

Главный редактор научного журнала  
«Известия Волгоградского государственного технического университета»  
академик РАН, профессор, доктор химических наук,  
президент Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)  
*И. А. НОВАКОВ*

**Редакционная коллегия:**

*Байбурин В. Б.*, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ, Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)  
*Безъязычный В. Ф.*, д-р техн. наук, проф., Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)  
*Бодров В. Н.*, д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)  
*Бребельс А.*, PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)  
*Буренин А. А.*, чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)  
*Голованчиков А. Б.*, д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Гринберг Б. А.*, д-р физ.-мат. наук, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)  
*Гуревич Л. М.*, д-р техн. наук, доцент ВолгГТУ  
*Добрушин Л. Д.*, д-р техн. наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина)  
*Злотин С. Г.*, д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)  
*Иванов А. М.*, д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)  
*Иващенко Н. А.*, д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ, МВТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)  
*Королев А. В.*, д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)  
*Кузьмин С. В.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Кураев А. А.*, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)  
*Лысак В. И.*, академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Марков В. А.*, д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет МГТУ им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия)  
*Мертен Клеменс*, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik (г. Штутгарт, Германия)  
*Навроцкий А. В.*, д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ  
*Нижегородцев Р. М.*, д-р экон. наук, главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)  
*Пай В. В.*, д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)  
*Поляничков Ю. Н.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Пустовойт В. Н.*, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)  
*Ревин А. А.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Русинов В. Л.*, чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета (ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)  
*Рыбин В. В.*, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет (г. Санкт-Петербург, Россия)  
*Трюэль Жан-Луи*, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция, вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»  
*Тхай Куанг Винь*, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)  
*Федянов Е. А.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Фролов В. А.*, д-р техн. наук, проф., «МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)  
*Шарипов В. М.*, д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МАМИ, г. Москва, Россия)  
*Шаховская Л. С.*, д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ  
*Шеин А. Г.*, д-р физ.-мат. наук, проф. ВолгГТУ  
*Щербаков М. В.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Яковлев И. В.*, д-р техн. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)

Серия  
«ПРОГРЕССИВНЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ»

# ИЗВЕСТИЯ



ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель

*Поляничков Ю. Н.*, д.т.н., проф.

*Сердобинцев Ю. П.*, д.т.н., проф.  
(зам. председателя)

*Безъязычный В. Ф.*, д.т.н. проф.  
(РГАТУ им. П. А. Соловьева,  
г. Рыбинск)

*Схиртладзе А. Г.*, д.т.н. проф.  
(МГТУ «СТАНКИН», г. Москва)

*Мухин А. В.*, д.т.н. проф.  
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва)

*Бржозовский Б. М.*, д.т.н. проф.  
(СГТУ, г. Саратов)

*Королев А. В.*, д.т.н. проф.  
(СГТУ, г. Саратов)

*Шумячер В. М.*, д.т.н., проф. ректор  
(ВГИСИ, филиал ВолГАСУ,  
г. Волжский)

*Сидякин Ю. И.*, д.т.н., проф.

*Ханов Г. В.*, д.т.н., проф.

*Тескер Е. И.*, д.т.н., проф.

*Благовецкая М. М.*, д.т.н., проф.  
проректор (МГУПБ, г. Москва)

*Паиков Е. В.*, д.т.н., проф. первый  
проректор (СевНТУ, г. Севастополь)

*Попов В. И.*, д.т.н., проф.  
(МГУПБ, г. Москва)

*Сердобинцев С. П.*, д.т.н., проф.  
(КТУ, г. Калининград)

*Плотников А. Л.*, д.т.н., проф.

*Крайнев Д. В.*, к.т.н., доц.  
(ответственный секретарь)

Международный индекс журнала  
ISSN 1990-5297.

Журнал распространяется  
по подписке.  
Индекс журнала по каталогу  
Агентства «Роспечать»  
для Российской Федерации –  
80811(ОК+ЭК). По вопросам  
подписки обращаться  
в издательство.

**Тел. издательства ВолГТУ:**  
(8442) 24-84-06  
Факс (8442) 24-84-06  
otr@vstu.ru

Научный журнал  
Издается с января 2004 г.  
Выходит двенадцать раз в год

**№ 9 (204)**  
**Сентябрь**  
**2017**

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**

**ФГБОУ высшего образования**  
**«Волгоградский государственный технический университет»**

**Адрес редакции:**

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.  
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00  
**E-mail:** president@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,**  
**на отдельные статьи – сохраняется за автором**

Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического  
университета» категорически запрещена без оформления договора  
в соответствии с действующим законодательством РФ

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского  
государственного технического университета» обязательна

Head Editor of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

**Novakov I. A.** – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, President of VSTU

### **Editorial board:**

*Baiburin V. B.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

*Bezyazychny V. F.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solov'yov (Rybinsk, Russia)

*Bodrov V. N.*, D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)

*Brebels A.*, PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)

*Burenin A. A.*, Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)

*Golovanchikov A. B.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Grinberg B. A.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS (Ekaterinburg, Russia)

*Gurevich L. M.*, D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU

*Dobrushin L. D.*, D. Sc. (Engineering), E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)

*Zlotin S. G.*, D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*Ivanov A. M.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)

*Ivashchenko N. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

*Korolev A. V.*, D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

*Kuzmin S.V.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Kurayev A. A.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)

*Lysak V. I.*, Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Markov V. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

*Merten K.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)

*Navrotskiy A. V.*, D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

*Nizhegorodtsev R. M.*, D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*Pai V. V.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

*Polyanchikov Y. N.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Pustovoit V. N.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

*Revin A. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Rusinov V. L.*, Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

*Rybin V. V.*, Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., St. Petersburg Polytechnic University (St.Petersburg, Russia)

*Thai Quang Vinh*, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)

*Truel J.-L.*, D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club "Kondratiev Circle"

*Fedyanov E. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Frolov V. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., "MATI Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky" (Moscow, Russia)

*Sharipov V. M.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow State Technical University "MAMI" (Moscow, Russia)

*Shakhovskaya L. S.*, D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU

*Shcherbakov M. V.*, D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU

*Sheyin A. G.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof. of VSTU

*Yakovlev I. V.*, D. Sc. (Economy), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

SERIES  
«ADVANCED  
TECHNOLOGY IN  
MACHINE BUILDING»

# IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY

*The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees*

## Editorial board:

### Chairman

**Polyanchikov Y.N.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.

**Serdobintsev Y.P.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (Vice-chairman)

**Bez'yazychniy V.F.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (RSATU  
named after P.A. Solovyov, Rybinsk)

**Skhirtladze A.G.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.

(MSTU STANKIN, Moscow)  
**Mukhin A.V.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof. (Bauman MSTU, Moscow)

**Brzhozovsky B. M.**, D. Sc.  
(SSTU, Saratov)

**Korolev A.V.**, D. Sc., Prof.  
(SSTU, Saratov)

**Shumyacher V.M.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof., Rector  
(Volzhski affiliate of VSUACE,  
Volzhski)

**Sidyakin Y.I.**, D. Sc. (Engineering), Prof.  
**Khanov G.V.**, D. Sc. (Engineering), Prof.

**Tesker E.I.**, D. Sc. (Engineering), Prof.  
**Blagoveschenskaya M.M.**, D. Sc.

(Engineering), Prof., Vice-rector  
(MSUFP, Moscow)

**Pashkov E.V.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof., First vice-rector  
(SEVNTU, Sevastopol)

**Popov V.I.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof. (MSUAB, Moscow)

**Serdobintsev S.P.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.

(KSTU, Kaliningrad)

**Plotnikov A.L.**, D. Sc. (Engineering), Prof.  
**Kraynev D.V.** (executive secretary),  
Cand. Sc., Ass. Prof.

International index of the journal  
ISSN 1990-5297.

The journal is distributed by subscription.  
Index of the journal in the catalogue of  
the Agency «Rospechat» for the Rus-  
sian Federation – 80811(OK+ЭК).  
Concerning subscription turn to the  
editorial office.

### Tel. Of VSTU editorial office:

(+7 8442) 24-84-06  
Fax: (+7 8442) 24-84-06  
otr@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

**№ 9 (204)**  
**September**  
**2017**

### FOUNDER:

FSBEI of Higher Professional Education  
«Volgograd State Technical University»

### Editorial office address:

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – (+7 8442) 24-80-00

E-mail: president@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication,  
IT and Mass Communications (Roscomnadzor)  
Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of  
Volgograd State Technical University

*The copyright for the journal in general belongs to the Founder,  
for separate articles – to authors.*

*Reprint from the journal «Izvestia VSTU» is strongly forbidden without conclusion of an  
agreement in accordance with the legislation of the RF  
When reprinting the materials, the citation to the journal «Izvestia VSTU» is obligatory*



## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абляз Т.Р. 78  
Авдеев А.Р. 74  
Аверченков В.И. 95  
Антонов Н.М. 125  
Ардашев Д.В. 98  
Батищева О.М. 85  
Бочкарев П.Ю. 128, 132, 135  
Вавилин Я.А. 116  
Вершинин А.Ю. 54  
Вороненко В.П. 9  
Ганиев М.М. 81  
Ганиев И.М. 81  
Говоров В.А. 26  
Головкин В.В. 85  
Горбунов А.С. 28  
Горленко О.А. 12, 116, 118  
Гребенкин Р.В. 63  
Григорьева Н.С. 112  
Гузеев В.И. 98  
Гущин И.А. 74  
Денисенко А.Ф. 32  
Дроботов А.В. 74  
Жабин О.И. 35  
Житников Ю.З. 120, 124  
Зарубин Д.А. 78  
Измайлов А.Д. 35  
Казак В.Ф. 54  
Клычев А.А. 124  
Кожевников С.И. 37  
Крюков В.А. 14  
Кудряшов Е.А. 40  
Курылев Д.В. 69  
Кухтик М. П. 137  
Лаврентьев А.М. 50  
Лавриненко В.Ю. 26  
Лебедев В.А. 88  
Лебедь Н.И. 125  
Лопа И.В. 17  
Лунев Н. А. 69  
Макаров А.М. 125, 137  
Макаров В.Ф. 28, 37, 44  
Макаров Г.Н. 12  
Митин С.Г. 132  
Можаева Т.П. 118  
Мушкин О.В. 137  
Надуваев В.В. 95  
Назарьев А.В. 128  
Наумов А.Г. 47  
Наумова О.А. 47  
Никитин С.П. 28  
Новиков А.Е. 125  
Новиков В.В. 47, 102  
Носенко В.А. 105  
Отений Я.Н. 50, 54  
Павлов Е.В. 58  
Папикян А.М. 92  
Папшев В.А. 85  
Песин М.В. 28, 72  
Петухов Г.Д. 44  
Пискунов В.В. 120  
Плотников А.Л. 61  
Прейс В.В. 14  
Проскуряков Н.Е. 17  
Раднюк В.С. 47  
Разманов И.А. 132  
Решетникова Е.П. 135  
Саразов А.В. 105  
Сарайнов Н.Е. 109  
Сергеев А.С. 61  
Сердобинцев Ю.П. 137  
Смирнов И.М. 40  
Соколов В.Д. 88  
Сорокин С.В. 140  
Сутягин А.Н. 20  
Сьянов С.Ю. 92  
Тамаркин М.А. 63  
Тихонова Ж.С. 66  
Тищенко Э.Э. 63  
Туренко А.П. 22  
Тышкевич В.Н. 105  
Унянин А.Н. 109  
Ушомирская Л.А. 78  
Фролов Е.Н. 95  
Хижняк Н.А. 40  
Шабайкович В.А. 145  
Шашин А.Д. 9  
Швец А.А. 74  
Штынь С.Ю. 88  
Якимов М.В. 32

## СОДЕРЖАНИЕ

---

Посвящение Учителю.....	8
Секция 1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ	
<i>Вороненко В.П., Шашин А.Д.</i>	
Влияние негативных геометрических погрешностей сопрягаемых поверхностей вала и подшипника на работоспособность подшипника и учет их при сборке.....	9
<i>Горленко О.А., Макаров Г.Н.</i>	
Проектирование прямозубых цилиндрических передач при условии минимизации контактных напряжений.....	12
<i>Крюков В.А., Прейс В.В.</i>	
Кулачковый привод с демпфером трения для механических ориентаторов систем автоматической загрузки.....	14
<i>Лопа И.В., Проскуряков Н.Е.</i>	
Расчет прочности трубопровода при гидравлическом ударе.....	17
<i>Сутягин А.Н.</i>	
Моделирование трибоконтакта сопрягаемых деталей машин, изготовленных с применением лезвийной обработки.....	20
<i>Туренко А.П.</i>	
Расчет изгибающего момента при формировании внутреннего кольца упорного подшипника.....	22
Секция 2. ТЕХНОЛОГИИ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА	
<i>Лавриненко В.Ю., Говоров В.А.</i>	
Исследование процесса обратного выдавливания поковок типа «стакан» с уменьшенной разностенностью.....	26
<i>Макаров В.Ф., Никитин С.П., Песин М.В., Горбунов А.С.</i>	
Применение различных методов упрочняющей обработки деталей с целью повышения сопротивления усталостному разрушению.....	28
Секция 3. ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	
<i>Денисенко А.Ф., Якимов М.В.</i>	
Изгибные колебания шпинделя металлорежущего станка с учетом анизотропной упругости опор.....	32
<i>Измайлов А.Д., Жабин О.И.</i>	
Оптимизация режимов резания промышленных и инженерных термопластов.....	35
<i>Кожеевников С.И., Макаров В.Ф.</i>	
Влияние траектории фрезерования на износостойкость пространственно-сложных поверхностей формообразующей оснастки.....	37
<i>Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Хижняк Н.А.</i>	
О возможности точения резцом с устройством демпфирования поверхности сборочной единицы, состоящей из разнородных конструкционных материалов.....	40
<i>Макаров В.Ф., Петухов Г.Д.</i>	
Повышение эффективности процесса скоростного протягивания на основе проектирования, расчета и оптимизации параметров сборных протяжек.....	44
<i>Наумов А.Г., Новиков В.В., Раднюк В.С., Наумова О.А.</i>	
О возможности использования микрокапсулированных СОТС при лезвийном резании материалов.....	47

<i>Отений Я.Н., Лаврентьев А.М.</i>	
Сравнение различных методов определения глубины упрочнения при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием.....	50
<i>Отений Я.Н., Вершинин А.Ю., Казак В.Ф.</i>	
Анализ методик определения контактных напряжений между цапфой и обоймой в цилиндрических парах трения.....	54
<i>Павлов Е.В.</i>	
Совершенствование процесса токарной обработки ротационных деталей с прерывистыми поверхностями.....	58
<i>Сергеев А.С., Плотников А.Л.</i>	
Физические принципы автоматизированных способов определения базовых параметров процесса металлообработки.....	61
<i>Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Гребенкин Р.В.</i>	
Анализ и формирование показателей надежности технологических процессов отделочно-упрочняющей вибрационной обработки деталей.....	63
<i>Тихонова Ж.С.</i>	
Способ обеспечения надежности работы сборного многолезвийного твердосплавного инструмента на станках с ЧПУ.....	66
 Секция 4. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	
<i>Курылев Д.В., Лунев Н. А.</i>	
Применение селективного лазерного сплавления при производстве технологической оснастки для изготовления деталей авиационной техники.....	69
<i>Песин М.В.</i>	
Научное обоснование повышения долговечности комплекса бурильных труб на основе методологии моделирования и управления параметрами упрочняющей обработки резьбы.....	72
<i>Швец А.А., Дроботов А.В., Гуцин И.А., Авдеев А.Р.</i>	
Управление 3D принтером с дополнительными степенями свободы.....	74
 Секция 5. ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ	
<i>Абляз Т.Р., Ушомирская Л.А., Зарубин Д.А.</i>	
Применение технологии электролитно-плазменного полирования для повышения качества поверхностей изделий, полученных методом электроэрозионной обработки.....	78
<i>Ганиев М.М., Ганиев И.М.</i>	
Влияние ультразвуковой ударной обработки на коррозионную стойкость стали.....	81
<i>Головкин В.В., Батищева О.М., Папиев В.А.</i>	
Нарезание резьбы с ультразвуковыми колебаниями в труднообрабатываемых материалах.....	85
<i>Лебедев В.А., Штынь С.Ю., Соколов В.Д.</i>	
Методика разработки технологических процессов получения покрытий в вибрационных технологических системах.....	88
<i>Съянов С.Ю., Папикян А.М.</i>	
Функционально-ориентированный подход при проектировании технологических процессов электроэрозионной обработки.....	92
 Секция 6. ТЕХНОЛОГИИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА	
<i>Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.Н.</i>	
Правящие карандаши из поликристаллических алмазов при абразивной обработке в машиностроении.....	95
<i>Ардашев Д.В., Гузев В.И.</i>	
Проектирование операций шлифования на основе прогнозирования работоспособности шлифовальных кругов.....	98
<i>Новиков В.В.</i>	
Влияние состава синтетических СОЖ на производительность шлифования стекла.....	102

<i>Тышкевич В.Н., Носенко В.А., Саразов А.В.</i> Повышение эффективности плоского шлифования торцов призматических заготовок малой жесткости.....	105
<i>Унянин А.Н., Сарайнов Н.Е.</i> Исследование влияния амплитуды ультразвуковых колебаний на температурное поле при шлифовании кругами из эльбора.....	109
Секция 7. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ И СБОРКИ МАШИН. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ	
<i>Григорьева Н.С.</i> Развертывание функции качества при сборке.....	112
<i>Горленко О.А., Вавилин Я.А.</i> Менеджмент безопасности продукции.....	116
<i>Горленко О.А., Можяева Т.П.</i> Обеспечение качества машиностроительной продукции на основе управления человеческими ресурсами.....	118
<i>Житников Ю.З., Пискунов В.В.</i> Обоснование надежной ориентации резьбовых деталей при роботизированной сборке изделий.....	120
<i>Житников Ю.З., Клычев А.А.</i> Обоснование условий надежного закрепления заготовок в трехкулачковом патроне с учетом деформации их поверхностей, взаимодействующих с кулачками.....	124
<i>Лебедь Н.И., Антонов Н.М., Макаров А.М., Новиков А.Е.</i> Результаты исследований автоматизированного роторного измельчителя плодоовощного сырья.....	125
<i>Назарьев А.В., Бочкарев П.Ю.</i> Формирование структуры комплекса проектных процедур для автоматизации технологической подготовки производства высокоточных изделий.....	128
<i>Разманов И.А., Митин С.Г., Бочкарев П.Ю.</i> Повышение эффективности технологической подготовки многономенклатурного производства на основе разработки системы показателей для оценки уровня проектных решений.....	132
<i>Решетникова Е.П., Бочкарев П.Ю.</i> Формализация выбора контрольно-измерительных средств для оценки размерных характеристик деталей со сложнопольными поверхностями при разработке технологических процессов.....	135
<i>Сердобинцев Ю.П., Мушкин О.В., Макаров А.М., Кухтик М.П.</i> Условия выбора эксплуатационных режимов для повышения надежности расфасовочного оборудования.....	137
<i>Сорокин С.В.</i> Автоматизированная система расчета элементов погрешности установки заготовки в приспособлении в среде CAD/CAM-систем.....	140
<i>Шабайкович В.А.</i> Малозатратное изготовление качественной и конкурентоспособной продукции.....	145

## Посвящение Учителю



9 августа 2017 года исполнилось 90 лет со дня рождения крупного ученого в области обработки резанием, бывшего заведующего кафедрой «Технологии машиностроения» Волгоградского политехнического института (ВПИ) Николая Васильевича Талантова.

Н. В. Талантов родился 9 августа 1927 г. в селе Нижний Услон Верхнеуслонского района Татарской АССР. Его отец, Василий Илларионович (1899–1965), заслуженный врач СССР, работал сельским врачом. Мать, Наталья Панфиловна (1901–1970), учительница русского языка.

В 1933 г. семья переехала в Казань. В 1944 г. Н. В. Талантов окончил среднюю школу и поступил в Казанский авиационный институт (КАИ), который в 1950 г. окончил с отличием по кафедре двигателей. С 1950 г. работал учебным мастером на кафедре «Авиационные двигатели» КАИ. Во время учебы и работы в КАИ Н. В. Талантов активно участвует в общественной жизни вуза (член бюро ВЛКСМ, староста потока, член сборной института по лыжным гонкам, мастер спорта). С 1951 г. заведующий лабораторией «Обработка металлов резанием» КАИ. С 1952 по 1954 г. работает ассистентом кафедры «Резание металлов» КАИ. С 1954 по 1955 г. обучался в аспирантуре КАИ (науч. рук. проф. Э. И. Иткин).

Свою научную деятельность Н. В. Талантов начал с изучения обрабатываемости резанием жаропрочных сталей. В 1955 г. на ученом совете Казанского авиационного института защитил диссертацию на тему «Исследование обрабатываемости сталей аустенитного класса с предварительным подогревом» на соискание ученой степени кандидата технических наук. Полученные результаты позволили значительно снизить себестоимость обработки деталей авиационных и ракетных двигателей.

После защиты диссертации Н. В. Талантов переехал в Ижевск. С 1956 г. старший преподаватель, с 1958 г. – заведующий кафедрой «Станки и инструменты», с 1961 г. – проректор по научной работе, а с 1964 г. – ректор Ижевского механического института. В 1970 г. в специализированном совете при МВТУ им. Н. Э. Баумана Н. В. Талантов защитил диссертацию на тему «Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента» на соискание ученой степени доктора технических наук (офиц. опп. проф. В. Н. Подураев и проф. В. Ф. Бобров). В его исследованиях были рассмотрены вопросы, связанные с закономерностями процесса лезвийной обработки металлов повышенной прочности, описаны тепловые явления и температура резания, изложены температурно-деформационные закономерности процесса резания, обоснованы связи контактных процессов с изнашиванием и разрушением режущей части инструмента.

В 1971 г. ему присваивают ученое звание профессора. В 1972 г. Н. В. Талантов переехал в Волгоград, где возглавил кафедру «Технология машиностроения» ВПИ. Здесь им была создана известная в стране научная школа по исследованию физических процессов при резании металлов лезвийным инструментом. Теоретические разработки и практические рекомендации по повышению эффективности процесса резания и улучшения обрабатываемости сталей за счет их микролегирования нашли свое применение на крупнейших машиностроительных заводах страны.

Его перу принадлежат 142 научные работы, в том числе 3 монографии и 18 изобретений. Под его руководством были выполнены и защищены четыре докторских и более 30 кандидатских диссертаций. Одновременно с активной научной деятельностью Н. В. Талантов занимался общественной и партийной работой. С 1963 г. – член Октябрьского районного комитета КПСС Ижевска, с 1966 г. – член городского комитета КПСС, с 1967 г. – депутат Верховного Совета Удмуртии и одновременно член бюро обкома КПСС.

В разные годы Н. В. Талантов был членом головного совета Минвуза СССР по специальности «Технология машиностроения», членом совета по специальности «Технология машиностроения» Государственного комитета по науке и технике при СМ СССР, председателем секции «Технология машиностроения» Волгоградского областного правления НТО Машпром.

Заслуги Н. В. Талантова были высоко оценены государством – он награжден орденом «Знак Почета», двумя орденами Трудового Красного Знамени и медалью «За трудовую доблесть».

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 658.512.6

В. П. Вороненко, А. Д. Шашин

ВЛИЯНИЕ НЕГАТИВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ  
СОПРЯГАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВАЛА И ПОДШИПНИКА  
НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПОДШИПНИКА И УЧЕТ ИХ ПРИ СБОРКЕ

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

В данной статье рассматриваются факторы, негативно влияющие на качество поверхности беговой дорожки подшипника качения при его запрессовке на вал. Проведенные экспериментальные исследования процесса запрессовки подшипника с жестким креплением вала, а также симуляция процесса запрессовки установили влияние геометрических погрешностей соединяемых деталей на качество собираемого комплекта.

*Ключевые слова:* подшипник качения, эксцентриситет, овальность, пассивная адаптация, угловое отклонение, геометрия беговой дорожки.

In this article, factors that negatively affect the surface quality of the roller bearing raceway when it is pressed onto the shaft are considered. Carried out experimental studies of the process of pressing the bearing with a rigid shaft fastening as well as simulating the pressing process determined the influence of the geometrical errors of the parts to be connected to the quality of the assembled set.

*Keywords:* rolling bearing, eccentricity, elliptical, passive adaptation, angular deviation, geometry of treadmill.

Одними из основных технических требований любого современного механизма, принцип действия которого основан на развитии большого крутящего момента и высокой частоты вращения являются обеспечение требуемого срока службы и низкого уровня шума [2]. Эти условия эксплуатации машин предъявляют повышенные требования к подшипниковым узлам. Так, качество работы подшипниковых узлов определяется не только качеством самих подшипников, но и в значительной мере технологией их сборки [3].

Технология сборки подшипниковых узлов должна учитывать наличие геометрических погрешностей элементов подшипника и поверхностей вала [2], в частности такие как: неперпендикулярность посадочных поверхностей к торцу вала и торцу внутреннего кольца подшипника; погрешности формы в поперечном сечении посадочных поверхностей вала, отверстия внутреннего кольца подшипника и его беговой дорожки. Процесс запрессовки подшипника качения на вал (рис. 1) сопровождается возникновением перекоса  $\gamma'$  оси посадочного отверстия подшипника и оси посадочной шейки вала.

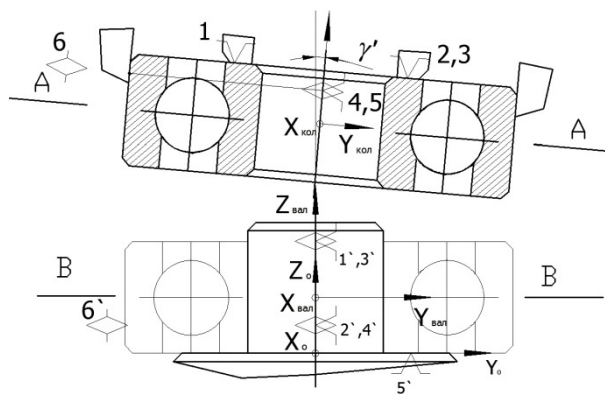


Рис. 1. Возникающая угловая погрешность  $\gamma'$  в процессе запрессовки с сечениями подшипника (А-А) и вала (В-В)

После снятия сборочной силы на подшипник, под воздействием сил упругой деформации подшипник устанавливается по шейке вала и их системы координат совпадают. В этом случае происходит увеличение деформации в радиальном направлении в сечениях (А-А) и (В-В) (рис. 2), из-за неравномерного распределения натяга, вызванное перекосом осей сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей.

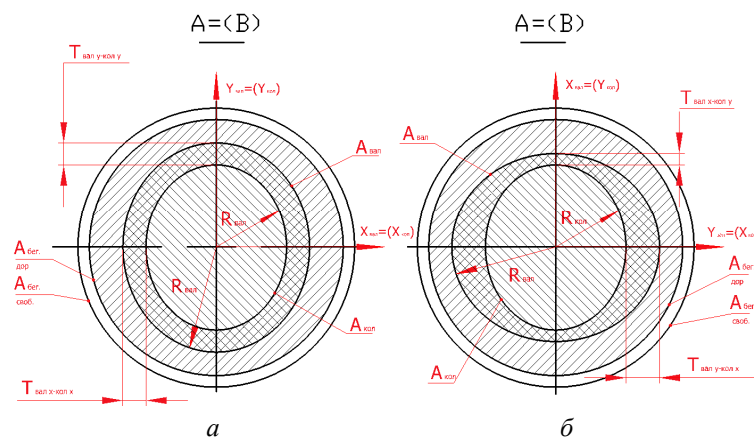


Рис. 2. Схематические распределения деформации вдоль осей:

а – при совпадении больших полуосей (эксцентриситетов); б – при развороте эллипсов (эксцентриситетов) на  $90^\circ$

Таким образом, вал изменяет свое сечение за счет сил сжатия, в свою очередь изменяя (расширяя) посадочное внутреннего кольца. Деформация кольца должна происходить пропорционально значению посадочного слоя ( $T$ ), то есть величины натяга в единичном сечении в заданном направлении. При увеличении значения  $T$  в любом направлении происходит увеличение деформации в том же направлении. Отсюда можно сделать вывод, что беговая дорожка ( $A_{\text{бег.дор.}}$ ) будет так же деформироваться, изменяя свою геометрию, и, образуя поверхность ( $A^{\circ}_{\text{бег.дор.}}$ ).

На основании методики [3] количественного расчета изменения деформационного процесса беговой дорожки внутреннего кольца подшипника серии 107 при запрессовке с жестким креплением вала деформации будут иметь различные величины в разных направлениях при не совпадении вершин эллипсов сопрягаемых поверхностей и несовпадении осей сопрягаемых поверхностей. На основе этого было решено провести экспериментальные исследования по запрессовке подшипника на вал с жестким креплением.

На практике положение эксцентриситета не учитывается, что ведет к дополнительной деформации беговой дорожки кольца подшипника. При таком случае эксцентриситеты сонаправлены. Соответственно для «выравнивания» беговой дорожки, нужно направить эксцентриситеты в разные стороны. В экспериментальных исследованиях основным контролируемым параметром было принято отклонение от круглости беговой дорожки подшипника, которое измерялось до запрессовки и после. Эксцентриситеты валов и подшипников были измерены в метрологической лаборатории на высокоточном кругломере MarForm MMQ 400. На рис. 3 представлены диаграммы отклонения от круглости (положение эксцентриситета) выборочного образца вала и подшипника.

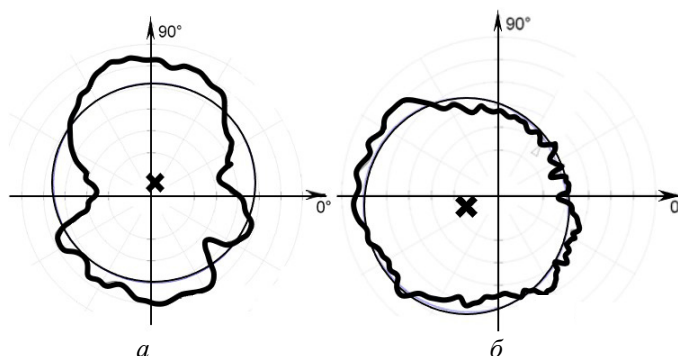


Рис. 3. Положение эксцентриситета вала (а) и подшипника (б)

Результаты отклонении от круглости беговой дорожки подшипника до запрессовки и после приведены в таблице.

Эксцентриситеты вала и подшипника	Отклонение от круглости, мм		Результат
	До	После	
Сонаправленный	0,011	0,013	Увеличение отклонений → возникновение дополнительной погрешности формы беговой дорожки
	0,011	0,013	
	0,016	0,015	
Разнонаправленный	0,016	0,001	Уменьшение отклонения от круглости → уменьшение погрешности формы беговой дорожки
	0,007	0,005	
	0,028	0,010	

Проведенное 3D-моделирование процесса запрессовки в SolidWorks Simulation, позволило наглядно продемонстрировать, как меняется форма беговой дорожки внутреннего кольца подшипника в зависимости от направления эксцентриситета.

Задав все необходимые параметры [4] и приняв шаг итерации решения равным 1 получились следующие результаты (рис. 4.)

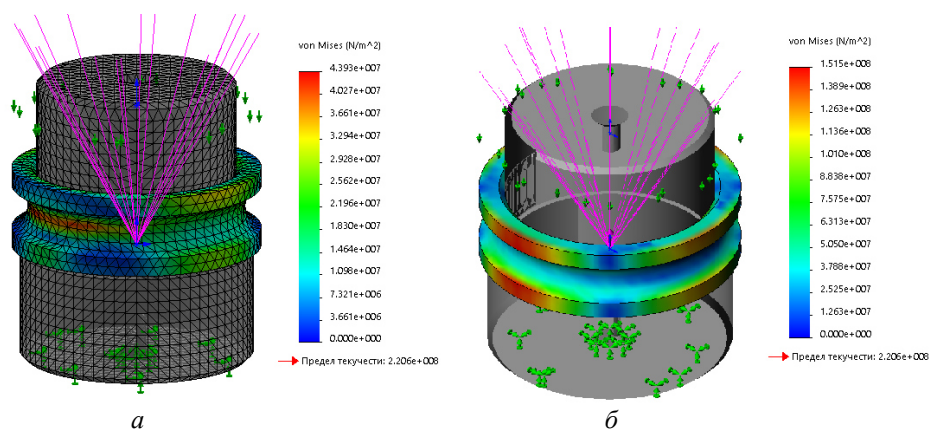


Рис. 4. Возникающие напряжения в единичном сечении на беговой дорожке подшипника вследствие сонаправленности (а) и разнонаправленности (б) эксцентриситетов сопрягаемых поверхностей

На рис. 4 наглядно видно, что напряжения, возникающие в единичном сечении достаточно критичные, но не превышают предел текучести ( $\sigma_B = 2,206 \cdot 10^8$  МПа). Если в первом случае подшипник деформируется на небольшую величину, которая может стать критической при высоких нагрузках узла и возникновения вибраций, то во втором случае, при таком виде положения эксцентриситетов идет своего рода «выравнивание» беговой дорожки внутреннего кольца подшипника.

Таким образом, проведенные исследования, показали, что от факторов отрицательно влияющих на геометрическую форму беговой дорожки можно и нужно избавляться. Возникновение деформаций и напряжений на беговой дорожке нельзя избежать полностью, но повлиять на их уменьшение вполне возможно. Для того чтобы избежать излишней деформации необходимо стараться по возможности направлять эксцентриситеты вала и подшипников в разные стороны, что приведет к повышению качества беговой дорожки подшипника. Применение в сборке элемента пассивной адаптации в технологической оснастке, подробно описанной в [4] позволит уменьшить угловое отклонения  $\gamma'$  возникающего в процессе запрессовки, которое в свою очередь влияет на величину овальностей сопрягаемых поверхностей, а, следовательно, и на деформацию беговой дорожки внутреннего кольца подшипника. Исследования ВНИПП [1] показали, что уменьшение овальности беговой дорожки с 5 мкм до 2 мкм приводит к увеличению долговечности подшипникового узла в 1,5 раза.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние точностных параметров на долговечность подшипников качения (Отчет по разделу 1.3 Договора о сотрудничестве ГПЗ и ВНИПП от 18/ХП-1972).
2. Повышение эффективности сборочных машиностроительных производств путем обеспечения гибкости технологических процессов и структур подразделений. Вороненко В.П. / Автореф. дис. ... д.т.н. – М.: МГТУ «Станкин», 1997. – 45 с.
3. Обеспечение качества подшипниковых узлов в процессе автоматизированной серийной сборки с использованием средств пассивной адаптации. Вороненко А.В. / Автореф. дис. ... к.т.н. – М.: 2005. – 20 с.: ил.
4. Исследование процесса запрессовки подшипников на валы в серийном производстве с использованием пассивной адаптации. Шашин А.Д. / Дис. на соискание академической степени магистра техники и технологии – М.: МГТУ «Станкин», 2017. – 57 с.

УДК.621.833

*О. А. Горленко, Г. Н. Макаров***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРЯМОЗУБЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ  
ПРИ УСЛОВИИ МИНИМИЗАЦИИ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ****Брянский государственный технический университет**

Рассмотрены способы минимизации контактных напряжений в зацеплении прямозубых цилиндрических зубчатых передач на этапе проектирования: предание зубьям солнечной шестерни бочкообразной формы и разделение зубьев сателлитов кольцевыми канавками. Произведен анализ данных способов по критерию наименьших контактных напряжений, в результате которого установлено что наименьшие контактные напряжения наблюдаются при комбинировании данных способов.

*Ключевые слова:* зубчатая передача, контактные напряжения.

Methods for minimizing contact stresses in the meshing of spur gears in the design phase are discussed: the presentation of the barrel-shaped teeth to the teeth of the sun gear and the separation of the teeth of the satellites by annular grooves. An analysis of these methods was made using the criterion of the smallest contact stresses, which established that the smallest contact stresses are observed when combining these.

*Keywords:* gearing, contact stresses.

Зубчатые передачи имеют ряд неоспоримых достоинств (большая долговечность и высокая надежность и т. п.) по сравнению с другими механическими передачами, что способствует их широкому применению в разнообразных машинах и механизмах в ряде отраслей промышленности. Зачастую от работоспособности зубчатых передач, их нагрузочной способности зависит долговечность всего агрегата, поэтому проектирование зубчатых передач при условии минимизации контактных напряжений является актуальной проблемой современного машиностроения.

Определение нагруженности зубчатых механизмов является комплексной задачей, требующей для своего решения изучения деформации податливых элементов передачи, учета погрешностей их изготовления и монтажа, раскрытия статической неопределенности системы, содержащей зубчатую передачу, т. е. расчета характера распределения нагрузки по длине контактных линий и между зубьями, определения величины контактных напряжений с учетом реальных условий работы деталей и узлов зубчатых механизмов. Основная проблема при расчете нагруженности и прочности передач зацеплением заключается в корректном определении контактных и изгибных напряжений и деформаций зубчатых колес в условиях перекоса. Поэтому на этапе проектирования вносятся изменения в классическую конструкцию зубчатых передач, заключающуюся в модификации профиля зубьев.

В работах [1, 2] предлагается продольная модификация профиля зуба – бочкообразность (рис. 1). Она осуществляется путем замены прямолинейных образующих боковых поверхностей зубьев криволинейными образующими с параметрами кривизны образующих боковых поверхностей зубьев в торцевых сечениях  $\Delta S = 0,005...0,30$  мм.

В работах [3–5] предлагается конструкция зубчатых колес с адаптивными свойствами, в которых зубья имеют три кольцевые канавки глубиной полтора модуля выполненные по замкнутой винтовой линии, расположенные в плоскостях, параллельных плоскостям движения колеса, разделяющие зуб на 4 равных участка (рис. 2) [6].

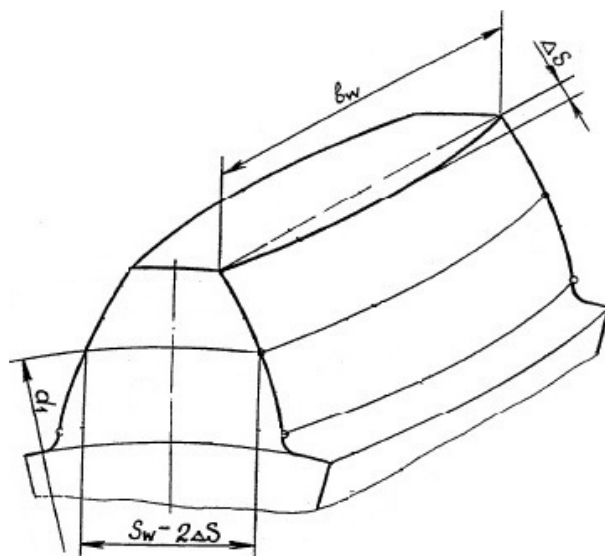


Рис. 1. Зуб зубчатого колеса с продольной модификацией:  
 $d_1$  – делительный диаметр,  $S_w$  – окружная толщина зуба,  $\Delta S$  – параметр кривизны образующих боковых поверхностей зуба в торцевых сечениях,  $b_w$  – ширина венца

Такая конструкция позволяет наделить зубья упругодемпфирующими свойствами, необходимыми для компенсации неравномерного распределения нагрузки по ширине зуба.

Авторы каждой из конструкций утверждают, что, используя модификацию зуба, можно достигнуть значительного уменьшения величины контактных напряжений в зацеплении. При этом исследования для первого и второго способов модификации проводились для разных типов передач, условий нагружения и режимов работы, а в литературных источниках отсутствуют данные, позволяющие сравнить предложенные способы модификации по критерию наименьших контактных напряжений.

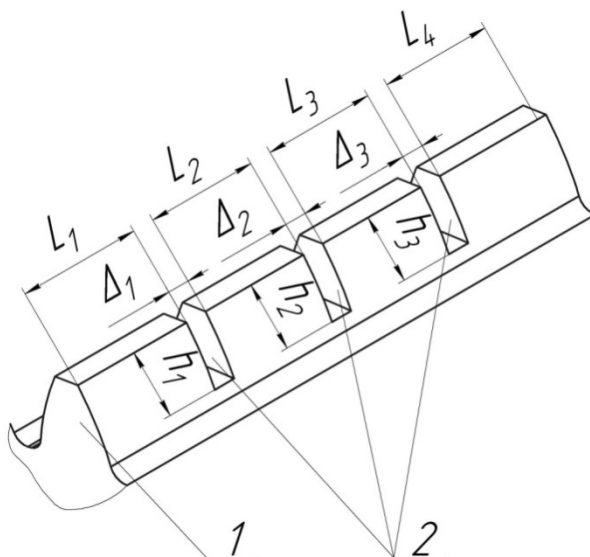


Рис. 2. Зуб зубчатого колеса с кольцевыми канавками:  
 1 – венец зубчатого колеса, 2 – кольцевые канавки;  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4$  – размеры участков,  $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = 1,5m$  – глубина кольцевых канавок (здесь  $m$  – модуль зубчатого колеса),  $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = 1$  мм – ширина кольцевых канавок

Поэтому был проведен сравнительный анализ способов модификации зубьев зубчатых колес. В качестве объекта исследования рассматривался второй ряд редуктора мотор-колеса карьерного самосвала БелАЗ, для которого в работе [1] определены геометрические параметры зацепления «солнечная шестерня – сателлит». В качестве метода исследований применялся метод конечно-

элементного моделирования с помощью программной системы конечно-элементного анализа SOLIDWORKSsimulation [7].

Для сравнительного анализа способов модификации рассматривались следующие варианты сопряжений: зубья сателлита и зубья солнечной шестерни без модификации; зубья сателлита без модификации, зубья солнечной шестерни с бочкообразностью; зубья сателлита с кольцевыми канавками, зубья солнечной шестерни без модификации; зубья сателлита с кольцевыми канавками, зубья солнечной шестерни с бочкообразностью. Для каждого варианта сопряжений суммарный угол поворота оси солнечной шестерни принимался равным  $\gamma=0,1053^\circ$ , нагружение осуществлялось вращающимися моментами 300, 500, 800, 1000, 1200, 1500 Н·м.

Таким образом, предание бочкообразной формы зубьям солнечной шестерни позволяет уменьшить максимальные контактные напряжения в зацеплении на 42...58 %, а разделение зубьев сателлита кольцевыми канавками – на 18...23 %. При этом наибольшее уменьшение контактных давлений на 53...64 % происходит при комбинировании двух способов устранения кромочного контакта, что может быть использовано при проектировании зубчатых передач как способ уменьшения максимальных контактных напряжений в зубчатых передачах, работающих при наличии угла взаимного перекося осей валов, на которых расположены зубчатые колеса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонюк, В.Е. Продольная модификация зубчатых колес планетарных передач мобильных машин / В.Е. Антонюк, В.Я. Павловский, С.Н. Поддубко, В.С. Александрова, И.Н. Николаенкова // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2011. – №4(17). – С. 37-41.
2. Попов, А.П. Контактная жесткость зубчатых передач с учетом влияния перекося зубьев / А.П. Попов, А.И. Мironenko, О.И. Савенков // *Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*. Серия: Проблемы механического привода. – 2016. – №23(1195). – С. 121-125.
3. Бородин, А.В. Повышение несущей способности зубчатой передачи тягового редуктора тепловоза / А.В. Бородин, Д.В. Тарута, Т.В. Вельгодская // *Известия трансба*. – 2010. – №3. – С. 7-12.
4. Горленко, О.А. Повышение износостойкости прямозубых цилиндрических зубчатых передач / О.А. Горленко, Г.Н. Макаров // *Известия Московского государственного технического университета*. – 2014. – Т.2. – №2(20). – С. 21-25.
5. Макаров, Г.Н. Повышение контактной выносливости зубьев прямозубых цилиндрических зубчатых передач / Г.Н. Макаров, И.О. Шныриков, О.А. Горленко // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2014. – №6. – С. 25-27.
6. Пат. 163518 РФ, МПК F16H 55/14. Зубчатое колесо / Макаров Г.Н., Шалыгин М.Г., Горленко О.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет. – № 201607329/11; заявл. 29.02.2016; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.
7. Луконин, А.Ю. Анализ контактных давлений при статическом нагружении зубчатых передач эллиптического и эвольвентного типа / А.Ю. Луконин // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2013. – № 5/6 (74). – С. 131-135.

