия вызывает колебания молекул и перемещения на энергетических

уровнях, что приводит к возникновению тепла. При действии лазерного излучения на поверхность материала происходит быстрый нагрев и испарение верхнего слоя пленки. В результате происходит абляция поверхности черного слоя и избирательное проявление белого слоя пленки. В совокупности эта технология позволяет получать контрастные изображения.

Получение изображений с высоким контрастом и разрешением дает возможность производителям соответствовать международным стандартам в области информационных технологий. Так, например, стандарт ISO/IEC 15415:2011, регламентирующий технологии автоматической идентификации и сбора данных, устанавливает требования к качеству изготовления двумерного кода [13]. Для считывания цифровыми и аналоговыми сканерами изображение должно обладать высокой степенью контраста, модуляции, однородности и равномерности. Эти требования относятся и к меткам-маркерам, использующимся при пространственном сканировании в процессе эксплуатации, обслуживания и ремонта крупногабаритных механизмов и изделий [14].

Качественная маркировка продукции является одним из важнейших элементов в процессе производства и сбыта. Она позволяет легко идентифицировать и контролировать продукцию на стадиях производства, отследить продукт на этапе транспортировки, обеспечивает безопасность и качество для потребителя. Один из самых распространенных и надежных форматов штрих-кодов для маркировки продукции – DataMatrix. Он позволяет сохранять большое количество информации на маленькой площади и надежно защищать информацию от ошибок при считывании.

Стандарты качества маркировки DataMatrix играют важную роль в обеспечении эффективной работы систем считывания и обработки информации. Они определяют требования к качеству информации, которая представлена в коде. Такие стандарты определяют, каким образом должен быть нанесен код на изделие, как проведена проверка его качества, и какие требования должны быть выполнены для обеспечения эффективного считывания.

Стандарты качества считывания DataMatrix определяют требования к оборудованию, которое должно использоваться для

считывания кодов, они учитывают множество факторов, оказывающих влияние на эффективность считывания, например, расстояние между кодом и считывающим устройством, угол наклона, скорость передачи данных и т. д. Качественная маркировка и эффективное считывание данных позволяют оперативно осуществлять контроль качества продукции на всех этапах ее производства и дальнейшего жизненного цикла, а также повышать эффективность работы предприятий и минимизировать риски нарушения прав потребителей.

Лазерная маркировка штрих-кодов имеет ряд преимуществ перед другими методами маркировки, такими как термопечать и т. д. Важнейшими преимуществами лазерной маркировки штрих-кодов являются: высокое качество маркировки, отсутствие расходных материалов, долговечность, быстрота нанесения, экономичность и возможность наносить разнообразные форматы маркировки: текст, код 128, UPC, EAN и другие.

На производствах для маркировки используются наносекундные волоконные лазеры из-за их способности эффективно нагревать или испарять поверхностные слои изделий из разных материалов с использованием микроскопических отпечатков импульсов на поверхности различных материалов [15]. Этот процесс маркировки проходит на основе обработки поверхности объекта лазерным лучом, объединенным с визуализацией деталей и навигацией по требующимся действиям благодаря программному обеспечению.

Волоконные лазеры с длиной волны 1,064 мкм взаимодействуют с материалами, которые являются оптически непрозрачными для данной длины волны (металлы, керамики, углеродистые и пигментированные полимеры). Одним из основных преимуществ использования наносекундных волоконных лазеров для маркировки является их высокая точность и скорость работы. Но качество маркировки зависит не только от лазерного оборудования, а от способности материала обрабатываться лазером.

В данной работе проводился сравнительный анализ полимерных пленок tesa 6930, 3М 7847, НПМ012 и кремнийорганической пленки ЛП2 на предмет соответствия международным стандартам маркировки. Маркировка осуществлялась волоконным

наносекундным лазером ТурбоМаркер-30А4. Целью работы являлась оценка способности материалов обеспечивать качественную маркировку. В процессе работы осуществлялся подбор технологических параметров лазерного нанесения штрих-кода и сканирование верификатором для автономной проверки штрих-кодов на соответствие стандартам ISO/IEC.