УДК 621.9.06-52-133.2

**В. А. Крюков, В. В. Прейс**

#### **КУЛАЧКОВЫЙ ПРИВОД С ДЕМПФЕРОМ ТРЕНИЯ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ОРИЕНТАТОРОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ**

**Тульский государственный университет**

[va.krukov@gmail.com](mailto:va.krukov@gmail.com), [rabota-preys@yandex.ru](mailto:rabota-preys@yandex.ru)

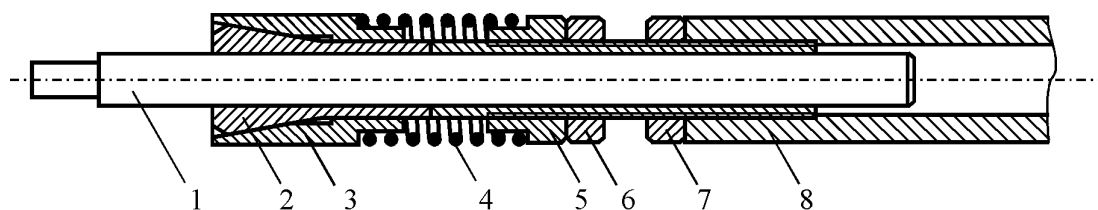
Рассматривается кулачковый привод с демпфером трения для механических ориентаторов, используемых в роторных системах автоматической загрузки штучных предметов обработки в технологические системы роторных машин. Показано, что применение демпфера трения в кулачковом приводе механических ориентаторов позволяет снизить ударные нагрузки в приводе и сократить длительность его кинематического цикла.

**Ключевые слова:** кулачковый привод, механический ориентатор, демпфер трения.

Seen the cam actuator with the damper friction for a mechanical orientators used in the rotor automatic loading sistem single-piece object of processing in technological systems of rotor machines. It is shown that application of the damper friction in the cam actuator for a mechanical orientators to reduce the impact forces in the actuator and the duration of the kinematic cycle.

**Keywords:** cam actuator, mechanical orientator, damper friction.

Улучшение динамики работы кулачкового привода может быть достигнуто заменой пружинного компенсатора демпфером трения. Одна из конструкций исполнительного органа с демпфером трения приведена на рис. 1.



1 – шток; 2 – цанга; 3 – втулка; 4 – пружина; 5, 6, 7 – гайки; 8 – корпус

Минимальная демпфирующая сила  $F_{\min}$  должна обеспечивать постоянство исходного состояния кинематической цепи привода в интервалах удаления и приближения, т.е. отсутствие перемещения штока в канале. Из расчетной схемы на рис. 3 для интервала удаления исполнительного органа, когда силы тяжести, силы трения и силы инерции звеньев суммируются (наихудший вариант) имеем

$$F_{\min} = m_1 g + m_2 g + [m_1 + m_2 + (J_{\text{оп}} / r_{\text{н}}^2)] \cdot (a_{\max})_1 + F_{\text{тр}} + M_{\text{тр}} / r_{\text{н}}, \quad (1)$$

где  $m_1, m_2$  – массы зубчатой рейки и штока соответственно;  $J_{\text{оп}}$  – осевой момент инерции ориентатора;  $r_{\text{н}}$  – наружный радиус ориентатора;  $a_{\max}$  – максимальное ускорение корпуса в соответствующих интервалах его движения ( $a_{\max} \leq 20 \text{ м/с}^2$ );  $F_{\text{тр}}$  – сила трения зубчатой рейки в направляющих;  $M_{\text{тр}}$  – момент сил трения ориентатора в посадочных гнездах.

Силу трения зубчатой рейки в цилиндрической направляющей можно определить по приближенной формуле (см. рис. 3)

$$F_{\text{тр}} = 0,5 F_{\min} (d_{\text{р}} / b_{\text{н}}) \mu_{\text{тр}}^*, \quad (2)$$

где  $d_{\text{р}}$  – наружный диаметр зубчатой рейки;  $b_{\text{н}}$  – длина направляющей;  $\mu_{\text{тр}}^* = 1,27 \mu_{\text{тр}}$  – приведенный коэффициент трения в направляющей.

Момент сил трения ориентатора в посадочных гнездах

$$M_{\text{тр}} = (4 / \pi) \mu_{\text{тр}}^* r_{\text{о}} m_{\text{оп}} g, \quad (3)$$

где  $r_{\text{о}}$  – радиус посадочных гнезд;  $m_{\text{оп}}$  – масса ориентатора.

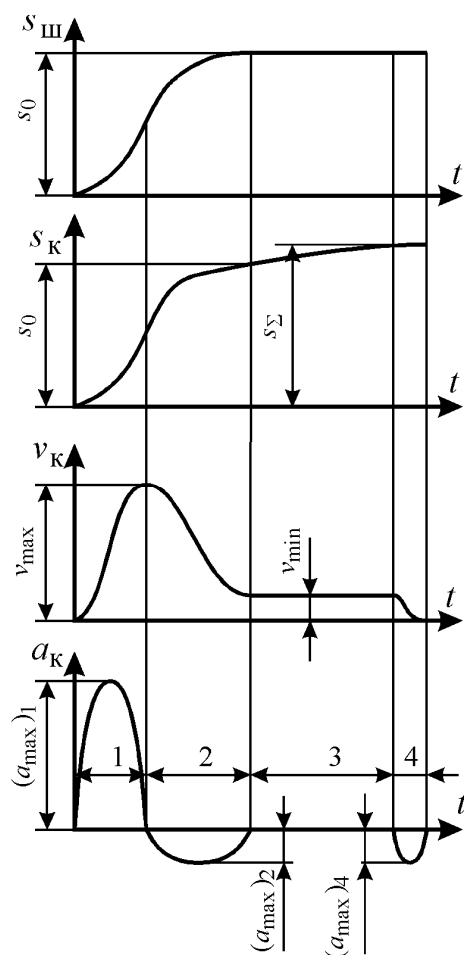


Рис. 2. Закон движения исполнительного органа кулачкового привода с демпфером трения:  
 $s_{\text{ш}}$  – величина хода штока;  $a_{\text{к}}, v_{\text{к}}, s_{\text{к}}$  – ускорение, скорость и величина хода корпуса

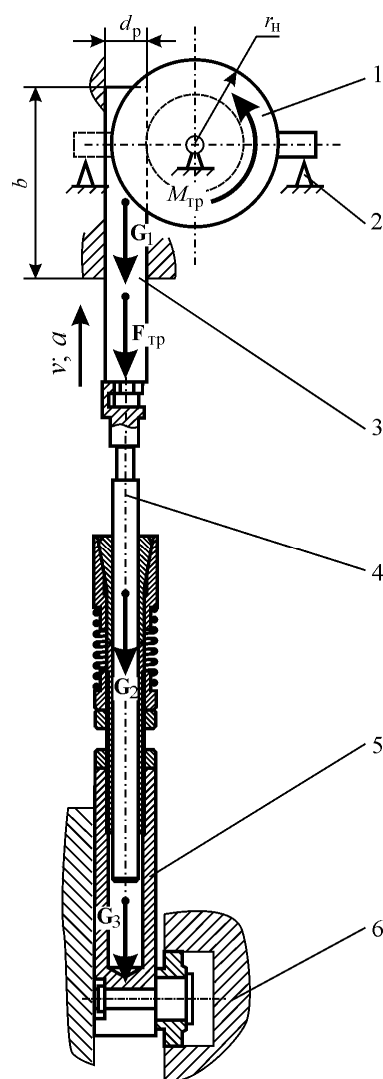


Рис. 3. Расчетная схема кулачкового привода с демпфером трения:  
1 – ориентатор; 2 – упор; 3 – зубчатая рейка;  
4 – шток; 5 – ползун; 6 – кулачок

Подставляя выражения (2) и (3) в формулу (1) после преобразований получим окончательное выражение для минимальной демпфирующей силы

$$F_{\min} = \frac{(m_1 + m_2)g + [m_1 + m_2 + (J_{\text{ор}}/r_n^2)] \cdot (a_{\max})_1 + (4/\pi)\mu_{\text{тр}}(r_o/r_n)m_{\text{ор}}g}{1 - 0,635(d_p/b_n)}. \quad (4)$$

Максимальное значение демпфирующей силы  $F_{\max}$  определяется прочностью зубчатого зацепления и неповреждаемостью предмета обработки при его возможных заклиниваниях в канале поворотного ориентатора. Тогда расчетное значение демпфирующей силы будет определяться неравенством

$$F_{\min} \leq F_{\text{расч}} \leq F_{\max}. \quad (5)$$

Для создания расчетного значения демпфирующей силы приложенная к зажимной втулке сила  $F_{\text{п}}$  должна удовлетворять неравенству

$$F_{\text{п}} \geq F_{\text{расч}} \operatorname{tg}(\alpha_{\text{ц}} + \varphi_{\text{т}}) / \mu_{\text{тр}_1}, \quad (6)$$

где  $\alpha_{\text{ц}}$  – угол конусности цанги;  $\alpha_{\text{ц}} = 10 \dots 15^\circ$ ;  $\varphi_{\text{т}} = \operatorname{arctg} \mu_{\text{тр}_2}$  – угол трения;  $\mu_{\text{тр}_1}$ ,  $\mu_{\text{тр}_2}$  – коэффициенты трения скольжения между поверхностями «шток-цанга», «цанга-втулка» (см. рис. 1).

Применение демпфера трения в кулачковом приводе позволяет полностью устранить колебания ориентатора при сходе с упоров и значительно снизить ударные нагрузки при фиксации ориентатора на упоре.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прейс, В.В.* Автоматическая загрузка роторных и роторно-конвейерных линий / В.В.Прейс, Г.В.Комаров, И.А.Клусов [и др.]. – М., 1990. – 56 с. (Машиностроит. пр-во. Сер. Автоматизация пр-ва, ГПС и робототехника: Обзор информ./ ВНИИТЭМР. Вып. 8).
2. *Астраханцев, А.Г.* Роторные ориентирующие устройства с гравитационными ориентаторами / А.Г. Астраханцев, Е.В. Давыдова, В.А. Крюков, В.В. Прейс, К.С. Филиппова / Под научн. ред. В.В. Прейса. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – 124 с.
3. *Крюков, В.А.* Моделирование процесса выдачи предмета обработки из поворотного ориентатора роторной системы автоматической загрузки / В.А. Крюков, В.В. Прейс // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 12-2. – С. 286-295.
4. *Левитский, Н.И.* Кулачковые механизмы. – М.: Наука, 1964. – 287 с.

УДК 539.4

*И. В. Лопя, Н. Е. Проскуряков*

#### РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ТРУБОПРОВОДА ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ

Тульский государственный университет

[igor-lopa@yandex.ru](mailto:igor-lopa@yandex.ru), [vippne@mail.ru](mailto:vippne@mail.ru)

По известным формулам проведено сравнение результатов по расчету необходимой толщины стенки трубы. Показано существенное расхождение между ними. Проанализирована прочность трубопровода при гидравлическом ударе. Предложено напряженно-деформированное состояние материала трубы определять на основе решения волновой задачи о распространении радиальных волн давления в трубе с учетом падающих волн радиальных напряжений сжатия, интерференции падающих и отраженных волн напряжений, которые формируются на свободной поверхности. Приводятся результаты расчетов необходимой толщины стенки трубы при осреднении действующих напряжений для различных транспортируемых сред.

*Ключевые слова:* труба, прочность, радиальные волны, напряжения, интерференция.

Comparison of results of calculations was conducted by well-known formulas for the definition of required wall thickness of the pipeline. The significant difference between their thickness is shown. The strength of the pipeline during the hydraulic blow analyzed. The stress-strain state of the pipeline material is proposed to determine based on the solution of the wave problem of distribution of radial pressure waves in the pipe, taking into account the falling waves of radial compressive stresses, the interference of falling and reflected waves of stresses, which formed on the free surface. The results of the calculations of the necessary wall thickness of the pipe in the averaging of stresses for a variety of transported environments presented.

*Keywords:* pipe, strength, radial wave, stress, interference.

Как известно, наиболее ослабленным элементом крепления запорной арматуры (задвижек, затворов, клапанов) является участок трубопровода, непосредственно примыкающий к арматуре, поскольку он имеет значительные концентраторы напряжений (сварные и резьбовые участки) и испытывает наибольшее давление вследствие гидравлического удара, возникающего при закрытии запорной арматуры.

На основе стандартных расчетов [1] получены зависимости между наружным радиусом  $R$  и внутренним радиусом  $r$  трубы без учета прибавки на коррозию и на отклонение толщины стенки от номинала при изготовлении:

- для тонких стенок трубопроводов при значениях  $\frac{s}{D_{\text{вн}}} \leq 0,05$

$$R \geq r \left( 1 + \frac{P}{[\sigma]} \right), \quad (1)$$

- для толстостенных трубопроводов при значениях  $R/r \leq 1,8$

$$R \geq r \left( 1 + \frac{P}{[\sigma] - P} \right), \quad (2)$$

где  $s$  – толщина стенки трубы;  $P$  – рабочее давление;  $D_{\text{вн}} = 2r$  – внутренний диаметр трубы;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение для материала трубы.

Формулы (1), (2) получены с использованием, так называемых, усредненных по толщине стенки напряжений, при этом формула (2) рекомендуется Ростехнадзором для практических расчетов.

Используя известную теорию наибольших касательных напряжений [2], возникающих в толстостенных цилиндрах, получим формулу

$$R \geq r \sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma] - 2P}}. \quad (3)$$

На рис. 1 в качестве примера представлены зависимости величин наружного радиуса трубы от давления, полученные по формулам (1)–(3) для материала трубы сталь 15 ( $[\sigma] = 200$  МПа) и внутреннего радиуса  $r = 100$  мм.

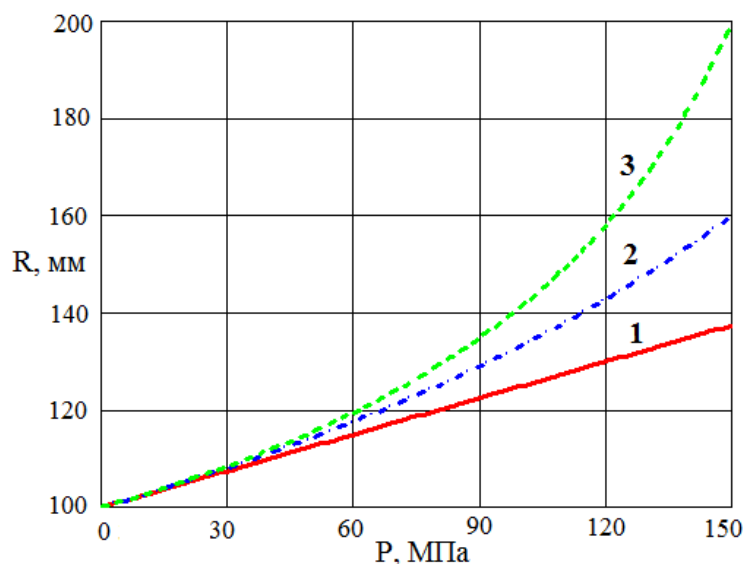


Рис. 1. Зависимости наружного радиуса трубы от давления, полученные соответственно по формулам (1), (2) и (3)

Видно, что с ростом давления результаты существенно расходятся, причем по классической теории прочности толщина трубы должна быть максимальна.

Существенным недостатком вышеуказанных решений является определение рабочих напряжений в стенке трубы из уравнений статики, поэтому они рекомендуются для оценки прочности

трубы при рабочем давлении транспортируемой среды. Использовать в формулах (1)–(3) вместо рабочего давления ударное давление нецелесообразно, так как в этом случае наружный диаметр трубы окажется значительно завышенным, а при использовании формулы (3) он при значении  $2P \geq [\sigma]$  будет стремиться к бесконечности.

Ударное давление  $P_{уд}$  в трубопроводе при гидравлическом ударе определяют по формуле [1]

$$P_{уд} = a \rho V_0, \quad (4)$$

где  $a$  – скорость звука в среде;  $\rho$  – плотность среды;  $V_0$  – скорость среды до закрытия затвора.

Считается, что нагружение трубы ударным давлением происходит мгновенно и приводит к распространению в трубе падающих волн радиальных напряжений сжатия  $\sigma_R$ , интерференции падающих и отраженных волн напряжений, формирующихся на свободной поверхности. Система уравнений, описывающее распространение в трубе радиальных волн давления, была получена в работе [3]:

- уравнение движения

$$\rho \frac{\partial V_R}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma_R}{\partial R} + \frac{\sigma_R - \sigma_v}{R} v; \quad (5)$$

- уравнения совместности деформаций:

$$\frac{\partial \epsilon_R}{\partial t} = \frac{\partial V_R}{\partial R}; \quad \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = \frac{V_R}{R}; \quad (6)$$

- определяющие соотношения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon_R}{\partial t} &= \frac{1}{E} \left( \frac{\partial \sigma_R}{\partial t} - \mu \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \right); \\ \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} &= \frac{1}{E} \left( \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} - \mu \frac{\partial \sigma_R}{\partial t} \right); \\ \frac{\partial \epsilon_z}{\partial t} &= \frac{-\mu}{E} \left( \frac{\partial \sigma_R}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\rho, E$  и  $\mu$  – соответственно плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона материала трубы;  $V_R$  – радиальная скорость материальных частиц;  $\sigma_v$  – окружные напряжения;  $\epsilon_R$ ,  $\epsilon_v$  и  $\epsilon_z$  – радиальная, окружная и осевая деформации соответственно.

Граничные условия задачи принимались в виде:

$$\sigma_R(r, t) = P_{уд}, \quad \sigma_R(R, t) = 0. \quad (8)$$

Изначально, решение системы (5)–(7) с учетом граничных условий (8) проводилось методом характеристик [4]. Было выявлено, что напряжения от нагружаемой поверхности трубы к свободной поверхности существенно уменьшаются. Разрушение не может произойти мгновенно и поэтому представляется целесообразным использовать в расчетах усредненные значения напряжений.

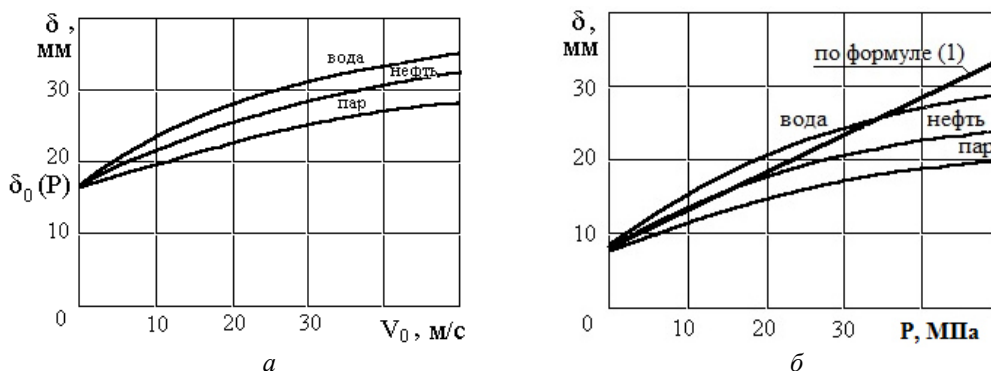


Рис. 2. Зависимости минимальной толщины стенки трубы от скорости среды (а) и давления в трубопроводе (б) при транспортировке различных сред



Решение системы (5)–(7) с учетом граничных условий (8) численными методами в программной среде *MathCad* для трех различных сред: воды ( $a = 1500$  м/с,  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>), нефти ( $a = 1330$  м/с,  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup>) и пара ( $a = 1100$  м/с,  $\rho = 500$  кг/м<sup>3</sup>), позволило построить зависимости минимальной толщины стенки трубопровода ( $D_{\text{вн}} = 400$  мм) от скорости среды (рис. 2, а) и давления в трубопроводе (рис. 2, б) при транспортировке.

Сравнение полученных результатов с ранее известными результатами, позволяет сделать вывод о необходимости учета динамичности нагрузки трубопровода при аварийном закрытии запорной арматуры.

Предложенные методы определения напряжений в материале трубы трубопровода при гидравлическом ударе и расчета необходимой толщины трубы позволяют повысить достоверность и корректность проектных расчетов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуревич, Д.Ф. Конструирование и расчет трубопроводной арматуры. – М.: Машиностроение, 1968.- 888 с.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. - М.: Наука, 1986.- 512 с.
3. Лопатин И.В., Баранов В.Л. Радиальные волны давления в термо-упруго-вязкопластической пластине // Известия ВУЗов. Машиностроение, М.: 1990, № 2, С. 16.
4. Лопатин И.В., Баранов В.Л. Продольные упруговязкопластические волны в стержнях конечной длины // Известия ВУЗов. Машиностроение, М.: 1993, № 1. С. 54.

УДК 621.8, 621.9

*А. Н. Сутягин*

#### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИБОКОНТАКТА СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

**Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П. А. Соловьева**

Рассмотрен подход к описанию геометрических параметров качества поверхностного слоя деталей машин, изготовленных с применением токарной обработки, на основе использования стандарта ISO25000. Представлена работа программного обеспечения, реализующего на базе разработанной математической модели визуализацию топографии обработанной поверхности после точения, а также ее преобразование в результате процесса приработки.

*Ключевые слова:* износостойкость, равновесное состояние, контакт поверхностей, токарная обработка.

The approach to the description of the geometric parameters of the quality of the surface layer of machine parts machined by turning based on the use standard ISO25000 is offered. The operation of the software implemented on the basis of the developed mathematical model of the visualization of topography of the machined surface, as well as its change as a result of the break-in period is shown.

*Keywords:* wear-resistance; equilibrium state, contact of surfaces, turning.

В связи с активным развитием и внедрением новых технологий появляются новые методы обработки металлов и сплавов, однако до сих пор от 60 до 70 % операций технологических процессов изготовления деталей составляет обработка резанием.

Параметры точности изготовления и параметры качества поверхностного слоя, которые формируются от операции к операции, часто колеблются в широких или, наоборот, узких диапазонах величин и непосредственно оказывают существенное влияние на процесс эксплуатации изделия через эксплуатационные свойства деталей. Значительная часть деталей изделий выходит из строя по причине преждевременного износа: выработка на торцевых поверхностях внутренних колец ГТД, выработка на внутренних диаметральных поверхностях лабиринтов ГТД, выработка на торцевых поверхностях дисков ГТД и др. Износ может быть обусловлен как несоблюдением технологических условий сборки узлов, так и неправильным выбором технологических условий обработки, которые формируют параметры качества поверхностного слоя деталей.

Традиционная для машиностроения последовательность обработки ответственных поверхностей позволяет обрабатывать детали с достаточной точностью геометрических размеров, однако не всегда обеспечивается требуемый ресурс детали, что связано с различием протекания процесса приработки в первые часы эксплуатации для разных деталей изделия. Окончание процесса приработки согласно ГОСТ 27674-88 характеризуется снижением силы трения, температуры и интенсивности изнашивания. При этом исходные параметры качества поверхностного слоя изменяются и могут воспроизводиться в течение длительного периода времени, и в этом случае называются равновесными.

Выполненные по одной и той же технологии детали и изделия могут иметь совершенно разный период приработки и, как следствие, изменяющийся по сравнению с расчетным гарантированный срок службы.

Изделие переходит в режим нормальной работы по окончании процесса приработки всех его деталей. Для отдельных деталей в узле окончание процесса приработки может происходить по истечении разной величины времени, поэтому износ деталей в узле в результате процесса приработки неравномерный. Именно поэтому следует уже на стадии технологической подготовки производства деталей изделий назначать технологические условия обработки с возможностью формирования равновесных или близких к ним параметров качества поверхностного слоя всех деталей изделия, что позволит сделать процесс приработки более прогнозируемым, обеспечит равномерное изнашивание всех элементов машины.

На чистовом этапе обработки ответственных деталей назначают так называемые оптимальные режимы резания, чтобы обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя детали [1]. Оптимальные режимы резания, обеспечивающие минимальный износ режущего инструмента, целесообразно применять и с точки зрения обеспечения эксплуатационных свойств изделий. Обработка при оптимальном сочетании скорости резания и подачи обеспечивает максимальные значения усталостной прочности, прочности на разрыв обработанных поверхностей деталей, которым соответствуют оптимальные параметры качества поверхностного слоя. Кроме того, работа на оптимальных скоростях резания обеспечивает регулярный профиль микронеровностей поверхности, что, в свою очередь, способствует обеспечению минимального значения интенсивности изнашивания сопрягаемых деталей машин [1]. Таким образом, посредством назначения определенных технологических условий механической обработки могут быть обеспечены наилучшие значения сразу нескольких эксплуатационных свойств деталей машин.

В процессе образования обработанной поверхности при лезвийной обработке происходит формирование поперечной и продольной шероховатости. Образование поперечной шероховатости зависит от радиуса при вершине  $r$  режущего инструмента, углов в плане  $\varphi$  и  $\varphi_1$ , величины подачи  $S$ , глубины резания  $t$ , составляющих силы резания  $P_x$  и  $P_y$ , температуры в зоне резания  $\theta_p$ . Анализ профилограмм цилиндрических поверхностей деталей, полученных в результате токарной обработки, показал, что функция базового профиля поперечной шероховатости для токарной обработки может быть описана с использованием ряда Фурье следующей функцией на длине рассматриваемого участка в координате  $x$

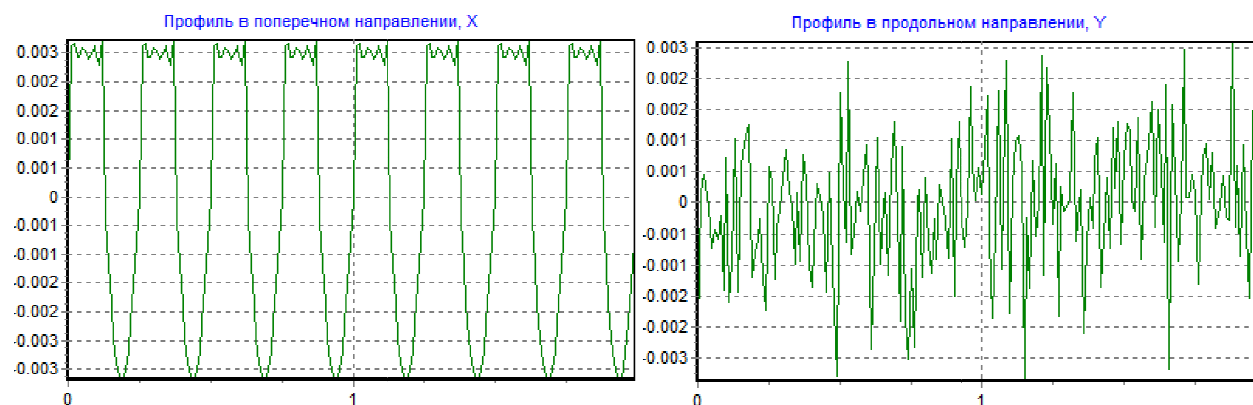
$$f_1(x) = \frac{4}{\pi} F(t, P_x, P_y, r, \varphi, \varphi_1, \theta_p) \sin\left(\frac{\pi x}{S}\right). \quad (1)$$

Продольная шероховатость, измеренная в направлении скорости резания, обусловлена колебаниями системы станок-приспособление-инструмент-деталь, как следствие величиной жесткости технологической системы  $j$ , а также величиной скорости резания  $v$ , передним  $\gamma$  и задним  $\alpha$  углами режущего инструмента, составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ , температуры в зоне резания  $\theta_p$ . На продольную шероховатость могут влиять погрешности, связанные с износом оборудования, например, биение шпинделя станка. Продольная шероховатость может быть представлена алгоритмом псевдослучайных чисел, содержащим в своей основе преобразование Бокса-Мюллера, либо описана функцией перехода к общему нормальному распределению после получения стандартной нормальной случайной величины профиля, что позволяет завершить генерацию нормальной случайной величины, на длине рассматриваемого участка в координате  $y$

$$f_2(y) = \frac{4}{\pi} F(j, P_z, P_y, \gamma, \alpha, \theta_p, v) \sin\left(\frac{y}{2R}\right) + \sigma z, \quad (2)$$

где  $z$  – величина субшероховатости поверхности, обусловленная действием случайных факторов,  $\sigma$  – интенсивность воздействия случайных факторов на продольную шероховатость,  $R$  – радиус обрабатываемой заготовки.

На основе уравнений (1), (2) был составлен алгоритм, позволяющий визуализировать картину изменения шероховатости контактируемых поверхностей во времени в процессе эксплуатации, который был реализован в программном обеспечении [2] (рисунок).



Фрагмент работы программного обеспечения для расчета координат точек поверхности детали после приработки

Разработанное программное обеспечение позволяет выполнить расчет продольной и поперечной шероховатости поверхностей деталей, получаемых токарной обработкой, на основании ГОСТ Р ИСО 4287-2014 и ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, сформированных на базе международного стандарта ISO25000. Результаты расчетов могут быть сохранены в виде таблицы координат точек профиля (текстовый файл формата csv) или в виде программы на языке APDL, позволяющей автоматизировать процесс построения трехмерной модели шероховатости в САЕ-системе ANSYS. Это дает возможность быстрого импортирования данных в любые САПР высшего уровня для последующего построения и анализа трехмерной шероховатой поверхности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Метод подобия в технологии машиностроения / В. Ф. Безъязычный. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.: ил.
2. Построение трехмерной модели шероховатости поверхностей деталей машин, обработанных точением, на основе расчета координат точек профиля / А. Н. Болотеин, А. Н. Сутягин // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017614676. Правообладатель: Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева. – зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 25.04.2017.

УДК 67.67.02

*А. П. Туренко*

#### РАСЧЕТ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВНУТРЕННЕГО КОЛЬЦА УПОРНОГО ПОДШИПНИКА

Саратовский государственный университет им. Ю.А. Гагарина

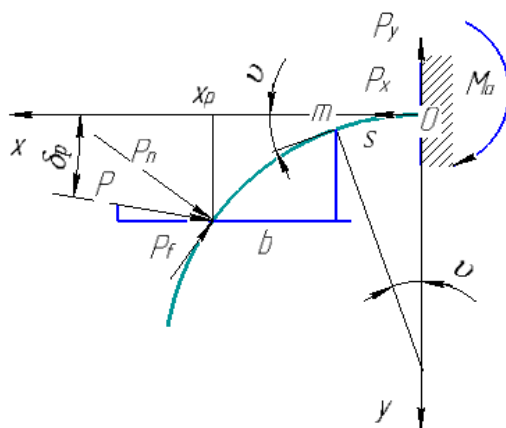
Особенностью подшипника, рассмотренного в статье, является то, что опорное кольцо изготовлено из фторопласта Ф-4, обладающего, как известно, высокими антифрикционными свойствами [3]. Фторопластовое кольцо является главным элементом упорного подшипника опоры передней подвески автомобилей LADA Гранта, Калина, Приора, так как от точности его выполнения существенно зависит точность подшипника. Кольцо получается в результате упруго-пластического изгиба на заданный радиус, равный радиусу дорожек скольжения верхнего и нижнего колец подшипника. С целью выявления механизма процесса изгиба колец и определения влияния на результаты обработки различных факторов выполнен расчет изгибающего момента при формировании внутреннего кольца из исходной прямолинейной заготовки. Оригинальность задачи заключается в том, что нам требуется решить обратную задачу по отношению к тем, что обычно решаются в курсе сопротивления материалов – по заданной деформации наружного кольца найти действующие изгибающие моменты. Целесообразность выбора данной темы обусловлена проблемой, возникающей при эксплуатации автомобилей LADA Гранта, Калина, Приора как в гарантийный срок, так и в постгарантийный период.

*Ключевые слова:* подшипник, технология, модель, подшипник скольжения, изгибающий момент.

The peculiarity of the bearing considered in the article is that the support ring is made of PTFE, which, as is well known, possesses high antifriction properties [3]. The PTFE ring is the main element of the thrust bearing of the front suspension bracket of the LADA Grant, Kalina, Priora cars, as the accuracy of the bearing significantly depends on the accuracy of the bearing. The ring is obtained as a result of elastic-plastic bending by a given radius equal to the radius of the slip tracks of the upper and lower bearing rings. In order to provide a mechanism for processing and determining the effects on the results of processing various results of the performed calculations from the initial straight billet. The originality of the problem lies in the fact that it is necessary to solve the inverse problem in relation to those that are usually solved in the course of the resistance of materials - to find the acting bending moments from the given deformation of the outer ring. LADA Grant, Kalina, Priora both in the warranty period, and in the post-warranty period.

*Keywords:* bearing, technology, ptfe, slide bearing, bending moment.

Для решения поставленной задачи воспользуемся известными решениями прямой задачи [1]. Расчетная схема изображена на рисунке. Проведем декартовую систему координат так, чтобы ось проходила вдоль направления подачи заготовки кольца, а ось – в направлении изгиба. Нагрузка  $P$  приложена по направлению к центру изгиба на расстоянии от начала координат. Заготовка слева заделана в жесткой опоре.



Расчетная схема нагружения кольца в процессе гибки

Дифференциальное уравнение равновесия упругой линии при больших перемещениях при плоском изгибе имеет вид [1]:

$$\frac{d^2(v+\delta)}{ds^2} - \frac{d^2\theta}{ds^2} = -\frac{P}{E \cdot J} \sin(v+\delta), \quad (1)$$

где  $v$  - угол наклона касательной в рассматриваемой точке  $m$  упругой линии к оси  $Ox$  в рассматриваемый момент времени, рад;  $\theta$  - угол наклона касательной в рассматриваемой точке упругой линии к оси  $Ox$  перед началом деформации ( для начальной прямой  $\theta=0$  ), рад.;  $s$  - длина упругой линии, мм;  $P$  - результирующая внешняя нагрузка, Н;  $\delta$  - угол наклона результирующей внешней нагрузки  $P$  к оси  $Ox$ , Н;  $E$  - модуль упругости материала заготовки, МПа.

В начальный момент наша заготовка имеет прямолинейный вид. Поэтому  $\theta=0$ . Умножим обе части равенства на величину:

$$2 \cdot \frac{dv}{ds} \cdot ds.$$

Тогда равенство (1) примет вид:

$$2 \frac{d^2(v+\delta)}{ds^2} \cdot \frac{d(v+\delta)}{ds} \cdot ds = 2 \frac{P}{E \cdot J} \sin(v+\delta) \cdot d(v+\delta). \quad (2)$$

Интегрируя обе части равенства (2) при  $\theta=0$  (исходная прямая) имеем:

$$2 \int \frac{d^2(v+\delta)}{ds^2} \cdot \frac{d(v+\delta)}{ds} \cdot ds = \left( \frac{d(v+\delta)}{ds} \right)^2;$$

$$2 \int \frac{P}{E \cdot J} \sin(v+\delta) \cdot d(v+\delta) = \frac{2P}{E \cdot J} (C - \cos(v+\delta)), \quad (3)$$

где  $C$  – произвольная постоянная, определяемая начальными условиями.

$$\frac{d(\nu + \delta)}{ds} = \frac{d\nu}{ds} = \rho, \quad (4)$$

где  $\rho$  - кривизна упругой линии в рассматриваемой точке  $m$ ,  $1/\text{мм}$ .

Полученный интеграл определяет кривизну упругой линии.

$$\rho = \pm \sqrt{\frac{2P}{E \cdot J} (C - \cos(\nu + \delta))}. \quad (5)$$

В точке действия внешней нагрузки, т.е. при  $\nu = \delta$ , кривизна упругой линии равна нулю, так как в этой точке равен нулю изгибающий момент. Из этих условий найдем величину  $C$ :

$$C = \cos(\nu_p + \delta), \quad (6)$$

где  $\nu_p$  - угол наклона касательной к оси  $Ox$  в точке приложения нагрузки.

С учетом (6) равенство (5) примет вид:

$$\rho = \sqrt{\frac{2P}{E \cdot J} (\cos(\nu_p + \delta) - \cos(\nu + \delta))}. \quad (7)$$

Преобразуем равенство (3):

$$\frac{d(\nu + \delta)}{\sqrt{C - \cos(\nu + \delta)}} = \sqrt{\frac{2P}{E \cdot J}} ds. \quad (8)$$

Производя интегрирование равенства (8), имеем:

$$\sqrt{\frac{2P}{E \cdot J}} s = \int_{\delta}^{\nu + \delta} \frac{du}{\sqrt{C - \cos u}}, \quad (9)$$

где

$$u = \nu_i + \delta$$

$\nu_i$  - любое промежуточное значение угла наклона касательной к оси  $Ox$  в промежутке  $0 \leq \nu_i \leq \nu$ ;

$\varsigma$  - значение величины  $u$  в заданной произвольной точке изгиба.

Равенство (9) связывает внешнюю нагрузку  $P$  и длину дуги  $s$ , соответствующей текущей точки упругой линии, со значением угла  $\varsigma$ .

$$ds = \frac{d\nu}{\rho},$$

а величина  $\rho$  определяется равенством (2.10), значит

$$ds = \frac{d\nu}{\rho} = \frac{d\nu}{\sqrt{\frac{2P}{E \cdot J} (\cos(\nu_p + \delta) - \cos(\nu + \delta))}}. \quad (10)$$

Интегрируя равенство (10), получим:

$$s = \sqrt{\frac{E \cdot J}{2P}} \int_{\delta}^{\nu + \delta} \frac{du}{\sqrt{(\cos(\nu_p + \delta) - \cos(u))}}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (9), определим:

$$\frac{2P}{E \cdot J} \sqrt{\cos(\nu_p + \delta)} \cdot \int_{\delta}^{\nu + \delta} \left( 1 - \frac{\cos u}{\cos(\nu_p + \delta)} \right) du = \int_{\delta}^{\nu + \delta} \frac{du}{\sqrt{C - \cos u}}. \quad (12)$$

Внутренний изгибающий момент в точке  $m(x, y)$  от силы  $P$  равен:

$$M = P \left( (y_p - y) \cos \delta + (x_p - x) \sin \delta \right). \quad (13)$$

Продифференцируем равенство (13) по дуге  $S$ :

$$\frac{dM}{ds} = -P \cdot \sin(\nu + \delta). \quad (14)$$

С учетом равенства (8) выражение (14) примет вид:

$$dM = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{P \cdot E \cdot J} \frac{\sin(\nu + \delta)}{\sqrt{(\cos(\nu_p + \delta) - \cos(\nu + \delta))}} d(\nu + \delta). \quad (15)$$

Проинтегрируем обе части равенства (15):

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{P \cdot E \cdot J} \int_{v+\delta}^{v_p+\delta} \frac{\sin u}{\sqrt{(\cos(v_p + \delta) - \cos u)}} du. \quad (16)$$

Равенство (16) позволяет определить величину изгибающего момента в любой точке упругой линии при заданном значении  $P$  и точки ее приложения. Но, к сожалению, величина  $P$  не известна. Поэтому в равенство (16) вместо величины  $P$ , подставим ее значение, полученное из равенства (10) и выраженное через изгибающий момент:

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{M \cdot E \cdot J}{(y_p - y) \cos \delta + (x_p - x) \sin \delta}} \int_{v+\delta}^{v_p+\delta} \frac{\sin u}{\sqrt{(\cos(v_p + \delta) - \cos u)}} du. \quad (17)$$

Из равенства (2.20) определим величину изгибающего момента:

$$M = \frac{E \cdot J}{2(y_p - y) \cos \delta + (x_p - x) \sin \delta} \left( \int_{v+\delta}^{v_p+\delta} \frac{\sin u}{\sqrt{(\cos(v_p + \delta) - \cos u)}} du \right)^2. \quad (18)$$

В результате применения полученных данных, произведены партии подшипника, успешно прошедшего стендовые испытания в сторонней организации [2]. На данный момент конструкция подшипника успешно работает на тысячах автомобилей ВАЗ. В дальнейшем конструкция будет дорабатываться путем более глубокого анализа процессов, происходящих в процессе эксплуатации подшипника.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, Е.П. Теория и расчет гибких упругих стержней. / Е.П.Попов / – Москва «НАУКА», главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 296 с.
2. Сайт Подшипник-Волга [Электронный ресурс] // Режим доступа <http://www.pdsar.biz/sertifikaty?lightbox=dataitem-j5kkrrtg>, свободный. (дата обращения: 25.07.2017).
3. Феценко, В.Н. Справочник конструктора. Книга 1. Машины и механизмы / В.Н.Феценко / – Москва-Вологда, Инфра-Инженерия, 2016. – 400 с.

## ТЕХНОЛОГИИ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.735

*В. Ю. Лавриненко, В. А. Говоров***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАТНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОКОВОК  
ТИПА «СТАКАН» С УМЕНЬШЕННОЙ РАЗНОСТЕННОСТЬЮ****Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана**

В работе проведено исследование процесса обратного выдавливания поволоков типа «стакан» путем компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM. В результате было установлено, что при использовании заготовок с заранее выполненной конической наметкой на торце разностенность полученных поволоков типа стакан уменьшилась до 2 раз по сравнению с использованием стандартной заготовки.

*Ключевые слова:* обратное выдавливание, разностенность, поволоки типа «стакан», компьютерное моделирование.

The process of backward extrusion of cup-shaped parts was carried out by computer simulation in the DEFORM software. It was found when using blanks with a pre-made conical marking at the end face, the difference of wall thickness tolerance was reduced to 2...3,5 times as compared to using a standard blank.

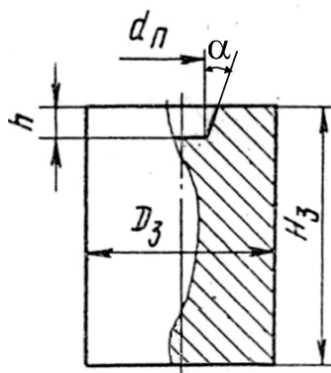
*Keywords:* backwards extrusion, cup-shaped parts, computer simulation.

Детали типа стакан широко распространены в различных отраслях промышленности. К ним относятся различные цилиндры (стальные и алюминиевые), корпуса снарядов, гильзы, капсулы и т.п. Одним из основных методов изготовления поволоков (заготовок) таких деталей является обратное выдавливание и протяжка (вытяжки с утонением стенок) на гидравлических прессах. Полученные при этом поволоки обладают рядом недостатков, одним из которых является низкая точность полученных поволоков вследствие наличия разностенности поволоков, достигающей 2-3 мм при толщине стенки поволоки 10 мм. Это увеличивает число операций обработки резанием после процесса получения поволоки методами штамповки и приводит к снижению производительности, увеличению трудоемкости и металлоемкости изготовления деталей [1].

Анализ существующих методов изготовления деталей типа стакан обратным выдавливанием показал, что на точность и качество полученных деталей влияют уклон (перпендикулярность) торца заготовки, точность массы заготовки, равномерный нагрев заготовки до температуры штамповки, точность установки заготовки в матрице и другие. Воздействие этих факторов при штамповке деталей типа стакан приводят к уходу в сторону пуансона относительно заготовки и появление высокой разностенности [1].

В работах профессора Е.И. Семенова [2 и др.] был предложен способ выдавливания поволоков типа «стакан» с минимальной разностенностью. Для ее снижения при обратном выдавливании круглых или квадратных заготовок на торцах исходной заготовки обработкой резанием предварительно выполняют наметку, которая имеет форму усеченного конуса, направленная основанием меньшего диаметра в тело исходной заготовки. При этом наметка обеспечивает хорошее центрирование пуансона относительно оси заготовки и снижает разностенность полученных деталей типа стакан в 2 и более раза.

Для определения условий получения поволоки типа стакан с уменьшенной разностенностью и изучения особенностей формоизменения был использован программный комплекс. Проводили моделирование процесса выдавливания по схемам обратного выдавливания заготовок без наметки и при наличии наметки верхнем торце заготовки, при этом варьировали основные размеры наметки (угол  $\alpha$ , диаметр  $d_n$  и глубина наметки  $h$ , представлены на рисунке).



Заготовка с нанесенной на верхний  
торец наметкой

В качестве варьируемых факторов были приняты размеры наметки на верхнем торце заготовки: угол  $\alpha$ , °, диаметр  $d_n$  и глубина наметки  $h$ . Значения факторов и интервалы их варьирования представлены в табл. 1.

Для сокращения общего числа экспериментов с использованием метода многофакторного планирования эксперимента была составлена матрица плана эксперимента. В качестве материала заготовок при моделировании использовали сталь 30ХГСА, температура нагрева заготовок 1100°C. Размеры заготовок без наметки:  $D_3 = 95$  мм и  $H_3 = 151$  мм. Диаметр заготовок с наметкой  $D_3 = 95$  мм, для компенсации потерь металла при получении наметки высота заготовки с наметкой составила  $H_3 = 152,75...156,6$  мм, в зависимости от параметров наметки. Кроме этого, моделирование процесса обратного выдавливания заготовок без- наметки и с наметкой на торце проводили в условиях смещения (несоосности) пуансона и матрицы равной 0,3 и 0,5 мм.

В табл. 1 приведены основные результаты моделирования процесса обратного выдавливания. Можно отметить, что средняя разностенность при обратном выдавливании поковки без наметки составляет 3,39 мм при отклонении пуансона от оси матрицы равной 0,3 мм, а при отклонении в 0,5 мм – 1,35 мм.

Таблица 1  
Натуральные и кодированные значения факторов  
плана эксперимента

i	Фактор	Натуральное значение $X_i$	Кодированное значение $F_i$
1	Угол $\alpha$ , °	5	0
		7	1
		10	2
2	Диаметр $d_n$ , мм	59	0
		55	1
		56	2
3	Глубина наметки $h$ , мм	5	0
		10	1
		15	2

Также установлено, что при использовании заготовки с наметкой на торце разностенность получаемой поковки была уменьшена в 2..3,5 раза, причем наименьшая разностенность получаемой поковки типа стакан имела место при использовании заготовки с предварительно изготовленной наметкой глубиной 15 мм, углом  $\alpha = 5^\circ$  и диаметром  $d_n = 56$  мм.



Таблица 2

## Средняя разностенность сечения поковки, мм

№	Δ при несоосности 0,3, мм	Δ при несоосности 0,5, мм
Разностенность при обратном выдавливании поковки без наметки		
	3,39	1,35
Разностенность при обратном выдавливании поковки без наметки		
1	0,56	0,33
2	1	1,36
3	3,34	2,36
4	1,69	0,67
5	0,85	1
6	0,68	0,34
7	0,67	0,67
8	1	1,35
9	0,67	2

## Выводы

Проведенное компьютерное моделирование технологических процессов обратного выдавливания поволоков типа «стакан» в программном комплексе DEFORM позволило установить, что использование заготовок с заранее выполненными наметками определенной конфигурации позволяет существенно уменьшить (до в 2...3,5 раза) разностенность получаемых поволоков, что позволит снизить затраты на последующую обработку резанием и обеспечит значительную экономию металла.

Результаты проведенных исследований можно использовать в дальнейшем для разработки ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов штамповки поволоков типа стакан для различных отраслей машиностроения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковка и штамповка: справочник. Т.2. / Под общ. ред. Семенова Е.И. М.: Машиностроение. 2010. 539 с.
2. Авторское свидетельство SU 1648630 A1 (ДСП). Способ изготовления деталей типа стакан. Е.И. Семенов, И.С. Зиновьев, В.Е. Снимщиков. Оpubл.

УДК621.091

В. Ф. Макаров, С. П. Никитин, М. В. Песин, А. С. Горбунов

# **ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Установлено, что в процессе механической обработки поверхностей сложного профиля деталей, работающих в эксплуатации при больших знакопеременных нагрузках, в критических переходных зонах сопряженных поверхностей профиля образуются локальные технологические концентраторы напряжений, способствующие зарождению, росту усталостных трещин и последующему разрушению деталей в эксплуатации. Разработаны и внедрены методы снижения величины таких концентраторов напряжений на основе применения различных методов локального поверхностно пластического деформирования поверхностного слоя переходных зон профилей. В результате значительно сократилась вероятность образования усталостных трещин и существенно повысилось сопротивление усталости обработанных деталей.

**Ключевые слова:** технологические концентраторы напряжений, профильные поверхности, локальные переходные зоны, усталостные трещины, сопротивление усталости, резба, шестерни, турбинные лопатки.

It is established, that in the course of machining of surfaces of a complex profile of the details working in operation at the big sign-variable loadings, in critical transitive zones of the interfaced surfaces of a profile the local technological concentrators of pressure promoting origin, growth of fatigue cracks and to the subsequent destruction of details in operation are formed.. Methods of decrease in size of such concentrators of pressure on the basis of application of various methods of local superficially plastic deformation of a blanket of transitive zones of profiles are developed and introduced. As a result the probability of formation of fatigue cracks was considerably reduced and resistance of weariness of the processed details has essentially raised.

*Keywords:* Technological concentrators of pressure, profile surfaces, local transitive zones, fatigue cracks, resistance of weariness, a carving, gear wheels, turbine shovels.

В современном машиностроении наиболее сложным и ответственным является производство авиационных газотурбинных двигателей, редукторов и трансмиссий вертолетов. С каждым годом растут требования к безопасности полетов военной и гражданской техники, что в свою очередь, отражается на ужесточении требований к показателям качества и надежности, предъявляемые к агрегатам и изделиям в целом. Надежность авиационной техники во многом зависит от эксплуатационных свойств таких наиболее ответственных деталей ГТД как лопатки турбины и компрессора, зубчатые колеса, ступенчатые валы, резьбовые соединения, которые работают в тяжелых условиях агрессивных сред, повышенных температур и знакопеременных нагрузок. В то же время для приведенных выше деталей имеется одна характерная особенность. Все эти детали имеют сложные профильные поверхности с присутствием конструктивного концентратора напряжений и которые обрабатываются часто по профильной схеме методом врезания профильным инструментом. В результате сопряженные поверхности обрабатываемого профиля имеют принципиальные отличия условий контакта и резания соответствующими поверхностями профильного режущего инструмента. Вследствие этого на контактных поверхностях инструмента и детали создаются различные термодинамические условия резания и стружкообразования, что может вызвать появление значительной неоднородности параметров качества поверхностного слоя в переходной зоне – остаточных напряжений, микротвердости, шероховатости, структурной неоднородности. Эти явления вызывают возникновение технологических концентраторов напряжений в переходных зонах профиля, как раз в тех местах, где уже действуют обычные конструктивные концентраторы напряжений, связанные с резким изменением формы профиля детали. В результате возможно сложение технологического и конструктивного концентраторов напряжений, что приводит к ускоренному появлению и накоплению различных дефектов в поверхностном слое. В результате суммирования конструктивного и технологического концентраторов напряжений существующие при резании дефекты в поверхностном слое переходной зоны профиля, объединяясь в микротрещины, под действием знакопеременных нагрузок приводят к появлению усталостных трещин, что, в конечном счете, приводит к разрушению деталей при испытаниях и в эксплуатации. Известно, что разрушение детали начинается с поверхностного слоя и именно поверхностному слою ответственных деталей, имеющих сложные профильные поверхности следует уделять особое внимание в процессе их изготовления.

Анализ случаев появления трещин и разрушения **шестерен ГТД** при испытаниях и в эксплуатации показал, что разрушение носит усталостный характер с зарождением усталостной трещины в переходной зоне профиля зубьев от дна впадины к боковой поверхности.

Именно в этой зоне имеют место наибольшие растягивающие напряжения от действия циклически изменяющегося изгибающего момента в условиях эксплуатации. Качество поверхностного слоя во впадинах и на боковых контактных поверхностях зубьев, риски во впадинах и на торцевых фасках зубьев безусловно, влияют на первоначальное зарождение усталостных трещин при циклических нагрузках, снижение усталостной прочности и возможное разрушение зубчатых колес в процессе эксплуатации.

Оценка пооперационного формирования остаточных напряжений поверхностных слоев во впадине и на боковой поверхности шестерни, сделанная на основе анализа производственного опыта и расчета величины и характера распределения по данным научных исследований, позволяет сделать вывод о том, что в переходной зоне формируются дополнительный технологический концентратор напряжений (ТКН), обусловленный резким переходом растягивающих остаточных напряжений от +200МПа на боковой поверхности зуба до высоких сжимающих остаточных на-

пряжений до  $-700\text{МПа}$  на дне впадины зуба. При циклическом воздействии изгибающего момента при эксплуатации этот технологический концентратор усиливается периодически действием конструктивного концентратора, что и может служить источником зарождения первоначальных усталостных трещин и последующего разрушения деталей. Выдвинута гипотеза, что снижение величины ТКН и выравнивание НДС в критической переходной зоне возможно путем введения дополнительной финишной операции упрочнения впадины зуба методом поверхно-пластического деформирования - пневмодробеструйной обработки.

Применение способствует снижению величин градиентов основных параметров качества поверхностного слоя и формированию благоприятных сжимающих остаточных напряжений с необходимой величиной и распределением по глубине в области смежных поверхностей зуба. В результате, технологические сжимающие остаточные напряжения противодействуют изгибными напряжениям растяжения, возникающих при эксплуатационной нагрузке, что в свою очередь существенно повысит предел выносливости, сопротивление усталости и долговечность шестерен...

В результате проведенных усталостных испытаний установлено, что применение локального направленного упрочнения дробью переходных зон от впадины к боковой поверхности зубьев шестерен повышает предел выносливости на 15–20 % по сравнению с прежним серийным маршрутом обработки.

Аналогичные исследования проведены при разработке методики назначения оптимальных режимов глубинного шлифования **елочных профилей турбинных лопаток**. Для выполнения елочного профиля на замке лопатки применяется профильная схема врезного многопроходного глубинного шлифования с постепенным снятием припуска глубиной по первой впадине елочного профиля замка до 5–6 мм. При усталостных испытаниях рабочих лопаток турбин на воздушно-пульсирующем вибростенде, проводимых периодически согласно директивной технологии, обнаружено методом люминесцентного контроля образование трещин усталостного характера в первой впадине «елочного» профиля. Установлено, что в процессе шлифования возникает технологический концентратор напряжений в переходной радиусной зоне. При действии знакопеременных нагрузок в условиях эксплуатации этот концентратор напряжений складывается с циклически возникающим конструктивным геометрическим концентратором напряжений и создает условия для образования усталостных трещин в критической радиусной переходной зоне и разрушения лопаток турбины.

Для снижения действия этого технологического концентратора напряжений и повышения сопротивления усталости после обработки глубинным шлифованием предложено применять процесс упрочнения профиля хвостовика микрошариками на пневмодробеструйной установке.

В результате проведения дробеструйного упрочнения микрошариками «елочного» профиля хвостовика и последующих усталостных испытаний турбинных лопаток и образцов-имитаторов «елочного» хвостовика при нормальной ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и рабочей температуре ( $650\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) установлено, что предел выносливости после упрочнения повышается на 20–25 %.

Для осуществления процесса бурения и подачи углеводородов на поверхность применяются большая номенклатура специальных буровых, обсадных и насосно-компрессорных труб, соединенных в многокилометровые колонны с помощью резьбовых соединений в виде муфт и ниппелей со **специальной конической резьбой**. В процессе бурения и подачи энергоносителей на поверхность резьбовые соединения буровых труб испытывают значительные знакопеременные нагрузки от действия растягивающих сил, изгибающих моментов, химического и абразивного воздействий, что приводит к нередким случаям поломки труб по резьбовым соединениям и обрыву многотонной колонны в скважинах. Анализ мест разрушения показал, что разрушение резьб носит усталостный характер и в основном, в зоне впадины резьбы, где начинается рост усталостных трещин.

Изготовление конической резьбы проводится методом врезного профильного многопроходного нарезания на токарно-винторезных станках.

В результате анализа износа и образующейся стружки на боковых режущих кромках и на вершине выявлено значительное отличие температурных и деформационных явлений, что связано с различной кинематикой резания. Доказан факт образования технологического концентратора напряжений в переходной зоне от дна впадины к боковой поверхности, что в условиях действия изгибных знакопеременных нагрузок и при наличии конструктивного геометрического concentra-

тора напряжений может усиливать вероятность образования усталостных трещин и последующего разрушения резьбы. Для снижения действия технологического концентратора напряжений предложено ввести поверхностно-пластическую деформационную обработку путем обкатки предварительно нарезанной резьбы роликом. В результате упрочнения повышаются твердость и прочность поверхностного слоя, формируются благоприятные остаточные напряжения, уменьшается параметр шероховатости  $R_a$ , увеличиваются радиусы закругления вершин, относительная опорная длина профиля и т.п. Испытания на сопротивление усталости при знакопеременном изгибе резьбового соединения проводились на стендовых установках при плоском или круговом изгибе по согласованной методике. При анализе сравнительных усталостных испытаний установлено увеличение наработки обкатанного резьбового соединения над неупрочненным в 2,7...3,7 раза, с 700 тыс. циклов до 3900 тыс. циклов. Таким образом, применение разработанной технологии упрочняющей обработки повышает усталостную прочность и надежность бурильных труб более чем в 3 раза.

#### Выводы

1. В процессе профильной механической обработки поверхностей сложного профиля деталей, работающих в эксплуатации при больших знакопеременных нагрузках таких, как зубьев шестерен, лопаток турбин, конических резьб и других деталей, имеющих сложные профильные поверхности, в критических переходных зонах сопряженных поверхностей профиля образуются локальные технологические концентраторы напряжений, способствующие зарождению, росту усталостных трещин и последующему разрушению деталей в эксплуатации.

2. Разработаны и внедрены методы снижения величины таких концентраторов напряжений на основе применения различных методов локального поверхностно-пластического деформирования поверхностного слоя переходных зон профилей.

3. В результате значительно сократилась вероятность образования усталостных трещин и существенно повысилось сопротивление усталости обработанных деталей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Горбунов А.С., Макаров В.Ф. Влияние последовательности обработки спирально-конических шестерен на распределение остаточных напряжений и величину наклепа поверхностного слоя зубьев // Технология машиностроения. 2012. №3. С. 9-12.

# ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

УДК 62-251

А. Ф. Денисенко, М. В. Якимов

## ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ШПИНДЕЛЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПНОЙ УПРУГОСТИ ОПОР

Самарский государственный технический университет

Рассмотрены изгибные колебания шпинделей металлорежущих станков с учетом анизотропной жесткости их опор. Для годографа жесткости в виде овальности получены аналитические выражения для собственных частот изгибных колебаний. Показано, что наличие анизотропии жесткостей опор шпинделя приводит к появлению диапазона собственных изгибных частот шпинделя, который должен быть учтен при проведении диагностических мероприятий.

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, изгибные колебания, собственные частоты, жесткость, годограф деформации, анизотропия жесткости опор, приведенный коэффициент жесткости.

The bending oscillation of the spindles of metal cutting machines are considered taking into account the anisotropic rigidity of their supports. For the hodograph of stiffness in the form of ovality, analytical expressions are obtained for the natural frequencies of bending vibrations. It is shown that the presence of anisotropy of the rigidity of the spindle supports leads to the appearance of a range of own bending frequencies of the spindle, which should be taken into account in carrying out diagnostic activities.

**Keywords:** spindle unit, bending vibrations, natural frequencies, stiffness, strain hodograph, anisotropy of stiffness of supports, reduced stiffness coefficient.

Повышение точности обработки на металлорежущих станках диктует необходимость поиска резервов в прогнозировании динамических процессов и разработке мероприятий по снижению возможных резонансных явлений. Особая роль здесь принадлежит динамике шпиндельного узла, как системы станка, в максимальной мере влияющей на качество обработки.

При разработке динамической модели шпиндельного узла можно воспользоваться богатым опытом, накопленным для роторных систем [1-3]. Однако, экспериментально отмеченное наличие анизотропии жесткости шпиндельных опор [4] не дает возможности использовать в качестве динамической модели вал на упругих опорах постоянной жесткости, как это сделано в большинстве опубликованных работ [1-3].

Для экспериментальной оценки степени анизотропии жесткости опор шпиндельного узла была разработана методика и нагрузочное устройство [4].

Экспериментальные данные показали существенное изменение жесткости в зависимости от направления приложения. Было установлено, что диапазон изменения упругих свойств опоры в зависимости от направления действия нагрузки составляет  $(\max \Delta_{\text{опоры}} / \min \Delta_{\text{опоры}}) = 2..3$ , и что упругие перемещения в основном определяются деформациями в контакте «наружного кольца - расточка корпуса» и контакте «внутреннее кольцо – шпиндель» [5].

При оценке влияния анизотропии жесткости опор на собственные частоты изгибных колебаний шпинделя ограничимся рассмотрением простейшей симметричной формы годографа жесткости в виде овальности и представлении динамической модели как одномассовой с массой  $m$ , сосредоточенной в точке, определяемой координатами  $a$  и  $b$  (рис. 1), где  $y$ ;  $z$  - смещение массы  $m$ ;  $c_{ny}$ ;  $c_{nz}$  - жесткость передней опоры по осям  $y$  и  $z$  соответственно;  $c'_{zy}$ ;  $c'_{yz}$  - жесткость задней опоры по осям  $y$  и  $z$  соответственно;  $y_{no}$ ;  $z_{no}$  - смещения оси шпинделя в передней опоре;  $y_{zo}$ ;  $z_{zo}$  - смещения оси шпинделя в задней опоре.

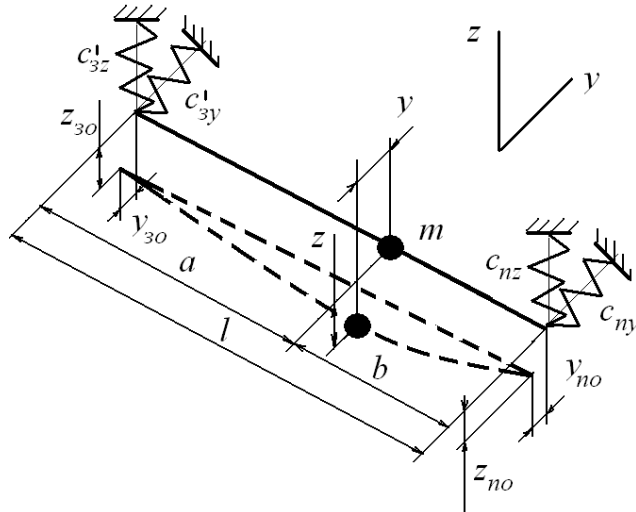


Рис. 1. Динамическая модель изгибных колебаний шпинделя

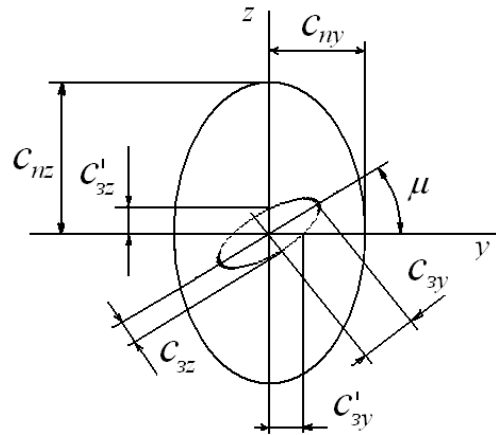


Рис. 2. Ориентация годографов жесткости опор шпинделя

При определении жесткостей  $c'_{3y}$ ;  $c'_{3z}$  следует учесть произвольную ориентацию годографа жесткости задней опоры шпинделя (угол  $\mu$ ) относительно выбранной по передней опоре системы координат (рис. 2).

Как показано в работе [6] для рассматриваемой динамической системы собственные частоты изгибных колебаний:

$$\omega_z = \sqrt{c_z / m}; \quad \omega_y = \sqrt{c_y / m}, \quad (1)$$

где  $c_z$ ;  $c_y$  - приведенные коэффициенты жесткости:

$$c_z = \frac{cc_{nz}c'_{3z}}{c_{ny}c'_{3y} + cc'_{3z}(1-B)^2 + B^2cc_{nz}}, \quad c_y = \frac{cc_{ny}c'_{3y}}{c_{ny}c'_{3y} + cc'_{3y}(1-B)^2 + B^2cc_{ny}}, \quad (2)$$

где  $c$  - жесткость упругой изгибной деформации шпинделя в точке расположения массы  $m$ ;  $B = b / (a + b)$ .

Таким образом, приведенный коэффициент жесткости по соответствующей координате (выражения(2)) и соответственно собственная частота изгибных колебаний (выражения (1)) зависят от расположения центра масс по длине шпинделя, жесткости передней опоры, соотношения жесткостей передней и задней опор, соотношения жесткостей передней опоры и тела шпинделя.

С учетом анизотропии жесткости опор приведенный коэффициент жесткости и собственная частота изгибных колебаний будут меняться в определенных пределах.

Считая, что усредненное значение жесткости передней опоры  $c_n$  связано с предельными значениями выражением  $c_n = 0,5(c_{ny} + c_{nz})$  получим

$$c_{ny} = 2c_nQ; \quad c_{nz} = 2Wc_nQ, \quad (3)$$

где  $W = c_{nz} / c_{ny}$  - степень анизотропии жесткости передней опоры;

$$Q = 1 / (1 + W).$$

Подставив (3) в выражения (2), получим значения приведенных коэффициентов жесткости, учитывающих анизотропию упругих деформаций в опорах, по соответствующим осям:

$$c_z = \frac{2WQcc'_{3z}c_n}{2WQc_n c'_{3z} + cc'_{3z}(1-B)^2 + 2WQB^2cc_n}; \quad c_y = \frac{2Qcc'_{3y}c_n}{2Qc_n c'_{3y} + cc'_{3y}(1-B)^2 + 2QB^2cc_n}.$$

Так как ориентация годографа жесткости задней опоры по отношению к годографу жесткости передней опоры носит случайный характер, то  $c'_{3y}$  и  $c'_{3z}$  могут принимать любые значения в диапазоне от  $2Gc_3$  до  $2VGc_3$ , где  $V = c_{3z} / c_{3y}$ ;  $c_3 = 0,5(c_{3y} + c_{3z})$ ;  $G = 1 / (1 + V)$ .

Таким образом, изменения приведенных коэффициентов жесткости определяются некоторым диапазоном, связанным с возможным варьированием  $W$  и  $c'_{zy}$  (или  $c'_{xz}$ ).

По полученным зависимостям были определены коэффициенты жесткости шпиндельного узла токарного станка мод. 16Б16Т1 производства «Средневолжского станкостроительного завода» (г. Самара) для четырех расчетных моделей с учетом анизотропии жесткости передней и задней опор и взаимной ориентации их годографов: модель I - тело шпинделя; модель II - тело шпинделя с шестерней перебора и полумуфтой; модель III - тело шпинделя с шестерней перебора, полумуфтой и конусом; модель IV - тело шпинделя с шестерней перебора, полумуфтой и патроном (таблица).

**Приведенные коэффициенты жесткости (Н/мм)  
шпиндельного узла токарного станка мод. 16Б16Т1**

Расчетная модель	$c_z$		$c_y$	
	min	max	min	max
I	$1,8787 \cdot 10^5$	$2,1099 \cdot 10^5$	$1,8307 \cdot 10^5$	$2,0793 \cdot 10^5$
II	$1,8866 \cdot 10^5$	$2,1135 \cdot 10^5$	$1,8366 \cdot 10^5$	$2,0818 \cdot 10^5$
III	$2,0747 \cdot 10^5$	$2,2798 \cdot 10^5$	$1,9917 \cdot 10^5$	$2,2287 \cdot 10^5$
IV	$8,7987 \cdot 10^5$	$11,5456 \cdot 10^5$	$5,9618 \cdot 10^5$	$8,8034 \cdot 10^5$

Объединенный диапазон изменения приведенного коэффициента жесткости (Н/мм) с учетом изменения по осям  $y$  и  $z$  (изменения  $c_y$  и  $c_z$ ) составляет:

модель I: от  $1,8307 \cdot 10^5$  до  $2,1099 \cdot 10^5$ ; модель II: от  $1,8366 \cdot 10^5$  до  $2,1135 \cdot 10^5$ ;  
модель III: от  $1,9917 \cdot 10^5$  до  $2,2798 \cdot 10^5$ ; модель IV: от  $5,9618 \cdot 10^5$  до  $11,5456 \cdot 10^5$ .

Оценим собственные частоты изгибных колебаний  $\omega$ , Гц, с учетом объединенных диапазонов изменения приведенного коэффициента жесткости, принимая во внимание также изменения положения центра тяжести и массы шпинделя: модель I -  $\omega = 2957,00 \dots 3174,49$ ; модель II -  $\omega = 2660,14 \dots 2853,64$ ; модель III -  $\omega = 2543,60 \dots 2721,36$ ; модель IV -  $\omega = 3247,96 \dots 4519,91$ .

#### Выводы

1. Экспериментально подтверждено наличие анизотропии жесткости опоры шпиндельного узла на подшипниках качения и установлена ее степень.
2. Получены зависимости, позволяющие оценить величины частот собственных изгибных колебаний шпинделя с учетом массы и собственной жесткости шпинделя, расположения центра масс шпинделя, межопорного расстояния, анизотропной жесткости опор шпинделя и взаимной ориентации годографов жесткостей передней и задней опор.
3. Показано, что наличие анизотропии жесткостей опор шпинделя приводит к появлению диапазона собственных изгибных частот шпинделя, что должно быть учтено при проведении диагностических мероприятий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Орликов М.Л. Динамика станков.- Киев: Выща шк., 1989.- 272 с.
2. Кельзон А.С., Журавлев Ю.Н., Январев Н.В. Расчет и конструирование роторных машин.- Л.: Машиностроение, 1977.- 288 с.
3. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов.- М.: изд-во АН СССР, 1959. - 247 с.
4. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Экспериментальная оценка анизотропии жесткости передней опоры шпиндельного узла токарного станка [Электронный ресурс] // «Инженерный вестник Дона», 2015, №1. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2854>.
5. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Учет анизотропии упругих свойств передней опоры шпиндельного узла токарного станка при изготовлении деталей приборов // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". №3(47), 2015, с.91-99.
6. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Определение собственных изгибных частот шпинделя металлорежущего станка с учетом анизотропной упругости опор // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. "Технические науки". №1(45), 2015, с.159-166.

УДК 621.9.01

*А. Д. Измайлов, О. И. Жабин***ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ****АО «НИИ гидросвязи «Штиль», Волгоград**

Показаны особенности обработки промышленных и инженерных термопластов концевыми фрезами на станках с ЧПУ. Рассмотрены возможные дефекты обработки и их причины. Приведены рекомендации по выбору геометрии твердосплавного инструмента, назначению режимов резания и траектории движения фрезы.

*Ключевые слова:* режимы резания, термопласты, механическая обработка, концевое фрезерование на станках с ЧПУ.

Features of machining of industrial and engineering thermoplastics by end milling cutter on CNC machines are shown in this paper. Possible defects of machining and their causes are considered. Recommendations about choice of geometry of hard-alloy tool are provided as well as about destination of cutting modes and path of the movement of a mill.

*Keywords:* cutting modes, thermoplastics, machining, end cnc-milling.

В настоящее время существующие методы изготовления заготовок и деталей из промышленных и инженерных термопластов в машиностроении методом прессования, литья под давлением не дают возможности получения точных размеров деталей вследствие усадки материала, наличия технологических уклонов, смещения элементов штампа. В этой связи в соответствии с современными тенденциями развития машиностроительного производства изделий и деталей эффективным представляется их изготовление механической обработкой [1].

Методы обработки большей частью зависят от используемого оборудования и инструмента. Однако режущих инструментов, оборудования и технологических методов, специально предназначенных для механической обработки термопластов очень мало. В основном используется инструмент, сконструированный для обработки металла и дерева. Этим обусловлены трудности эффективной обработки резанием, усугубляемые многообразием видов и недостаточностью представлений о присущих им свойствах, характеризующих их обрабатываемость [2].

Так, при детальном изучении обработанных резанием поверхностей термопластов они часто оказываются шероховатыми и покрытыми задирами и рисками (следами режущего инструмента). Также обнаруживается, что чрезмерное тепло трения, развивающееся в результате механической обработки, вызывает прижоги на поверхности, так как концентрация температур в инструменте приводит к возникновению значительных температур (до 500°C) на его режущих кромках и в объеме режущего клина. В результате чего возникает необходимость дополнительной отделочной обработки деталей, что увеличивает трудоемкость изготовления деталей [3].



Рис. 1. Вертикально-фрезерный станок с ЧПУ  
модели PFE 500-PX -PFE 1512-PX



В процессе изготовления деталей для приборов гидроакустической связи из различных термопластов, таких как полиацеталь, поливинилхлорид, капролон и поликарбонат монолитный, на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ модели PFE 500-PX -PFE 1512-PX (рис. 1) был выявлен ряд проблем, связанных с их механической обработкой.

Исходя из обрабатываемого материала, были подобраны концевые фрезы с наиболее оптимальными характеристиками для обработки пластика. Для обработки мягкого материала чаще всего используются 1- и 2-заходные, реже 3-заходные фрезы. Основная их проблема при фрезеровании мягких материалов - это "запекание" в полостях фрезы. Однозаходные фрезы благоприятствуют лучшему выводу стружки за счет более просторного желоба фрезы. Далее необходимо выбрать метод фрезерования- встречное или попутное. Как правило, канты прохода отличаются друг от друга. Контрсторона движения "красивее", чем сторона синхронности. Это особенно видно при использовании однозаходной фрезы, поэтому внутренние контуры обрабатываются наиболее качественно по часовой стрелке, внешние против часовой. Далее по таблицам с рекомендованными значениями скорости и подачи рассчитывается необходимая частота вращения (1) шпинделя и радиальная подача (2).

$$n = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot d}, \quad (1)$$

где  $v_c$  - скорость резания, м/мин;  $d$  - диаметр фрезы, мм;

$$f = n \cdot f_z \cdot z, \quad (2)$$

где  $f_z$  - подача на 1 зуб, мм/зуб;  $z$  - количество лезвий/

В процессе фрезерования и сверления материалов были выявлены следующие характерные особенности:

- пониженная теплопроводность термопластов, обуславливающая плохой теплоотвод из зоны резания, а следовательно и резкий нагрев лезвий режущих инструментов, также оплавление, задиры и разрушение обработанной поверхности;
- интенсивное пылеобразование и выделение вредных газов, что требует применение отсасывающих устройств;
- трудность применения СОЖ (смазочно-охлаждающая жидкость) из-за гигроскопичности полимеров и образования пасты из пыли и СОЖ, которая налипает на поверхности деталей станка, вызывая их коррозию, попадает на инструмент, затрудняя обработку [1];
- сложность достижения высокой точности деталей из-за их большого упругого прогиба, повышенного коэффициента линейного расширения материала, интенсивного изнашивания инструмента.



Рис. 2. Дефекты обработки

Для устранения выявленных проблем при обработке пластика (рис. 2) по выработанным для них закономерностям и стандартам были опытным путем оптимизированы режимы резания: уменьшена частота вращения шпинделя относительно расчетной, чтобы предотвратить наплавление стружки на режущую кромку инструмента. Корректирование значения подачи проводилось вручную, позволило в случае с ПВХ и поликарбонатом ускорить процесс фрезерования за счет снижения температуры в зоне резания и прекращения наплавления пластика на режущие кромки инструмента. Кроме того, улучшилось качество обработанной поверхности (рис. 3).



Рис. 3. Качество поверхности деталей после оптимизации режимов резания

Таким образом, за счет сравнительно небольшой твердости, пластиковые изделия хорошо поддаются механической обработке, в частности – обработке резанием. Это дает возможность использовать для производства пластиковых изделий современное автоматическое оборудование с ЧПУ. Оптимизация режимов резания промышленных и инженерных термопластов позволяет получать из них качественные детали различной сложности по форме, а применение современных фрезерных станков с ЧПУ в разы сокращает время их изготовления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батаев, А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: Учеб.пособие / А.А. Батаев, В.А. Батаев - М.: Университетская книга; Логос, 2006. - 400 с.
2. Кобаяши, А. Обработка пластмасс резанием: сокращ. перев. с англ. -М.: Машиностроение, 1974.- 192 с.
3. Режимы резания при фрезеровании на фрезерно-гравировальных станках.- URL: [www.bzt-cnc.ru](http://www.bzt-cnc.ru).

УДК.621.9.07

*С. И. Кожевников, В. Ф. Макаров*

#### **ВЛИЯНИЕ ТРАЕКТОРИИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФОРМООБРАЗУЮЩЕЙ ОСНАСТКИ**

**Пермский национальный исследовательский политехнический университет**

Тенденция использования деталей сложной геометрической формы из полимерных композиционных материалов связана с необходимостью снижения материалоемкости и производственных ресурсов. Процесс производства изделий из композиционных материалов сопряжен с интенсивным изнашиванием формообразующей оснастки, сохранение геометрии которой является приоритетной задачей машиностроения. Полимерные композиционные материалы все чаще используются во всех сферах деятельности человека, а количество производимых деталей растет с каждым днем. Наиболее распространенным и экономически эффективным по различным технико-экономическим показателям является метод литья под давлением. Это обусловлено тем, что этот метод позволяет серийно изготавливать изделия сложной конфигурации, обеспечивая при этом требуемую точность, а также получать тонкостенные отливки с минимальным отклонением от заданного размера. Качество поверхности пресс-форм при таком методе производства деталей из полимерных композиционных материалов имеет прямое влияние на количество произведенных деталей. Установлено, что траектория фрезерования имеет значительное влияние на долговечность пресс-форм, которая характеризуется долговечностью таких деталей как матрицы, пуансоны, знаки и подвижные части пресс-форм. Эта статья показывает влияние обработки на станках с числовым программным управлением во время высокоскоростного фрезерования на долговечность пресс-форм. В некоторых случаях правильная траектория фрезерования может значительно увеличить долговечность пресс-форм.

*Ключевые слова:* повышение стойкости пресс-форм, направленное формирование микрогеометрии, полимерные композиционные материалы.

The trend of using details of complex geometric shapes from polymer composite materials is associated with the need to reduce material-capacity and production resources. The process of manufacturing products from composite materials is associated with intensive wear of the forming tool, the preservation of the geometry of which is a priority task of mechanical engineering. Polymer composite materials are increasingly used in all spheres of human activity, and the number of parts produced is growing every day. The most common and cost-effective for various technical and economic indicators is the method of injection molding. This is due to the fact that this method allows you to serially produce products of complex configuration, while ensuring the required accuracy, as well as to obtain thin-walled castings with a minimum deviation from the specified size. The quality of the surface of the molds with this method of manufacturing parts made from polymeric composite materials has a direct effect on the number of parts produced. It is established that the trajectory of milling has a significant influence on the durability of molds, which is characterized by the durability of such parts as matrices, punches, signs and movable parts of molds. This article shows the effect of machining on CNC machines during high-speed milling on the durability of molds. In some cases, the correct milling path can significantly increase the durability of the molds.

*Keywords:* increase of durability of molds, directed formation of microgeometry, polymeric composite materials.

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в машиностроении обусловлено тем, что изделия из ПКМ являются более экономически выгодными и удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам в машиностроении. Самым распространенным и экономически эффективным по различным технико-экономическим показателям является метод литья под давлением в пресс-формы [1]. Такой метод позволяет производить детали сложной геометрической формы в больших количествах.

На данный момент вопрос повышения износостойкости пресс-форм мало изучен, а применяемые способы для повышения стойкости штампов могут быть не применимы в условиях литья полимерных композиционных материалов. Повышение износостойкости штампов с помощью нанесения антифрикционных покрытий рассмотрены в работе [2]. Таким способом можно добиться повышение износостойкости в 3-5 раз, значительно удорожая процесс производства. Также повысить долговечность возможно с помощью упрочняющих методов, которые рассмотрены в работе [3], такие методы позволяют снизить усилия в штампах и уменьшить количество разноплановых ремонтов, путем использования дорогостоящего инструмента.

В настоящее время в технологическом процессе не учитывается влияние траектории обработки, которая формирует микрогеометрию поверхности формообразующей детали, что приводит к быстрому износу формообразующих поверхностей и снижению долговечности пресс-формы из-за напряженного состояния геометрической формы, а также неправильно заданных режимов при обработке [4]. Технологический процесс изготовления пресс-форм содержит большое количество операций на высокопроизводительных станках с ЧПУ. Предлагается использовать метод подбора оптимальной траектории фрезерования на таких станках. Специально подобранная траектория формирует микрогеометрию на формообразующей поверхности, которая совпадает с направлением движения материала в пресс-форме.

Метод подбора оптимальной траектории фрезерования заключается в подборе оптимальной траектории обработки поверхностей сложной формы сферическими монолитными фрезами на станках с ЧПУ. Главным образом микрогеометрия поверхности зависит от таких характеристик как: глубина реза, подача, скорость резания, износ режущего инструмента и использование смазки [5]. Все эти параметры сильно влияют на поверхность формообразующей детали. Для подбора оптимальной траектории можно указать следующую упрощенную последовательность действий по подбору оптимальной траектории при фрезеровании. Строится математическая модель детали для пресс-формы, назначается материал и его свойства, что поможет точнее спроектировать пресс-форму. Определяется главный вектор течения расплава полимерного композиционного материала в специальном программном обеспечении, которое учитывает динамику процесса литья при заданных граничных условиях. Затем строится программа обработки формообразующих поверхностей пресс-формы для станка с ЧПУ коллинеарно главному вектору течения расплава полимерного композиционного материала в детали.

Для анализа данной методики были проведены теоретические и экспериментальные исследования. Для теоретического исследования была смоделирована упрощенная ячейка из полимерного композиционного материала. На основе технологического анализа в САЕ-системах было определено направление потока в пресс-форме. Для определения оптимальности траектории были построены две математические модели. В первой модели был смоделирован сценарий процесса литья при фрезеровании формообразующей поверхности сферической фрезой вдоль главного векто-

ра течения расплава (рис. 1, *а*). Вторая модель, напротив, была смоделирована так, что фрезерование проходило поперек главного вектора течения расплава (рис. 1, *б*).

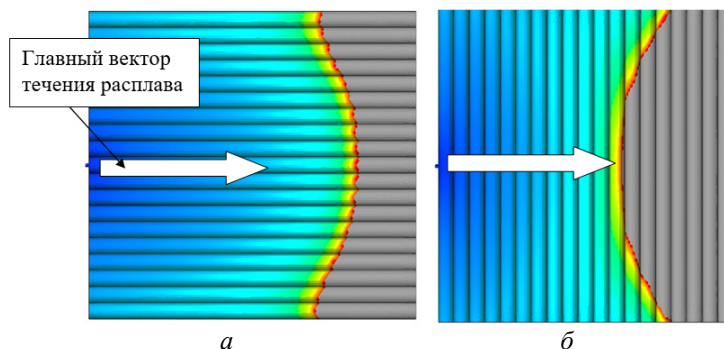


Рис. 1. Проливаемость при фрезеровании вдоль главного вектора (*а*); проливаемость при фрезеровании поперек главного вектора (*б*)

При идентичных граничных условиях по математическим моделям заметно что при фрезеровании коллинеарно главному вектору, процент заполнения простейшей ячейки больше, а именно 85 %. Во втором случае, когда фрезерование происходило перпендикулярно главному вектору процент заполнения заметно меньше – 60 %. Процесс заполнения пресс-формы происходит значительно быстрее, так как материалу не нужно преодолевать микронеровности на своем пути, это увеличивает производительность труда и увеличивает стойкость формообразующих поверхностей пресс-форм, что повышает долговечность.

В процессе анализа проливаемости детали в системах инженерного анализа CAE, получаем модель литниковой системы (рис. 2, *а*), в которой указано направление движения расплава в каждой детали литниковой системы. По движению расплава, необходимо определить главный вектор движения литейной массы (рис. 2, *б*).

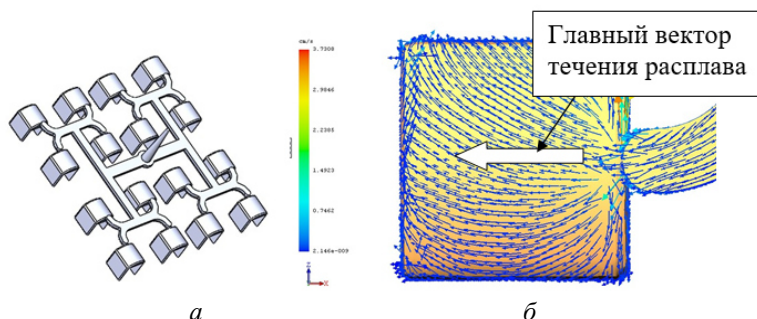


Рис. 2. Литниковая система в процессе инженерного анализа CAE (*а*); определение главного вектора движения литейной массы (*б*)

Эксперимент был подготовлен для формообразующих пуансона и матрицы пресс-формы, фрезерование поверхностей осуществлялось под углом  $90^\circ$  (рис. 3, *а*) и  $0^\circ$  (рис. 3, *б*) по отношению к главному вектору течения расплава литейной массы.

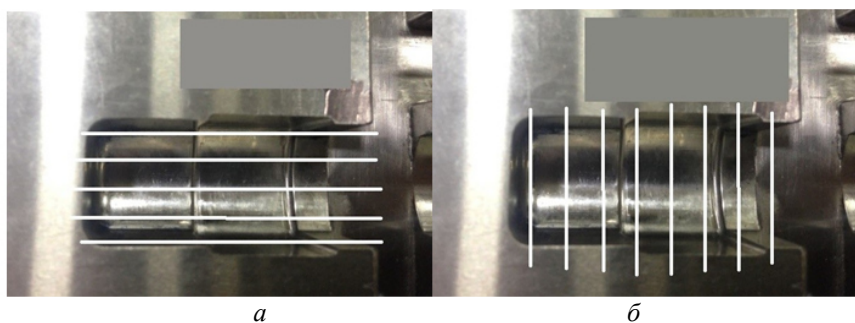


Рис. 3. Формирование линейного рельефа фрезерования под углом  $0^\circ$  (*а*); формирование линейного рельефа фрезерования под углом  $90^\circ$  (*б*)

Обе фрезерные операции проводились инструментом с одинаковыми параметрами. В пресс-форме половина гнезд были обработаны по одной программе с одной траектории, а другие половина по другой.

Результаты этого эксперимента показали, что формирование линейного рельефа фрезерования под углом  $0^\circ$  по отношению к главному вектору скорости движения литейной массы дает лучшие результаты проливаемости. Изменение фрезерной стратегии дало результат улучшив проливаемость деталей на 25-35%. Выбор оптимальной траектории обработки для получения микрогеометрии на формообразующих поверхностях пресс-форм повышает износостойкость, а также сокращает время заполнения пресс-формы, что увеличивает производительность и в совокупности дает положительный экономический эффект.

Планируется проведение исследований и обработка 6 пресс-форм с целью определения влияния стратегии фрезерования на износостойкость формирующей поверхности.

Изучение данного вопроса является перспективным так как формирование микрогеометрии на формообразующих поверхностях, не только позволяет повысить технико-экономические показатели применения технологии получения деталей из полимерных композиционных материалов, а также может позволить создавать интеллектуальные материалы путем направленного формирования геометрии изделия при процессе литья. Такой материал сможет получить необходимое направление волокон в своей структуре, которое позволит повысить его физико-механические и эксплуатационные свойства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вшивков С. А., Тюкова И. С.* Учебно-методический комплекс дисциплины "Технология получения композиционных полимерных наноматериалов" [Электронный ресурс] / С. А. Вшивков, И. С. Тюкова ; Мин-во образования и науки РФ, Урал. гос. ун-т им. А. М. Горького. – Электрон. дан. – Екатеринбург : [б. и.], 2011.
2. *Мовшович А.Я.* Повышение надежности и долговечности штампов для разделительных операций листовой штамповки / А.Я. Мовшович, Н.К. Резниченко, Ю.А. Черная [и др.] // «Оборудование и инструмент для профессионалов». Серия «Металлообработка». 2012. №5. С. 232-236.
3. *Каравая Д.Н., Пучков В.П.* Повышение стойкости рабочих элементов разделительных штампов // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. X междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012. С. 53-65.
4. *Вишняков М.А., Вашихов Ю.А.* Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения: учеб. пособие. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2005. 20 с.
5. *Басова Е.В.* Описание шероховатости поверхности, обработанной методом высокоскоростного фрезерования // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2015. №1. С. 95-100.

УДК 621.9

*Е. А. Кудряшов, И. М. Смирнов, Н. А. Хижняк*

#### **О ВОЗМОЖНОСТИ ТОЧЕНИЯ РЕЗЦОМ С УСТРОЙСТВОМ ДЕМПФИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СБОРОЧНОЙ ЕДИНИЦЫ, СОСТОЯЩЕЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Юго-Западный государственный университет**

Приведены результаты исследования возможности применения резцов с устройством демпфирования при обработке точением поверхности сборочной единицы, состоящей из сочетания трех различных конструкционных материалов: сталь, алюминиевый сплав и стекловолокнит. Разработаны конструкции демпфирующих резцов, оснащенные инструментальным материалом композит, приняты меры технологического характера по созданию условий резания конструктивно сложной поверхности, достигнуто повышение производительности обработки до трех раз, получена точность седьмого качества при показателе шероховатости  $R_a$  не грубее  $1,25 \text{ мкм}$ .

**Ключевые слова:** сборочная единица, прерывистая поверхность, резец, композит, удар, вершина инструмента, стойкость, безударное резание, производительность, точность, шероховатость.

The article shows the results of the possibility of using tools with damping device when machining a surface of an assembly unit consisting of a combination of three different structural materials: steel, aluminum alloy and glass fiber. In addition, the article cites a number of designs of damping tools equipped with composite tool material and propose technological measures to create cutting conditions for a structurally complex surface. The proposed solutions allow to increase the processing capacity up to three times, to reach an IT Grade of 7 and surface quality  $R_a$  less than  $1.25 \text{ }\mu\text{m}$ .

**Keywords:** part, interrupted surface, cutter, composite, stress, tool tip, durability, unstressed cutting, productivity, accuracy, roughness.



В современных конструкциях машин встречаются детали, обрабатываемые поверхности которых представляют сочетание двух и более конструкционных материалов. Низкая обрабатываемость, появление вибраций на границах стыка материалов, образующих обрабатываемую поверхность, способствовали формированию мнения, что применение композитов в связи с высокой их хрупкостью, проблематично в условиях прерывистого резания из-за выкрашивания режущих кромок и высокой вероятности поломки вершины режущего элемента.