Материалы и методика проведения эксперимента

В исследовании изучались пленки для лазерной маркировки tesa 6930, 3М 7847, НПМ012 и ЛП2. Основным материалом пленок (табл. 1) представляет собой полимер с введенными модификаторами. Состав модификаторов производителями не разглашается.

1. Основные характеристики изучаемых лазерных пленок 1. The main characteristics of the studied laser films

Пленки	Основной материал	Толщина материала без клея, мм		Температура эксплуатации, °С		Поверхность
		Черный верхний слой	Белый нижний слой	Min	Max	
3М 7847	модифицированный полиакрилат	0,01	0,05	-40	250	матовая
tesa 6930	модифицированный полиуретан	0,02	0,07	-40	250	
НПМ012	модифицированный поли(о-гидроксиамид)	0,01	0,05	-50	250	
ЛП2	модифицированный органосилоксан	0,03	0,08	-50	700	

Благодаря рентгенофлуоресцентному анализу, выполненному научно-образовательным «Центром коллективного пользования» СПГУ, выявлены общие для всех материалов элементы наполнения: Al до 5,0 %; K до 3,0 %; Na и Mg до 2,0 %; P, Ca, Sr, Cl и Zr до 1 %. Черный слой – с добавлением технического углерода (до 5,0 %), за исключением НПМ012 с черным красителем – спирторастворимый нигрозин (5,0 %). Белый слой – с добавлением диоксида титана рутильной формы (до 10 %). Все пленки являются лазерочувствительными, имеют высокую степень стойкости к воздействию химических веществ, к истиранию и старению. В исследовании использовались пленки только с матовой поверхностью.

Лазерная обработка производилась на системе ТурбоМаркер-30А4. Это станок для лазерной маркировки на базе иттербиевого наносекундного импульсного волоконного излучателя YLPN-1-4x200-30-M. Характеристики излучателя: длина волны 1,064 мкм; средняя мощность 30 Вт; энергия импульса 1,0 мДж; продолжительность импульса варьируется от 4 до 200 нс; частота повторений импульсов от 1,6 до 1000 кГц. Система перемещения луча: два сканирующих зеркала. Фокусирующий объектив F-Theta с полем обработки 130×130 мм.

Управляющее лазером программное обеспечение MaxiGraf.

Выбор оборудования с данными характеристиками обусловлен его универсальностью и высоким распространением на российских производствах и в образовательных учреждениях. Основными материалами, подвергающимися обработке этим лазером, являются все металлы и сплавы, керамики, лазерочувствительные полимеры.

Так как с 2015 г. в России действуют системы маркировки и прослеживания товаров, включающие в себя операции по нанесению и считыванию кода DataMatrix, то в качестве записываемого с использованием лазера изображения на поверхности изделия выбран двухматричный код DataMatrix (GS1). Выбор обусловлен тем, что маркировочные лазерные пленки обычно представляют собой шильдики или этикетки, на которых указывается логотип компании, серия и номер изделия, дата изготовления и хранения, условия эксплуатации и код с зашифрованной информацией.

Рисунки и цифробуквенная информация не вызывает затруднения для лазерного формирования на поверхности изделий, так как их размеры не нуждаются в прецизионности в то время, как штрих-коды могут иметь малый размер

составляющих модулей. Так, например, система «Честный знак», введенная в России с 2019 г., обязывает маркировать продукцию кодами DataMatrix (GS1), которые в среднем имеют размер 12×12 мм и плотность 22×22 модуля. При данных размерах кода один его модуль равен примерно 0,545 мм.

Маркировка двухматричных кодов с размерами модуля менее одного миллиметра нуждается в качественной записи в материале, чтобы обеспечить хорошее считывание кода. Поэтому в данном эксперименте рассматривался код DataMatrix (GS1) с размером модуля 0,545 мм. В код были зашифрованы название станка «TurboMarker-30A4» и обозначение материала, на который нанесен код: «TESA» - tesa 6930, «ЗМ» - ЗМ 7847, «НР» - ННМ012, «ЛР» - ЛР2.

Перед записью кода осуществлялся поиск режима маркировки. Для этого необходимо было определить параметры мощности, скорости перемещения луча, частоты следования импульсов, длительности импульса, плотность линий заливки, их угол и количество проходов. Методика нанесения качественного кода подразумевает заливку перпендикулярными линиями, то есть два прохода, где первый под углом 0°, а второй 90°. Таким образом можно добиться на материале ровный рельеф без эффекта «грядок».

Плотность линий определялась экспериментально: лазером формировалась одна линия на средних оптимальных параметрах (мощность 50 %; длительность импульса 100 нс; частота 60 кГц; скорость 1200 мм/с). На материале пленки ЗМ 7847 образовалась самая широкая дорожка 55 мкм, на материале tesa 6930 – самая узкая 45 мкм. Исходя из среднего размера 50 мкм, была определена плотность линий заливки 20 лин/мм. Расчет проходил, опираясь на то, что линии заливки должны друг друга касаться или накладываться не более чем на половину радиуса отпечатка.

Все изучаемые лазерные пленки имеют важную особенность: толщина и цвет лазерочувствительного слоя у них не сильно отличаются

друг от друга, что позволяет применять близкие по значению показатели лазерной обработки. Но, несмотря на схожие характеристики, исследуемые материалы пленок имеют отличные друг от друга молекулярные соединения, которые в зависимости от спектра поглощения взаимодействуют с излучением 1,064 мкм по-разному. Это подтвердил тест по методу формирования матрицы режимов (рис. 1).

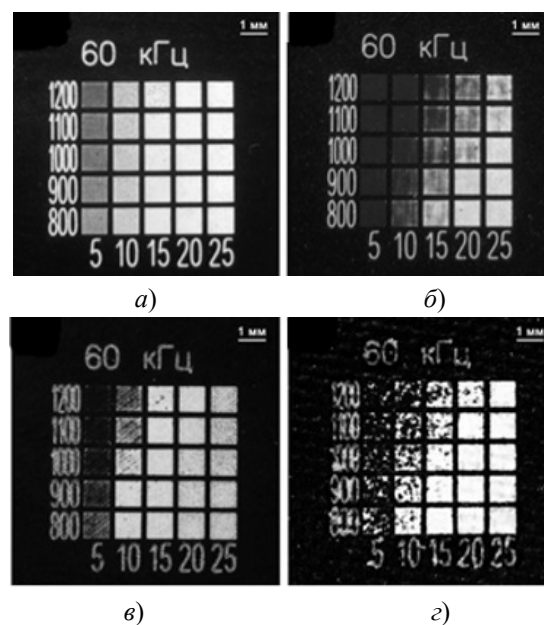


Рис. 1. Матрицы режимов, нанесенные на разные пленки лазером:

а – ЗМ 7847; б – tesa 6930; в – ННМ012; г – ЛР2

Fig. 1. Mode matrices for different films made by laser:

а – ЗМ 7847; б – tesa 6930; в – NPM012; г – LP2

Матрица формировалась одна на все четыре изучаемые лазерные пленки. Принцип матрицы заключается в том, что она демонстрирует изменение двух параметров по координатам абсцисс и ординат. В данном случае по оси абсцисс изменялась мощность (%) с шагом 5,0, по оси ординат – скорость (мм/с) с шагом 100. Все остальные показатели сохранялись постоянными: плотность линий 20 лин/мм; два прохода под углом 0° и 90° последовательно; длительность импульса и частота следования импульсов (табл. 2).

2. Параметры нанесения режимов матрицы на ТурбоМаркере-30А4

2. Parameters for applying matrix modes using the Turbo Marker-30A4

P, %	v, мм/с	f, кГц	τ, нс	Заливка, лин/мм	Угол, °	Количество проходов	Элемент матрицы, мм	Матрица, ед.
5...25	800...1200	60	100	20	0, 90	2	1	5×5

Длительность импульса избрана по умолчанию 100 нс. Смена длительности импульса в меньшую сторону, повлекла бы менее активную абляцию и увеличение времени обработки, а в большую сторону – активную абляцию вещества и менее контролируемое качество обработки. При длительности импульса 100 нс частота следования импульсов 60 кГц дает максимальную энергию в импульсе. Энергия в импульсе при большей частоте снижается, и при абляции материала образуется больше жидкой фазы. При меньшей частоте энергия в импульсе также снижается, что замедляет процесс обработки, хоть и снижается количество жидкой фазы. Поэтому в тесте

матрицы режимов сохраняются постоянными длительность импульса 100 нс и частота 60 кГц.