Принятый алгоритм решения обозначенных проблем представлен на рис. 1.

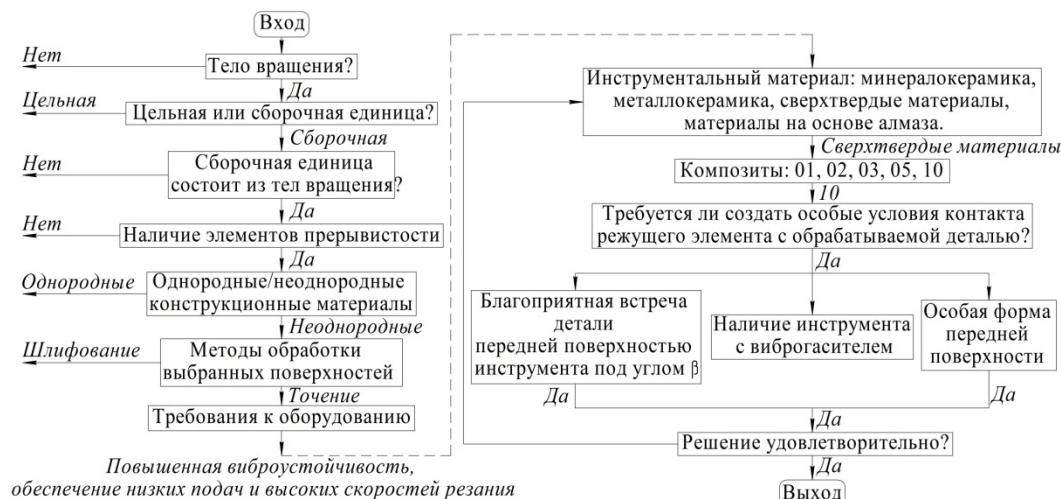


Рис. 1. Последовательность принятия технологических решений

Решение технологической задачи точения поверхности из разнородных конструкционных материалов включает:

- 1) разработку универсальной конструкции проходного резца, способного демпфировать ударную нагрузку прерывистого резания;
- 2) выбор лучшей марки инструментального материала, способного к точению прерывистых поверхностей различной степени сложности;
- 3) обоснование условия рационального контакта режущего элемента с прерывистой поверхностью заготовки.

Нами выполнены следующие решения конструктивного и технологического характера:

- 1) разработаны конструкции токарных демпфирующих инструментов в большей степени по сравнению с серийно-выпускаемым инструментом, свободные от воздействия негативных факторов процесса прерывистого резания, рис. 2 [1,2].
- 2) выбрана лучшая марка инструментального материала—композит 10.

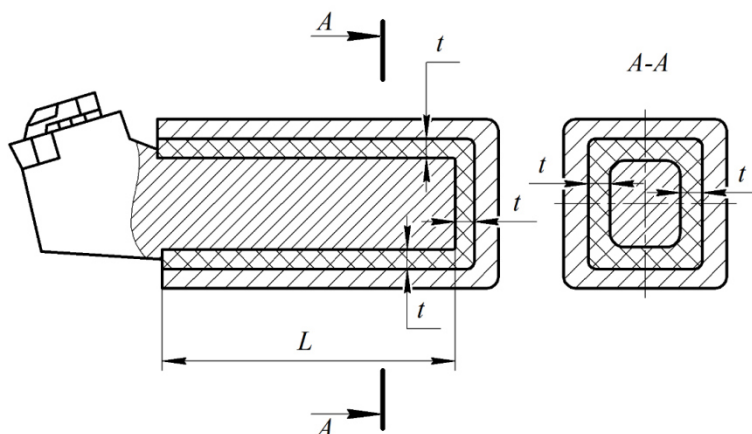


Рис. 2. Демпфирующий резец

$E$ , ГПа	$\sigma_n$ , ГПа	$\sigma_p$ , ГПа	$T$ , °C	$K_{Ic}$ , МПа $\times$ м <sup>1/2</sup>
880 — К10	1,50 — К10	0,49 — К01	1500 — К10	
840 — К01	1,19 — К09	0,39 — К10	1470 — К01	
	0,98 — К01	0,35 — К09	1300 — К02	7,12 — К10
800 — К02	0,80 — К02	0,30 — К05	1200 — К05	7,10 — К05
	0,60 — К05	0,22 — К05	1050 — К05	7,00 — К05
720 — К02				4,62 — К02
700 — К05				4,17 — К01
500 — К09				
Модуль упругости	Предел прочности при изгибе	Предел прочности при растяжении	Термостойкость	Коэффициент трещиностойкости
Характеристика 1	Характеристика 2	Характеристика 3	Характеристика 4	Характеристика 5

Рис. 3. Характеристики инструментальных материалов группы композитов

Как следует из рис. 3 инструментальный материал композит 10 обладает лучшими характеристиками, а по показателю трещиностойкости, что особенно важно для прерывистого резания, ему нет равных среди всей совокупности инструментальных материалов. Композиты на практике показали, что способны обеспечить высокую точность и качество обработки, превосходя во многом возможности процессов шлифования [3-7].

3) предложены условия рационального контакта резец-заготовка, заключающиеся в настройке режущего элемента таким образом, чтобы первоначальная его встреча с поверхностью обработки происходила в точке наиболее отдаленной от вершины и режущих кромок передней поверхности [8-10].

Рассмотрим пример применения технологических решений на операции точения наружного контура сборочной единицы Корпус.

Конструкция изделия (тело вращения), представляет собой сборочную единицу, состоящую из двух деталей: Основания, изготавливаемого из стали 30ХГСА и Кольца, изготавливаемого из алюминиевого сплава В95, соединяемых на этапе промежуточной сборки, с образованием арматурной конструкции, помещаемой в пресс-форму, для создания оболочки из стекловолокнита марки ДСВ-2-О, рис. 4.

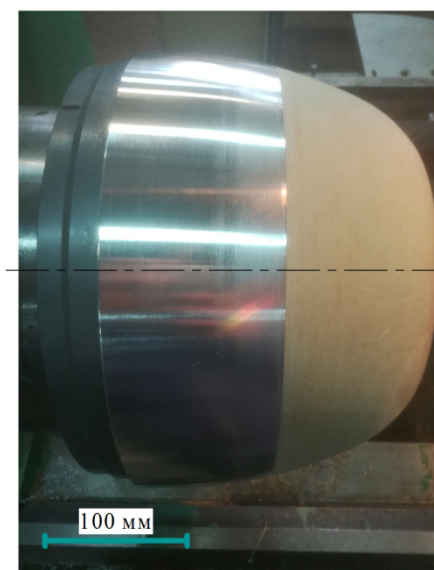


Рис. 4. Общий вид сборочной единицы Корпус

Таким образом, на операцию точения торцевой поверхности с элементами прерыва (56 основных, 10 вспомогательных отверстий и 4 сферических паза) и контура, образованного сочетанием алюминиевого сплава (деталь Кольцо) со стекловолкнитом, поступает сборочная единица, обрабатываемые поверхности которой состоят из трех разнородных конструкционных материалов.

По существующей технологии, на токарно-винторезном станке мод. 16К20, производится раздельное изготовление детали Основание с последующей обработкой контура по копиру в составе сборочной единицы Корпус, рис. 5.

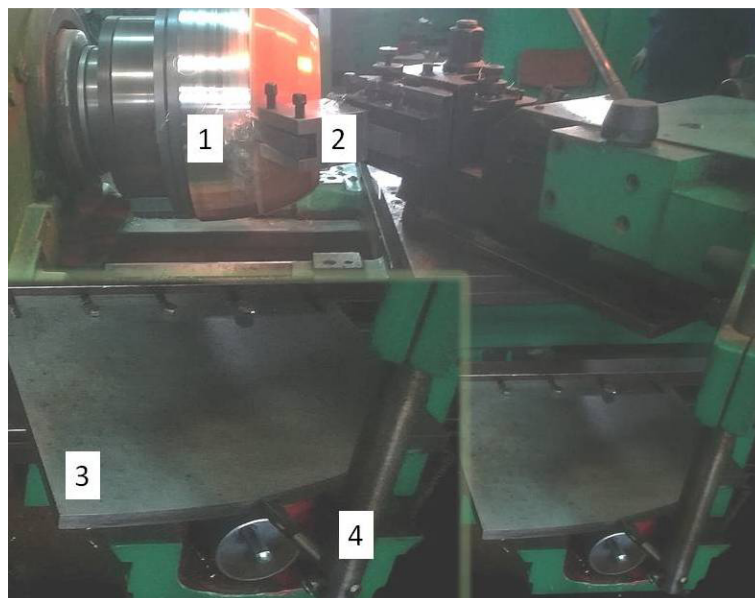


Рис. 5. Технологическая наладка операции точения контура сборочной единицы Корпус: 1 – сборочная единица Корпус; 2 – проходной резец с механическим креплением режущего элемента из T15K6; 3 – копир обрабатываемого контура заготовки; 4 – считывающее устройство управления положением режущего элемента резца в процессе точения

Резец из твердого сплава с радиусной формой вершины режущего элемента и густой смазкой эмульсолом (для лучшего стружкодробления и сохранения стойкости инструментального материала), первоначально обрабатывает участок алюминия, а затем участок стекловолкнита. В результате на стыке материалов формируется перемычка, которую приходится устранять дополнительными проходами резца. Точность обработки определяется точностью копира и настройкой считывающего механизма управления процессом точения.

К недостаткам существующего способа обработки следует отнести: низкую производительность (стойкости инструментального материала T15K6 практически хватает на обработку контура только одной сборочной единицы); необходимость удаления перемычки на стыке площадки перепада припуска; вибрации, возникающие при обработке торцевой поверхности с элементами прерыва.

Процесс точения переведен с универсального оборудования на станок с программным управлением мод. TAKISAWA TS – 4000YS. Последовательность принимаемых при этом решений показана на рис. 1.

Обработка на станке с ЧПУ с рациональными условиями настройки резца позволяет предельно точно следовать заданному в управляющей программе контуру. Данное оборудование сочетает в себе возможность работы на сверхнизких подачах до 0,001 мм и высоких скоростях резания. Обладает высокой жесткостью, точностью позиционирования и повторяемостью. Отпадает необходимость в изготовлении копиров и приспособлений.

#### Выводы

Широкий диапазон технических характеристик станка с ЧПУ и применение резцов с демпфированием с условиями оптимального контакта резец-заготовка, позволили придать устойчивый характер процессу точения прерывистых поверхностей в диапазоне скоростей 6,0...7,0 м/с; подач 0,05 мм/об и глубины резания до 0,2 мм, поднять производительность до трех раз и тем самым



реализовать потенциальные возможности инструментального материала композит для получения точности обработки не грубее 7-го качества при показателе шероховатости  $Ra \leq 1,25$  мкм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2457078 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Универсальный демпфирующий резец / Новиков С. Г., Кудряшов Е. А., Яцун Е. И., и др.; заявитель и патентообладатель «Юго-Западный государственный университет» – №2010145193/02; заявл. 03.11.2010; опубл. 27.07.2012; Бюл. №21. – 8 с.
2. Пат. 2479385 Российская Федерация, МПК В23В 27/00. Демпфирующий резец с регулируемой жесткостью / Новиков С. Г., Малыхин В. В., Кудряшов Е. А., и др.; заявитель и патентообладатель «Юго-Западный государственный университет» – №2011141683/02; заявл. 13.10.2011; опубл. 20.04.2013; Бюл. №11. – 9 с.
3. Кудряшов Е. А. Технологические преимущества инструментального материала композит при обработке конструктивно сложных поверхностей // Известия ВолгГТУ. 2010. № 12. С. 15–20.
4. Кудряшов Е. А., Лукин Д. Ю., Павлов Е. В. Преимущества лезвийной технологии обработки деталей инструментом из композита // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. №5. С. 77–80.
5. Кудряшов Е. А., Павлов Е. В., Яцун Е. И. Технологические особенности лезвийной обработки режущими инструментами, оснащенными композитами // Международный станкостроительный форум «Современные тенденции в технологиях и конструкциях металлообрабатывающего оборудования»: Сб. тез. докл. М: ЦВК «Экспоцентр». 2011. С.15–20.
6. Кудряшов Е. А., Смирнов И. М. К вопросу выбора рациональной марки инструментального материала // Системы. Методы. Технологии. 2014. № 2 (22). С. 118–125.
7. Смирнов И. М. Инструментальное обеспечение процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин. – М.: Триумф, 2014. – 128 с.
8. Кудряшов Е. А., Яцун Е. И., Павлов Е. В. и др. Повышение эффективности работы инструментов из сверхтвердых материалов в сложных технологических условиях // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XVII междунар. научно-техн. конф. ДонНТУ. 2010. Т.2. – С. 51-55.
9. Кудряшов Е. А. Технологическое оснащение процессов изготовления конструктивно сложных деталей: монография/Е. А. Кудряшов, С. Г. Емельянов, Е. И. Яцун. – Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2013. – 268 с.
10. Смирнов И. М. Повышение эффективности процессов механической обработки конструктивно сложных деталей машин. – М.: Триумф, 2012. – 224 с.

УДК 621. 91

**В. Ф. Макаров, Г. Д. Петухов**

#### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СКОРОСТНОГО ПРОТЯГИВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СБОРНЫХ ПРОТЯЖЕК**

**Пермский национальный исследовательский политехнический университет**

Приведены результаты разработки новой сборной конструкции протяжки с неперетачиваемыми твердосплавными пластинками для обработки замковых поверхностей лопаток из титановых сплавов на повышенных скоростях резания.

**Ключевые слова:** протяжка, сборная конструкция, твердосплавная пластинка, скорость резания, протягивание.

Results of development of a new modular design of the broach with hard alloy plates for processing lock surfaces of blades from titanic alloys on the raised speeds of cutting are resulted.

**Keywords:** broach, assembly construction, hard alloy plates, cutting speed, broaching.

В авиационном двигателестроении наиболее ответственные узлы компрессора и турбины состоят из большого числа дисков и лопаток, соединенных с помощью специальных профильных замковых соединений типа «ласточкин хвост» (рис. 1). Эти поверхности относятся к наиболее нагруженным и ответственным элементам ГТД. Самым производительным и высококачественным методом обработки таких поверхностей является процесс протягивания.

Анализ состояния и перспектив развития процессов протягивания показал, что основным направлением повышения эффективности этого процесса является интенсификация процесса резания на основе увеличения скоростей резания и применения протяжек со сменными многогранными твердосплавными пластинами. Для реализации этого процесса проектирование, моделирование и расчет конструкций протяжек с механическим креплением твердосплавных пластин.

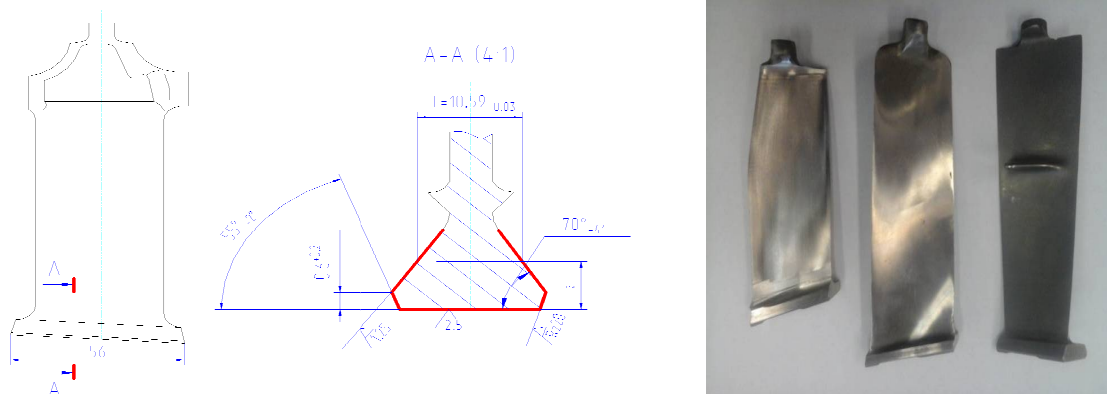


Рис. 1. Конструкторско-технологические требования к поверхностям замков лопаток компрессора двигателя ПС90 2А из титанового сплава ВТ8, обрабатываемых скоростным протягиванием

При выполнении операции скоростного (26–30 м/мин) протягивания замков лопаток компрессора из жаропрочных и титановых сплавов ЭИ 787ВД, ВЖЛ14 и ВТ8 в настоящее время разработаны и применяются специальные конструкции протяжек с напайными пластинками из твердого сплава ВК8 вместо применяемых ранее быстрорежущих протяжек (рис. 2).

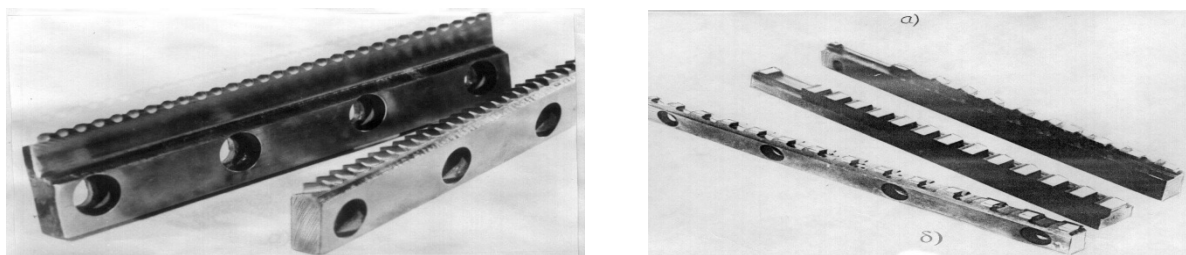


Рис. 2. Общий вид быстрорежущих (а) и твердосплавных с напайными пластинками (б) протяжек для обработки замков лопаток компрессора

Протяжки в виде отдельных секций устанавливаются в один протяжной блок и за один проход обрабатывают сразу все пять поверхностей замка лопатки. Однако длительная эксплуатация твердосплавных протяжек с напайными пластинками выявила целый ряд проблем. Среди них нужно отметить следующие:

- В процессе напайки и заточки зубьев протяжек часто образуются термические трещины в твердом сплаве от нагрева и резкого охлаждения;
- Износ протяжек неравномерный и имеет различные виды одновременно в виде площадок износа, выкрашиваний или случайного излома кромок. В результате нарушается высота зубьев, изменяется подача на зубьях, наблюдается лавинообразное разрушение последующих зубьев, ухудшается шероховатость обработанной поверхности, возможен брак деталей;
- При таком износе переточка протяжек проводится неравномерно по передней и задней поверхности индивидуально для каждого зуба, что изменяет чертежные перепады между зубьями;
- Хрупкое катастрофическое разрушение одного – двух зубьев протяжки приводит к съему и замене всей протяжки. Корпус протяжки повторно не используется, а отправляется в металлолом;
- В механическом цехе для организации переточки протяжек требуется иметь отдельное заточное отделение с квалифицированными рабочими, высокоточным оборудованием, высококачественными алмазными кругами и приборами контроля качества заточки зубьев протяжек.

В то же время при обработке деталей газотурбинных двигателей широко и успешно применяются сборные конструкции различных режущих инструментов с неперетачиваемыми пластинками из различных твердых сплавов – токарные резцы, фрезы, сверла.

Для проектирования, изготовления и внедрения в производство протяжек со сменными многогранными пластинами из твердого сплава выполнены следующие теоретические и экспериментальные исследования:

- Проведено исследование жесткости различных схем и способов установки и крепления сменных многогранных пластин и выбран наиболее рациональный способ крепления винтом сверху;
- Установлены основные закономерности и взаимосвязи между режимами резания и изменениями силы резания и процессом стружкообразования, необходимые для проектирования и расчета параметров сборных протяжек;
- Разработана методика проектирования и расчета параметров новых конструкций сборных протяжек для обработки замков лопаток ГТД с учетом применения повышенных до оптимального значения скоростей резания;
- Спроектированы и изготовлены и успешно испытаны опытные образцы сборных протяжек с СМП.

В результате анализа литературы и опыта эксплуатации сборного режущего инструмента установлено, что сборные инструменты с СМП, по сравнению с напайными, наиболее надежны и долговечны, обеспечивают экономию инструментального материала и конструкционной стали, меньшее рассеяние стойкости, большую производительность (на 15...20 %). Они применяются при меньших подачах, но во всех случаях при большей скорости резания, что и обеспечивает рост производительности обработки.

Применение СМП дает ряд преимуществ:

- Значительное увеличение срока службы державки инструмента (до 400 смен режущих кромок);
- Максимальная унификация и взаимозаменяемость составных элементов, сокращение номенклатуры режущих пластин;
- Исключение из производственного процесса трудоемких операций пайки и заточки, требующих дополнительных трудозатрат специальных участков, технологической оснастки, оборудования и абразивного инструмента;
- Сокращение времени простоя протяжных станков для смены и переточки режущих кромок зубьев (поворотом или заменой СМП);
- Оптимизация выбора параметров стружечной канавки с учетом усадки стружки, формы и размеров стружечных валиков
- Сокращение расхода твердых сплавов и увеличение их возврата при утилизации до 90 %;
- Возможность повышения режимов обработки при сохранении качества обрабатываемой поверхности за счет использования пластин с износостойким покрытием.

Проведены исследования схем и жесткости горизонтального крепления режущих пластин на сборных конструкциях других режущих инструментов. Рассматривались схемы крепления винтом сверху, методом косой тяги, клиновое крепление, напайное крепление, крепление силами упругой деформации и др. По результатам испытаний наилучшие результаты по жесткости показал метод крепления пластин винтом сверху по схеме на рис. 3.

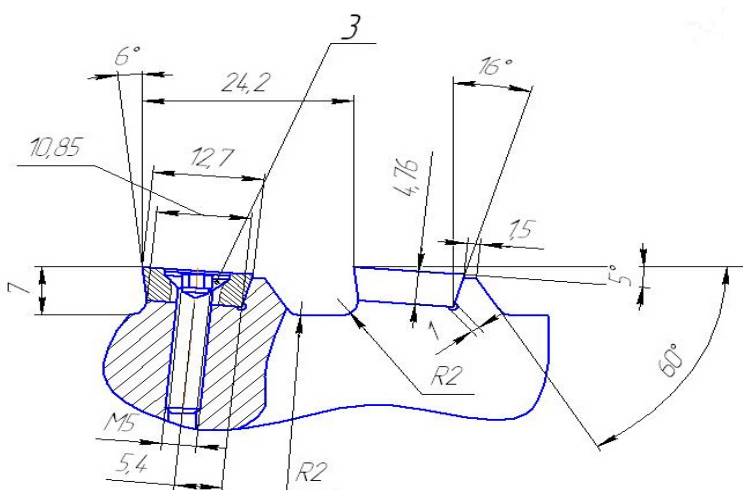


Рис. 3. Схема крепления многогранной сменной пластинки на корпусе протяжки

Такое конструктивное решение привело к предельно малому количеству деталей узла крепления пластин, его компактности и малым габаритам. Ось резьбового отверстия крепежного винта смещена в сторону неподвижного упора в виде стенок гнезда державки на расстояние около 0,15 мм. Вследствие этого, при закручивании винта режущая пластинка перемещается к неподвижному упору, прижимается к нему и к основанию гнезда державки. По разработанным чертежам впервые в авиационном моторостроении в инструментальном цехе ОАО «ПМЗ» была изготовлена опытная сборная протяжка с механическим креплением пластинок (рис. 4), показавшая хорошие результаты при испытаниях.

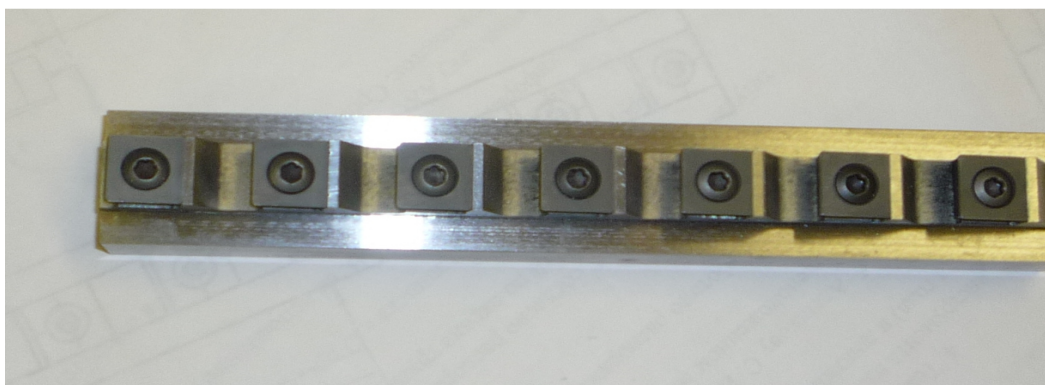


Рис. 4. Общий вид сборной протяжки с СМП для обработки замка лопатки

Испытание опытной конструкции протяжки показало положительные результаты. Работа продолжается с целью полного перехода процесса скоростного протягивания на сборные протяжки с механическим креплением СМП при протягивании замков лопаток из титанового сплава BT8 и жаропрочных сплавов ЭИ787ВД и ВЖЛ14 для двигателей ПС90-2А и ПД14.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пронкин, Н.Ф. Протягивание труднообрабатываемых материалов/ Н.Ф. Пронкин. – М.: Машиностроение, 1978. – 119 с.
2. Макаров, В.Ф. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки: монография / В.Ф.Макаров [и др.] –М.: Машиностроение, 2011. – 327 с.
3. Макаров В.Ф. Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов: монография/В.Ф. Макаров. - Старый Оскол: ТНТ, 2014. -440 с.

УДК 621.9

**А. Г. Наумов, В. В. Новиков, В. С. Раднюк, О. А. Наумова**

#### **О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МИКРОКАПСУЛИРОВАННЫХ СОТС ПРИ ЛЕЗВИЙНОМ РЕЗАНИИ МАТЕРИАЛОВ**

**Ивановский государственный университет**

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по возможности применения в качестве СОТС магнитных микрокапсул.

*Ключевые слова:* смазочно-охлаждающие технологические средства, резание материалов, микрокапсулы.

This article states the results by experiment and theory regarding the possibility of application of the magnetic microcapsules as a cutting fluid.

*Keywords:* cutting fluid, cutting of metal, microcapsules.

Микрокапсулы (МК), как носители веществ, достаточно широко используются в мировой практике в таких отраслях как химическая промышленность, медицина, сельское хозяйство.

В машиностроении основной областью использования МК являются операции обработки давлением [1]. О применении МК при резании сведения весьма ограниченные. Выявлено лишь два случая использования МК на операциях стружкоотделения [2, 3].

В настоящей работе представлены результаты исследований по применению микрокапсулированных СОТС (МК СОТС) на операциях лезвийного резания, т.е. при подаче микродоз СОТС, каждая из которых окружена оболочкой из непроницаемого для него материала. Размеры МК варьировались в пределах от сотен нанометров до 30-50 мкм. Для повышения эффективности их действия в состав МК были дополнительно введены магниточувствительные компоненты, в качестве которых использовался магнетит  $Fe_3O_4$  с размерами частиц порядка 10-15 нм - магнитные микрокапсулы (ММК).

Изучение направления движения ММК в реальных условиях резания проводилось по внешнему виду рабочих поверхностей резцов после точения сплава ВТ6. Установлено, что при использовании 1%-ной суспензии ММК рабочие поверхности резца были покрыты слоем вещества, представляющего собой полимер оболочек ММК, подвергнутый термической деструкции. Его количество увеличивалось по мере приближения к режущим кромкам, как по передней, так и по задним поверхностям. Максимум фиксировался вблизи вершины инструмента. Использование 4%-ной суспензии немагнитных МК (без магнетита) при аналогичных условиях резания приводило к появлению темных фрагментов только по передней поверхности, причем их распределение носит вероятностный характер.

Определение скорости дрейфа микрокапсул производилось с помощью ячейки Керра. Для придания ММК движения в электрических полях в состав жидкого носителя дополнительно вводилось поверхностно-активное вещество ДНСА. в концентрации, не превышающей критической концентрации мицеллообразования (рис. 1). В этом случае на контакты ячейки подавалось напряжение в пределах от 0 до 26 В. При использовании постоянного магнитного поля, напряженность которого изменялась от 0 до 7545 А/м, его возбуждение осуществлялось посредством электромагнита.

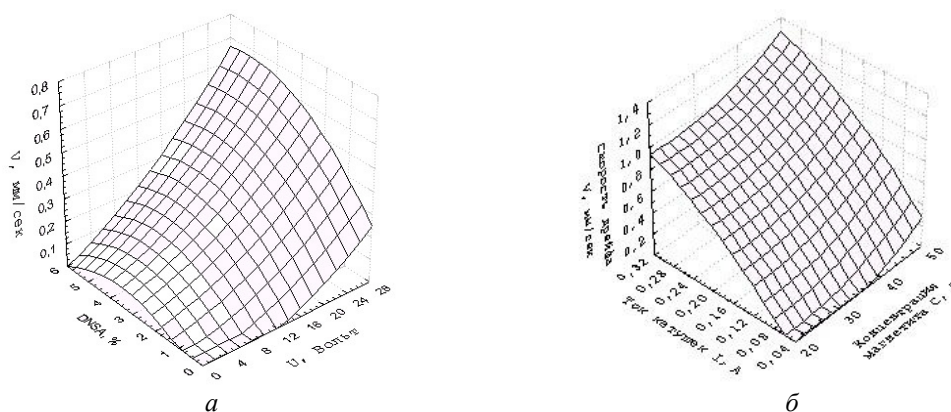


Рис. 1. Скорость движения ММК в электрическом (а) и магнитном (б) полях

Изучение характеристик процесса резания и стойкости инструментов в реальных условиях проводилось на операциях точения и сверления в лабораторных и производственных условиях. Микрокапсулы подавались в зону резания в виде суспензии в дистиллированной воде капельным методом.

Установлено, что применение МК СОТС с концентрацией ММК от 1,0 % до 4,0 % (рис. 2) способствует эффективному повышению стойкости режущих инструментов не только по сравнению с резанием всухую, но и при использовании стандартных водоземulsionных и масляных СОТС. Дальнейшее увеличение количества ММК практически не оказывало заметного влияния на повышение работоспособности инструментов.

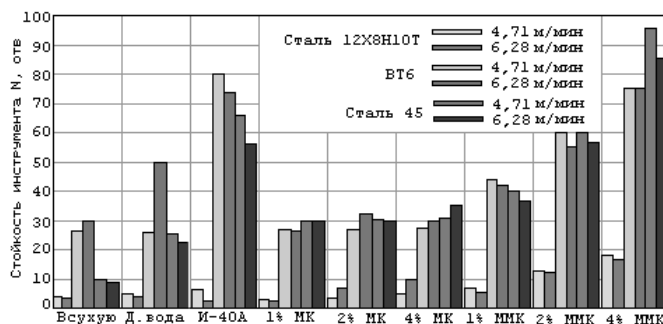


Рис. 2. Гистограмма стойкости сверл из БС Р6М5 при сверлении всухую и с применением СОТС



Одним из основных параметров процесса резания является качество обработанных поверхностей, в частности, величина и знак остаточных напряжений. Исследованиями, проведенными в производственных условиях ММПП "Салют" [4] установлено, что применение ММК СОТС имеет показатели не хуже по сравнению с другими СОТС при высокой повторяемости результатов (рис. 3).

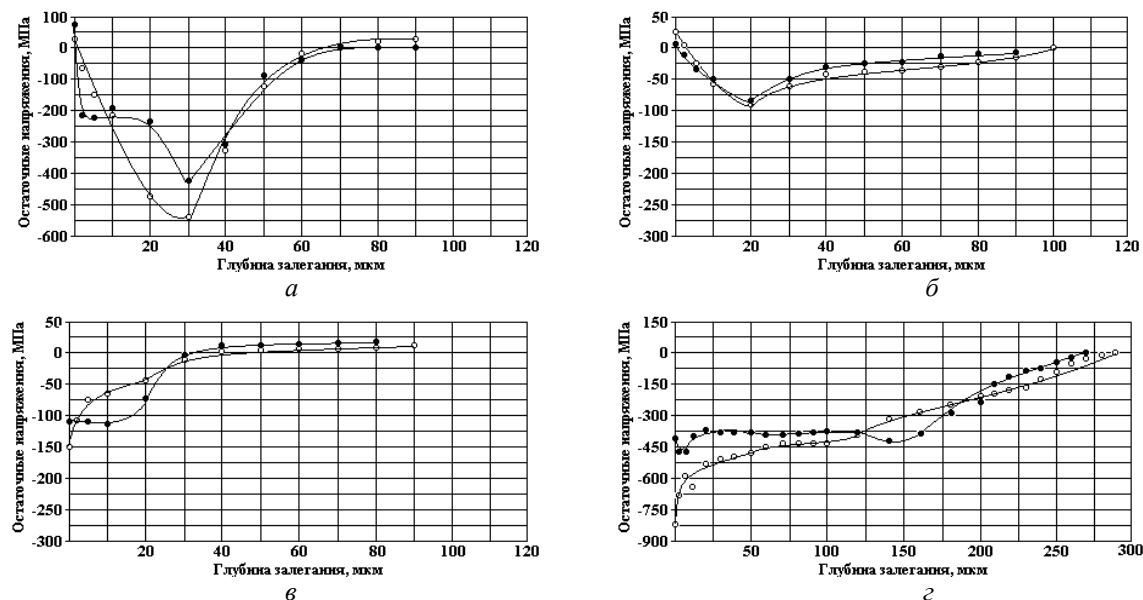


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений в образцах сплава ВТ9 после точения резцами ВК-60М с использованием в качестве СОТС: а – сжатого воздуха; б – ММК СОТС; в – ионизированной воздушной среды; г – упрочняющей дробеструйной обработки шариками D = 3 мм

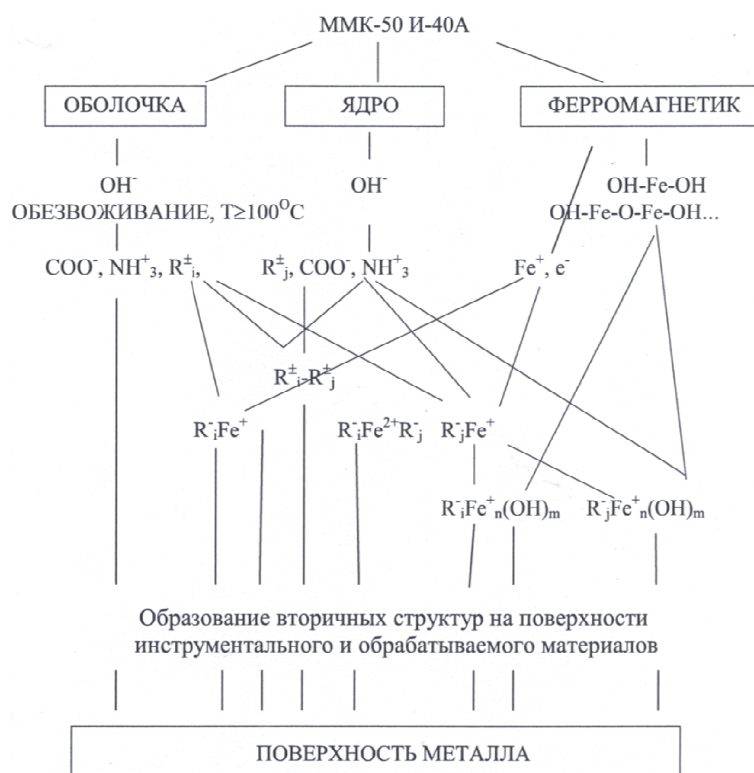


Рис. 4. Модель активации протекания радикально-цепных реакций при использовании магнитных микрокапсул

Механизм действия ММК при резании достаточно сложен и, по нашему мнению, имеет в своем основании совместное действие всех компонентов, входящих в состав ММК (рис. 4), активиро-

ванное протеканием радикально-цепных реакций в зоне контакта. Это подтверждается данными экспериментов по трению и резанию, при проведении которых в качестве смазочных материалов использовались отдельные компоненты МК; результатами исследований по замене магнетита на немагнитные вещества, электронной микроскопией и термографическими исследованиями, которые показали на протекание в зоне контакта сложных параллельно идущих химических реакций.

#### Заключение

Рассмотренный в данной работе вопрос о возможности подачи СОТС при резании металлов в виде магнитных микрокапсул и их влияния на процессы контактного взаимодействия относится к одному из направлений, сложившихся в мировой практике и направленных на снижение техногенных рисков и улучшение экологии металлообработки. Конструирование новых составов экологически чистых или экологически безвредных СОТС, техника их применения представляют собой многогранную задачу, решение которой должно базироваться на всестороннем и глубоком изучении физико-химических процессов, протекающих в контактной зоне между инструментальным и обрабатываемым материалами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sertificate N 297596 (Japan). 1990.
2. *Девочкин А.А.* Разработка составов и техники применения смазочно-охлаждающих композиций при обработке резанием молибдена и алюминия // Дис. ... к.т.н. Горький. 1988. 203 с.
3. *Whitney R.A., Colvin V.S., Mulligan J.C.* Two component cutting/cooling fluids for high speed machining / МКИ F 01 М 5/00.
4. *Поклад. В.А., Горелов В.А., Полоскин Ю.В., Петухов А.Н., Верещака А.С., Хаустова О.В.* Влияние условий экологически безопасного резания с охлаждением ионизированной газовой средой на качество поверхностного слоя и долговечность деталей. // В сб. трудов научно-технического симпозиума "Двигатели и экология". М.: 2002.

УДК 621.787.4

*Я. Н. Отений, А. М. Лаврентьев*

#### СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

В данной статье рассматривается сравнение методов определения глубины упрочненного слоя, предложенных различными авторами, при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД) наружных цилиндрических поверхностей. Представлены расчетные зависимости для определения глубины упрочнения при ППД инструментом, в качестве деформирующих элементов которых используются шарики или профильные ролики. Также представлены графики изменения величины упрочнения поверхностного слоя при обработке ППД в зависимости от величины внедрения деформирующего элемента в поверхность заготовки. Показано, что все кривые графиков зависимости за исключением двух С.Г. Хейфеца и М.М. Матлина, С.Л. Лебского, В.А. Бабакова практически совпадают друг с другом.

*Ключевые слова:* поверхностное пластическое деформирование, глубина упрочнения, профильный ролик, шар.

In this paper, a comparison of the methods for determining the depth of a hardened layer, proposed by various authors, is considered for surface plastic deformation (SPD) of external cylindrical surfaces. Calculated dependencies are presented to determine the depth of hardening in a PPD tool, as the deforming elements of which, balls or profile rollers are used. Graphs of the change in the hardening value of the surface layer during the processing of PPD are also presented, depending on the amount of introduction of the deforming element into the surface of the billet. It is shown that all the curves of the dependence curves with the exception of two Heifets SG. And M.M. Matlina, S.L. Lebsky, V.A. Babakova practically coincide with each other.

*Keywords:* Surface plastic deformation, hardening depth, profile roller, ball.

В настоящее время в качестве отделочной обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей большее распространение нашли методы поверхностного пластического деформи-

рования (ППД), позволяющие обеспечить высокое качество поверхностного слоя и низкую шероховатость в пределах  $Ra = 0,16 \dots 0,32$  мкм. [3]

Сущность этого метода состоит в том, что под давлением деформирующего элемента (ролик, шар) более твердого, чем обрабатываемый материал, выступающие неровности обрабатываемой поверхности пластически деформируются – сминаются, при этом шероховатость поверхности уменьшается и образуется новый микрорельеф [7].

Одним из важных показателей качества поверхностного слоя после ППД является глубина упрочнения. Определение ее величины аналитическим методом осуществляется по различным формулам. В литературных источниках наиболее распространенной является формула, полученная Хейфецем [6]

$$h_x = \sqrt{\frac{P_y}{2\sigma_T}}, \quad (1)$$

где  $P_y$  – усилие деформирования;  $\sigma_T$  – предел текучести материала обрабатываемой детали.

Как оказалось в дальнейшем между результатами экспериментальных исследований глубины упрочнения и расчетами, произведенными по формуле Хейфеца, обнаружились существенные расхождения. С увеличением радиусов деформирующего элемента и детали глубина упрочнения уменьшается, причем разница достигают 30 и более процентов. Объяснение этому факту не было найдено. Для учета уменьшения глубины упрочнения с увеличением размеров деформирующего элемента и детали И.В. Кудрявцев предложил ввести в исходную зависимость (1) экспериментально полученную поправку [2]

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,07R_{np}},$$

где  $R_{np} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_{np}} + \frac{1}{r_p}}.$

Тогда формула Хейфеца с учетом поправки Кудрявцева принимает вид

$$h_k = \omega \cdot \sqrt{\frac{P_y}{2\sigma_T}}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус обрабатываемой детали;  $r_{np}$  – профильный радиус ролика;  $r_p$  – радиус ролика.

Формулы (1) и (2) получены для деформирования поверхностного слоя шариками и кольцевыми роликами, которые образуют на поверхности в процессе обработки эллипсный или круговой контакт. Для других форм контактных зон и, в частности, для часто применяемого на практике конического ролика, дающего каплевидный контакт, аналитическая зависимость не найдена, и определяется экспериментально.

Приведенные выше зависимости для определения глубины упрочнения не позволяют в общем случае установить влияние формы и размеров деформирующих элементов на глубину распространения пластической деформации в поверхностном слое. Причина заключается в том, что рассматривается только влияние сосредоточенной силы, которая лишена физического смысла, так как в природе сосредоточенные силы не существуют. При контактировании деталей наблюдаются распределенные по площадям контактные напряжения. Таким образом, необходимо знать фактическое распределение напряжений в контактной зоне.

Для этой цели авторами данной статьи было получено следующее интегральное уравнение для определения глубины упрочнения учитывающее распределение контактных напряжений по площади контакта

$$\sigma_T - \int_0^{L_k} \int_{-z_k}^{z_k} \frac{3\sigma_k \cdot h_{yn}^3}{\pi \left[ \sqrt{z^2 + (l - 0,5L_k)^2 + h_{yn}^2} \right]^5} dz dl = 0, \quad (3)$$

где  $L_k$  – длина контактной зоны;  $z_k$  – закон изменения полуширины контакта по его длине  $l$ ;  $\sigma_k$  – распределение напряжений по площади контакта;  $h_{yn}$  – глубина упрочненного слоя.



Для определения напряжений по площади контакта чаще всего применяют решения упругой задачи Герца известной из теории упругости, при этом полагают, что максимальные напряжения превышают предел упругости на величину, определяемую или уточняемую экспериментально.

С целью установления общих соотношений между методами определения глубины упрочнения представленных формулами (1), (2) и (3) рассмотрим обработку вала профильным роликом. Контактная зона в этом случае ограничена дугой эллипса. Формулы практически всех авторов получены для этого контакта.

Приняв на основе контактной задачи Герца для данного случая закон распределения напряжений по площади контакта в виде [4]

$$\sigma_k = \sigma_m \sqrt{1 - \left( \frac{l - 0.5L_k}{0.5L_k} \right)^2} \sqrt{1 - \left( \frac{z}{z_k} \right)^2} \quad (4)$$

найдем усилие деформирования, приходящееся на площадь контакта

$$P_y = \int_0^{L_k} \int_{-z_k}^{z_k} \sigma_m \sqrt{1 - \left( \frac{l - 0.5L_k}{0.5L_k} \right)^2} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{z}{z_k} \right)^2} dz dl. \quad (5)$$

Длина контакта и изменение его полуширины в зависимости от радиуса ролика, профильного радиуса ролика и радиуса детали могут быть записаны в виде

$$L_k = 2\sqrt{r_{np}^2 - (r_{np} - h_m)^2}, \quad (6)$$

$$z_k = \sqrt{R^2 - \left[ \frac{(R - r_p)(R - h_k)}{R + r_p - h_k} \right]^2}. \quad (7)$$

Изменение радиуса ролика и глубины его внедрения по длине контакта определяются из зависимостей:

$$r_p = r_m - h_m + h_k; \quad (8)$$

$$h_k = h_m - r_{np} + \sqrt{r_{np}^2 - (0.5L_k - l)^2}. \quad (9)$$

Представим изменение профильного радиуса ролика, а также радиусов ролика и вала в виде функций от параметра  $k$ . Тогда все вышеприведенные зависимости тоже будут функциями этого параметра.

Как следует из графиков приведенных на рис. 1 глубина упрочнения, определяемая по формуле (3), в которой учитывается распределенное напряжение достаточно хорошо согласуется с формулой предложенной И.В. Кудрявцевым. Разность между кривыми может быть объяснена погрешностями экспериментальных исследований.