Нанесенные на разные пленки матрицы демонстрируют параметры режимов удовлетворительной и неудовлетворительной маркировки. Под удовлетворительной маркировкой подразумевается полное испарение верхнего черного слоя материала и выявление белого ровного слоя без дефектов. К неудовлетворительной маркировке относятся два случая: когда материал черного слоя еще не полностью испарен и когда начинает испаряться или темнеть слой белого материала. Исходя из полученных маркировок (см. рис. 1), выявлены удовлетворительные параметры с чистым белым оттенком. Их параметры записаны в табл. 3.

3. Параметры мощности и скорости, соответствующие качественной обработки пленок на ТурбоМаркере-30А4, при $\tau = 100$ нс, $f = 60$ кГц, заливка плотностью 20 лин/мм, перпендикулярно в два прохода

3. Power and speed parameters corresponding to the high-quality processing of films on the turbo-marker-30A4, at $\tau = 100$ ns, $f = 60$ kHz, filling with a density of 20 lines / mm, perpendicular for two passes

3М 7847		tesa 6930		НПМ012		ЛП2	
P , %	v , мм/с	P , %	v , мм/с	P , %	v , мм/с	P , %	v , мм/с
20	1000	20	800	10	800	15	800
20	1100	20	900	10	900	20	800
20	1200	25	800	15	800	20	900
25	800	25	900	15	900	20	1000
25	900	25	1000	15	1000	25	900
25	1000	-	-	15	1100	25	1000
25	1100	-	-	20	1200	25	1100
25	1200	-	-	-	-	25	1200

Далее для оценки способности записывать в материале качественный штрих-код, на пленки были нанесены штрих-коды на выявленных удовлетворительных режимах из табл. 3.

Оценка штрих-кодов, сформированных в материалах пленок по принципу DPM, проводилась сканером LVS-9585. Это портативный ручной верификатор, разработанный для автономной проверки кодов на соответствие стандартам ИСО/МЭК 15415/15416. Верификатор представляет собой систему на основе 5.0-мегапиксельной камеры, которая распознает линейные (1D) и двумерные (2D) коды шириной до 3,0 дюймов (76 мм) и высотой до 2,0 дюймов (51 мм). Верификатор равномерно

подсвечивает штрихкод автономной подсветкой с постоянной освещенностью, фотографирует штрихкод строго в фокусе камеры и программно рассчитывает параметры контраста и модуляции кода. Модуляция в данном случае – однородность и геометрическая ровность светлых и темных модулей по всему коду.

Управляющая программа верификатора автоматически выдает увеличенную фотографию кода и выходные расчётные данные с указанием полученных параметров в единицах измерения и соответствующих параметрам классов. Класс присваивается целым баллом каждому параметру от 0.0, до 4.0, где 4.0 – наивысший балл. Оценка кода присваивается по

наименьшему полученному параметру класса латиницей от F до A , где A – наивысшая оценка. То есть, если основные показатели класса 4.0, но хотя бы один параметр соответствует 3.0, то присваивается общая оценка B (3.0).

При исследовании полученных штрих-кодов с использованием верификатора всем штрих-кодам были присвоены параметры. Основные параметры имели равные значения: размер модуля 21,5 мил ($\approx 0,546$ мм), нет повреждений и коррекций, модуляция 4.0 класса, запас отражения материала 4.0 класса. По отличающимся параметрам верификатором была проведена сравнительная оценка.

Результаты изучения параметров, полученных штрих-кодов на разных пленках

Из всех записанных на материалах штрих-кодов верификатором были выявлены наиболее качественные маркировки для каждой пленки (рис. 2). Фотографии выполнены и обработаны автоматически верификатором LVS-9585. Размер кода 12×12 мм.