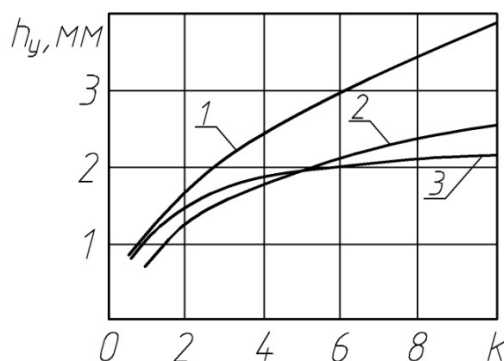


Рис. 1. Влияние параметра  $k$  на глубину упрочнения:  
1 — по Хейфецу, 2 — от распределенных напряжений по площади контакта, 3 — по Кудрявцеву

Увеличение глубины упрочнения с увеличением приведенного радиуса объясняется одновременным увеличением суммарного усилия деформирования.

Для практического расчета глубины упрочнения в случае обработки деталей роликами образующими произвольную контактную зону может быть рекомендована следующая последовательность расчетов.

Сначала устанавливают геометрические параметры контактной зоны и распределение напряжений по площади контакта. Затем определяют распределение напряжений по глубине поверхностного слоя по интегральной зависимости, входящей в уравнение (3) или с учетом эквивалентных напряжений. Строят график изменения напряжений по глубине упрочнения поверхностного слоя, на котором проводят горизонтальную прямую (на рис. 2 пунктирная линия), соответствующую пределу текучести обрабатываемого материала. Точка пересечения этой прямой с кривой, изменения напряжений по глубине поверхностного слоя определит координату распространения пластических деформаций в теле детали.

Указанная методика была применена для расчета глубины упрочнения при обработке вала диаметром 40 мм, профильным роликом при переменной глубине его внедрения.

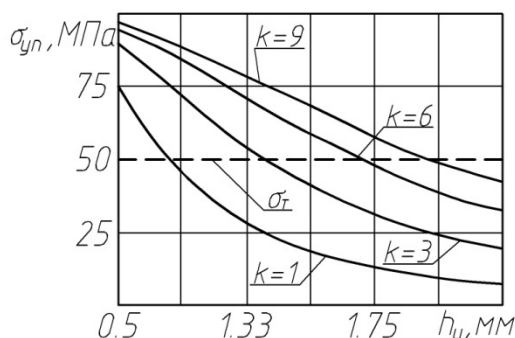


Рис. 2. Изменение напряжений по глубине поверхностного слоя при различных значениях коэффициента  $k$ , учитывающего размеры контактной зоны

Полученные результаты по формуле (3) сравнивались при одинаковых для всех случаев условиях с результатами расчетов по формулам Хейфеца (1), И. В. Кудрявцева (2), М. С. Дрозда, М.М. Матлина, Ю.И. Сидякина. [1]

$$h_d = k \sqrt{\frac{P_e}{2\sigma_T} - 1,42 \cdot z_{km} \cdot 0,5L_k}, \quad (10)$$

где

$$k = 1 - 0,5 \left( 1 - \frac{z_{km}}{L_k} \right)^4,$$

по формуле Папшева Д.Д. [5]

$$h_n = k_n \sqrt{S_k} \quad \kappa=1.2 \quad (11)$$

по формуле М.М. Матлина, С.Л. Лебского, В.А. Бабакова

$$h_m = 2,87 \frac{q_c}{114} - 0,01r_p. \quad (12)$$

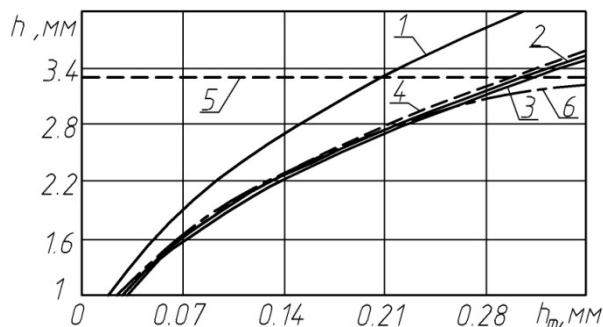


Рис. 3. Изменения глубины упрочнения от глубины внедрения профильного ролика в поверхность вала ( $D_b=40$  мм) по данным различных авторов и предложенной в данной работе методике при одних и тех же условиях обработки. Предел текучести обрабатываемого материала  $\sigma_T = 240$  МПа. 1 – по С.Г. Хейфецу, формула (1), 2 – по И.В. Кудрявцеву, формула (2), 3 – по формуле М. С. Дрозда, М.М. Матлина, Ю.И. Сидякина (10), 4 – по Д.Д. Папшеву, формула (11), 5 – по формуле (12) М.М. Матлина, С.Л. Лебского, В.А. Бабакова, 6 – по формуле (13)

На рис. 3 приведены графики зависимостей изменения глубины упрочнения от величины внедрения деформирующего элемента в наружную цилиндрическую поверхность.

Как видно из представленных на рис. 3. графиков все кривые за исключением двух зависимостей- Хейфеца С.Г.(1) и М.М. Матлина, С.Л. Лебского, В.А. Бабакова (12) практически совпадают друг с другом. Незначительное уменьшение глубины упрочнения по формуле (3) с увеличением глубины внедрения деформирующего элемента объясняется увеличением площади контакта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчеты упруго-пластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. - 224 с.
2. Кудрявцев И. В. Повышение прочности стальных деталей обкаткой, М: Машгиз, 1948.- 183 с.
3. Лаврентьев А.М. Исследование влияния обработки поверхностным пластическим деформированием на геометрическую точность наружных цилиндрических поверхностей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 12-5.
4. Отений Я.Н., Никифоров Н.И., Лаврентьев А.М. Обеспечение точности формы при обработке ротационным обжатием длинных толстостенных труб. - Упрочняющие технологии и покрытия. - 2012.-№ 7. - С. 12-16.
5. Папиев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. -М. Машиностроение, 1978. 152 с.
6. Хейфец С. Г. Аналитическое определение глубины наклепанного слоя. В сб. ЦНИИТмаш. - М.: Машгиз, 1952, кн. 49, С. 7-17.
7. Шнейдер Ю.Г. Инструмент для чистовой обработки металлов давлением. – Л: Машиностроение, 1971. – 248 с.

УДК 621.822

**Я. Н. Отений, А. Ю. Вершинин, В. Ф. Казак**

#### **АНАЛИЗ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕЖДУ ЦАПФОЙ И ОБОЙМОЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАРАХ ТРЕНИЯ**

**Камышинский технологический институт (филиал)  
Волгоградский государственный технический университет  
Филиал ОАО «Газэнергосервис» – завод «Ротор»**

В данной статье приведен анализ различных методик расчета контактных напряжений между цапфой и опорным кольцом цилиндрической пары трения по математическим моделям, полученным различными авторами и приведенным в литературных источниках. В качестве исследовательской задачи авторами была определена попытка оценить влияние зазора между цапфой и опорным кольцом трущейся пары трения, а также сходимость результатов для трех различных расчетных математических моделей. На основе анализа установлено, что значения контактных напряжений, также как и ширина контакта, для одних и тех же расчетных размеров цапфы и отверстия опорного кольца значительно отличаются друг от друга. Данная проблема недостаточно изучена и требует дальнейших исследований с целью выявления адекватности теоретического определения действительных контактных напряжений и ширины контакта с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** подшипники скольжения, методика, расчет контактных напряжений, ширина контакта.

In this paper, an analysis is given of various methods for calculating contact stresses between a trunnion and a supporting ring of a cylindrical pair of friction using mathematical models obtained by various authors and cited in the literature. As an investigation task, the authors determined an attempt to estimate the influence of the gap between the trunnion and the support ring of a rubbing friction pair, as well as the convergence of the results for three different computational mathematical models. Based on the analysis it was established that the calculated values of contact stresses, as well as the contact width for the same trunnion dimensions and the holes of the support ring, differ significantly from each other. This problem has not been adequately studied and requires further research to determine the adequacy of the theoretical determination of the actual contact stresses and contact widths with experimental data.

**Keywords:** sliding bearings, technique, calculation of contact stresses, contact width.

В различных машинах и механизмах большое распространение получили подшипники качения. Однако они имеют ряд недостатков, заложенных непосредственно в их конструкции. Между бегущими дорожками и телами качения, заключенными между ними, необходимо обеспечение гарантированных зазоров, которые служат для предотвращения заклинивания при температурных

деформациях. Это приводит к возникновению вибраций в процессе работы. За счет этих же зазоров не обеспечивается достаточно высокая точность базирования, возникают биения и гироскопические эффекты. Все эти недостатки привели к созданию и широкому применению подшипников скольжения (цилиндрических пар трения). Они имеют простую конструкцию, технологичны в изготовлении, удобны для сборки. Коэффициент скольжения при условии достаточно хорошей смазки достигает значений соответствующего коэффициенту качения. Главным недостатком подшипников скольжения является возникновение силы трения скольжения, вследствие чего необходимо обильная смазка для снижения износа и температуры.

Таким образом, определение геометрических параметров контактной зоны и действующих на контактных поверхностях цилиндрических пар трения напряжений является важной и ответственной задачей, от которой зависит точность и достоверность дальнейших расчетов.

Наиболее распространенной и простой методикой в инженерных расчетах является определение среднего давления в контакте и произведение этого давления на скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей:

$$\sigma_c = \frac{P}{D \cdot L_c}; \quad (1)$$

$$C_{qv} = \sigma \cdot V, \quad (2)$$

где  $P$  – радиальная сила, действующая на цапфу;  $D$  – диаметр кольца цилиндрической пары трения;  $L_c$  – длина цапфы, находящаяся в контакте с кольцом;  $\sigma$  – напряжения в контакте;  $V$  – скорость перемещения наружной поверхности цапфы относительно поверхности кольца опоры.

Значения величин  $Q$  и  $V$  определяются служебным назначением цилиндрической пары и не могут быть изменены. Из формул (1) и (2) снижение контактного напряжения и его произведения на скорость при заданной радиальной силе возможно только за счет увеличения площади контакта, что влечет за собой увеличение диаметра цапфы и ее длины. Однако, это приводит к изменению габаритов цилиндрической пары, что во многих случаях недопустимо по конструктивным соображениям.

Другое направление снижения контактных напряжений связано с исследованиями особенностей контакта цилиндрической пары трения.

На рис. 1, *а* показаны распределения контактных напряжений  $\sigma_c$ , рассчитываемых по формуле (1), на рис. 1, *б* – фактическая схема нагружения цапфы.

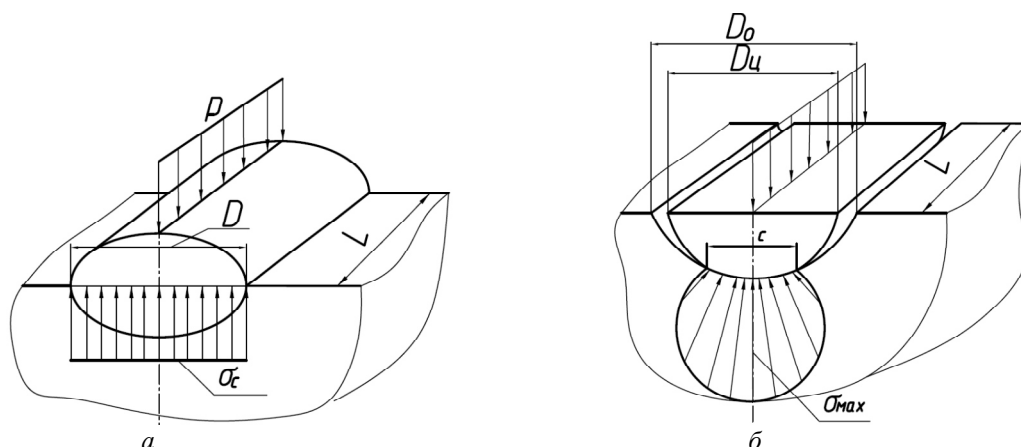


Рис. 1. Установка цапфы в обойме подшипника скольжения:  
*а* – принимаемая для расчета среднего давления  $\sigma_c$ ; *б* – фактическая схема нагружения

На работоспособность цилиндрической пары трения главным образом влияет не среднее, а максимальное напряжение в контакте  $\sigma_{\max}$ . При анализе особенностей контакта в цилиндрической паре скольжения (рис. 1) становится ясно, что расчет среднего давления в контакте по формуле (1) дает лишь приблизительные результаты, что определяется несколькими причинами: форма контакта является круговой, а не плоской, контакт осуществляется не по всей окружности полукольца, а распределение напряжений является неравномерным по длине дуги окружности.

Определение среднего напряжения по указанным формулам основывается на представлении, что за счет малых зазоров цапфа и обойма цилиндрической пары соприкасаются практически по полным своим поверхностям. На самом деле, даже если обе поверхности полностью соприкасаются друг с другом, поверхность контакта является частью цилиндра. Этот предельный случай невозможно обеспечить по технологическим причинам. При обработке деталей всегда имеются погрешности, а цапфа должна быть установлена с гарантированным зазором. Повышение точности обработки не выгодно по экономическим соображениям.

Таким образом, необходимо установление фактических площадей контакта в цилиндрической паре скольжения при изменении зазоров в пределах заданных посадок и определение действительных средних и максимальных напряжений.

Количественное определение величин для исследования указанных особенностей можно осуществить на основе известных зависимостей для решения упругой контактной задачи, например задачи Герца. Для вычисления полуширины контакта  $c$  и максимальных напряжений в центре контакта  $\sigma_{\max}$  с учетом зазоров в посадке цилиндрической пары скольжения формулы Герца имеют вид.

$$c = 1,08 \cdot \sqrt{\frac{p}{E} \cdot \frac{D_{\kappa} \cdot D_{\delta}}{D_{\kappa} - D_{\delta}}}. \quad (3)$$

$$\sigma_{\max} = 0,59 \cdot \sqrt{p \cdot E \frac{D_{\kappa} - D_{\delta}}{D_{\kappa} \cdot D_{\delta}}}, \quad (4)$$

где  $p$  – погонная нагрузка, приложенная к цапфе, равная отношению радиальной силы к длине цапфы;  $D_{\delta}$ ,  $D_{\kappa}$  – диаметры цапфы и опорного кольца;  $E$  – модуль упругости материалов цапфы и кольца цилиндрической пары.

Возможность применения теории Герца для решения контактной задачи ограничивается наличием незначительных зазоров в соединении и отсутствием четко установленных критериев границ применимости этой теории при уменьшении зазоров. Существует мнение, что достоверные результаты могут быть получены, если угол контакта не превышает 30 градусов. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Между диаметрами цапфы и опорного кольца обоймы, на которую опирается цапфа, существует зависимость

$$D_{\delta} = D_{\kappa} - \delta, \quad (5)$$

где  $\delta$  – диаметральный зазор между цапфой и кольцом. С учетом этого соотношения формулы (3) и 4) примут вид

$$c = 0,8 \cdot \sqrt{\frac{p}{E} \cdot \frac{D_{\kappa}^2 - D_{\kappa} \cdot \delta}{\delta}}. \quad (6)$$

$$\sigma_m = 0,798 \cdot \sqrt{p \cdot E \cdot \frac{\delta}{D_{\kappa}^2 - D_{\kappa} \cdot \delta}}. \quad (7)$$

Анализ этих зависимостей показывает, что при стремлении величины зазора к нулю ширина контакта стремится к бесконечности, а максимальное напряжение стремиться к нулю.

Величина зазора зависит от выбранной посадки. Из всех возможных посадок минимально возможное значение диаметрального зазора равно  $\delta = 0,025$  мм. Это значение и принято в дальнейших расчетах. Для зазоров больших этого значения, очевидно, контактная площадь будет уменьшаться, а напряжения увеличиваться.

Максимальные напряжения в контакте зависят от диаметра подшипника и величины радиального зазора при заданной силе нагружения цапфы. Величина зазора зависит от выбранной посадки и от диаметра отверстия подшипника.

Помимо формул для определения контактных напряжений приведенных выше существует еще одно решение, приведенное в теории упругости [3]

Любой элемент малой поверхности, расположенный на расстоянии  $r$  от точки приложения силы, подвергается простому сжатию в радиальном направлении. Компоненты напряжения определяются при этом формулой:

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi} \cdot \frac{\cos \varphi}{r}. \quad (8)$$

Если выделить в полубесконечном теле поверхность в виде полуцилиндра, диаметр которой будет равен диаметру цапфы (рис. 2), то напряжения, на поверхности этого полуцилиндра будут тоже вычисляться по формуле (8). Максимальное значение контактного напряжения будет при значении угла  $\varphi=0$ .

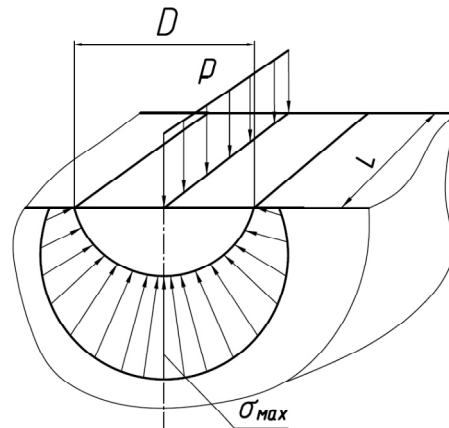


Рис. 2. Вариант распределения напряжений, описываемый формулами (10)

Расчеты по приведенным выше формулам производились на ЭВМ с применением прикладного программного обеспечения Mathcad.

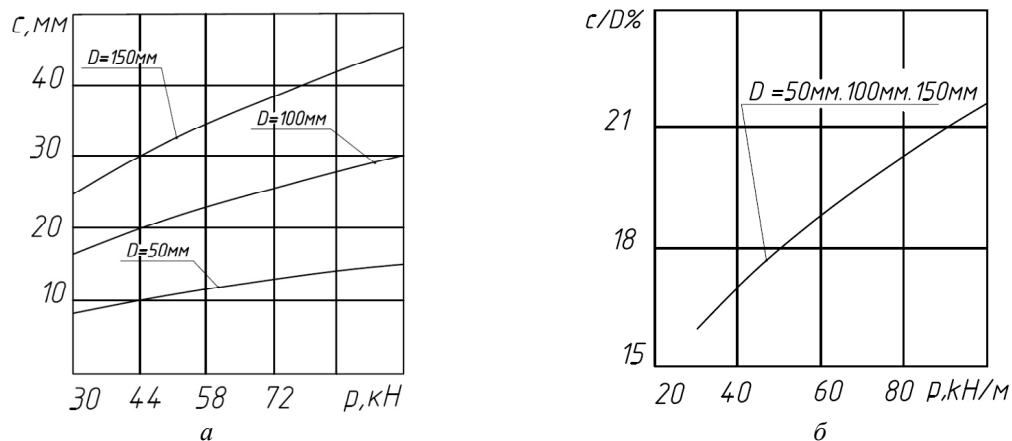


Рис. 3. Изменение ширины контакта между цапфой и обоймой и процентного отношения ширины контакта к диаметру вала в зависимости от приложенной нагрузки различных диаметров соединений

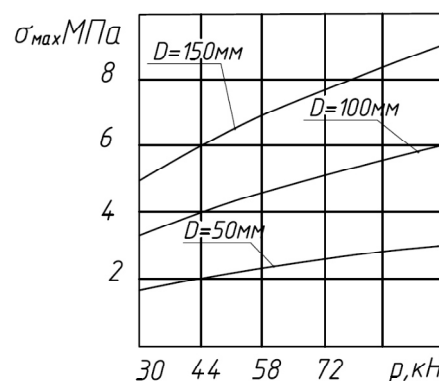


Рис. 4. Изменение максимальных напряжений от погонного давления действующего на вал и диаметров обоймы цилиндрической пары трения

Оказалось, что действительная ширина контакта между цапфой и опорным кольцом цилиндрической пары существенно меньше диаметра отверстия кольца, который принимают за ширину контакта при расчетах по приведенным в справочниках методиках и не превышает 30 % (рис. 3, б). Ширина контакта увеличивается пропорционально увеличению диаметра цапфы (рис. 3, а). В то же самое время максимальные напряжения в контакте уменьшаются (рис. 4).

Остается только провести экспериментальные исследования по определению действительной ширины контакта и при необходимости модифицировать формулы (6) и (7).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ануриев И.И. Справочник конструктора – машиностроителя: В 3-х т. Т. 2. – 5-е изд. Перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1978. 559с., ил.
2. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 479
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости, М.: Наука 1975Г, 576с.

УДК 621.91

*Е. В. Павлов*

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ РОТАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРЕРЫВИСТЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Юго-Западный государственный университет

Возможности повышения режимов резания ротационных деталей с прерывистыми поверхностями традиционными инструментальными материалами ограничены. Однако при использовании для обработки прерывистых поверхностей инструментов с рабочими элементами из поликристаллических сверхтвердых материалов (композитов) достигается значительный эффект, но только в случае уменьшения негативного воздействия ударных нагрузок на вершине и главной режущей кромке в момент врезания инструмента в заготовку. Предлагаемые решения по обеспечению работоспособности токарного инструмента при обработке поверхностей резанием с ударом отличаются простотой применения и универсальностью, не требуют использования специальных средств автоматизации и компьютерной техники, позволяют упростить выбор геометрических параметров инструмента. Разработанный способ обработки прерывистых поверхностей точением (расточиванием) позволяет создать рациональные условия контакта режущей части инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки и устранить негативное влияние ударно-импульсной нагрузки на вершину инструмента. При создании режущему инструменту из композита 03 (петбор) и композита 10 (гексанит-р) благоприятных условий в процессе обработки прерывистых поверхностей удастся повысить до 25 % производительность обработки за счет интенсификации режимов резания, а также сократить примерно на 20 % расходы на приобретение режущего инструмента.

*Ключевые слова:* режущие инструменты, прерывистые поверхности, работоспособность, геометрические параметры, взаимодействие инструмента и заготовки.

The possibilities of increasing cutting modes for rotating parts with discontinuous surfaces by traditional tool materials are limited. However, when using tools with polycrystalline superhard materials (composites) for working with intermittent surfaces, a significant effect is achieved, but only in the case of a reduction in the negative impact of shock loads on the top and the main cutting edge at the moment the tool is inserted into the workpiece. The proposed solution to ensure operation of lathe tool in the treatment of surfaces by cutting with a punch are easy to use and versatile, does not require the use of special means of automation and computer technology, can simplify selection of geometric parameters of the tool. The developed method for processing discontinuous surfaces by turning (boring) makes it possible to create rational conditions for contact of the cutting part of the tool with the workpiece surface of the workpiece and to eliminate the negative impact of the shock-impulse load on the tool tip. When creating a cutting tool from composite 03 (petbor) and composite 10 (hexanite-r) favorable conditions during machining of discontinuous surfaces, it is possible to increase the processing capacity by 25% by intensifying the cutting modes, and also reduce by about 20% the cost of purchasing a cutting tool.

*Keywords:* cutting tools, interrupted surfaces, working capacity, geometrical parameters, the interaction of tool and workpiece.

Работоспособное состояние режущего инструмента характеризуется способностью инструмента осуществлять обработку резанием с соблюдением установленных технологической документацией условий и требований.

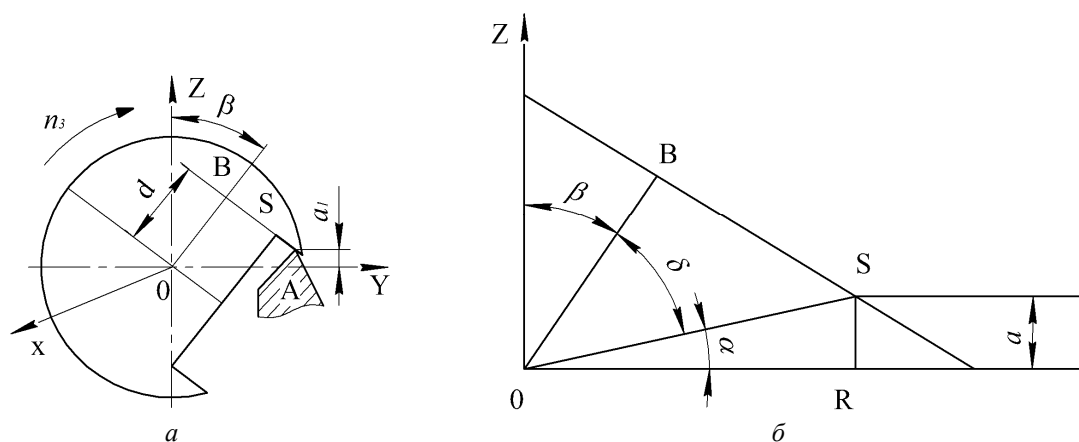
Состояние режущего инструмента определяется совокупностью его конструктивных и геометрических параметров [1-5]. Для обработки резанием прерывистых поверхностей был предложен новый способ, в котором устраняется удар на вершине и главной режущей кромке в момент врезания инструмента в заготовку. Главной особенностью способа является установление и настройка перед обработкой рациональных геометрических параметров токарного инструмента для создания оптимальных условий контактирования режущих кромок и поверхностей инструмента с обрабатываемой прерывистой поверхностью заготовки, т.е. передняя поверхность инструмента устанавливается к основной плоскости резания, таким образом, чтобы врезание происходило не вершиной, а более прочной областью передней поверхности и периферией режущей кромки. В этом случае главная режущая кромка и передняя поверхность должны обеспечивать рациональные значения углов  $\lambda$  и  $\gamma$  к основной плоскости резания, определяемых из соотношений:

$$\begin{aligned}\lambda &> -\arctg(\operatorname{tg} \beta \cdot \sin \varphi); \\ \gamma &< -\arctg(\operatorname{tg} \lambda \cdot \operatorname{ctg} \varphi),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\varphi$  – главный угол в плане инструмента, составленный проекцией главной режущей кромки на основную плоскость резания с направлением подачи, град;  $\beta$  – угол контакта инструмента с прерывистой обрабатываемой поверхностью, град;  $\gamma$  – главный передний угол, град;  $\lambda$  – угол наклона главной режущей кромки, град.

Обобщенный опыт исследований [6-10] в области окончательной обработки прерывистых поверхностей деталей позволяет сделать заключение, что при точении прерывистых поверхностей деталей имеет место закономерное чередование рабочих ходов со снятием стружки и холостых пробегов инструмента. За полный цикл обработки прерывистой поверхности инструмент осуществляет: а) врезание; б) рабочий ход – резание; в) выход из контакта с обрабатываемой поверхностью; г) холостой пробег инструмента.

На рисунке схемы для расчета геометрических параметров резца.



Схемы расчета геометрических параметров режущего инструмента

Рациональное расположение инструмента и заготовки обеспечивает угол  $\beta$

$$\beta = \left(\frac{\pi}{2} - \delta - \alpha\right). \quad (2)$$

Из прямоугольных треугольников  $SOB$  и  $SOR$  получим:

$$\begin{aligned}\operatorname{tg}(\pi/2 - \delta) &= \operatorname{tg} \angle SOR = d \sqrt{R^2 + a^2 + d^2}, \\ \operatorname{tg} \alpha &= a / \sqrt{(R - t)^2 - a^2},\end{aligned}$$

где  $R$  – радиус заготовки;  $t$  – глубина резания;  $a$  – смещение вершины инструмента. По формуле тангенса разности углов найдем, что

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{tg}(\pi/2 - \delta) - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}(\pi/2 - \delta) \operatorname{tg} \alpha} = \frac{R \cdot d - a \sqrt{R^2 + a^2 + d^2}}{R \sqrt{R^2 + a^2 + d^2} + ad},$$



откуда:

$$\beta = \arctg \frac{R \cdot d - a \sqrt{R^2 + a^2 + d^2}}{R \sqrt{R^2 + a^2 + d^2} + ad}. \quad (3)$$

Для полного прилегания передней поверхности резца с боковой поверхностью паза необходимо и достаточно, чтобы продольный угол  $\gamma_{oc}$  равнялся критическому значению  $\gamma_{oc.кр} = \beta$ , а поперечный угол  $\gamma_{рад.кр} = 0$ . Для получения критических углов  $\gamma$  и  $\alpha$  воспользуемся известными формулами, описывающими связь между углами резца:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &= \operatorname{tg} \gamma_{oc} \cdot \cos \varphi + \operatorname{tg} \gamma_{pad} \cdot \sin \varphi; \\ \operatorname{tg} \lambda &= \operatorname{tg} \gamma_{pad} \cdot \cos \varphi - \operatorname{tg} \gamma_{oc} \cdot \sin \varphi, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – угол наклона главной режущей кромки;  $\gamma$  – передний угол;  $\varphi$  – главный угол резца в плане. Откуда

$$\operatorname{tg} \gamma_{кр} = -\operatorname{tg} \lambda_{кр} \cdot \operatorname{ctg} \varphi. \quad (5)$$

Окончательно установили, чтобы врезание инструмента в заготовку происходило в более прочной области передней поверхности, необходимо:

1. Выбрать угол наклона главной режущей кромки так, чтобы  $\lambda > \lambda_{кр}$ .
2. Назначить передний угол исходя из условия:

$$\gamma < -\arctg(\operatorname{tg} \lambda \cdot \operatorname{ctg} \varphi). \quad (6)$$

Например, при исходных параметрах заготовки и инструмента:

$$R = 100 \text{ мм}; d = 30 \text{ мм}; a = 1 \text{ мм}; \alpha = 2^\circ; \varphi = 35^\circ,$$

значение угла наклона главной режущей кромки, исходя из рекомендаций и условия  $\lambda > \lambda_{кр}$ ;  $\lambda = -2^\circ$ . Используя условие (6) и стандартные рекомендации, назначаем угол  $\gamma < 2,85^\circ$ , для упрощения настройки принимаем  $\gamma = 2^\circ$ .

Экспериментальные исследования стойкости инструмента из композита с расчетными геометрическими параметрами проводились при точении заготовок из стали 40ХН с двумя радиальными пазами. В качестве инструментального материала использовали пластины из композита 03 (петбор) и композита 10 (гексанит-р). Режимы резания были приняты следующими: скорость резания  $V = 2$  м/с, подача  $S = 0,05$  мм/об, глубина резания  $t = 0,1$  мм. В качестве критерия стойкости режущего инструмента была принята величина площадки износа по задней поверхности  $h_z$ . Достижение значения  $h_z = 0,4$  мм считалось концом периода стойкости инструмента из композита, так как именно для этого значения характерно снижение шероховатости обработанной поверхности до  $Ra = 1,25$  мкм. Эксперименты показали, что за период стойкости инструменты из композитов с рассчитанными геометрическими параметрами прошли путь резания, примерно на 20% превышающий путь резания инструментами со стандартными рекомендациями по геометрии режущей части ( $\lambda = 4^\circ$ ,  $\gamma = -6^\circ$ ). Для инструмента из композита 03 путь резания прерывистых поверхностей точением увеличился с 12,1 до 14,6 километров, а для композита 10 – с 20,0 до 23,7 километров. Кроме того, дополнительные исследования показали, что увеличение скорости резания с 2 до 2,5 м/с практически не отражается на значениях периода стойкости инструмента. При токарной обработке инструментами из композита 03 и 10 величина износа по задней поверхности  $h_z$  в конце периода стойкости сохранилась на уровне 0,39 мм.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянов С.Г. Теория резания: математическое моделирование и системный анализ: Монография / С.Г. Емельянов, С.В. Швец, А.И. Ремнев, С.А. Сергеев, Е.В. Павлов, Л.А. Ремнева – Старый Оскол, ТНТ, 2010. – 312 с.
2. Черепяхин А.А. Стойкостные испытания режущего инструмента: монография / А.А. Черепяхин, В.Ф. Солдатов. – М.: Русайнс, 2016. – 122 с.
3. Инструментальщик: энциклопедический справочник-каталог. В 3-х томах / Я.А. Музыкант, Я. Арпаз, М.А. Волосова и др. – М.: Наука и технологии, 2009. – 264 с.
4. Павлов Е.В. Исследование термомеханических процессов резания деталей погружных пневмоударников / Е.В. Павлов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5. 2014. – С. 150-158.
5. Солодков В.А. Влияние условий выхода на работоспособность твердосплавного инструмента при прерывистом резании / В.А. Солодков, М.А. Тибиркова // Известия ВолгГТУ, 2010. – № 12. – С. 63-65.

6. Кудряшов Е.А. Применение композиционных инструментальных материалов при ремонте деталей машин / Е.А. Кудряшов, Е.В. Павлов, Е.И. Яцун, А.Ю. Алтухов, Д.Ю. Лунин // Упрочняющие технологии и покрытия, № 9, 2010. – С. 30-31.
7. Kudryashov E.A. Validated Methods of Parts Machining for Nonleaking Hydraulic Cylinders in Drilling Installations // Journal of Mining Science, 2012, Vol. 48, No. 5, pp. 870-873.
8. Кудряшов, Е.А. Способы достижения надежности работы гидроцилиндров высокого давления буровых установок [Текст] / Е.А. Кудряшов, Е.И. Яцун, Е.В. Павлов и др. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, Том 12(33), № 1(2), 2010. – С. 401-403.
9. Павлов Е.В. Исследование технологий механической обработки гетерофазных покрытий при упрочнении и восстановлении деталей машин и оборудования / Е.В. Павлов, Д.Ю. Лунин // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Материалы VIII межд. научно-техн. конф.: в 2 ч. Ч.2. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2011. – С. 79-84.
10. Павлов Е.В. Выбор инструментального обеспечения технологии окончательной лезвийной обработки поверхностей деталей класса «тела вращения» // Качество в производственных и социально-экономических системах: Сборник научных трудов 3-ей Межд. научно-техн. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2015. – С. 118-122.

УДК 621.9.015

*А. С. Сергеев, А. Л. Плотников*

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЗОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА МЕТАЛЛООБРАБОТКИ**

**Волгоградский государственный технический университет**

В статье рассмотрена возможность применения термоэлектрического сигнала, генерируемого естественной термопарой «Инструмент-заготовка», с целью повышения эффективности управления процессом лезвийной обработки. Применение данного сигнала является в большей степени оправданным, поскольку появляется возможность оценки физико-механических свойств контактных пар. Наиболее перспективным направлением является использование термоЭДС в качестве сигнала обратной связи из зоны резания в условиях серийного и крупносерийного производства с использованием обрабатывающих центров и станков с ЧПУ. Использование в качестве диагностического параметра сигнала естественной термопары «инструмент-заготовка» позволяет получать оперативную информацию о фазовом составе, а также о теплофизических свойствах контактной пары в режиме пробного прохода. Информативная способность сигнала термоЭДС может быть использована для разработки математического и программного обеспечения при решении задач оценки состояния инструментального обеспечения и управления качеством лезвийной обработки сталей в условиях автоматизированного производства.

*Ключевые слова:* скорость резания, пробный проход, термоЭДС, твердосплавный инструмент.

In article the possibility of application of the thermoelectric signal generated by the natural thermocouple "Tool - Workpiece" for the purpose of increase in effective management of process of the blade machining is considered. Application of this signal is more justified as the possibility of an assessment of physicomachanical properties of contact couples appears. The most perspective direction is use of thermoEMF as a feedback signal from a cutting zone in the conditions of mass and large-lot production with use of the processing centers and CNC machines. Use as a diagnostic parameter of the signal in a natural thermocouple "tool – workpiece" allows to receive the operative information on phase composition, and thermal properties of the contact pair as a trial passage. Informative ability of the signal to the thermopower can be used to develop a mathematical software in solving problems assessment tool security and quality management blade processing of steels in conditions of the automated production.

*Keywords:* cutting speed, trial pass, thermoEMF, hard-alloy tool.

Процессы механической обработки изделий на металлорежущих станках занимают значительную долю среди всех операций тяжелого и среднего машиностроения. Современная металлообработка характеризуется высокоинтенсивным процессом выполнения как основных, так и вспомогательных операций, а также сокращением норм времени вспомогательных переходов. Особенно остро этот вопрос встает при организации производственных структур с многостаночным обслуживанием, при эксплуатации металлообрабатывающего оборудования в условиях серийного и крупносерийного производства с использованием обрабатывающих центров и станков с ЧПУ.

Как отмечено в работе [1], основным направлением оптимизации современного машиностроительного производства является решение задач по устранению потерь времени, в том числе и при переналадке оборудования.

Наиболее ответственными этапами переналадки оборудования являются установка и корректировка режимов обработки, регламентированных технологическим процессом. Прежде всего, это касается выбора точного значения скорости резания, призванной обеспечить требуемый период стойкости инструмента и производительность обработки, определения расчетным путем точного значения составляющих силы резания, по величине которых определяется мощность резания, величина крутящего момента, расчетные значения по усилию закрепления заготовки в приспособлении, ожидаемые геометрические отклонения формы заготовки, а также определение расчетного значения параметров шероховатости обработанной поверхности и ряд других параметров процесса резания.

Существующие математические модели, изложенные в справочной литературе, по которым рассчитываются базовые параметры металлообработки, не позволяют в полной мере обеспечить надежность технологического процесса. Под термином «надежность технологического процесса» понимается соответствие показателей объема и качества продукции требованиям технической документации, полученных на этапе проектирования. В практике металлообработки часто случается так, что фактические значения базовых величин значительно отличаются от расчетного и требуется коррекция принятых режимов обработки. Использование САПР ТП, в которых алгоритмы расчета основных параметров обработки, таких как составляющие силы резания, скорости резания, точности обработки и качества обработанной поверхности построены на использовании все тех же математических моделей не обеспечивает достаточный уровень надежности. Неточности расчета этих параметров снижают эффективность использования САПР ТП и негативно сказываются на обеспечении надежности автоматически выполняемого процесса резания.

Авторами на основе проведенного анализа технической литературы, справочно-нормативных источников и проведенных экспериментальных исследований, установлено, что причиной значительного несовпадения расчетных и фактических значений основных базовых параметров процесса резания является одно общее обстоятельство - отсутствие в расчетных математических моделях оперативного учета теплофизических свойств сменных контактных пар «твердосплавный инструмент - стальная заготовка» и ориентация расчетных моделей на среднее значение этих свойств из всего допускаемого диапазона разброса. Учитывая неизбежный, допустимый по техническим условиям изготовления (ТУ) разброс свойств обрабатываемых сталей и разброс режущих свойств твердосплавного инструмента, вероятностный характер формирования на станке контактных пар «инструмент – стальная заготовка», предлагается для повышения точности расчета использовать в математических моделях предварительную оперативную информацию о теплофизических свойствах каждой новой контактной пары, а не среднестатистическое значение величин поправочных коэффициентов на свойства стали и инструмента.

Предложенная принципиально новая методика расчета параметров процесса металлообработки [2], [3] основана на получении предварительной информации о свойствах контактных пар за счет всегда сопутствующего резанию термоэлектрического эффекта естественной термопары путем проведения предварительного кратковременного (4-5 секунд) пробного прохода на строго одинаковых для каждой пар режимах. ТермоЭДС пробного прохода, как своеобразный тест, используется не как информация о температуре в зоне резания, а как интегральная характеристика свойств контактной пары, собранной на станке случайным образом.

Основываясь на положениях физики твердого тела, описывающих термоэлектрические явления, предложено использовать величину термоЭДС пробного прохода как оценочную характеристику всего диапазона изменения свойств контактных пар, с введением этой характеристики в математические модели расчета параметров металлообработки. Используется свойство контактной составляющей естественной термопары отражать изменение в химическом, структурном и фазовом состоянии элементов контактной пары. При смене хотя бы одного элемента естественной термопары (стальной заготовки или инструмента) новой контактной пары величина термоЭДС пробного прохода будет другой, хотя режимы пробного прохода остаются неизменными. Причина в том, что изменяется электрохимический потенциал новой контактной пары. Если же обеспечить постоянство режимов резания тестового пробного прохода при смене контактных пар, то появляется возможность оперативно оценить изменение их электрохимического потенциала, а значит, косвенно, и их свойств. Основы физики твердого тела позволяют найти взаимосвязь химических и физических свойств материалов с их тепловыми и термоэлектрическими свойствами.

На основе проведенных исследований скорректированы математические модели расчета составляющих силы резания, скорости резания и модели расчета высоты микронеровностей для полуставового и чистового точения и фрезерования сталей твердосплавным инструментом. Ведение в их структуру оперативного параметра, характеризующего теплофизические свойства контактной пары позволило значительно повысить точность расчета (величина погрешности 10-15% против 70-90%). Разработан комплекс алгоритмов автоматизированного расчета указанных величин, который может быть использован как на станках с ЧПУ, так и на универсальных станках при соответствующем аппаратном обеспечении их работы.

Предложен перенос модуля расчета режимов обработки из САПР ТП в системы ЧПУ, построенных на использовании мощных вычислительных комплексов, что, в конечном итоге, открывает перспективу создания нового класса станочных САПР (гибридных), встроенных в системы ЧПУ.

Станочные САПР ТП, наделенные техническим интеллектом за счет использования автоматизированных способов определения параметров процесса металлообработки и имеющие обратную связь с зоной резания, призваны решить задачу обеспечения надежности автоматически выполняемого процесса металлообработки на станках с ЧПУ в условиях их многостаночного обслуживания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быков С.Ю. Методы уменьшения времени переналадки металлообрабатывающего оборудования / С.Ю. Быков, Ю.М. Быков // Известия ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 13. - С. 7-9.
2. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания материалов. / В. К. Старков. - М.: Машиностроение, 2009. - 640 с.
3. Плотников А.Л. Автоматизированные способы определения значений параметров процесса токарной и фрезерной обработки на станках с ЧПУ: Монография /Плотников А.Л., Сергеев А.С., Уварова Т.В.- Волгоград; Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии (ТНТ), 2017 – 211 с.

УДК 62-922.4

*М. А. Тамаркин, Э. Э. Тищенко, Р. В. Гребенкин*

#### **АНАЛИЗ И ФОРМИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ**

**Донской государственный технический университет**

В статье представлены результаты исследований процесса вибрационной обработки деталей в среде стальных шариков. Получен комплекс моделей формирования показателей надежности технологического процесса, позволяющих обеспечить повышение эффективности и достижение заданной величины и стабильности параметров качества обрабатываемой детали. Определены значения показателей точности по контролируемому параметру: коэффициент точности, коэффициент мгновенного рассеивания, коэффициент смещения и коэффициент запаса точности. Установлены зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности, глубины упрочнения, степени деформации, рационального времени обработки. Предложенные зависимости прошли комплексную экспериментальную проверку, по результатам которой установлена их адекватность и возможность использования для аналитического прогнозирования обеспечения надежности технологических процессов вибрационной отделочно-упрочняющей обработки деталей. Разработаны методические рекомендации по обеспечению надежности технологического процесса.

*Ключевые слова:* вибрационная отделочно-упрочняющая обработка деталей, надежность технологического процесса, шероховатость поверхности, глубина упрочнения, степень деформации.

Results of researches of process of vibration processing of details in the environment of steel balls are presented in article. The complex of models of formation of the indicators of reliability of technological process allowing to provide increase in efficiency and achievement of the set size and stability of parameters of quality of the processed detail is received. Values of indicators of accuracy are determined by controlled parameter: accuracy coefficient, coefficient of instant dispersion, coefficient of shift and coefficient of a stock of accuracy. Dependences for definition of an arithmetic average of a deviation of a profile of a roughness of a surface, depth of hardening, extent of deformation, rational time of processing are established. The offered dependences have undergone complex experimental testing by results of which their adequacy and a possibility of use for analytical forecasting of ensuring reliability of technological processes of the vibration finishing strengthening processing of details is established. Methodical recommendations about ensuring reliability of technological process are developed.

*Keywords:* the vibration finishing strengthening processing of details, reliability of technological process, a surface roughness, hardening depth, extent of deformation.

Под надежностью технологических систем и осуществляемых ими технологических процессов, согласно ГОСТ 27.202-83 [1], понимают их свойство обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или нескольких этапах. При контроле технологических процессов по рассеянию размеров после обработки поверхности детали определяют значения показателей точности.

В качестве объекта для исследования надежности выбран технологический процесс вибрационной отделочно-упрочняющей обработки (ВиОУО) в среде стальных шариков. ВиОУО является одним из наиболее перспективных методов обработки деталей машин и приборов. Целью настоящих исследований является повышение эффективности и надежности технологических процессов ВиОУО с учетом исследования формирования показателей точности на основании разработки комплекса адекватных теоретических моделей процесса обработки [2].

Авторами были проведены исследования формирования шероховатости обработанной поверхности при ВиОУО. Изменение шероховатости происходит от исходной до некоторой характерной для данного метода при конкретных технологических режимах обработки. Такую шероховатость называют установившейся. Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости при ВиОУО определим по зависимости:

$$Ra = 0.002 \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot l_{ed} \cdot a \cdot b}{R^2}},$$

где  $h_{\max}$  – максимальная глубина внедрения шарика в поверхность детали,  $a$  и  $b$  большая и малая полуоси эллипсоида контакта частицы среды с поверхностью детали,  $R$  – радиус шарика,  $l_{ed}$  – единичная длина, введенная для сохранения размерности.

Определено рациональное время обработки при ВиОУО:

$$t_F = \frac{4 \cdot h_{\max} \cdot F \cdot R^2}{V_S \cdot f_g},$$

где  $F$  – число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности,  $V_S$  – объем деформируемого металла при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью,  $f_g$  – частота циклов воздействия рабочей среды на поверхность детали.