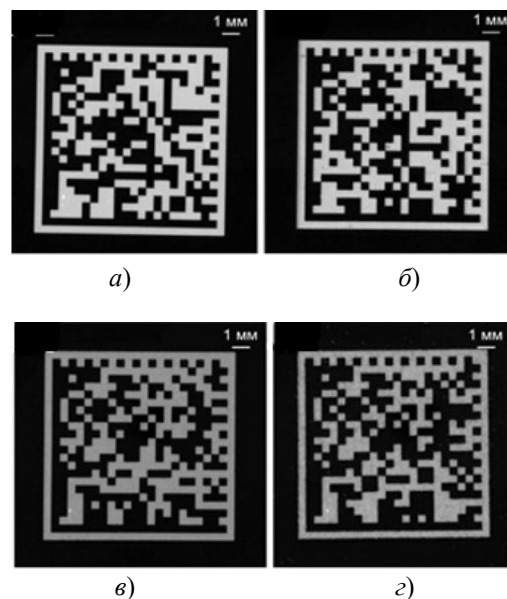


Рис. 2. Коды DataMatrix, нанесенные лазером на пленки:

a – 3M 7847; b – tesa 6930; c – НПИМ012; g – ЛП2.

Fig. 2. DataMatrix codes made by laser for films:

a – 3M 7847; b – tesa 6930; c – NPM012; g – LP2.

Штрих-коды получили расчетную классификацию по параметрам оценки. Параметры, имеющие различия, для наилучших штрих-кодов в группе материала представлены в табл. 4.

4. Результат оценки сканирования двумерных кодов и отличительных параметров по ИСО/МЭК 15415/15416. Расчет произведен автоматически программным обеспечением Microscan LVS-9585

4. The result of the evaluation of two-dimensional codes scanning and distinctive parameters according to ISO/IEC 15415/15416. The calculation is made automatically by Microscan LVS-9585 software

	3M 7847	tesa 6930	НПИМ012	ЛП2
Расшифрованный текст	TurboMarker-30A4 3M	TurboMarker-30A4 TESA	TurboMarker-30A4 NP	TurboMarker-30A4 LP
Контраст, % (класс)	82,0 (4,0)	76,0 (4,0)	56,0 (3,0)	71,0 (4,0)
Осевая неравномерность, % (класс)	0,6 (4,0)	0,6 (4,0)	0,6 (4,0)	0,9 (4,0)
Неоднородность сетки, % (класс)	3,0 (4,0)	4,0 (4,0)	2,0 (4,0)	5,0 (4,0)
Оценка кода ($A-F$)	A	A	B	A

По результатам оценки штрих-кодов, наивысший класс « A » получили пленки 3M 7847, tesa 6930 и ЛП2. Пленка НПИМ012 оценена на класс ниже – « B ». Ее ключевым показателем, не удовлетворившим наивысший класс, является контрастность. Контрастность определялась за счет измерения отражаемого света от материала. Роль сыграла не только способность окрашенных полимеров

поглощать и отражать свет, но и микрорельеф поверхности. Отражение света от полимерного материала зависит от шероховатости поверхности, что верно и для других непрозрачных материалов.

Поверхность полученных маркировок можно наблюдать на рис. 3. Видно, что белая поверхность пленок ЛП2 и НПИМ012 после маркировки имеет неровный микрорельеф.

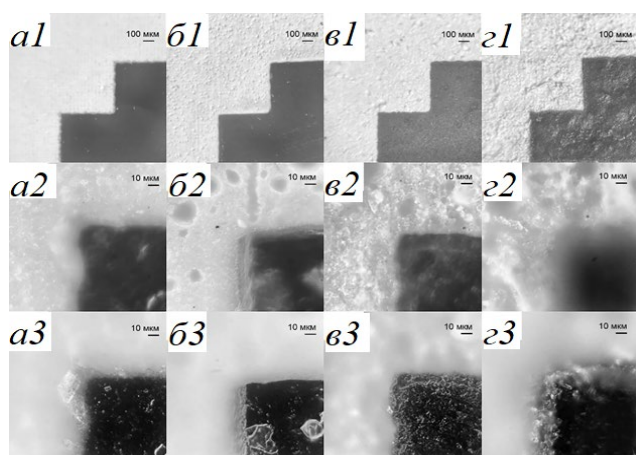


Рис. 3. Фото поверхности пленок после лазерной маркировки. Фрагменты модулей 2D-кода на пленках:
а – 3М 7847; б – tesa 6930; в – НПМ012; г – ЛП2;

1 – увеличение $\times 100$; 2 – увеличение $\times 1000$ фокус на белой поверхности, 3 – фокус на черной поверхности

Fig. 3. Photo of film surfaces after laser marking. Fragments of 2D code modules on films:

а – 3М 7847; б – tesa 6930; в – НПМ012; г – ЛП2;
1 – magnification $\times 100$; 2 – magnification $\times 1000$ focus on a white surface; 3 – focus on a black surface

Предполагается, что такой шероховатый микрорельеф с эффектом хлопьев мог возникнуть из-за деструкции частично кристаллизованных полимеров. Свет попадает на шероховатую поверхность и рассеивается в разные направления. В этом случае отраженный свет не сфокусирован в точке считывающего устройства, а формирует более широкий угол отражения. Поверхность кажется менее гладкой и более матовой. Если же поверхность полимерного материала более ровная и гладкая, то отраженный свет лучше сфокусирован, что приводит к более яркому и блестящему эффекту, как в случае с пленками 3М 7847 и tesa 6930. Высокая степень яркости при отражении света белого цвета и низкая при отражении света черного цвета дают высокий контраст.

Визуально сравнивая белую поверхность пленок ЛП2 и НПМ012 по шероховатости, создается впечатление, что контрастность ЛП2 должна быть ниже. Но основной материал поли(о-гидроксиамид) пленки НПМ012 обладает высоким светопоглощением. Предполагается, что в нем низкое содержание белого светоотражающего пигмента, и он поглощает больше световой энергии. Уровень отражения света черного слоя от других пленок не

отличается. За счет низкого светоотражения белого слоя НПМ012 общий контраст снижается.

Кремнийорганическое связующее с пигментом белого красителя в пленке ЛП2 обладает высокой светоотражающей способностью, что компенсирует эффект рассеивания света шероховатой поверхностью. Материалы пленок 3М 7848 и tesa 6930 имеют высокую светоотражающую способность и гладкую ровную поверхность, относительно пленок НПМ012 и ЛП2. Но на поверхности полиуретана пленки tesa 6930 после лазерной обработки наблюдаются поры (средний размер 15 мкм). Предполагается, что из-за этого tesa 6930 уступает 3М по контрасту.

Из теста матрицы режимов (см. табл. 3) наблюдается, что пленки 3М 7848 и ЛП2 дают широкий охват параметров для возможной обработки лазером, количество их удовлетворительных маркировок выше, чем у НПМ012 и tesa 6930. Пленка tesa 6930 нуждается в более мощных режимах.

Пленка НПМ012 в данном тесте показала как участки, на которых не хватило мощности, так и участки, на которых вложенная мощность испарила материал белого слоя, образовав рыхлую поглощающую свет структуру поверхности. Необходимо отметить, что толщина черного слоя 3М 7848 и НПМ012 одинаково равна 0,01 мм. Но по наблюдению результатов теста материал пленки НПМ012 является более лазерочувствительным к длине волны 1,064 мкм. С одной стороны, это является преимуществом – обрабатывать пленку можно даже на менее мощном лазере, чем 30 Вт. Но с другой стороны, охват вариаций технологических режимов ниже – подбирать режим обработки необходимо деликатно, чтобы не пережечь материал.

Закключение

Полимерные лазерные пленки 3М 7847 и tesa 6930, состоящие из полиакрилата и полиуретана соответственно, способны обеспечивать качественную маркировку с наивысшей оценкой «А» по стандартам ИСО/МЭК 15415/15416. Этому способствуют высокий контраст материалов, достигающийся оптической способностью оптимального сочетания

отражения и поглощения света, а также гладкой поверхностью после лазерной обработки.

Полимерная пленка НПМ012, основой которой является модифицированный поли (о-гидроксиамид) после маркировки имеет неровный микрорельеф поверхности. Предполагается, что такой шероховатый микрорельеф с эффектом хлопьев мог возникнуть из-за деформации частично кристаллизованных полимеров. Свет попадает на шероховатую поверхность и рассеивается в разные направления. В этом случае отраженный свет не сфокусирован в точке считывающего устройства, а формирует более широкий угол отражения.