При решении технологических задач ВиОУО важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочнения  $h_u$  и степени деформации  $\epsilon$ . От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей, например, усталостная прочность и долговечность. Такой параметр упрочнения, как степень пластической деформации  $\epsilon$ , оказывает влияние на механическое состояние поверхностного слоя материала обрабатываемой детали. Аналитическое определение глубины упрочнения и степени деформации в зависимости от физико-механических свойств материала детали и параметров процесса является очень сложной задачей. При проведении исследований был учтен тот факт, что с переходом от статического нагружения к ударному возрастает сопротивление материала вдавливанию в него инденторов, т.е. возрастает уровень твердости материала, вследствие чего динамическая твердость оказывается больше статической. Количественной мерой возрастания твердости, которая обусловлена динамичностью нагрузки, служит динамический коэффициент твердости  $\eta$  [3]. С достаточной для практики точностью зависимость динамического коэффициента твердости от скорости внедрения индентора при обработке стали, как для случая контакта сферы с плоскостью, так и для тел произвольной формы и кривизны, получена в работе Сидякина Ю. И. [3] и может быть определена по формуле:

$$\eta = 0.5 \left( 1 - \frac{137V_0}{HD} + \sqrt{1 + \frac{2250 \cdot V_0}{HD}} \right),$$

где  $HD$  – статическая твердость,  $V_0$  – начальная скорость удара.

С учетом вышеприведенной зависимости и коэффициента твердости, а также условия пластичности Генки-Мизеса [3] при описании пластически деформированной области, распространяющейся на некоторую глубину вокруг остаточной вмятины (пластического отпечатка), получены следующие формулы для расчета глубины упрочнения и степени деформации:

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

$$\varepsilon = 0,025 \cdot \sqrt{k_{\text{эф}} \cdot A \cdot \omega} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{ш}}}{\eta \cdot HB^{1,12}}},$$

где  $\rho_{\text{ш}}$  – плотность материала шарика;  $\alpha$  – угол встречи шарика с поверхностью детали,  $\sigma_T$  – предел текучести материала детали,  $c$  – коэффициент несущей способности контактной поверхности,  $k_c$  – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта,  $k_{\text{эф}}$  – коэффициент, учитывающий влияние соседних шариков, HB – твердость по Бринеллю.

Для удобства расчетов осуществлен перевод динамической твердости в твердость по Бринеллю с использованием соотношения  $HB = 0,2 \cdot HD^{0,89}$ .

Для анализа надежности технологических процессов, согласно [1], используются коэффициенты надежности. При контроле технологических процессов по количественному признаку по зависимостям, представленным в [1], определены значения показателей точности по контролируемому параметру: коэффициент точности  $K_T$ , коэффициент мгновенного рассеивания  $K_p(\tau)$ , коэффициент смещения  $K_{\text{см}}(\tau)$  и коэффициент запаса точности  $K_z(\tau)$ .

Для проверки достоверности предложенных теоретических моделей формирования шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО проведены комплексные экспериментальные исследования. Исследовано влияние амплитуды рабочей камеры, размеров среды и твердости материала детали по Бринеллю на формирование шероховатости поверхности, глубины упрочнения и степени деформации при ВиОУО. Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Разница между результатами не превышает 20%.

Полученный комплекс теоретических моделей процесса ВиОУО, прошедший экспериментальную проверку, может быть использован для аналитического прогнозирования обеспечения надежности технологических процессов. Были произведены расчеты параметров надежности ТП. Разработана методика проектирования технологических процессов ВиОУО с учетом обеспечения их надежности и элементы САПР в виде программного модуля. Рассчитываются показатели точности процесса по формулам, полученным выше. Далее пользователем вводятся поля рассеяния исходных величин (технологических режимов и физико-механических свойств материала детали). Определяются поля рассеяния значений контролируемого параметра, среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса точности по зависимости, представленной в ГОСТ 27.202–83. В случае выполнения условия  $K_z > 0$ , рассчитывается время обработки для каждого варианта сочетаний технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

Результаты проведенных исследований и методика проектирования ТП позволят обеспечить надежность процесса ВиОУО.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 27.202–83. Надежность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надежности по параметрам производительности. – 28 с.
2. Tamarkin M., Tichshenko E., Fedorov V. Theoretical bases of the surface layer formation in the finishing and hardening treatment of details by spd in flexible granular environment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2015, MEACS 2015" 2016. – 6 p.
3. Сидякин Ю.И. Разработка методов расчета упругопластических контактных деформаций в процессах упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием: автореф. дисс. докт. техн. наук: 01.02.06/Сидякин Юрий Иванович. – М., 2002. – 34 с.

УДК 621.9.015

*Ж. С. Тихонова***СПОСОБ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ  
СБОРНОГО МНОГОЛЕЗВИЙНОГО ТВЕРДОСПЛАВНОГО  
ИНСТРУМЕНТА НА СТАНКАХ С ЧПУ****Волгоградский государственный технический университет**

Рассмотрены основные направления повышения эффективности многолезвийной обработки. Представлены основные способы диагностики предельного состояния многолезвийного инструмента и оценки механических и теплофизических свойств контактных пар «заготовка-режущая кромка фрезы». В качестве перспективного способа предлагается использовать сигнал естественной термопары термоЭДС. В статье указаны недостатки применения данного сигнала и основные пути их устранения.

*Ключевые слова:* торцовое фрезерование, надежность процесса металлообработки, скорость резания, пробный проход, термоЭДС, твердосплавный инструмент.

The main directions of increase in efficiency of mnogolezviyny processing are considered. The main ways of diagnostics of a limit condition of the mnogolezviyny tool and an assessment of mechanical and heatphysical properties of contact couples "preparation - the cutting mill edge" are presented. As a perspective way it is offered to use a signal of the thermoEMF natural thermocouple. In article shortcomings of application of this signal and the main ways of their decision are specified.

*Keywords:* face milling, reliability of process of machining, cutting speed, trial pass, thermoEMF, hard-alloy tool.

Среди всех операций механической обработки лидирующие позиции, особенно в автоматизированных производствах, занимают токарные и фрезерные операции. При этом около 60% всех фрезерных работ составляют операции торцевого фрезерования. Современное машиностроение характеризуется производством ответственных деталей машин, работающих в жестких эксплуатационных условиях, что обуславливает повышение требований к показателям качества поверхностного слоя деталей, закладываемых на этапе конструкторского проектирования.

Повышение эффективности многолезвийной обработки изделий (торцовое фрезерование) с точки зрения автоматизированного станочного производства можно рассматривать в трех аспектах:

- 1) использование достоверного сигнала обратной связи из зоны резания для оценки механических и тепло-физических свойств каждой режущей кромки наборного комплекта торцевой фрезы;
- 2) разработка алгоритмов на базе достоверных математических моделей по расчету и корректировке основных показателей технологического процесса (скорость резания, шероховатость поверхности, силы резания и т.д.);
- 3) разработка и использование надежных методов контроля и диагностики предельного состояния инструмента.

В качестве сигнала обратной связи из зоны резания могут применяться сигналы различной физической природы (виброакустические, термоэлектрические, показатели токовой нагрузки электроприводов, динамометрические и т.д.). Более подробно с особенностями использования каждого из методов можно познакомиться в работе В.К. Старкова [1].

Каждый из этих методов имеет свои достоинства и недостатки, однако особо среди них следует выделить термоэлектрический метод оценки состояния контактной пары «заготовка-режущая кромка фрезы». Подробно с этим методом можно ознакомиться в работе [2].

Суть данного способа заключается в том, что в режиме кратковременного пробного прохода производится измерение и фиксация сигнала термоЭДС естественной термопары «заготовка-режущая кромка фрезы», по которому косвенно оцениваются механические и теплофизические свойства контактной пары и вводятся необходимые корректировки в режимы обработки. Данная методика показала себя весьма эффективной и надежной и легла в основу разработки алгоритмов управления технологическими параметрами процесса фрезерования с точки зрения обеспечения: заданной скорости резания [3], требуемого ресурса и стойкости всего комплекта фрезы [4], требуемого параметра шероховатости поверхности [5].

К недостаткам применения сигнала термоЭДС контактной пары «заготовка-режущая кромка фрезы», можно отнести следующие:

1. Появление паразитной термоЭДС, возникающей при нагреве контактной зоны инструмента в процессе пробного прохода. Паразитная составляющая термоЭДС возникает за счет изменения разности температур между инструментом и обрабатываемой заготовкой (тепловые потоки со временем распределяются от заготовки к инструменту), что приводит к снижению объемной составляющей  $\alpha_{об}$  термоЭДС и всего сигнала в целом. Однако, при осуществлении пробного прохода при торцовом фрезеровании величина паразитной термоЭДС составляет около 4,5% от величины полезного сигнала, что является в целом приемлемым результатом, а применение специальных технических средств (пик-детекторы) позволяют и вовсе решить указанную проблему.

2. Основным недостатком использования сигнала термоЭДС резания, помимо возникновения паразитной составляющей сигнала и необходимости электроизоляции инструмента и стальной заготовки, является зависимость переходного сопротивления, а следовательно и самого значения термоЭДС, от конструкции и вида токосъемников, установленных на шпиндельных узлах станков.

Проблема изоляции заготовки (при обработке на фрезерных станках) может быть решена за счет применения изолирующих материалов, приспособлений или диэлектрических покрытий, например, из оксида титана полученных, путем термоокислительного процесса. Твердость таких покрытий сравнима с твердостью поверхностей закаленных сталей.

3. Зависимость переходного сопротивления от усилия поджатия контактов токосъемников, установленных на шпиндельных узлах станков.

В рамках указанного недостатка автором в составе научного коллектива кафедры «Автоматизация производственных процессов» предлагается новое техническое решение, цель которого состоит в уменьшении погрешности измерения полезного сигнала термоЭДС за счет включения изолированной детали в замкнутую электрическую цепь без использования промежуточных элементов фиксации электрического сигнала (токосъемников различной конструкции). Токосъемник может быть выполнен в виде неподвижного контактного узла, состоящего из двух сочленяемых элементов, один из которых представляет собой электропроводную часть станка, а второй выполнен в виде удлинительного термоэлектрода, подключенного к измерительному прибору, обрабатываемая заготовка закрепляется в тисках фрезерного станка без изолирующих элементов. Данное техническое решение находится в стадии рассмотрения заявки на интеллектуальную собственность.

4. Процесс взаимного электрического шунтирования режущих кромок фрезы, возникающий в результате их одновременного нахождения на дуге фрезерования и как следствие искажения полезного сигнала термоЭДС. Данный недостаток может быть решен двумя способами. Первый способ относится к технологическому решению, которое заключается в смещении торцевой фрезы (т.е. реализации не симметричного фрезерования) таким образом, чтобы в результате пробного прохода на дуге фрезерования находилась одна режущая кромка. Однако данный способ может иметь ограничения, связанные с конструктивными особенностями некоторых обрабатываемых изделий. Второй способ заключается в программной обработке сигнала электродвижущей силы с учетом специфики характера его изменения при одновременной генерации этого сигнала режущими пластинами. Для получения информации по каждой режущей кромке необходимо применять программу-обработчик для пересчета сигнала термоЭДС контактных пар «заготовка-режущая кромка фрезы».

Рассматривая аспект повышения эффективности торцового фрезерования с точки зрения назначения и корректировки режимов резания следует уделить особое внимание отсутствию достоверных математических моделей по расчету составляющих силы резания. Данные значения могут использоваться для оценки мощностных режимов работы станков, силовых параметров, направленных на удержание заготовки в приспособлениях, оценки погрешности форм обрабатываемых изделий и степени их деформации и т.д.

В рамках выделенных проблем и задач повышение эффективности обработки деталей многолезвийным инструментом заключается в физической реализации указанных путей решения недостатков использования сигнала термоЭДС при фрезеровании, а также разработка на базе этого сигнала математических моделей по расчету составляющих силы резания применительно к операциям обработки заготовок торцовыми фрезами, что позволит, объединив результаты предыдущих исследователей в этой области, разработать обобщенную концепцию управления параметрами обработки на фрезерных станках на базе многокритериального подхода (точность обработки, ресурс инструмента, производительность, надежность и качество процесса резания).



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Старков, В. К.* Физика и оптимизация резания материалов: учебник / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
2. *Плотников, А.Л.* Повышение надежности управления шероховатостью обработанной поверхности деталей в САПР ТП токарных и фрезерных операций: монография / А.Л. Плотников, А.С. Сергеев, Н.Г. Зайцева; науч. ред. А.П. Бабичев; ВолгГТУ, ЗАО «ОНИКС». - Волгоград; Ирбит; Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2015. - 162 с.
3. *Плотников, А. Л.* Управление параметрами процесса лезвийной обработки на станках с ЧПУ: Монография / А. Л. Плотников, – ВолГТУ-Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012-231с.
4. Пат. 2449860 РФ, МПК В23 В25 / 06. Способ программного контроля предельного состояния режущих кромок сборных многолезвийных инструментов / Б. В. Лесной, Е. Г. Крылов, А. Л. Плотников, А. С. Сергеев; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2012.
5. Пат. 2509633 РФ, МПК В23С3/00. Способ определения параметра шероховатости Ra на фрезерных станках с ЧПУ при получистовой и чистовой обработке углеродистых, конструкционных и низколегированных сталей сборным многолезвийным твердосплавным инструментом при торцевом фрезеровании / А.Л. Плотников, А.С. Сергеев, Н.Г. Зайцева; ВолгГТУ. - 2014.

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

УДК. 621.373.826

*Д. В. Курылев, Н. А. Лунев***ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ  
ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ****Казанский национальный исследовательский университет им. А. Н. Туполева**

В работе рассматривается методика получения технологической оснастки с использованием аддитивных технологий. Проведены эксперименты по изготовлению деталей пресс-форм, посредством селективного лазерного сплавления. Представлены результаты исследований. Проведен анализ полученного микрорельефа, определены основные геометрические характеристики микрорельефов, дана оценка точности формы получаемой поверхности.

*Ключевые слова:* изготовление пресс-форм, селективное лазерное сплавление, микрорельеф.

The paper considers the technique of manufacturing technological equipment using additive technologies. Experiments have been carried out on the manufacture of parts of molds by selective laser melting. The results of the research are presented. The analysis of the obtained microrelief is carried out, the main geometric characteristics of the microreliefs are determined, and the accuracy of the foreshortening of the obtained surface is estimated.

*Keywords:* mold making, selective laser melting, micro-relief.

Известно [6], что в общем процессе технологического обеспечения производства деталей ГТД большую роль играет технологическая оснастка. Именно она во многом определяет экономические и технические параметры производства детали, в том числе стоимостные и, в конечном итоге, конкурентоспособность изделия на рынке.

Основной технологией изготовления технологической оснастки является обработка резанием из монолитных заготовок с использованием оборудования с ЧПУ. И поэтому данный вариант изготовления уже практически полностью оптимизирован и не имеет существенного ресурса по уменьшению трудоемкости и себестоимости.

Аддитивные технологии являются частью современных методов создания новых изделий, машин, технологий, продуктов, которые используются на этапе отработки дизайна и конструкции изделия или на этапе подготовки изделия к производству [4, 7, 10].

В работе [Любимов] предложена методика изготовления технологической оснастки, с использованием прототипированных оправок. Изготовление сложнофасонных деталей производилось путем их выращивания методом стереолитографии с последующим нанесением металлического слоя методом химической металлизации. Преимуществом данной методики является низкая трудоемкость и себестоимость по сравнению с механической обработкой. Недостатком данной методики является неравномерность толщины нанесенного металлического слоя и в итоге невысокая точность изготовления детали.

Селективное лазерное сплавление – это самый распространенный метод изготовления металлических деталей. Метод позволяет изготавливать детали с большей производительностью, однако он ограничен в выборе материала [2].

Одним из перспективных направлений применения технологии селективного лазерного сплавления является изготовление технологической оснастки для освоения деталей при литье по выплавляемым моделям. Современное производство характеризуется относительно быстрой сменой продуктов и с помощью селективного лазерного сплавления можно изготовить формообразующие детали оснастки за более короткий срок [1].

Первым этапом изготовления технологической оснастки с использованием селективного лазерного сплавления является проработка конструкции деталей на технологичность, с учетом особенностей аддитивных технологий [6]. Проработка конструкции, спроектированной под традиционную технологию изготовления, может включать в себя группирование деталей и их объединение в одну (рис. 1, *а*). Кроме того селективное лазерное сплавление вносит определенные требования к конструкции детали [10] и поэтому необходимо достаточно существенное изменение конструкции детали (рис. 1, *б*). Из-за того, что в настоящее время селективное лазерное сплавление ограничено в выборе материала металлического порошка [1], необходимо изменение марки материала в конструкторской документации. По результатам этого этапа также определяются требования к оснастке, 3D принтеру и оборудованию, использующегося для контроля качества.

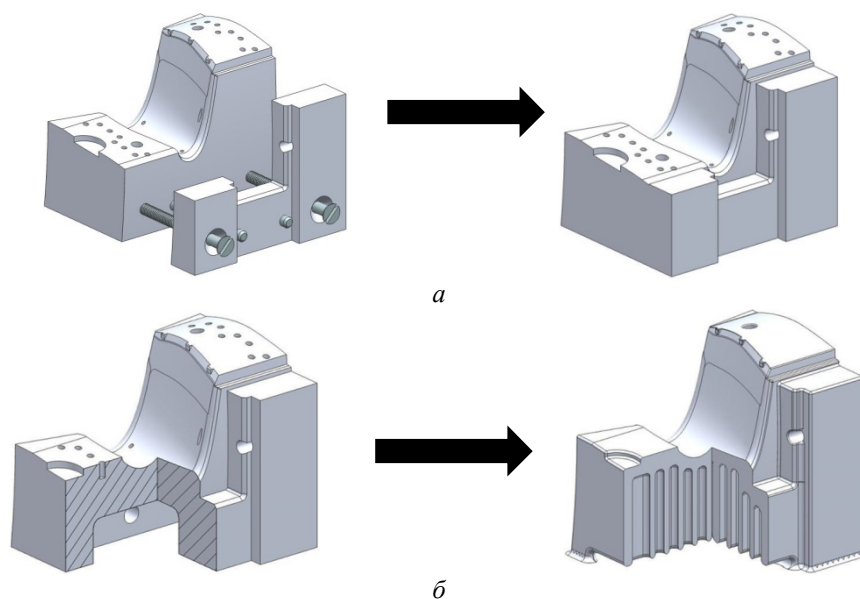


Рис. 1. Проработка геометрии детали на технологичность:  
*а* – объединение деталей в одну; *б* – адаптация геометрии детали под СЛС

На этом же этапе проходит выбор наилучшей и наиболее выгодной технологии изготовления деталей пресс-формы с учетом технико-экономических показателей, капитальных и эксплуатационные издержек [8].

Следующим этапом цикла производства технологической оснастки является проектирование технологического процесса изготовления ее деталей. Процесс изготовления деталей по традиционной технологии состоит из получения заготовки и цикла механической и термической обработки. Изготовление с использованием селективного лазерного спекания состоит из непосредственного послойного выращивания детали на 3D принтере, снятие остаточных внутренних напряжений и доработка детали согласно требованиям конструкторского чертежа.

Детали, выращенные селективным лазерным сплавлением, имеют высокую шероховатость [3, 9]. Поэтому после изготовления детали на 3D принтере необходима механическая доработка.

Заключительным этапом производства литейной оснастки является ее сборка и апробация в условиях реального производства. Анализ результатов испытаний проводится группой экспертов (конструкторы, технологи) и требует использования большого спектра измерительных приборов для контроля заданных характеристик.

Выращивание деталей пресс-формы производилось на 3D принтере ProX 300. После изготовления основание детали сплавлено с плитой рабочей платформы и для их отделения использовался ленточный станок.

После отделения детали от плиты возможно сильное коробление детали за счет наличия в материале внутренних напряжений. Однако, при термообработке детали совместно с плитой происходит спекание дорогостоящего металлического порошка, оставшегося во внутренней полости и отверстиях (рис. 2). А также, как негативный фактор, происходит изменение свойств плиты рабочей платформы.

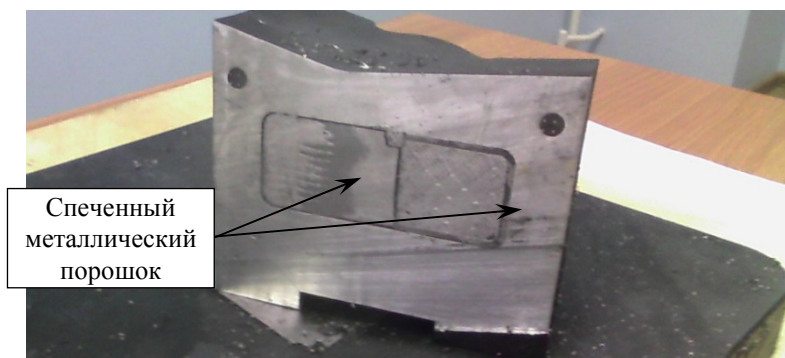


Рис. 2. Спеченный металлический порошок во внутренней полости детали

Поэтому было принято решение производить термообработку после отрезки детали и удаления металлического порошка из внутренней полости отверстий. За счет наличия в конструкции детали ребер жесткости (см. рис. 1, б) после отделения изделия от плиты коробление детали не произошло.

В рамках проведенных экспериментальных работ изготовлены пять формообразующих деталей пресс-формы используемой для получения выплавляемой модели охлаждаемой лопатки турбины ГТД с использованием технологии селективного лазерного спекания.

После изготовления всех деталей пресс-формы была произведена ее сборка и апробация в условиях реального производства на базе цеха АО «КМПО» (рис. 3).

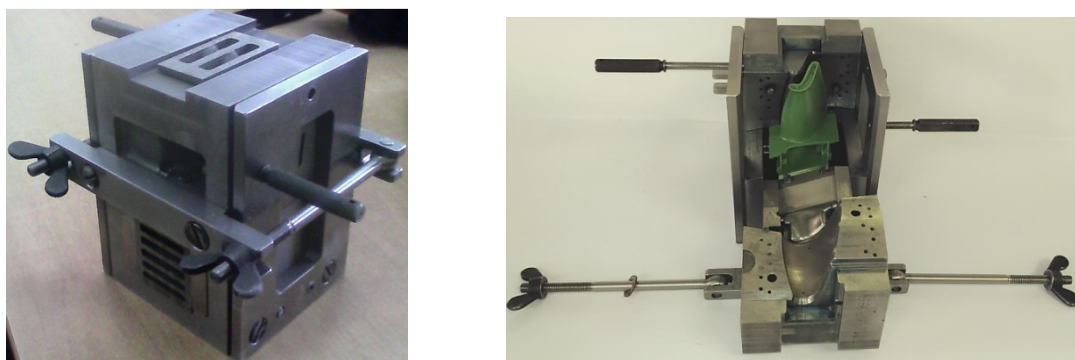


Рис. 3. Собранный опытная пресс-форма

Предложенный способ изготовления сложнопрофильной оснастки позволяет значительно сократить цикл подготовки производства деталей ГТД.

Для изготовления деталей с применением аддитивных технологий необходимо либо изменение методов проектирования изделия, рассчитанных под изготовление традиционными способами, либо адаптация геометрии 3D модели изготавливаемой детали в соответствии с требованиями, разработанными в ходе данной работы.

Экспериментальный образец пресс-формы соответствует конструкторской документации, что подтверждено результатами измерений при помощи оптической координатно-измерительной топометрической системе ATOS III Rev.02.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров / Москва – 2015.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего / Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, Б.С. Ломберг // Автоматическая сварка – 2013 – № 10 – С. 23-32.
3. Курьлев Д.В., Лунев А.Н., Янбаев Р.М. Исследование технологических особенностей процесса лезвийной обработки деталей и заготовок, полученных различными методами аддитивной технологии/В сборнике: Аддитивные технологии: настоящее и будущее сборник докладов II Международной конференции. 2016. С. 28.
4. Лунев А.С. Внедрение аддитивных технологий в литейном производстве авиационной компании «Прогресс» / Д.В. Бушуев, Ю.Ю. Горб, Н.А. Батина //

5. Любимов В.В., Пермяков Д.Г. Технология изготовления технологической оснастки с применением прототипированных оправок
6. Мельников А.П. Современные подходы к изготовлению литейной технологической оснастки /М.А. Садоха, Д.М. Голуб, В.Л. Акулич, Н.А. Яцевич // Литье и металлургия. 2014. № 1 (74). С. 109-113.
7. Печенкин М.В., Янбаев Р.М., Лунев А.Н. Технология получения заготовок гиперболических зубчатых колес двойной кривизны послойным выращиванием на 3D принтерах / В сборнике: Аддитивные технологии: настоящее и будущее сборник докладов II Международной конференции. 2016. С. 31.
8. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения.
9. Шевченко Д.Ю. Аддитивные технологии в машиностроительном производстве
10. Nyamekye P. Overview of Sustainability Studies of CNC Machining and LAM of Stainless Steel / P. Nyamekye, M. Leino, H. Piili, A. Salminen // Physics Procedia – 2015 – № 78 – С. 367-376.

УДК 622.276.53.054

*М. В. Песин*

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ  
КОМПЛЕКСА БУРИЛЬНЫХ ТРУБ НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ  
МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ  
УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ РЕЗЬБЫ**

**ООО «ПКНМ», ПНИПУ, г. Пермь**

Установлены взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами процесса обкатывания резьбовой конической поверхности бурильной трубы (геометрией упрочняющего ролика, величиной нагрузки, радиусом впадины), величиной и характером распределения остаточных напряжений в резьбовой поверхности на основе комплекса разработанных математических моделей и серии экспериментальных исследований НДС резьбы и усталостных испытаний.

*Ключевые слова:* упрочнение, резьба, бурильная труба, обкатывание.

Set the relationship between the constructive and technological process parameters folding threaded conical surface drill pipe (geometry of a strengthening of the movie, the size of the load, radius of hollow), magnitude and distribution of residual stresses in a threaded surface based on complex mathematical models developed and a series of pilot studies stress-strain state threads and fatigue tests.

*Keywords:* hardening, thread, drill pipe, deep roll.

В данный момент резьбовые соединения являются самым распространенным видом соединений в машиностроении. Их применение можно встретить в любой отрасли, так как резьбовые соединения обеспечиваются универсальностью, точностью изготовления, способностью воспринимать большие осевые нагрузки.

Применение резьбовые соединения нашли в нефтегазовой промышленности, в частности, в бурильных трубах. Отличительной особенностью эксплуатации таких труб является воздействие больших изгибающих, крутящих, сжимающих и растягивающих нагрузок, кроме того, колонну периодически собирают и разбирают. Трубы, соединенные в бурильную колонну, спускают на глубину 3000 м, а иногда и более, для этого требуется примерно 300 труб и соответственно для изготовления одной колонны труб нужно нарезать 600 резьб наружных (ниппель) и внутренних (муфта).

В процессе бурения скважин резьбовые соединения принимают на себя большие нагрузки, так длина бурильной колонны может достигать 3000 м., вес ее около 180 т. – в результате этого возможен обрыв колонны. На устранение последствий уходит порядка 1 млн. руб. Поэтому важной целью является разработка конкурентоспособного технологического процесса упрочняющей обработки резьбовых соединений труб нефтегазового назначения при наименьших затратах.

В настоящее время наиболее эффективным методом упрочняющей обработки, получившим широкое применение, является поверхностная пластическая деформация (ППД) [1]. В свою очередь, метод ППД имеет следующие разновидности: обкатывание роликами, алмазное выглаживание, дробеструйная обработка, виброгалтовка и др.

Рекомендуемым методом упрочнения резьбового соединения является обкатывание роликами, так как данный метод обеспечивает:

повышение микротвердости резьбовой поверхности трубы,  
повышение герметичности соединения,  
устранение явлений схватывания и задиоров,  
не требует значительных затрат.

В результате проведенной работы получены охранные документы: патент № 2486994, РФ. МКИ F04 F5/02. Способ изготовления резьбы на детали; патент № 2482942, РФ. МКИ B23G1/00. Способ изготовления резьбы на детали.

На сегодняшний день отсутствуют математические модели обкатки резьбы роликом. Для решения этой проблемы разработаны физические и математические модели для расчета параметров упрочняющей обработки впадины резьбы.

Компьютерное или численное моделирование является одним из эффективных методов исследования процессов упрочняющей обработки металла давлением. При анализе литературных источников установлено, что моделирование процесса обкатывания роликом нарезанного профиля не достаточно исследовано, отсутствуют технологические рекомендации.

Выбор параметров упрочнения (усилия и глубины вдавливания, радиуса края ролика и др.), обеспечивающих необходимый эффект, существенно зависит от габаритных размеров и формы детали, а также механических свойств упрочняемого материала, и, обычно, проводится на основе результатов испытаний на усталость натурных образцов. При проведении натурных испытаний вызывает интерес характер распределения и величина остаточных напряжений и деформаций в поверхности резьбы, степени наклепа, параметрах цикла действующих суммарных (остаточных и эксплуатационных) напряжений. При этом без специальной аппаратуры сложно оценить эффективность назначенных режимов упрочнения изделия на сопротивление усталости. Так было установлено, что область пластического деформирования незначительно больше пятна контакта и распространяется на 2,5..3 мм в глубину, дна впадины.

Установлено также, что приповерхностные слои материала дна впадины резьбы имеют значительное повышение микротвердости на глубину до 1 мм. Таким образом, показано, что в процессе обкатывания резьбы роликом в приповерхностных слоях материала межвитковой впадины резьбы формируются области сжимающих напряжений и упрочнение этого слоя, что в значительной степени препятствует возникновению микротрещин и дальнейшему усталостному разрушению бурильных труб.

Для решения задачи в статической постановке модель была разбита на конечные элементы, полученная конечно-элементная модель. В соответствии с принятой физической моделью процесса разработана ее математическая модель. Описание упругопластических процессов для каждого из двух контактирующих тел в указанной постановке описано в статье.

Для получения приближенного решения поставленной ниже задачи был использован программный комплекс *ABAQUS*, использующий традиционный для механики деформируемого твердого тела метод конечных элементов. В частности в силу существенной нелинейности задачи был использован модуль *Abaqus/Explicit*.

С точки зрения механики деформируемого твердого тела задача моделирования процесса обкатывания резьбы относится к трехмерным нестационарным контактными задачам упругопластического деформирования. Сложная геометрия моделируемых тел исключает возможность использования аналитических методов для решения подобной задачи. Модель ролика устанавливалась во впадину резьбы без наклона к оси обрабатываемой детали и прижималась соответствующим усилием, затем труба начинала вращаться, заставляя прижатый ролик катиться по впадине резьбы [2]. Так в результате проведенного численного эксперимента по определению напряжений после обкатки роликом резьбовой поверхности бурильной трубы определена интенсивность напряжений. В результате проведенной работы была разработана программа и получено Свидетельство о государственной регистрации программы *PKNM Deep Roll Thread v 1.0* («Обкатка резьбы роликом ПКНМ версия 1.0») №2014610774.

Анализ результатов моделирования с использованием динамического подхода показал, что в процессе обкатывания резьбы роликом в приповерхностных слоях материала межвитковой впадины резьбы формируются области сжимающих напряжений, что приводит к упрочнению этого слоя и препятствует возникновению микротрещин [3].

С другой стороны, в результате данного процесса в подповерхностных слоях материала резьбы могут формироваться области значительных растягивающих напряжений, что может приводить к возникновению внутренних микро- и макротрещин, приводящих к разрушению конструкции. Подбирая соответствующие параметры процесса (геометрия ролика и сила его прижатия), можно получать благоприятные для данной конструкции распределения остаточных напряжений и микротвердости.

#### Выводы:

1. Проведенный анализ показал отсутствие научных и методологических основ технологического процесса упрочнения резьбовых соединений роликом, направленных на повышение эффективности эксплуатации буровых труб и снижения себестоимости обработки.

2. В результате проведенной работы сделана постановка трехмерной нестационарной контактной задачи упругопластического деформирования резьбы при обкатывании, решение которой повысит конкурентоспособность продукции.

3. Полученные модели ППД участка буровой трубы с конической замковой резьбой, проведены численные эксперименты и сделан их анализ; проведены необходимые инженерные расчеты и анализ локальных механических напряжений с помощью метода конечных элементов. Все это ведет к повышению конкурентоспособности продукции и снижению затрат на ее изготовление.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Песин М.В.* Научные основы моделирования процесса упрочнения впадины резьбы буровых труб обкатыванием роликом // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №5 (30). С. 68–70.
2. Simulation of the Technological Process of the Strengthened Treatment of the Drill Pipes Thread / M. V. Pesin // Urgent Problems of Up-to-Date Mechanical Engineering : Intern. Conf., UTI TPU, December 11-12, 2014, Yurga, Russia. - Dumten-Zurich : TTP, 2015. – P. 476-482. – ([Applied Mechanics and Materials; Vol. 770]).
3. *Pesin M.V.* Improving the Reliability of Threaded Pipe Joints. Russian Engineering Research 2012. Vol. 32. №2. pp. 210–212.

УДК 621.9.06

*А. А. Швец, А. В. Дроботов, И. А. Гуцин, А. Р. Авдеев*

#### УПРАВЛЕНИЕ 3D ПРИНТЕРОМ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

**Волгоградский государственный технический университет**

В промышленности широко используются различные 3D принтеры. Их основными недостатками являются низкая производительность и качество. В статье рассматривается способ изготовления изделий сложной формы на 3D принтере, оснащенный дополнительными степенями свободы. Приведено математическое обоснование принципа автоматической подготовки управляющей программы для такого устройства. Предложен алгоритм подготовки управляющей программы. Печать на таком устройстве позволит получать изделия с повышенными прочностными характеристиками в сравнении с изделиями, произведенными стандартным способом печати.

*Ключевые слова:* аддитивные технологии, метод послойного наплавления, STL, алгоритм расчета пересечений, заполнение модели, G-Code.

In industry, various 3D printers are widely used. However, their low productivity and quality are their main disadvantages. The article deals with way of manufacturing products with complex shapes on a 3D printer equipped with additional degrees of freedom. The mathematical justification of the principle of automatic preparation of the control program for such device is given. An algorithm for preparing a control program is proposed. Printing on such device will allow receiving products with increased strength characteristics in comparison with products produced by the standard printing method.

*Keywords:* 3D printing technology, Fused Deposition Modeling (FDM), STL, algorithm for finding intersections, infill, G-Code.

Многие крупные корпорации уже сейчас изготавливают по аддитивным технологиям элементы конечных изделий. Особенность аддитивных технологий - низкое качество получаемых поверхностей на наклонных гранях. Кроме того, для печати деталей, имеющих свесы (рис. 1), необходимо

использовать поддержку 4. Это ведет к снижению производительности, дополнительному расходу материала, необходимости удаления поддержек после печати [1].

Однако, если использовать не стандартную 3-х осевую, а 5-ти осевую печать, с наклоном и поворотом (вращением) изделия (или печатающей головки), то можно обойтись без поддержек под нависающими элементами (рис. 1). Кроме того, наложение нитей материала в различных направлениях повысит прочность изделий и качество их поверхности.

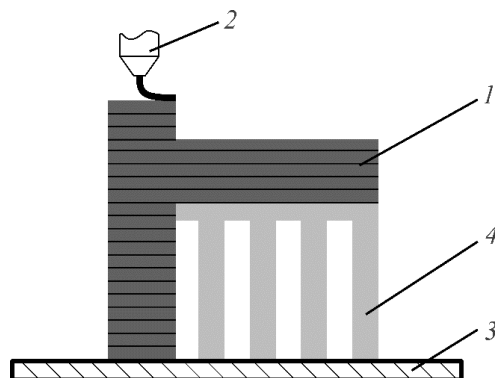


Рис. 1. Печать изделия с поддержкой по традиционной технологии

На рис. 1 показан процесс построения детали 1 экструдером 2 на рабочем столе 3 по обычной (трехосевой) технологии, с нависающей частью и поддержкой 4 под ней. Построение той же детали с использованием 5-ти осевой технологии показано на рис. 2. При этом сперва печатается вертикальная часть детали (рис. 2, а), затем стол поворачивается и печатается нависающий элемент (рис. 2, б) [2].

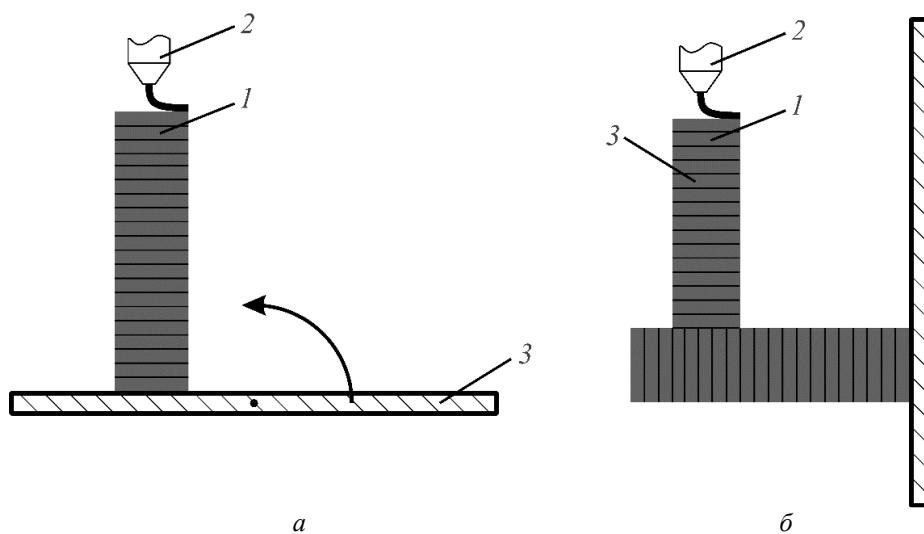


Рис. 2. Изготовление изделия на устройстве с возможностью наклона:

а – после построения вертикальной части, стол поворачивается; б – построение горизонтальной части изделия после поворота

На данный момент не разработано ПО для автоматической подготовки файла для многоосевой печати на 3D принтере [3]. Поэтому для пятиосевого устройства, необходим собственный редактор, который позволит генерировать программу управления на основе заданной объемной модели изделия, учитывающий особенности специальных режимов многоосевой печати. К таким специальным режимам построения можно отнести: печать упрочняющих слоев методом разнонаправленного наложения нити материала на боковых поверхностях (рис. 3); печать выравнивающих слоев на наклонных поверхностях для повышения качества (снижения показателя шероховатости поверхности) конечного изделия; наклон детали, с последующим нанесением дополнительных элементов на боковых поверхностях (рис. 2); печать деталей вращения с помощью поворотного стола.



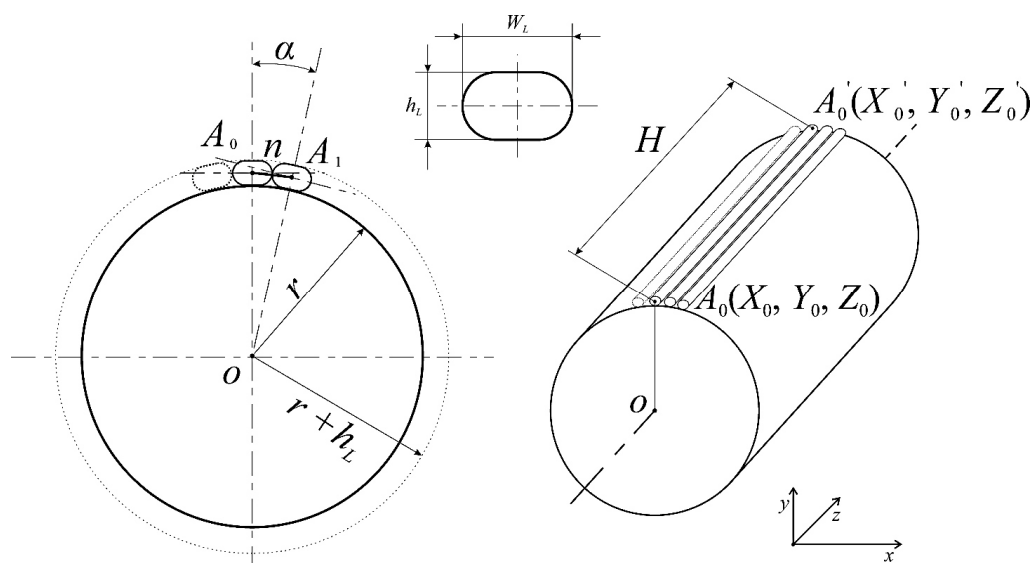


Рис. 3. Принцип печати упрочняющих слоев

Для реализации описанных режимов работы, необходимо рассчитать координаты начала и окончания путей перемещения печатающей головки. Рассмотрим режим построения с нанесением разнонаправленных слоев на примере цилиндрической детали радиусом  $r$ . На рис. 3 показано нанесение линии заполнения длиной  $H$  с началом в точке  $A_0$  с координатами  $(X_0, Y_0, Z_0)$  и концом в точке  $A'_0$  с координатами  $(X'_0, Y'_0, Z'_0)$ . Форма нити, выходящей из сопла представляет собой в сечении окружность, но после касания с деталью ее сечение становится прямоугольником со скругленными углами шириной  $W_L$  и высотой  $h_L$ , равной высоте слоя печати. Точка начала отсчета – центр окружности в основании цилиндра в точке  $O$ . Расчет количества линий заполнения в слое производится по выражению 1:

$$n' = 2 \cdot \pi \cdot (r + h_L) / W_L. \quad (1)$$

Затем, расчетное количество  $n'$  линий округляется до целого  $n$  в меньшую сторону  $n = \lfloor n' \rfloor$ , и вычисляется результирующая ширина каждой линии по выражению 2:

$$W = W_L \cdot n' / n. \quad (2)$$

После, рассчитывается угловой шаг линий заполнения:

$$A_p = 2 \cdot \pi / n. \quad (3)$$

Расчет координат точек  $A_i$  начала каждой линии заполнения производится по выражениям:

$$X_i = r \cdot \cos(A_p \cdot i), Y_i = r \cdot \sin(A_p \cdot i), Z_i = 0. \quad (4)$$

Расчет координат  $(X'_i, Y'_i, Z'_i)$  точек  $A'_i$  окончания каждой линии ведется по тем же выражениям (4), но при  $Z'_i = H$ . При расчете точки  $A_i$  и  $A'_i$  заносятся в массив, и, в конце, происходит замыкание контура, путем добавления первой точки в конец массива.

Для возможности вести заполнение не прямыми линиями (по образующей цилиндра), а по спирали, начала линий ( $A_i$ ) определяются так же, как и в предыдущем случае, а окончания ( $A'_i$ ) – по следующим выражениям:

$$X'_i = r \cdot \cos\left(A_p + \frac{180 \cdot H \cdot \tan(\beta)}{\pi \cdot r}\right), Y'_i = r \cdot \sin\left(A_p + \frac{180 \cdot H \cdot \tan(\beta)}{\pi \cdot r}\right), Z'_i = H, \quad (5)$$

где  $\beta$  – угол наклона линии  $A_i A'_i$  к образующей цилиндра, проходящей через точку  $A_i$  в плоскости, проведенной через эту образующую касательно к боковой поверхности цилиндра.