Предполагается, что в пленке НПМ012 низкое содержание белого светоотражающего пигмента, и он поглощает больше световой энергии. Уровень отражения света черного слоя от других пленок не отличается. Но за счет низкого светоотражения белого слоя НПМ012 общий контраст снижается. Пленка НПМ012 оценена на класс ниже, по сравнению с остальными изучаемыми пленочными материалами: ее 2D-кодам присвоен класс «В». Ключевым показателем НПМ012, не удовлетворившим наивысший класс, является невысокая контрастность.

Кремнийорганическая пленка ЛП2 также имеет после маркировки неровный микрорельеф поверхности, как и пленка НПМ012, но благодаря тому, что кремнийорганическое связующее с пигментом белого красителя в пленке ЛП2 обладает высокой светоотражающей способностью, это компенсирует эффект рассеивания света ее шероховатой поверхностью. В результате пленка ЛП2 обеспечивает нанесение 2D-кодов с наивысшим классом «А».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Schuitemaker Reuben, Xu Xun. Product traceability in manufacturing: A technical review. *Procedia CIRP*, 2020, Vol. 93, pp. 700–705. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.078.
2. Ganzulenko O. Y., Petkova A. P. Testing a nanobarcodes marking technology for identification and protection of the mechanical products. *Journal of Physics*, 2020, No. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012032.
3. Дзембак Ю. Современные технологии маркировки для электроники и приборостроения // Компоненты и Технологии. 2002. № 26. С. 150–151.
4. Горбовец М.А., Славин А.В. Кодированная маркировка образцов для высокотемпературных

испытаний // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 125–132. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-125-132.

5. Фомин А.В., Глущенко А.И., Поляченко Д.А., Зорин И.С. Идентификация маркировки стальных заготовок в СПЦ-1 АО «Оскольский электрометаллургический комбинат им. А. А. Угарова» на основе нейросетевого подхода // Управление большими системами. 2022. № (95). С. 62–78. DOI: 10.25728/ubs.2022.95.4.

6. Сырков А.Г., Ячменова Л.А. Особенности получения металлургической продукции в условиях твердотельного гидридного синтеза // Записки Горного института. 2022, Т. 256. С. 651–662. DOI: 10.31897/PMI.2022.25.

7. Санько А.А., Шейников А.А. Автоматическое распознавание нарушений нормальной работы газотурбинного двигателя вертолета по его параметрам и параметрам несущего винта // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2019. Т. 23. № 1 (83). С. 64–69.

8. Панов Н.Ш., Ахмедов В.Н., Хамрокулов Ш.Ш. Получение термоустойчивых покрытий на основе гидролизированных акриловых эмульсий и кремнийорганических соединений // *Universum: технические науки*. 2020. № 12 (81). С. 27–30.

9. Бажин, В.Ю., Исса Б. Влияние термической обработки на микроструктуру стальных змеевиков нагревательной трубчатой печи // Записки Горного института. 2021. № 249. С. 393–400. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.8.

10. Ahearne E. Engineering the surface for direct part marking (DPM). *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, No. 29, pp. 1–10.

11. Li C. L., Lu C., Li J. M. Nanosecond laser direct-part marking of data matrix symbols on titanium alloy substrates. *Key Engineering Materials*, 2018, Vol. 764, pp. 194–200.

12. Xia-Shuang Li, Wei-Ping He, Lei Lei, Jian Wang, Gai-Fang Guo, Teng-Yun Zhang, Ting Yue. Laser direct marking applied to rasterizing miniature Data Matrix Code on aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, 2016, Vol. 77, pp. 31–39. DOI: 10.1016/j.optla.2015.08.020.

13. Титова Т.А., Лось Л.А. Стандартное кодирование книг, журналов и газет посредством штрихового кода // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2014. № 5. С. 360–381.

14. Shammazov, I.A. Dzhemilev, E.R. Sidorkin, D.I. Improving the Method of Replacing the Defective Sections of Main Oil and Gas Pipelines Using Laser Scanning Data. *Applied Sciences*, 2023, No. 13, pp. 1–26. DOI: 10.3390/app13010048.

15. Amiaga J.V., Gorny S.G., Vologzhanina S.A. Method of Convex Marking of the Surfaces of Steel Products Using a Pulsed 50-W Infrared Fiber Laser Russian Metal-lurgy. *Metally*, 2020, Vol. 13, pp. 1513–1517. DOI:10.1134/S0036029520130042.