Расчет количества слоев  $L$  детали находится путем деления необходимой величины радиуса цилиндра  $R$  на величину высоты слоя  $h_L$ :

$$L = R / h_L. \quad (6)$$

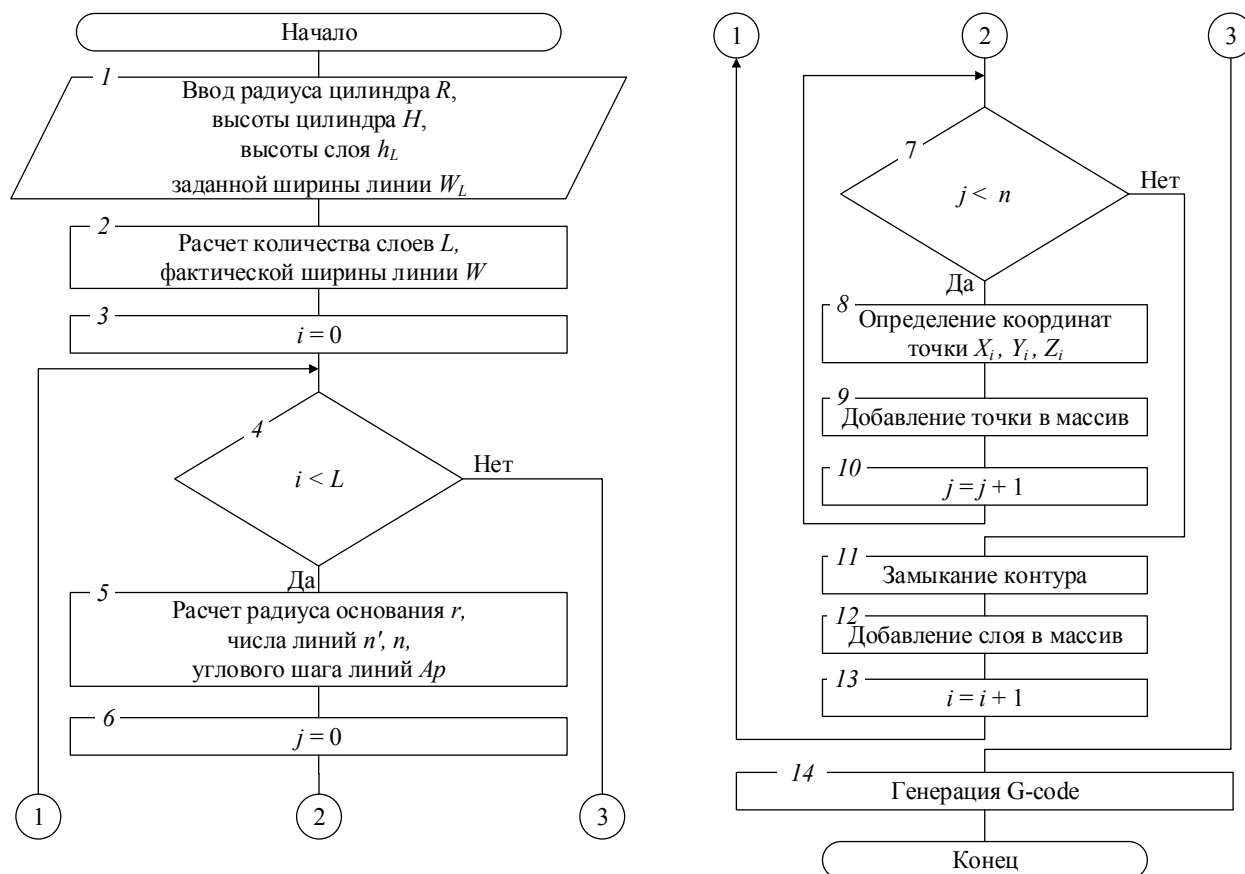


Рис. 4. Алгоритм расчета координат точек начала и конца линий

Алгоритм расчета координат точек начала  $A_i$  и окончания  $A'_i$  линий заполнения представлен на рисунке 4. Входные данные, необходимые для расчетов, вводятся в блоке 1. В блоках 2 и 5 выполняется вычисление параметров линий заполнения по выражениям 1, 2, 3 и 6. Цикл, начинающийся с блока 4, создает слои заполнения, в котором сами линии с координатами, рассчитанными по выражениям 4 и 5 создаются в цикле, показанном блоками 7-10. Блок 14 создает управляющую программу (G-код).

Детали, построенные таким способом, смогут выдерживать более высокие нагрузки, в особенности повышается прочность на растяжение, в сравнении с деталями, напечатанными стандартно, где происходит разрыв по слоям.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алгоритм деления объемной модели на слои для 3D-печати / И.А. Гушин, А.Р. Авдеев, А.А. Швец, А.В. Дроботов // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. - 2016. - Вып. 11, ч. 2. - С. 99-105.
2. Принципы создания программы работы устройства объемной печати по трехмерной модели / И. А. Гушин [и др.] // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2015. - № 11 (173). - С. 50-53.
3. Liou, F. Multi-Axis Planning System (MAPS) for Hybrid Laser Metal Deposition Processes / F. Liou, J. Ruan, T. E. Sparks // 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference / Missouri University of Science and Technology. - Rolla, MO, USA, 2010. - P. 592-695.

## ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ

УДК-621.9.048.4

*Т. Р. Абляз<sup>1</sup>, Л. А. Ушомирская<sup>2</sup>, Д. А. Зарубин<sup>2</sup>*

### ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ\*

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО ПНИПУ<sup>2</sup> ФГАОУ ВО СПБПУ

Актуальной задачей является разработка технологии, позволяющей произвести финишную обработку поверхностей сложнопрофильных деталей, выполненных из труднообрабатываемых материалов, полученных методом электроэрозионной обработки. Целью работы является изучение возможности применения метода электролитно-плазменного полирования для финишной обработки поверхностей деталей, полученных методом копировально-прошивной электроэрозионной обработки. В качестве обрабатываемого материала выбрана конструкционная легированная сталь 38X2H2MA по ГОСТ 4543–71. Электроэрозионная обработка образца проходила на копировально-прошивном электроэрозионном станке Electronica Smart CNC. Эксперименты по электролитно-плазменной полировке экспериментальных образцов после ЭЭО проводились на лабораторной установке «Polytech-15» мощностью 15 кВт. В процессе исследования изучалось изменение шероховатости обработанной поверхности. В работе показана возможность применения технологии электролитно-плазменной полировки для повышения качества обработанной поверхности стали 38X2H2MA после электроэрозионной обработки. Установлено, что применение технологии электролитно-плазменного полирования за 5 мин рабочего времени позволило снизить шероховатость обработанной методом электроэрозионной обработки поверхности в среднем в 5 раз. Показано, что для получения шероховатости обработанной поверхности детали значением Ra 1,6 мкм эффективнее использовать сочетание технологий электроэрозионной обработки на режимах №2 и электролитно-плазменного полирования.

*Ключевые слова:* электроэрозионная обработка, электролитно-плазменное полирование, шероховатость.

The actual task is to develop a technology that allows the finishing of surfaces of difficult-to-profile parts made of hard-to-work materials obtained by electrical discharge machining. The aim of the work is to study the possibility of using the electrolyte-plasma polishing method for finishing the surfaces of parts obtained by the method of electrical discharge machining. As the processed material, structural alloyed steel 38X2H2MA in accordance with GOST 4543 - 71 was chosen. Electrical discharge machining of the sample was carried out on the machine-tool Electronica smart CNC. Experiments on electrolyte-plasma polishing of experimental samples after EEE were carried out on a laboratory installation "Polytech-15" with a power of 15 kW. In the course of the study, the change in the roughness of the treated surface was studied. The paper shows the possibility of applying electrolyte-plasma polishing technology to improve the quality of the machined surface of 38X2H2MA steel after electrical discharge machining. It is established that the use of the technology of electroclimatic-plasma polishing in 5 minutes of work allowed to reduce the roughness of the surface processed by the electrical discharge machining by an average of 5 times. It is shown that in order to obtain a roughness of the machined workpiece surface with a value of Ra 1.6  $\mu\text{m}$ , it is more efficient to use a combination of electrical discharge machining technologies at regimes No. 2 and electrolytic-plasma polishing.

*Keywords:* electrical discharge machining, electrolytic-plasma polishing, roughness.

#### Введение

Эффективность применения технологии электроэрозионной обработки (ЭЭО) обусловлена возможностью изготовления как отдельных сложнопрофильных элементов на заготовках, так и изготовления полноценных деталей машин и механизмов выполненных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Технологические процессы изготовления деталей с применением метода ЭЭО, как правило, не предусматривают последующих финишных опера-

© Абляз Т. Р., Ушомирская Л. А., Зарубин Д. А., 2017

© Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию 11.9716.2017/8.9

ций, и окончательная шероховатость поверхности формируется на электроэрозионном станке. Большинство современных электроэрозионных станков позволяют получать шероховатость обработанной поверхности в диапазоне Ra 0,1-0,4 мкм. Данные показатели шероховатости достигаются при подключении электрода-детали к отрицательному полюсу генератора импульсов и назначении режимов с минимальной энергией импульса. Однако обработка изделий на чистовых режимах резания характеризуется низкой производительностью процесса ЭЭО [1]. Актуальной задачей является разработка технологии позволяющей произвести финишную обработку поверхностей сложнопрофильных деталей выполненных из труднообрабатываемых материалов полученных методом ЭЭО.

Адекватным решением является применение технологии электролитно-плазменного полирования сложнопрофильных поверхностей (ЭПП). Метод ЭПП основан на электроразрядных явлениях в системе «металл-электролит», при этом обрабатываемая деталь является анодом. В процессе ЭПП напряженность электрического поля достигает максимального значения на вершинах микронеровностей. На этих участках возникают мигрирующие по поверхности микроплазменные разряды, которые обеспечивают комплексное химическое и физическое воздействие на материал поверхности изделия. В микроразрядах выделяется значительная энергия и наблюдается интенсивный процесс снижения высоты микронеровностей поверхности, что приводит к ее полированию [2-5]. В настоящее время не в полной мере изучен вопрос применения технологии ЭПП для обработки поверхностей деталей полученных методом ЭЭО.

Цель работы – изучение возможности применения метода ЭПП для финишной обработки поверхностей деталей полученных методом копировально-прошивной ЭЭО.

#### Материалы и методы исследования

В качестве обрабатываемого материала выбрана конструкционная легированная сталь 38Х2Н2МА по ГОСТ 4543–71. Экспериментальный образец представляет собой пластину размером 10х20 мм и толщиной 2 мм.

Электроэрозионная обработка образца проходила на копировально-прошивном электроэрозионном станке Electronica Smart CNC. Рабочая жидкость - масло И-20А. Режимы обработки представлены в табл. 1, где  $T_{оп}$  – время включения импульсов (мкс),  $T_{ау}$  – рабочий цикл импульса (%),  $U$  – напряжение (В),  $I$  – сила тока (А). Глубина прожига составляла 0,4 мм.

Таблица 1

Режимы электроэрозионной обработки

№ эксперимента	Режимы обработки			
	I, А	U, В	$T_{оп}$ , мкс	$T_{ау}$ , %
1	6	50	50	26
2	50	50	50	26
3	20	50	50	26
4	3	50	50	26
5	1	50	50	26

Измерение шероховатости производилось на профилометре Mahr Perthometer S2 по ГОСТ 2789–73. Анализ обработанной поверхности проводился при помощи светового микроскопа Olympus при увеличении x200 крат.

Эксперименты по электролитно-плазменной полировке экспериментальных образцов после ЭЭО проводились на лабораторной установке «Polytech-15» мощностью 15 кВт. Используемый метод – частичное погружение. Напряжение на электродах составляло 270 В. Для дифференциации уровня выпрямленного выходного напряжения в установке «Polytech-15» используется лабораторный трехфазный автотрансформатор. В качестве электролита использовались растворы солей в дистиллированной воде. Рабочая температура электролита составляла 90° С. Время обработки экспериментального образца составляло 5 минут.

#### Результаты исследования и обсуждения

В процессе ЭПП образцов полученных методом ЭЭО при подачи напряжение на электроды вокруг поверхности образца, погруженной в электролит, загоралась стабильная плазма аномально-

го тлеющего разряда. Происходило комплексное электрохимическое и электрофизическое воздействие на поверхность образца, в результате чего происходило сглаживание микронеровностей (полирование). Обработанные поверхности обретали металлический блеск.

Установлено, что при снижении температуры электролита ниже  $90^{\circ}\text{C}$  толщина пароплазменной оболочки уменьшалась, возникал эффект анодного нагрева. Эффект полирования в данном случае отсутствовал, поверхность образца покрывалась черными пятнами.

В табл. 2 представлены результаты замера высоты микронеровностей полученных после ЭЭО на режимах табл. 1 и результаты замеров этих же образцов после применения метода ЭПП.

Таблица 2

Шероховатость поверхностей деталей

№ эксперимента	I, А	Ra после ЭЭО	Ra после ЭПП
1	6	4,6	1,4
2	50	7,7	1,6
3	20	6,7	1,4
4	3	1,6	0,4
5	1	1,5	0,4

Из проведенных исследований установлено, применение технологии ЭПП позволило снизить высоту микронеровностей полученных после ЭЭО в среднем в пять раз.

На рис. 1 представлены профилограммы поверхностей образца № 4 (табл. 2) после ЭЭО и последующего ЭПП.

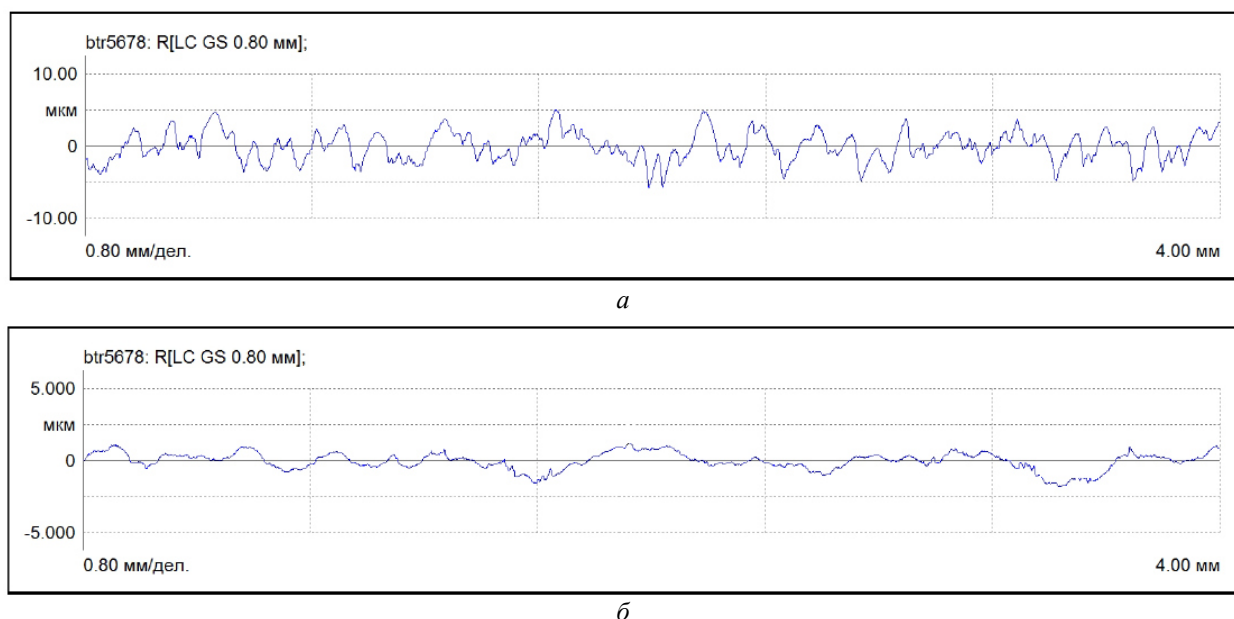


Рис. 1. Профилограммы обработанных поверхностей:  
а – после ЭЭО; б – после ЭПП

Максимальная высота микронеровностей уменьшилась от значения  $R_{\max} 10,9$  мкм (после ЭЭО) до значения 4,1 мкм (после ЭПП). Средний шаг неровности  $S_m$  после ЭПП увеличился до значения 421,4 в сравнении со значением среднего шага после ЭЭО  $S_m = \text{мкм } 197,4$  мкм.

На рис. 2 представлен анализ поверхностей заготовки (образец № 4) после ЭЭО и последующего ЭПП.

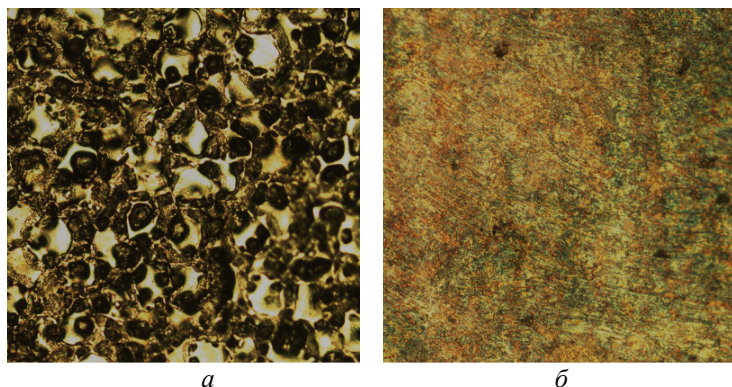


Рис. 2. Микроскопический анализ обработанных поверхностей  $\times 100$ :  
 а – поверхность после ЭЭО; б – поверхность после ЭПП

Анализ образца № 4 показал, что после ЭЭО обработанная поверхность представляет собой большое количество наложенных друг на друга единичных лунок (рис. 2, а). Видны следы оплавления металла на границах лунок. Средний диаметр единичной лунки составляет 100 мкм. После ЭПП (рис. 2, б) на обработанной поверхности не наблюдаются ярко выраженных следов единичных лунок. Поверхность ровная, зон оплавления металла после ЭЭО не наблюдается.

#### Выводы

Показана возможность применения технологии ЭПП для повышения качества обработанной поверхности стали 38Х2Н2МА после ЭЭО.

Установлено что ЭПП за 5 минут рабочего времени позволило снизить шероховатость обработанной методом ЭЭО поверхности в среднем в 5 раз.

Показано, что для получения шероховатости обработанной поверхности детали значением  $R_a$  1,6 мкм эффективнее использовать сочетание технологий ЭЭО на режимах № 2 и ЭПП.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние шероховатости рабочей поверхности электрода-инструмента на производительность электроэрозионной обработки стали 38х2Н2МА / Т. Р. Абляз, Д. А. Борисов // СТИН. - 2017. - № 3. - С. 19-22.
2. Зарубин Д.А., Ушомирская Л.А. и др. Автоматизация процессов электролитно-плазменной обработки пространственно сложных поверхностей токопроводящих изделий методом контролируемого струйного полива: «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении» (МТЕТ – 2016), 6-8 октября 2016 – 347 с ;
3. Куликов И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов/ И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Камнев. – Минск: Беларусь. Наука, 2010. – 232 с.
4. Патент: Способ электролитно-плазменного полирования деталей из нержавеющей сталей (RU 2461667).
5. Ушомирская Л.А., Новиков В.И., Фоломкин А.И. Формирование газовой анодной оболочки и ее влияние на возможности электролитно-плазменной обработки сложных поверхностей // Металлообработка : научно-производственный журнал. – СПб., 2012. – № 3 (69). – С. 11-14.

УДК 621.9.048.6

*М. М. Ганиев, И. М. Ганиев*

#### ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УДАРНОЙ ОБРАБОТКИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ СТАЛИ

Поволжский Федеральный Университет, Казань

Исследовано влияние ультразвуковой ударной обработки на коррозионную стойкость стали 17Г1С. Установлено, что при обработке коррозионных участков эффективность пассивации поверхности определяется оптимальным сочетанием режимов ультразвуковой обработки и выбора ингибитора коррозии. Показано, что ультразвуковая ударная обработка оказывает двойное действие: повышение коррозионной стойкости и упрочнение стали.

*Ключевые слова:* ультразвук, коррозионная стойкость, ППД, ингибитор.

The influence of ultrasonic impact treatment on the corrosion resistance of the 17G1S steel is studied. It is established that the efficiency of passivation of the treated surface is determined by the optimal combination of ultrasonic treatment regimes and the choice of a corrosion inhibitor. It is shown that ultrasonic impact treatment has a double action: increasing of the corrosion resistance and hardening of the steel.

*Keywords:* ultrasonics, corrosion resistance, surface peening, inhibitor.

Коррозионная стойкость материалов деталей имеет важное значение для прочности конструкций, эксплуатирующихся в условиях воздействия агрессивных сред. Например, значительная часть аварий на магистральных газопроводах происходит по причине коррозионного растрескивания. Коррозия развивается вглубь материала послойно в плоскостях остаточных напряжений, образовавшихся при прокатке труб. Места, пораженные коррозией, являются концентраторами напряжений для межкристаллитного растрескивания и дальнейшего развития коррозии. Поэтому актуальной задачей является изыскание простых и эффективных способов повышения коррозионной стойкости сталей и ремонта коррозионных участков с восстановлением их прочности.

В ряде работ [1, 2, 3, 4, 5] отмечается положительное влияние поверхностного пластического деформирования (ППД) обкаткой роликом, шариком на коррозионную стойкость и коррозионно-усталостную прочность сталей. При ППД происходит сглаживание микронеровностей, закатывание дефектов поверхности, уменьшение площади контакта со средой. Образующиеся напряжения сжатия препятствуют раскрытию усталостных трещин и проникновению в них коррозионной среды. Степень повышения коррозионной стойкости и коррозионно-усталостной прочности различается для разных марок сталей.

Одним из эффективных и перспективных способов ППД является ультразвуковая ударная обработка (УУЗО) [1, 4]. В последние годы для ППД сталей с целью повышения производительности начали применять ультразвуковую ударную обработку многобойковым инструментом [6–8]. В данной работе представлены результаты исследования влияния УУЗО в комбинации с ингибитором на коррозионную стойкость широко применяемой для изготовления газовых трубопроводов стали 17Г1С.

#### Методика исследований

Для УУЗО использовался серийно выпускающийся ультразвуковой многобойковый технологический комплект УЗТК 18/20-0,40 «Гефест-400Э», с модернизированной по патенту [9] виброзащитой оператора (представлен на рисунке). Корпус инструмента жестко закреплялся в вертикальном положении на массивном штативе. Статическое усилие прижима инструмента к обрабатываемой поверхности обеспечивалось контролируемым давлением сжатого воздуха в системе охлаждения инструмента. Усилие прижима в 60 Н выдерживалось с точностью  $\pm 2$  Н.

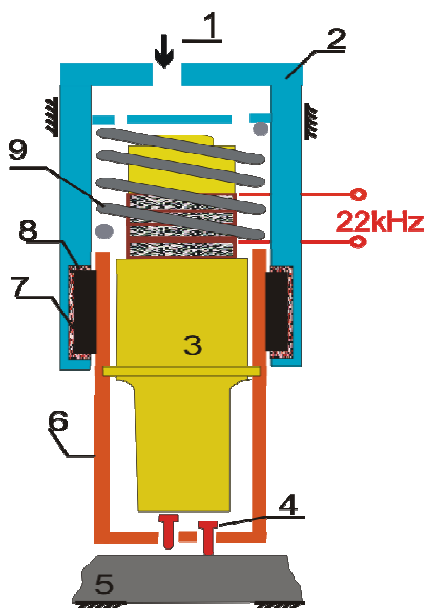


Схема ультразвукового многобойкового инструмента:  
1 – сжатый воздух; 2 – корпус; 3 – магнитоstrictionный преобразователь; 4 – промежуточный блок; 5 – образец; 6 – обойма; 7 – эластичные вкладыши; 8 – направляющие; 9 – пружина

Образцы размерами 29,7x29,7x2 мм изготавливались из исследуемой стали. Формообразование образцов выполнялось механическим резанием-фрезерованием и шлифованием до Ra 1,25 мкм по всем плоскостям. Для каждого вида коррозионного испытания использовалась серия из пяти одинаковых образцов так. В табл. 1 и 2 приведены виды и условия применявшейся обработки образцов до коррозионных испытаний.

Таблица 1

## Виды комбинированной обработки

№ серии образцов	Вид обработки	Условия обозначения
1.	Без обработки (контрольные образцы)	КО
2.	УЗО в среде Ингибитора 1	И1+УЗО
3.	УЗО в среде Ингибитора 2	И2+ УЗО
4.	Ингибитором 1 при УУО ударным инструментом	И1+УУЗО
5.	Ингибитором 2 при УУО ударным инструментом	И2+ УУЗО
6.	Ультразвуковым ударным инструментом	УУЗО

Таблица 2

## Составы ингибиторов

Код №	Состав	Температура среды	Объем раствора, л/дм	Концентрация массов, %	Время обработки по каждой стороне, с
Ингибитор 1	Сода кальцинирования по ТУ6-18-171-78, вода	50-60	4	30	120
Ингибитор 2	Ингибитор коррозии М1 Ту 6-02-1132-88	50-60	4	5	120

Образцы серии 1 не подвергались обработке ингибитором коррозии и ультразвуком и принимались в качестве контрольных образцов. Образцы серий 2 и 3 подвергались ультразвуковой обработке через слой раствора толщиной 3 мм с двух сторон в среде ингибиторов коррозии 1 и 2 соответственно. Частота ультразвуковых колебаний составляла 22 кГц, интенсивность – 5 Вт/см<sup>2</sup>. Образцы серий 4 и 5 сначала обрабатывались аналогично образцам серий 2 и 3. Далее после просушки подвергались виброударной обработке (УУЗО) с двух сторон инструментом с сеимбойковой насадкой. Образцы серии 6 обрабатывались только виброударным инструментом. Виброударную обработку проводили, положив образец на плотный резиновый лист, в течение 1-й минуты при интенсивности 30 Вт/см<sup>2</sup>.

## Коррозионные испытания

Для испытаний на коррозионную стойкость была применена методика ускоренных лабораторных испытаний, составленная по ГОСТ 9905-82. Перед началом коррозионных испытаний все образцы взвешивались. При коррозионных испытаниях образцы полностью погружались в раствор при подвешивании на все время экспозиции. После выдержки в испытательном растворе образцы очищались от коррозии, промывались, высушивались и снова взвешивались. Составы испытательных растворов приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Составы испытательных растворов

Назначение	Состав	Концентрация (масс, долей, %)	Время экспозиций, ч
Раствор испытательный №1	Серная кислота Соляная кислота Серноокисное желез Поваренная соль Вода	5,0 8,0 3,0 2,0 82,0	96
Раствор испытательный № 2	Серная кислота Серноокисное железо Вода	65,0 3,0 32,0	20



Результаты испытаний оценивались по удельным коррозионным потерям массы металла  $\bar{L}_j$ ; скорости проникновения коррозии в растворе  $R_j$  приведенной скорости проникновения коррозии  $\bar{R}_j$ ; эффективности пассивации  $E_j$ . Удельные коррозионные потери массы металла (среднеквадратичные) для серии оценивались как:

$$\bar{L}_j = \sqrt{\frac{\sum_i \Delta p_i^2}{\tau_{exp}}}, \quad i[1,5] \quad j[1,6], \text{ мг/(дм}^2 \text{ ч)}, \quad (1)$$

где  $\Delta p_i$  - коррозионные потери -  $i$ -го образца, равные разнице результатов до и после испытаний, мг;  $\tau_{exp}$  - время экспозиции, час;  $j$  – номер серии;  $i$  - номер образца в серии.

Скорость проникновения коррозии в испытательном растворе для серии (среднеквадратичная) определялась как:

$$R_i = 0,874 \frac{L_j}{\gamma}, \text{ мм/г}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – плотность металла, г/см<sup>3</sup>.

Приведенная скорость проникновения коррозии вычислялась по формуле:

$$\bar{R}_j = C_{red} R_j, \quad C_{red} = \frac{R_{nat}}{R_l}, \text{ мм/г}; \quad (3)$$

где  $R_{nat}$  – скорость проникновения коррозии, установленная как среднестатистическое значение для натурных объектов (труб)  $R_{nat} = 0,35$  мм/г;  $R_l$  – среднеквадратичная скорость проникновения коррозии на контрольных образцах;  $C_{red}$  - эмпирический коэффициент приведения, позволяющий имитировать коррозионные поражения стали в лабораторных условиях с использованием испытательных растворов данного состава. Для раствора № 1  $C_{red} = 0,517$  мм/г, для раствора № 2 -  $C_{red} = 0,46$  мм/г.

Эффективность метода пассивации определялась относительным уменьшением скорости (в число раз) коррозии пассивированных образцов по сравнению с необработанными:

$$E_j = \frac{R_l}{R_j}, \text{ отн. ед.} \quad (4)$$

#### Результаты исследований

Результаты расчетов параметров коррозии образцов из трубной стали приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4

Параметры коррозии для ингибитора № 1

№ серии	Вид обработки	$\bar{L}_j$ , мг/(дм <sup>2</sup> ч)	$R_i$ , мм/г	$\bar{R}_j$ , мм/г	$E_j$ , отн.ед.
1	КО	6,0399	0,676	0,349	1,0
2	И1-УЗО	5,213	0,583	0,301	1,16
3	И2+УЗО	6,169	0,686	0,355	0,98
4	И1+УУЗО	5,331	0,596	0,308	1,13
5	И2+УУЗО	5,7406	0,330	0,330	1,05
6	УУЗО	6,870	0,768	0,397	0,87

Таблица 5

Параметры коррозии для ингибитора № 2

№ серии	Вид обработки	$\bar{L}_j$ , мг/(дм <sup>2</sup> ч)	$R_i$ , мм/г	$\bar{R}_j$ , мм/г	$E_j$ , отн.ед.
1	КО	0,985	0,446	0,350	1,0
2	И1-УЗО	2,421	0,271	0,212	1,64
3	И2+УЗО	4,186	0,468	0,367	0,95
4	И1+УУЗО	4,367	0,488	0,383	0,91
5	И2+УУЗО	2,79	0,312	0,244	1,42
6	УУЗО	3,45	0,386	0,302	1,15

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

– Ультразвуковая ударная обработка с применением ингибиторов коррозии и без них приводит к повышению коррозионной стойкости стали.

– Эффективность пассивации поверхности определяется оптимальным сочетанием режимов ультразвуковой обработки и выбора ингибитора коррозии.

– Из исследованных видов обработки наибольшую эффективность показали:

1) УЗО с ингибитором коррозии №1;

2) УУЗО с ингибитором коррозии № 2;

3) УУЗО.

Предложенные оборудование и режимы УУЗО прошли полигонные испытания и дали положительные результаты при ремонте коррозионных участков действующего газового трубопровода. Установлено, что при ремонте коррозионных участков УУЗО оказывает двойное действие: повышение коррозионной стойкости и упрочнение стали. В результате этого утонченные из-за коррозии стенки трубы после УУЗО восстановили свою прочность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология и обеспечение ресурса самолетов. / Под ред. Л.Д. Брондз М: Машиностроение, 1986. – 184 с.
2. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. / Под ред. Г.В. Карпенко Киев: Наукова думка, 1976. – 125 с.
3. Упрочнение стали механической обработкой. / Под ред. Г.В. Карпенко, Ю.Н. Бабей, Э.М. Гутман Киев: Наукова думка, 1966. – 201 с.
4. Поверхностное динамическое упрочнение деталей машин. / Под ред. Н.В. Олейник, В.П. Кычин, А.Л. Луговской Киев: Техника, 1984. – 151 с.
5. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. Под ред. / В.М. Сагалевиц М: Машиностроение, 1974. – 248 с.
6. Физико-химия поверхностей: учебное пособие. / Под ред. Л.М. Амирова, М.М. Ганиев, Э.В. Сахабиева, и др. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 1999. – 46 с.
7. Композиционные материалы на основе эпоксидных олигомеров: учеб. пособие. / Под ред. Л.М. Амирова, М.М. Ганиев, Р.Р. Амиров. Казань: Новое знание, 2002. – 167 с.
8. Модификация эпоксидных связующих для армированных стекло- и базальтопластиков. Под ред. Л.М. Амирова, Р.Х. Сайфутдинов, А.Ф. Магсумова, Р.Р. Амиров. // Журнал прикладной химии. 2001. Т.74. № 11. С. 1881-1884.
9. Устройство для изготовления лезвий на кромках плоских заготовок. / В.А. Булавин [и др.]. А.с. 1827904 СССР.

УДК 621.9.048

**В. В. Головкин, О. М. Батищева, В. А. Папшев**

#### **НАРЕЗАНИЕ РЕЗЬБЫ С УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ**

**Самарский государственный технический университет**

Представлена технология ультразвукового способа нарезания резьбы метчиком. Приведено специальное ультразвуковое устройство, и представлены результаты исследования влияния ультразвука на процесс нарезания резьбы.

*Ключевые слова:* нарезание внутренних резьб, ультразвуковые колебания, метчик.

The article presents the technology of ultrasonic method of tapping. It describes a special ultrasonic device and presents the results of the research on the impact of ultrasound on the process of thread cutting.

*Keywords:* internal thread cutting, ultrasonic oscillations, tap.

В современном машиностроении для повышения надежности и срока эксплуатации изделий все более широкое применение находят высокопрочные, жаропрочные и другие материалы с особыми физико-механическими характеристиками, обработка которых часто вызывает серьезные затруднения. Наиболее проблемными являются операции сверления глубоких отверстий и нарезания резьбы, особенно малого диаметра (до 10...12 мм). При этом процесс нарезания резьбы характеризуется низкой производительностью (часто резьба нарезается вручную) и стойкостью резбонарезного инструмента. Кроме того, имеет место частая поломка метчиков, особенно при нарезании резьб М5, М6 и менее.

Одним из возможных аспектов решения данной проблемы является применение качественно новых технологий, основанных на комбинированном воздействии нескольких видов энергии. Наряду с многочисленными методами физико-химической обработки широкое применение получили различные процессы ультразвуковой технологии, причем особенно эффективным оказалось применение ультразвуковых колебаний при нарезании резьб малого диаметра в материалах с высокими прочностными характеристиками.

Многочисленными исследованиями установлено [Головкин, В.В., Ромашкина, О.В. Влияние ультразвука на процесс нарезания резьбы и работоспособности резьбовых деталей: Монография / В. В. Головкин, О. В. Ромашкина – Самара: «Изд-во СНЦ», 2012. – 113 с.], что введение в зону резания ультразвуковых колебаний при нарезании резьбы метчиком позволяет значительно повысить производительность, механизировать процесс резьбонарезания, в несколько раз повысить период стойкости метчиков, а также улучшить качественные характеристики поверхностного слоя резьбы. Для реализации предложенного способа обработки с наложением на метчик ультразвуковых колебаний были разработаны специальные ультразвуковые резьбонарезные устройства. Общий вид одного из ультразвуковых устройств представлен на рис. 1.

Данное ультразвуковое устройство выполнено с пьезокерамическим преобразователем ультразвуковых колебаний, что позволило значительно уменьшить его габариты и массу. Кроме того, при разработке были реализованы технические решения, направленные на устранение и компенсацию возможных технологических проблем, имеющих место при нарезании внутренних резьб метчиками. В частности, в устройстве имеется возможность компенсации несоосности метчика и отверстия под резьбу, погрешности шага нарезаемой резьбы и подачи станка, за счет телескопического выдвижения ведомого вала, реверсирования инструмента при срабатывании предохранительной муфты, что исключило возможные поломки метчиков. Для удобства работы в устройстве предусмотрено настраивание на необходимую глубину резьбонарезания.

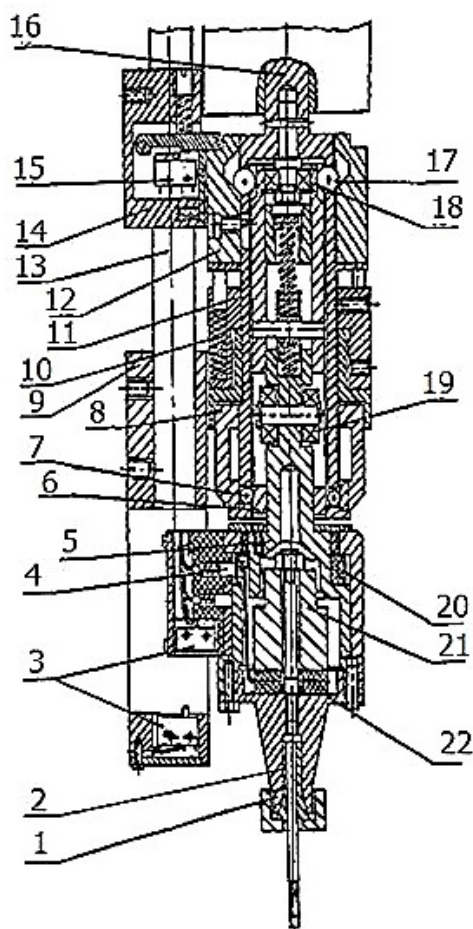


Рис. 1. Ультразвуковое устройство для нарезания резьб М5-М14

При помощи данного ультразвукового устройства были проведены сравнительные исследования влияния ультразвука на процесс нарезания внутренних резьб. На рис. 2 приведены результаты исследования влияния амплитуды колебания ( $\xi$ ) и скорости резания ( $V$ ) на крутящий момент ( $M_{кр.}$ ). Резьба нарезалась в заготовках из титанового сплава BT9. При этом метчику сообщались ультразвуковые колебания в осевом направлении.

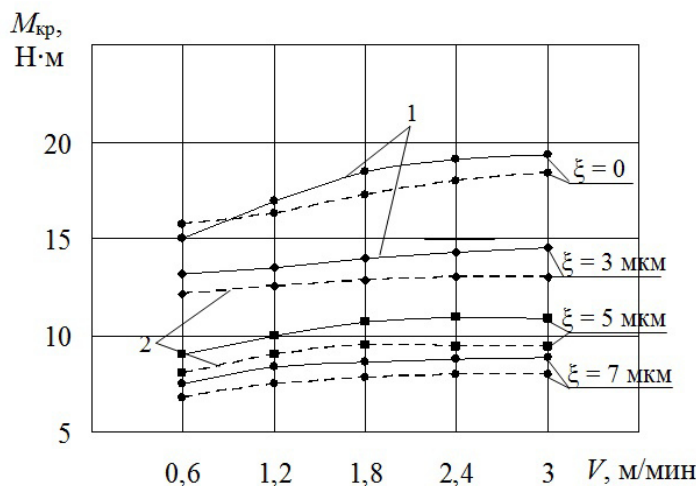


Рис. 2. Влияние амплитуды колебания и скорости резания на крутящий момент при нарезании резьбы М8 метчиком:  
1 – метчик без износостойкого покрытия; 2 – метчик с износостойким покрытием из нитрида титана

Из представленных зависимостей видно, что в случае обработки с ультразвуком имеет место уменьшение значений крутящего момента резания во всем диапазоне исследованных скоростей. С увеличением эффективности ультразвукового воздействия возрастает. Дополнительное нанесение на метчик износостойкого покрытия также позволяет уменьшить крутящий момент резания, что в итоге приводит к повышению периода стойкости метчика. Снижение крутящего момента связано с уменьшением сопротивления пластической деформации за счет активизации дислокации и уменьшении сил трения на режущих поверхностях инструмента ультразвуковым полем.

Также были проведены исследования влияния типоразмера метчика на крутящий момент резания. Из представленных на рис. 3 графиков видно, что крутящий момент возрастает прямо пропорционально диаметру метчика. При этом обработка производилась на заготовках из титанового сплава BT9 сразу 1 или 3 метчиком из комплекта. В данном случае наложение на метчик ультразвуковых колебаний позволяет также существенно уменьшить крутящий момент резания. При обработке с ультразвуком становится возможным нарезать резьбы сразу третьим метчиком из комплекта.

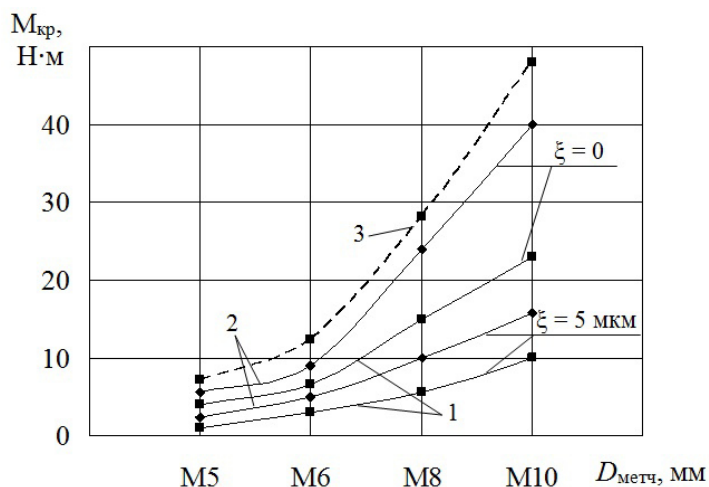


Рис. 3. Влияние ультразвуковых колебаний и типоразмера метчика на  $M_{кр.}$ :  
1 – первый метчик; 2 – третий метчик; 3 –  $M_{кр}$  разрушения метчика

Таким образом, применение ультразвуковых колебаний при нарезании метчиком в труднообрабатываемых материалах позволяет повысить эффективность процесса за счет значительного уменьшения сил резания и улучшения условий работы метчиков.

УДК 621.792.05

*В. А. Лебедев, С. Ю. Штынь, В. Д. Соколов*

## **МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ВИБРАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ\***

**Донской государственный технический университет**

В статье раскрыта сущность вибрационных механо-химических покрытий, отличительной особенностью которых от других способов нанесения покрытий является то, что их формирование происходит в условиях вибрационного ударно-импульсного воздействия свободно движущихся инденторов в виде металлических или стекловидных шариков. Представлена энергетическая модель управления механо-химическим синтезом процесса и обеспечивающая получение покрытия на поверхности материала, требуемой по условиям эксплуатации прочности. На основе обобщенной модели виброволновой технологической системы нанесения покрытий и энергетической модели управления механо-химическим синтезом процесса их формирования в условиях ударно-импульсного, виброволнового воздействия свободнодвижущихся инденторов разработана методика проектирования технологии нанесения покрытий в вибрационных технологических системах, представленная в виде блок-схемы. Заложенный в ней алгоритм проектирования обеспечивает получение заданных эксплуатационных характеристик изделия, в первую очередь, по надежности, долговечности и ресурсу безотказной работы. Показано, что предложенная методика позволяет автоматизировать процесс технологической подготовки производства и расширить область использования вибрационных механо-химических покрытий в различных отраслях машиностроения, особенно при создании образцов новых поколений летательных аппаратов, где рассматриваемые покрытия находят наибольшее применение, а также повышать ресурс покрытий до уровня, не ниже заявленного ресурса всего изделия.

*Ключевые слова:* механо-химические покрытия, вибрационная технологическая система, энергетическая модель, технология, методика проектирования.

The essence of vibrational mechano-chemical coatings is revealed in the article, the distinguishing feature of which from other coating methods is that their formation occurs under conditions of vibrational shock-impulse action of freely moving indentors in the form of metal or glassy spheres. An energy model for controlling the mechanochemical synthesis of the process is presented and it provides a coating on the surface of the material required by the operating conditions of strength. Based on the generalized model of the vibro-wave technological coating system and the energy management model of the mechanochemical synthesis of the process of their formation under the conditions of the shock-impulse and vibration effect of free-moving indentors, a technique for designing coating technology in vibrating technological systems was developed. The design algorithm incorporated in it ensures obtaining of the specified performance characteristics of the product, first of all in terms of reliability, durability and a resource of trouble-free operation. It is shown that the proposed technique allows to automate the process of technological preparation of production and expand the scope of use of vibrational mechano-chemical coatings in various branches of engineering, especially when creating samples of new generations of aircraft, where the coatings in question find the greatest application and also increase the life of coatings to a level no lower than Declared resource, and the whole product.

*Keywords:* mechanical-chemical coatings, vibrational technological system, energy model, technology, design methodology.

Отличительной особенностью вибрационных механо-химических покрытий (ВиМХП) от других способов нанесения покрытий является то, что их формирование происходит в условиях вибрационного ударно импульсного воздействия свободно движущихся инденторов в виде металлических или стекловидных шариков. В результате динамического воздействия обеспечивается активация химических процессов протекающих в поверхностном слое происходит изменение его геометрических и физико-механических характеристик. Основными факторами, определяющими механизм формирования покрытия на поверхности металлов, являются: природа контактирующих материалов и их физико-химические свойства; степень участия металлической основы в образовании покрытия; условия формирования покрытий, обусловленные амплитудно-частотными пара-

метрами виброволнового воздействия, видом и гранулометрическими характеристиками рабочей среды, уровнем создаваемых в зоне контакта динамическими нагрузками.

Исследования проведенные в НИИ «Вибротехнология» ДГТУ впервые раскрыли возможности применения вибрационных технологических систем для нанесения покрытий различного функционального назначения путем введения в рабочую камеру непрерывно или периодически жидких растворов, суспензии или порошковых материалов и создали предпосылки для разработки методики проектирования технологии нанесения покрытий в вибрационных технологических системах на основе энергетической модели управления механохимическим синтезом процесса.

В работах [1,2,3,4] показано, что процесс формирования вибрационных механохимических покрытий представляет собой совокупность одновременно протекающих в поверхностном слое металла под воздействием механических внешних сил химических и физико-химических явлений. С учетом метода избыточных величин Гиббса, интерпретацией энтропии Больцманом, известных из теории сопротивления материалов выражений для оценки энергий упругих и пластических деформаций, а также выражения, устанавливающего изменение свободной энергии в локальном микрообъеме в процессе химического взаимодействия компонентов покрытия, предложено энергетическое условие, раскрывающее механизм механохимического синтеза формирования покрытий в вибрационных технологических системах и определяющее энергетическое состояние локальных микрообъемов на границе «покрытие – подложка» модифицированных в процессе виброобработки. Это условие учитывает вклад в процесс формирования ВиМХП поверхностного слоя повышения связанной энергии за счет роста энтропии, увеличения энергии упруго-пластических искажений кристаллической решетки в результате механического воздействия инденторов рабочей среды, изменения внутренней энергии поверхностного слоя модифицированного в результате химического взаимодействия контактирующих сред.