REFERENCES

1. Schuitemaker Reuben, Xu Xun. Product traceability in manufacturing: A technical review. *Procedia CIRP*, 2020, Vol. 93, pp. 700–705. DOI: 10.1016/j.procir.2020.04.078.
2. Ganzulenko O. Y., Petkova A. P. Testing a nanobarcodes marking technology for identification and

protection of the mechanical products. Journal of Physics, 2020, No. 1, pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742–6596/1582/1/012032.

3. Dzembak Yu. Modern marking technologies for electronics and instrumentation // Components and Technologies, 2002, no. 26. pp. 150–151.

4. Gorbovets M.A., Slavin A.V. The coded marking of specimens for high-temperature tests/ Proceedings of VIAM, 2019, no. 10 (82), pp. 125–132. DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-125-132.

5. Fomin A.V., Glushchenko A.I., Poleshchenko D.A., Zorin I.C. Identification of marking of steel billets in SPC-1 JSC "Oskol Electrometallurgical Combine named after A. A. Ugarov" on the basis of a neural network approach // Management of large systems, 2022, no. (95), pp. 62–78. DOI: 10.25728/ubs.2022.95.4.

6. Syrkov A.G., Yachmeneva L.A. Features of obtaining metallurgical products under conditions of solid-state hydride synthesis. Journal of Mining Institute, 2022, no. 256. pp. 651–662. DOI: 10.31897/PMI.2022.25.

7. Sanko A.A., Shennikov A.A. Automatic recognition of violations of the normal operation of the helicopter gas turbine engine by its parameters and parameters of the main rotor // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University, 2019, vol. 23, no. 1 (83). pp. 64–69.

8. Panaev N.S., Akhmedov V.N., Khamrakulov S.S. Obtaining heat-resistant coatings based on hydrolyzed acrylic emulsions and organosilicon compounds // Univer-sum: technical sciences, 2020, no. 12 (81), pp. 27–30.

9. Bazhin V.Yu., Isa B. Influence of heat treatment on the microstructure of steel coils of a heating tube furnace. Journal of Mining Institute, 2021, no. 249, pp. 393–400. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.8.

10. Ahearne E. Engineering the surface for direct part marking (DPM). CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, no. 29, pp. 1–10.

11. Li C. L., Lu C., Li J. M. Nanosecond laser direct-part marking of data matrix symbols on titanium alloy substrates. Key Engineering Materials, 2018, Vol. 764, pp. 194–200.

12. Xia-Shuang Li, Wei-Ping He, Lei Lei, Jian Wang, Gai-Fang Guo, Teng-Yun Zhang, Ting Yue. Laser direct marking applied to rasterizing miniature Data Matrix Code on aluminum alloy. Optics & Laser Technology, 2016, Vol. 77, pp. 31–39. DOI: 10.1016/J.OPTLASTEC.2015.08.020.

13. Titova T.A., Los L.A. Standard coding of books, magazines and newspapers by barcoding/ Mechanical engineering and computer technologies, 2014, no. 5, pp. 360–381.

14. Shammazov I.A. Dzhemilev E.R. Sidorkin D.I. Improving the Method of Replacing the Defective Sections of Main Oil and Gas Pipelines Using Laser Scanning Data. Applied Sciences, 2023, no. 13, pp. 1–26. DOI: 10.3390/app13010048.

15. Amiaga J.V., Gorny S.G., Vologzhanina S.A. Method of Convex Marking of the Surfaces of Steel Products Using a Pulsed 50-W Infrared Fiber Laser Russian Metallurgy. Metally, 2020, vol. 13, pp. 1513–1517. DOI: 10.1134/S0036029520130042.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.04.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 17.05.2023.

The article was submitted 25.04.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 17.05.2023.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39, 8-903-868-85-68.

E-mail: naukatm@yandex.ru, editntm@yandex.ru

Верстка Н.А. Лукашов. Редактор Е.В. Лукашова. Технический редактор Н.А. Лукашов.

Сдано в набор 17.07.2023. Выход в свет 28.07.2023.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Брянский государственный технический университет» 241035,

Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+