Приравняв мольную энергию, определяющую условия образования модифицированного локального микрообъема на границе раздела «покрытие – подложка» к средней энергии единицы связи, обеспечивающей его адгезию  $E_a$ , получена расчетно-аналитическая модель технологической системы вибрационной механохимической обработки, обеспечивающей получение покрытия на поверхности материала, требуемой по условиям эксплуатации прочности:

$$TR \ln \left( \frac{t}{\tau_0} \right) + V_m 10^{-6} \left( \frac{\sigma^2}{2E} + k_a \sigma d/D \right) - \Delta G^0 = E_a,$$

где  $T$ - абсолютная температура,  $R$ - постоянная Больцмана,  $t$ - время пребывания системы в состоянии механохимического синтеза,  $\tau_0$ - период тепловых колебаний атомов,  $V_m$ - молярный объем,  $\sigma$ - эффективное напряжение,  $E$ - модуль упругости,  $k_a$ - коэффициент аккумулялирования механической энергии,  $d$ - диаметр пластического отпечатка,  $D$ - диаметр частиц рабочей среды,  $\Delta G^0$ - свободная энергия Гиббса.

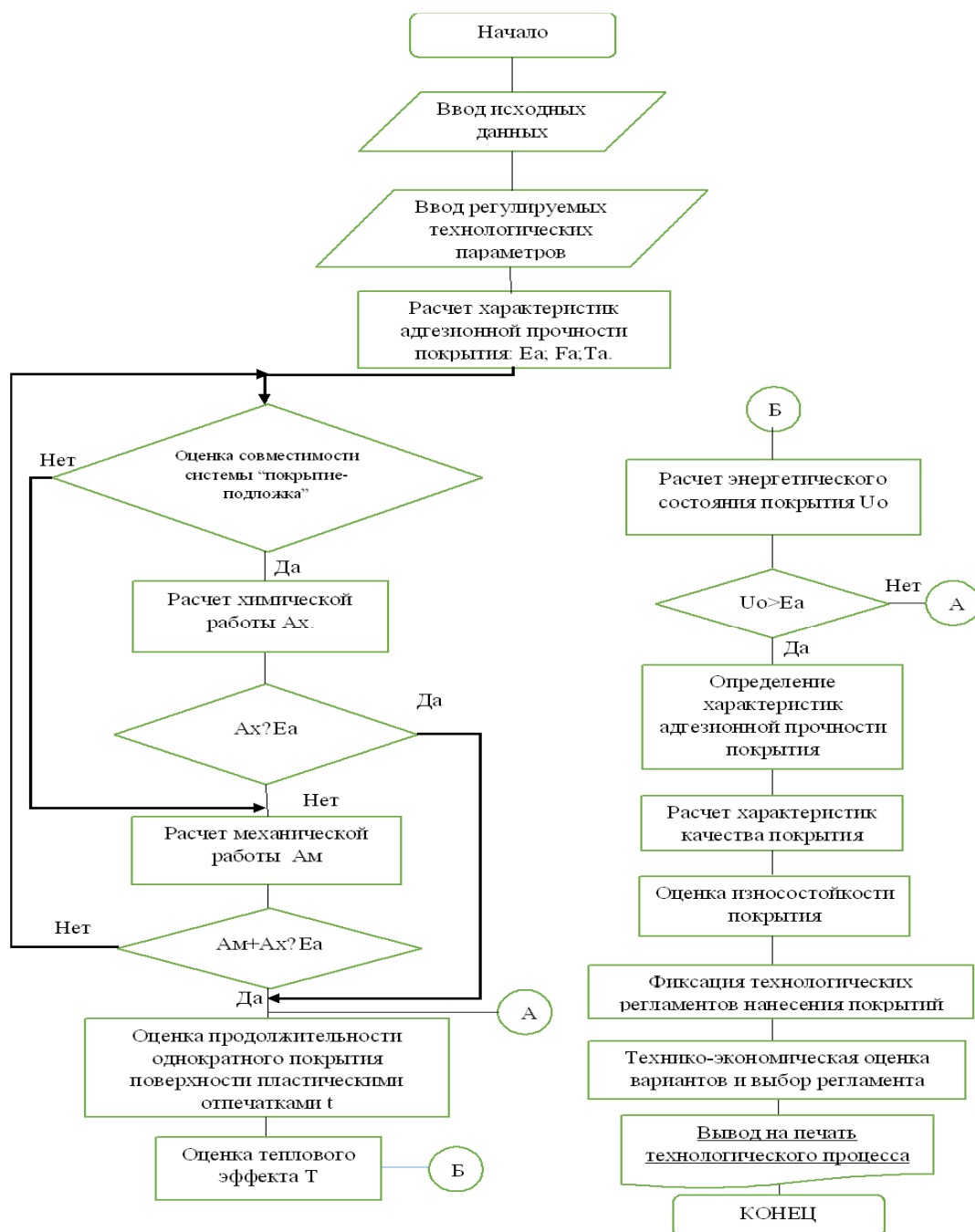
Предлагаемая методика проектирования технологических процессов получения вибрационных механохимических покрытий базируется на обобщенной модели виброволновой технологической системы нанесения покрытий [5] и энергетической модели управления механохимическим синтезом процесса их формирования в условиях ударно-импульсного, виброволнового воздействия свободнотелесных инденторов (2). Базой для построения методики является уровень достигнутых технологических показателей, обеспечивающих получение заданных эксплуатационных характеристик изделия, в первую очередь по надежности, долговечности и ресурсу безотказной работы.

Методически процесс проектирования технологии нанесения ВиМХП может быть представлен в виде изображенной на рисунке блок-схемы, которая включает в себя следующую последовательность действий:

1. Анализ и ввод исходных данных для проектирования, в качестве которых выступают: а) параметры, которые не меняются в процессе обработки: конструктивные параметры обрабатываемой детали: ее геометрическое и размерное описание, материал и механические свойства, вес, требуемые эксплуатационные показатели; б) параметры, которые должны выбираться для реализации технологической задачи: условия проведения процесса (режимы обработки), тип оборудования или устройства, гранулометрические характеристики рабочей среды, характеристики технологической среды покрытия и их технологические ограничения на операцию; в) критерии, характеризующие: показатели качества покрытия после обработки, эксплуатационные свойства поверхности

детали после нанесения покрытия, технический уровень ВТС – ожидаемые производительность и себестоимость и при необходимости санитарно-гигиенические и экологические ограничения.

2. Предварительный прогнозный расчет характеристик его адгезионной прочности: энергия адгезии- $E_a$ , прочность сцепления и сила адгезии для выбранных условий формирования покрытия.



Алгоритм проектирования технологии нанесения ВиМХП

3. Проведение оценки термодинамической совместимости компонентов технологических сред покрытия и материала металла подвергаемого нанесению покрытия (на основании таблиц совместимости).

4. Определение работы химической реакции, протекающей в поверхностном слое при виброобработке, затрачиваемой на изменение состава системы и на повышение потенциальной внутренней энергии модифицированного в процессе обработки локального объема на границе «покрытие – подложка» и ее сравнение с расчетной величиной адгезии - $E_a$ .

6. Определение вклада механических сил в приращение внутренней энергии локального микрообъема покрытия. Вклад механических сил в приращение внутренней энергии локального микрообъема покрытия определяется энергетическим состоянием свободно движущихся инденторов рабочей среды, которое в свою очередь зависит от амплитудно – частотных характеристик вибрационной технологической системой.

7. Анализ энергетического состояния локального микрообъема покрытия сформированного в результате протекания химической и механической активации на границе «покрытие – подложка»

8. Проведение расчета величины внутренней энергии накапливаемой в локальном объеме на границе слоев «покрытие-подложка». Расчет проводится на основе прогноза промежутка времени за которое произойдет изменение энергетического состояния локального микрообъема покрытия в процессе химической и механической активации обрабатываемой поверхности. Расчетная величина внутренней энергии сравнивается с расчетной величиной адгезии покрытия. Если выбранные условия варианта ВиМХП не обеспечивают расчетную величину адгезии осуществляется корректировка условий обратным, по амплитудно-колебательным характеристикам вибрационного воздействия продолжительности обработки и величин режима в камере.

9. Исходя из конкретных условий выбранного варианта ВиМХП осуществление расчета характеристик адгезионной прочности покрытия, определение геометрические характеристики качества покрытия и поверхности обрабатываемой детали, прогнозирование влияния сформированного в процессе ВиМХО покрытия на повышение износостойкости детали.

10. Проведение технико-экономической оценки зафиксированных регламентов и выбор наиболее предпочтительного по установленным в исходных данных требованиям по энергоемкости, экономичности, экологичности.

Представленная методика позволяет ускоренно спроектировать рациональный технологический процесс для получения вибрационных механо-химических покрытий типовых деталей, обоснованно выбрать технологические режимы, оборудование и средства технологического оснащения, источники информации для экономического обоснования эффективности комбинированного процесса для конкретного изделия. Кроме того она позволяет автоматизировать процесс технологической подготовки производства и расширить область использования вибрационных механо-химических покрытий в различных отраслях машиностроения, особенно при создании образцов новых поколений летательных аппаратов, где рассматриваемые покрытия находят наибольшее применение а также повышать ресурс покрытий до уровня, не ниже заявленного ресурса всего изделия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бабичев, А. П.* Основы вибрационной технологии / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. -2 – е изд., перераб. и доп. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2008. – 693 с.
2. *Иванов В.В.* Вибрационные механохимические методы нанесения покрытий/ Монография. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2010.- 143 стр.
3. *Лебедев В.А., Иванов В.В., Соколов В.Д.* Энергетическая модель формирования вибрационных механохимических покрытий/ Наноинженерия, 2013, №5.-стр.11-18.
4. *S U Shtyn, V A Lebedev and A O Gorlenko* Thermodynamic aspects of the coating formation through mechanochemical synthesis in vibration technology systems/ IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 177 (2017) 012127.
5. *Штынь С.Ю., Лебедев В.А., Иванов В.В.* Получение покрытий в виброволновых технологических системах на основе энергетической модели управления механохимическим синтезом процесса /Вестник РГАТУ им. Соловьева. Рыбинск, 2017 №2 – стр. 117-121.



УДК 621.9.047

*С. Ю. Съянов, А. М. Папикян***ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ****Брянский государственный технический университет**

Описаны этапы разработки функционально-ориентированных технологических процессов электроэрозионной обработки от выделения поверхностей деталей и их служебных функций до определения параметров процесса электрической эрозии, которые обеспечат не только параметры качества поверхностного слоя, но и требуемые эксплуатационные свойства.

*Ключевые слова:* функционально-ориентированный технологический процесс, электроэрозионная обработка, качество поверхностного слоя, эксплуатационные свойства деталей машин.

Describes the stages of development of functionally-oriented technological process of electrical discharge machining from the allocation of the surfaces of the parts and their functions to determine the process parameters of electric erosion, which will ensure not only the quality parameters of the surface layer, but also the required performance properties.

*Keywords:* functionally-oriented technological process, electrical discharge machining, the quality of the surface layer, the operational properties of machine parts.

**Введение**

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) позволяет проводить обработку как электропроводящих, так и неэлектропроводящих материалов независимо от их физико-механических свойств, формы и расположения поверхностей обрабатываемых деталей, что выгодно отличает ее от механической обработки резанием, в особенности при обработке труднообрабатываемых материалов.

Процессы, протекающие при ЭЭО, подробно изучены, выявлено влияние технологических режимов обработки на качество поверхностного слоя, точность, износ электрода-инструмента и производительность процесса [1].

Однако разрушения механизмов и машин (износные, усталостные, коррозионные и др.) начинаются с рабочих поверхностей деталей, поэтому разработка мероприятий по повышению их надежности на основе обеспечения заданных, требуемых или предельных эксплуатационных свойств является актуальной проблемой.

Также можно отметить, что применяемые в настоящее время технологии электроэрозионной обработки изделий обеспечивают необходимые эксплуатационные показатели только для ограниченных условий работы. Решение данного вопроса возможно на основе применения для изготовления изделий электроэрозионными методами функционально-ориентированных технологий [2].

**Разработка функционально-ориентированного технологического процесса  
электроэрозионной обработки**

Задача, которая решается при разработке функционально-ориентированного технологического процесса ЭЭО, - определение оптимальных условий ведения ЭЭО, обеспечивающих выполнение требуемых эксплуатационных функций и повышение надежности изделия в целом (рис. 1).

Основные этапы разработки функционально-ориентированных технологических процессов ЭЭО следующие: анализ основных элементов конструкции и выделение типовых поверхностей изделия; определение служебных функций типовых поверхностей изделия; определение эксплуатационного свойства или группы эксплуатационных свойств, обеспечивающих выполнение поверхностью изделия служебной функции; определение параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих эксплуатационное свойство или группу эксплуатационных свойств; рассмотрение схемы технологического воздействия, вариантов и условий реализации технологических операций ЭЭО для обеспечения необходимых параметров качества поверхностного слоя.

Все имеющиеся на деталях поверхности можно разделить на следующие типовые виды: наружные цилиндрические - гладкие и ступенчатые; наружные конические; внутренние цилиндрические (отверстия) - гладкие и ступенчатые, сквозные и глухие; внутренние конические; плоские (в том числе торцовые и прерывистые); фасонные; резьбовые; шлицевые; зубья (различного профиля).

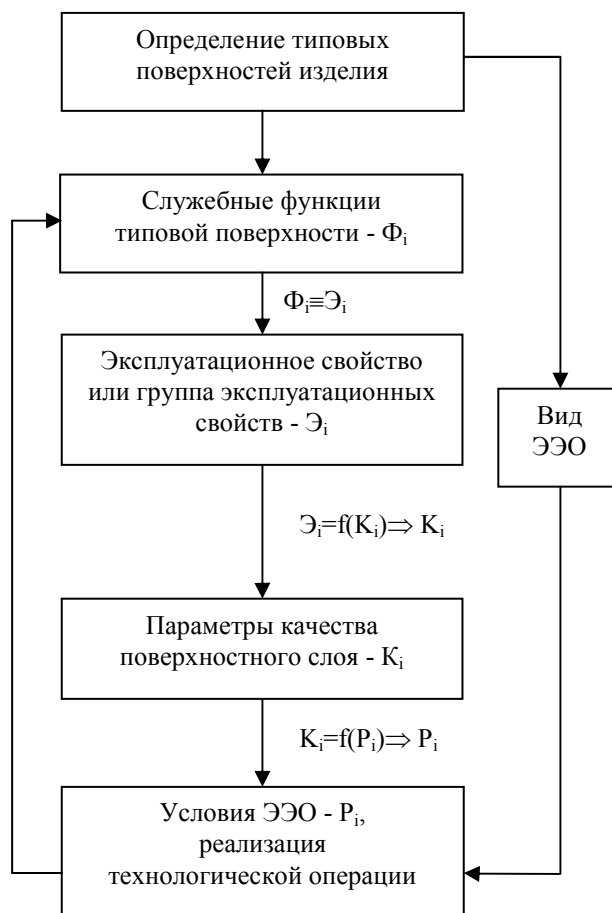


Рис. 1. Этапы разработки функционально-ориентированного технологического процесса электроэрозионной обработки

Размеры детали существенно влияют на характер оборудования и в меньшей мере - на маршрут обработки, а вид типовой поверхности в свою очередь оказывает основное влияние на применяемые методы ЭЭО.

Разбив изделие на типовые поверхности, необходимо определить их служебные функции.

Служебные функции поверхностей детали (рис. 2) используются технологами при проектировании технологического процесса.

После определения служебных функций  $\Phi_i$  поверхностей изделий необходимо определить эксплуатационные свойства  $\mathcal{E}_i$  (износостойкость, усталостная прочность, контактная жесткость, коррозионная стойкость и др.), которые будут обеспечивать выполнение требуемой эксплуатационной функции.

Зная эксплуатационные свойства  $\mathcal{E}_i$  и функциональные взаимосвязи данных эксплуатационных свойств с технологическими параметрами, а именно с качеством поверхностного слоя ( $\mathcal{E}_i = f(K_i)$ ) [3], можно определить, оптимальные параметры качества поверхностного слоя  $K_i$ , необходимые для обеспечения требуемой эксплуатационной функции поверхности  $\Phi_i$ .

Используя полученные параметры качества поверхностного слоя  $K_i$ , физику процесса ЭЭО и функциональную взаимосвязь параметров качества поверхностного слоя с условиями ведения ЭЭО ( $K_i = f(P_i)$ ) [1], определяют необходимые технологические воздействия  $P_i$  (материал электрода-инструмента, свойства диэлектрической жидкости, технологический ток, технологическое напряжение, длительность и скважность импульса и др.) для обеспечения требуемой эксплуатационной функции поверхности изделия  $\Phi_i$ .

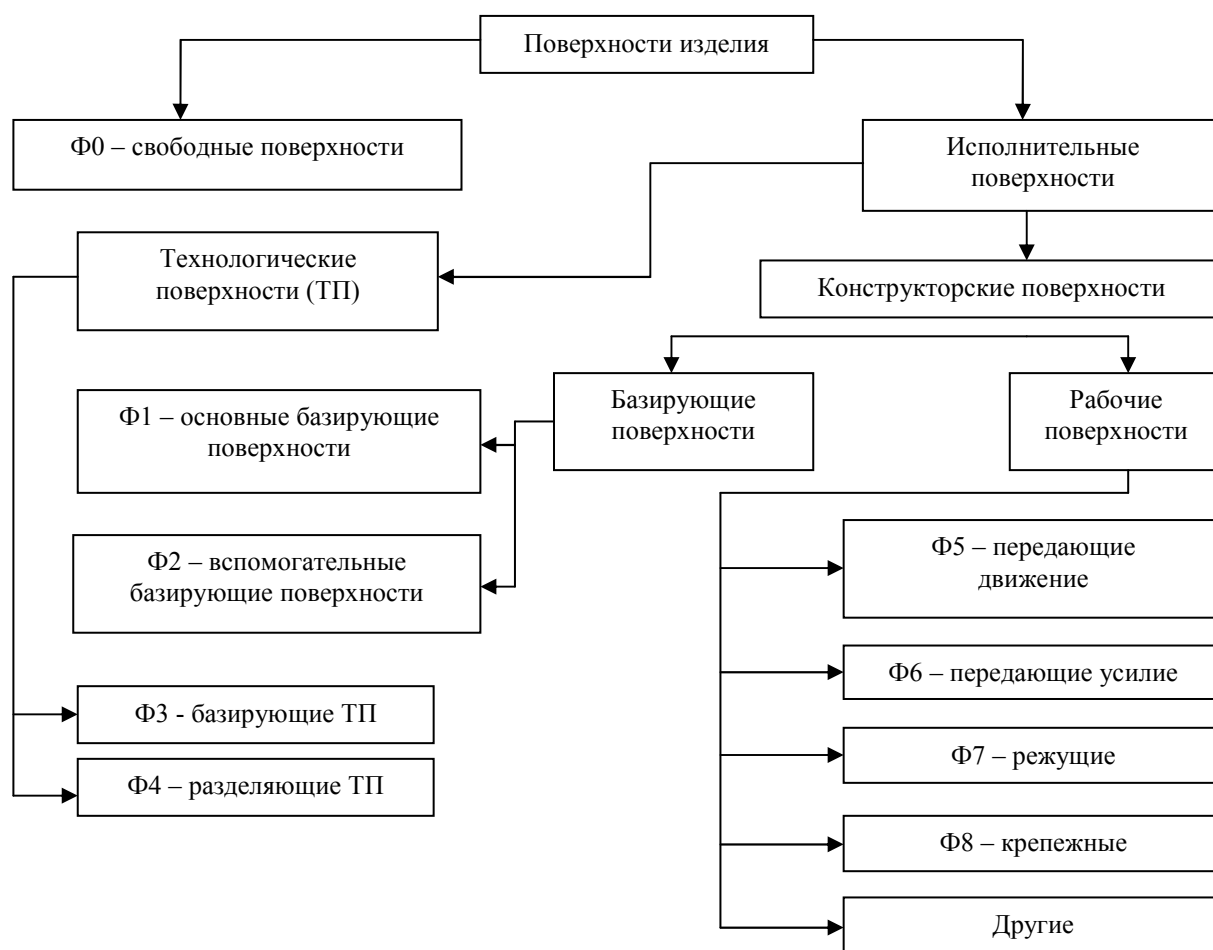


Рис. 2. Классификация функций поверхностей изделия

### Заключение

В статье изложен общий подход к разработке функционально-ориентированных технологических процессов ЭЭО на основе целого комплекса новых принципов проектирования технологических процессов. Функционально-ориентированные технологии ЭЭО существенно повышают технико-экономические показатели эксплуатации изделий и обеспечивают реализацию их полного потенциала возможностей. Также создаются возможности для обеспечения равной долговечности и качества эксплуатации всех элементов изделия. При этом существенно снижаются трудовые затраты на изготовление изделий и их себестоимость.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Съянов, С.Ю. Теоретическое определение параметров качества поверхностного слоя деталей, износа электрода-инструмента и производительности процесса при электроэрозионной обработке / С.Ю. Съянов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2016. - № 1 (49). - С. 67-73.
2. Михайлов, А.Н. Общие особенности функционально-ориентированных технологий и принципы ориентации их технологических воздействий и свойств изделий / А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XIV междунар. науч.-техн. конф. (г. Севастополь, 17-22 сент. 2007 г.): в 5 т. – Донецк: ДонНТУ, 2007. - Т. 3. - С. 38 – 52.
3. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. - М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.

## ТЕХНОЛОГИИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

УДК 621.923.:621.921.34

*В. И. Аверченков, В. В. Надуваев, Е. Н. Фролов*

### ПРАВЯЩИЕ КАРАНДАШИ ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Брянский государственный технический университет

Рассмотрены возможности эффективного использования поликристаллических СВ-алмазов для правки абразивных кругов, применяемых для различных видов шлифования.

*Ключевые слова:* поликристаллы, абразивы, правящие карандаши, шлифование.

Considering the efficient use poly-crystalline SV-diamonds for dressing of abrasive wheels, used for various types of grinding.

*Keywords:* polycrystals, abrasives, ruling pencils, grinding.

В современных условиях постоянно возрастают требования к качеству и эксплуатационным характеристикам деталей машин. Повышение этих показателей достигается, главным образом, применением более прочных и стойких новых видов конструкционных материалов, а также прогрессивных высокопроизводительных методов обработки деталей из этих материалов.

Завершающим этапом изготовления большинства ответственных деталей являются операции абразивной обработки, на которых, как правило, формируются основные показатели качества деталей, такие как точность, шероховатость поверхности и физико-механические свойства поверхностного слоя. Основными требованиями, предъявляемыми к абразивной обработке, в том числе и к шлифованию, являются повышение производительности и снижение себестоимости обработки при сохранении требуемого качества обработанных поверхностей деталей машин. Несомненные достоинства процесса шлифования реализуются наиболее полно лишь в том случае, когда вместе с процессом шлифования получает аналогичное, или опережающее развитие технология восстановления режущей способности абразивных кругов посредством их правки. Совершенствование процессов правки абразивных кругов является важнейшим условием повышения эффективности шлифования деталей. Это достигается путем использования для правки более производительных и износостойких видов правящих инструментов и оптимизации технологических условий правки.

Абразивные круги, как правило, в большей степени расходуются не в процессе шлифования, а в процессе их правки. Следовательно, износ шлифовальных кругов и правящих инструментов, влияющий на показатели процесса шлифования, в значительной мере зависит от вида правящего инструмента и технологических условий правки. Причем затраты времени на правку могут достигать 40-50% штучного времени обработки. Увеличение производительности процесса шлифования в значительной степени определяется правильным выбором правящих инструментов и совершенствованием самих методов правки. Существенное влияние на работоспособность правящего инструмента и показатели процесса шлифования оказывает правильный выбор вида алмазного сырья.

Для изготовления правящих карандашей используются различные виды алмазов. Проблема замены природных алмазов синтетическими в настоящее время решается не только за счет использования монокристаллических синтетических алмазов, но и путем применения поликристаллических синтетических алмазов.

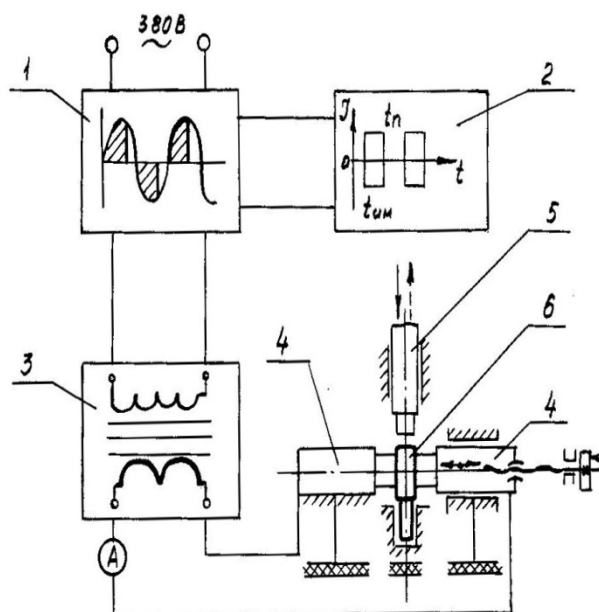
В связи с этим особое значение приобретают вопросы, связанные с созданием новых видов правящих инструментов при использовании для их изготовления прогрессивных высокопроизводительных инструментальных материалов и более эффективных связей.

Наиболее перспективным видом правящих инструментов являются алмазные карандаши, используемые для правки кругов на операциях круглого и плоского шлифования, а также на резьбо- и зубошлифовальных операциях. В настоящее время в правящих карандашах широко используются наряду с инструментальными материалами из природных алмазов различные виды синтетических алмазов и ПСТМ, в том числе и поликристаллические алмазы типа СВ.

Алмазы типа СВ имеют достаточно высокую прочность  $8 \dots 10$  ГПа и термостойкость до  $1470^\circ\text{K}$ , к тому же, обладают изотропией свойств. Данное обстоятельство, а также относительно низкая стоимость данных алмазов позволяют их широко использовать в правящем инструменте, в том числе вместо дорогостоящих природных и некоторых видов синтетических алмазов.

В Брянском государственном техническом университете были разработаны и исследованы ряд конструкций алмазных правящих карандашей, рабочими элементами которых являются зерна алмазов типа СВ, отработана технология их изготовления и проведены исследования их эксплуатационных показателей.

В результате предварительно проведенного анализа конструкций правящих инструментов был обоснован целесообразный выбор типоразмеров правящих алмазных карандашей, которые изготавливались типов 01,02,04 исполнения А и С в соответствии ГОСТ 607-80. При изготовлении правящих карандашей использовался метод электроконтактного спекания с последующей горячей допрессовкой на специально созданной установке для спекания (рисунок).



Принципиальная схема установки для электроконтактного спекания алмазных карандашей:

1 – прерыватель линейный (ПСЛ); 2 – система управления; 3 – трансформатор сварочный;  
4 – медно-графитовые электроды; 5 – шток пресса(пуансон); 6 – заготовка алмазного карандаша

В результате проведения исследований процесса правки абразивных кругов было установлено, что основными эксплуатационными характеристиками правящих карандашей являются их производительность и износостойкость, поскольку от них в значительной мере зависит качество обработки и себестоимость операций шлифования.

Наибольшее влияние на износостойкость правящих карандашей оказывают статическая прочность алмазов, их термостойкость, зернистость и концентрация, а также твердость, износостойкость и прочность алмазоудерживающей связки. Это объясняется достаточно низкой адгезионной активностью большинства металлических связок по отношению к химически инертному алмазу. Это, прежде всего, относится к связкам на основе композиции  $\text{Cu}+\text{Sn}$ , наиболее широко применяемым при изготовлении правящих карандашей из поликристаллических сверхтвердых материалов. Повышение прочности алмазоудержания связок достигалось путем введения в их состав незначительных количеств так называемых переходных металлов  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Ni}$ .

На основании выполненных исследований было установлено, что существенное влияние на показатели износостойкости правящих карандашей оказывает характер износа алмазного слоя. В ходе микроскопического анализа была определена картина износа и установлен механизм изнашивания алмазоносного слоя. Как показали исследования, в процессе правки связка на рабочей поверхности карандаша изнашивается неравномерно. Наиболее интенсивный износ происходит в зоне вокруг алмазного зерна, где образуется углубление под действием потока абразивного шлама, снимаемого с круга в процессе правки, что способствует снижению износостойкости алмазных правящих карандашей. Это явление наблюдается практически для всех видов металлических связок, независимо от их твердости. Повышение износостойкости может быть достигнуто путем введения в связку высокоабразивных наполнителей и относительного повышения концентрации алмазов [1].

На основании полученных экспериментальных исследований были выявлены оптимальные характеристики для определенного вида правящего инструмента и конкретных условий правки абразивных кругов, которые следует рекомендовать для широкого использования в машиностроительной отрасли. Рекомендуемые области применения алмазных карандашей для правки абразивных кругов приведены в таблице [2].

Рекомендуемые области применения алмазных карандашей

Вид шлифования	Параметры шлифовального круга				Характеристика правящего карандаша		
	Марка абразива	Размеры Dхh, мм	Зернистость	Твердость	Марка алмаза	Материал связки	Обозначение
1	2	3	4	5	6	7	8
Круглое наружное	24А, 25А	600х63	16-40	СМ-С	алмаз СВ	М2-01	3908-0086 3908-0088
	64С	400х40		СТ1-СТ2	прир. алм.А	М6-02 М8-01	3908-0091 3908-0093
Бесцентровое	24А, 25А	400х63	16-40	СТ1-СТ2	алмаз СВ	М2-01	3908-0085 3908-0088
				СТ1-СТ2	прир. алм.А	М6-02 М8-01	3908-0091 3908-0093
Внутреннее	24А, 25А	150х40	8-40	М-СМ-С	алмаз СВ	М2-01	3908-0055 3908-0085
Плоское	64С	500х63	16-40	СТ1-СТ2	прир. алм.А	М6-02 М8-01	3908-0085 3908-0088
Резьбо- и зубошлифование	Эльбор	400х8	63/50	Т1-Т2	алмаз СВ прир. алм.А	М2-01 М6-02	3908-0061 3908-0062
	24А, 25А	300х32	16-40	Ст1-СТ2	прир. алм.А	М6-02	3908-0069

Однако, при этом следует отметить, что себестоимость правящих карандашей, изготовленных из алмазов типа СВ в 8...10 раз ниже себестоимости карандашей из природных алмазов. Всесторонний анализ закономерностей процессов правки абразивных кругов и исследования, представленные выше, а также расчеты экономической эффективности процессов шлифования в целом показали, что карандаши из поликристаллических алмазов типа СВ достаточно эффективны при правке абразивных кругов различной твердости, а это позволяет рекомендовать их для широкого использования в при модернизации современного машиностроительного производства [3].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Надуваев, В.В. Перспективы использования инструментальных материалов СВ-алмазов в промышленности/ В.В. Надуваев, Е.Н. Фролов – М.: Машиностроение «Справочник. Инженерный журнал», 2009, вып. 10, с. 49-53.
2. Аверченков В.И. Технология производства поликристаллических алмазов, используемых в различных отраслях промышленности/ Аверченков В.И., Надуваев В.В., Фролов Е.И. //Металлообработка - 2015 : тез. докл. меж. конф. – Минск 2015 – С. 9-11
3. Аверченков, В.И. Формообразование поверхностей с использованием инструментальных материалов СВ-алмазов/ Аверченков, В.И., Надуваев, В.В., Фролов, Е.Н.//Известия Тульского государственного университета, выпуск 8, часть 1, Тула, 2016 - С. 306-314.

УДК 621.922

*Д. В. Ардашев, В. И. Гузеев***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ШЛИФОВАНИЯ НА ОСНОВЕ  
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ\*****ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»,  
г. Челябинск**[ardashevdy@susu.ru](mailto:ardashevdy@susu.ru), [guzeevvi@susu.ru](mailto:guzeevvi@susu.ru)

В статье предложен новый подход к проектированию операций шлифования для условий современного многономенклатурного производства – на основе методики континуального проектирования операций шлифования. Суть методики – в определении области возможной эксплуатации шлифовальных кругов при обработке различных заготовок. Прогнозирование работоспособности шлифовальных кругов предлагается вести при помощи системы прогнозных моделей, позволяющих имитационными методами определить область возможной рациональной эксплуатации инструмента для различных технологических условий. В дальнейшем на область работоспособности инструмента накладываются технологические ограничения, предъявляемые к проектируемой операции, выделяется область рациональной его эксплуатации и определяется пара «характеристика шлифовального круга-режим шлифования» для обработки конкретной партии заготовок. Применение разработанной методики позволит повысить эффективность операций шлифования, реализуемых в условиях многономенклатурного производства.

*Ключевые слова:* континуальное проектирование, прогнозирование работоспособности, многономенклатурное производство.

This paper proposes a new approach to the design of grinding operations to the conditions of modern multiproduct manufacturing, based on continuous methodology design of grinding operations. The technique to identify areas of possible operating grinding wheels when processing different workpiece. Forecasting performance of grinding wheels is proposed to conduct, with the help of predictive models, allowing simulation methods to determine the area of possible rational use of the instrument for different process conditions. In the future, to the region of the tool performance are imposed technological limitations applicable to projected operations is the management of its operation and is defined by a pair of "characterization of grinding wheel-grinding mode" for processing of a particular batch of workpieces. Application of the developed methodology will enable to improve the efficiency of grinding operations implemented in multiproduct manufacturing.

*Keywords:* continual planning, forecasting efficiency, multiproduct production.

В многономенклатурном производстве партии обрабатываемых заготовок поступают на станок одна за другой. Наиболее распространенной является ситуация, когда ресурс шлифовального круга, установленного на станке полностью не выработан, его эксплуатация допускается НТД и необходимо изготавливать детали, отличающиеся от предыдущих как требованиями к качеству, так и основным материалом.

Методика проектирования операции шлифования различных деталей кругом конкретной характеристики включает в себя два основных этапа.

Первый этап – определение времени эффективной эксплуатации инструмента (периода стойкости) на различных режимах эксплуатации. Для этого формируется комплекс условий применимости круга конкретной характеристики для выполнения требований, предъявляемых к операции шлифования. Комплекс накладывается на сведения о работоспособности шлифовального круга и для каждого эксплуатационного показателя инструмента, для каждой величины подачи выделяется режимно-временная область возможной эксплуатации данного шлифовального круга, при выполнении им всех требований чертежа и организации производства [1].

На рис. 1 приведен фрагмент технологического эксплуатационного паспорта круга [2], установленного на станке. Этим кругом планируют обработать следующую партию деталей. К партии деталей предъявляются следующие основные требования (из карты технологического процесса):

1. Шероховатость  $R_a$  – 1,0 мкм.
2. Квалитет IT6.

Шероховатость поверхности принимается из чертежа детали. Точность обработки достигается ограничением по нагрузке на деталь со стороны круга. Для достижения точности обработки IT6 средний уровень силы резания (нагрузки на технологическую систему) не должен превышать 3–5 Н/мм [3].

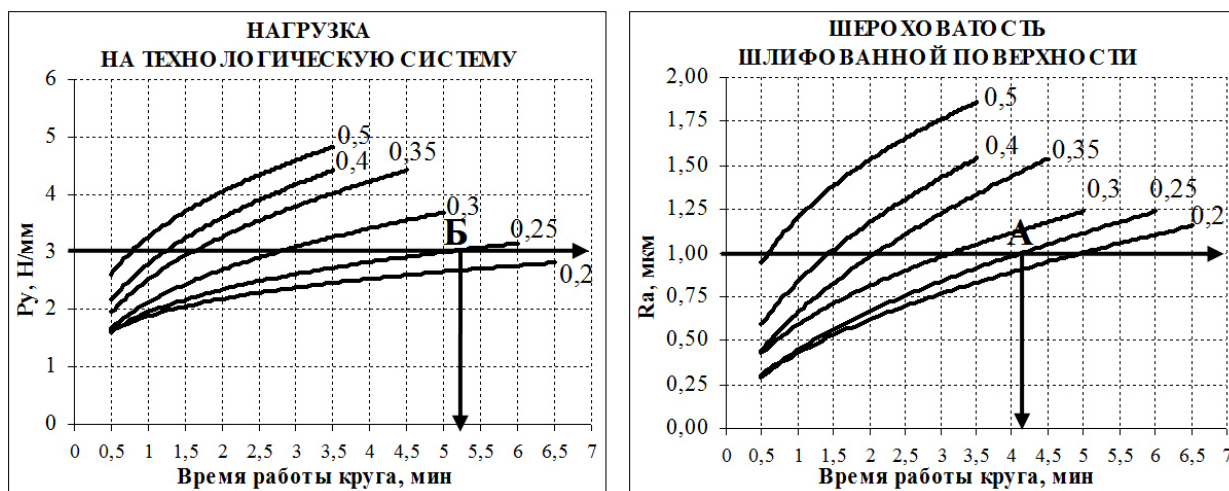


Рис. 1. Определение периода стойкости шлифовального круга 24AF60L7V по паспорту его эксплуатационных показателей

Комплекс ограничений, накладываемых на технологический эксплуатационный паспорт:

1. Шероховатость  $R_a$  – 1,0 мкм.
2. Допустимая нагрузка со стороны круга на ТС – 3 Н/мм.

Накладывая комплекс ограничений на технологический эксплуатационный паспорт круга, получаем область эффективной его эксплуатации, в которой будет выполняться требование, предъявляемое к конкретному эксплуатационному показателю. В каждой координатной сетке определяется время, в течение которого шлифовальный круг будет обеспечивать заданное требование качества обработки. Минимальное из всех времен является периодом стойкости шлифовального круга для данных условий его эксплуатации, а параметр – лимитирующим. Так, на подаче 0,25 мм/мин по критерию обеспечения точности обработки период стойкости составляет 5,2 мин (см. рис. 1), по критерию обеспечения шероховатости поверхности – 4,1 мин. Следовательно, лимитирующим параметром является ограничение по требуемой шероховатости поверхности (т. А), а период стойкости круга –  $T = 4,1$  мин.

Второй этап – выбор оптимального режима шлифования – в рассматриваемом примере скорости радиальной подачи круга  $v_{спад}$  – режима, обеспечивающего выполнение целевой функции. В качестве целевой функции принят минимум технической нормы времени  $T_{н.в.}$ :

$$T_{н.в.} = \sum_{n=1}^m n \cdot T_o^n + \sum_{i=1}^{p_n} T_{пр}^i + T_3 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $n$  – количество заготовок в обрабатываемой партии;  $m$  – количество партий, планируемых к обработке;  $T_o$  – основное время обработки одной детали;  $T_{пр}$  – время правки круга;  $p$  – количество правок;  $T_3$  – время на замену круга.

Данные, полученные из рис. 1 сведены в табл. 1.

В результате получается массив конкурирующих точек (1–6 на рис. 2) – скоростей подачи круга, каждая из которых обеспечивает определенный период стойкости инструмента, в пределах которого выполняются все требования чертежа готовой детали. Определяется экстремальная точка – соответствующая минимуму неполной нормы времени, представляющая собой сумму минимально возможного основного времени и минимально возможного при этом суммарным временем на правку круга (см. рис. 2). Последнее, в рассматриваемом примере, определяется минимально допустимым, для конкретной подачи круга, количеством правок и соответствует пограничной величине, между двумя подачами – 0,3 и 0,35 мм/мин. На подаче 0,35 мм/мин суммарное основное время обработки партии меньше примерно на 8 мин, однако повышение производительности приводит к увеличению интенсивности износа круга, уменьшается количество деталей, изготовлен-



ных между правками и увеличивается количество правок. Следовательно, для заданных технологических условий выполнения операции шлифования скорость радиальной подачи  $v_{\text{Срад}} = 0,3$  мм/мин является оптимальной: она обеспечит как выполнение всех требований чертежа детали, так и максимально возможный уровень производительности процесса.

Таблица 1

Результаты нормирования операции шлифования (этап 2)

Подача, мм/мин	$T_o$ , мин	$T$ , мин	$n$ , шт.	$\Sigma T_o$ , мин	$p_m$ , шт.	$T_{\text{пр.кр.}}$ , мин	$\Sigma T_{\text{пр.}}$ , мин	$T_{\text{нв}}$ , мин
0,2	0,75	5,00	6	75,00	17	1,5	25,5	100,50
0,25	0,60	4,10	6	60,00	17	1,5	25,5	85,50
0,3	0,50	3,20	6	50,00	17	1,5	25,5	75,50
0,35	0,43	2,10	4	42,86	25	1,5	37,5	80,36
0,4	0,38	1,40	3	37,50	34	1,5	51	88,50
0,5	0,30	0,70	2	30,00	50	1,5	75	105,00

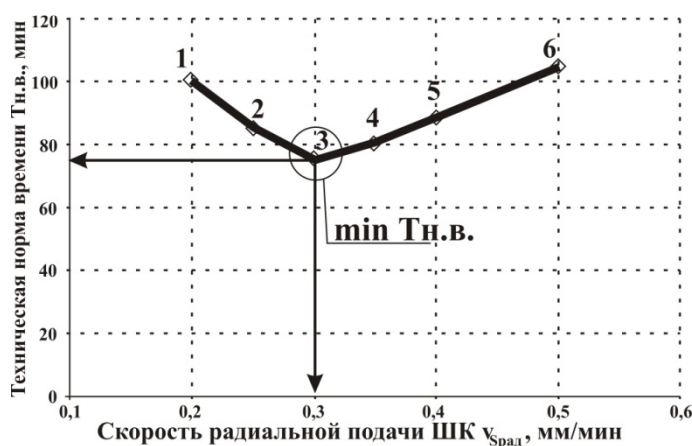


Рис. 2. Определение режима шлифования, обеспечивающего требования чертежа детали и выполнение целевой функции (см. формулу)

Экстремальная точка, соответствующая минимуму технической нормы времени, определяется минимально возможным основным временем и минимально возможным при этом суммарным временем на правку круга. Последнее, в свою очередь определяется минимально допустимым, для конкретной подачи круга, количеством правок и соответствует пограничной величине, между двумя подачами – 0,3 и 0,35 мм/мин. На подаче 0,35 мм/мин суммарное основное время меньше примерно на 15%, однако за счет повышения производительности, увеличивается интенсивность износа круга, уменьшается количество деталей, изготовленных между правками и увеличивается количество правок. Следовательно, для заданных технологических условия выполнения операции шлифования скорость радиальной подачи  $v_{\text{Срад}} = 0,3$  мм/мин является оптимальной: она обеспечит как выполнение всех требований чертежа детали, так и максимально возможный уровень производительности процесса.

В случае, когда круг, установленный на станке, выработал свой ресурс полностью и должен быть заменен, возникает задача выбора такой характеристики круга, которая бы в большей мере была оптимальной для обработки партии деталей, поступающей на станок. При этом, одновременно назначается наиболее эффективный режим шлифования, обеспечивающий выполнение всех требований, предъявляемых к операции шлифования и целевой функции (1). Для этого необходимо иметь базу данных по эксплуатационным возможностям шлифовальных кругов различных характеристик, работающих в изменяющихся технологических условиях, либо возможность прогнозирования показателей работоспособности инструмента. Выбор шлифовального круга производится путем сопоставления эксплуатационных возможностей инструментов.

Начальный этап проектирования подразумевает формирование номенклатуры шлифовальных кругов, которые рекомендуются к обработке данной партии деталей. Номенклатура формируется в соответствии со справочными рекомендациями, которыми располагает предприятие, при этом рассматриваются различные варианты, в т.ч. доступные у предприятий-поставщиков абразивной продукции [4, 5 и др.]. В дальнейшем, выбор конкретного шлифовального круга осуществляется из сформированной выборки.

Для каждого шлифовального круга, имеющегося в распоряжении предприятия, на основе спрогнозированной области его работоспособности, определяется область возможных режимов эксплуатации – в которой выполняются все технологические ограничения – требования к проектируемой операции, а также целевая функция (1).

Далее для каждого возможного режима шлифования определяется период стойкости шлифовального круга – время его работы в течение которого им будет обеспечено выполнение всех технологических требований. В дальнейшем для каждого возможного режима эксплуатации круга рассчитывается величина целевой функции (1), с учетом правки круга (табл. 2).

Таблица 2

## Результаты нормирования операции шлифования

№ круга	Подача, мм/мин	$T_o$ , мин	$T$ , мин	$n$ , шт	$\Sigma T_o$ , мин	$p_m$ , шт	$T_{пр.кр.}$ , мин	$\Sigma T_{пр.}$ , мин	$T_{инв.}$ , мин
1	0,2	2,50	6,50	2	250,00	50	1,5	75	325,00
	0,25	2,00	6,00	3	200,00	34	1,5	51	251,00
	0,3	1,67	5,00	3	166,67	34	1,5	51	217,67
	0,35	1,43	2,20	1	142,86	100	1,5	150	292,86
	0,4	1,25	1,50	1	125,00	100	1,5	150	275,00
	0,5	1,00	1,10	1	100,00	100	1,5	150	250,00
2	0,2	2,50	9,00	3	250,00	34	1,5	51	301,00
	0,25	2,00	7,00	3	200,00	34	1,5	51	251,00
	0,3	1,67	6,00	3	166,67	34	1,5	51	217,67
	0,35	1,43	5,00	3	142,86	34	1,5	51	193,86
	0,4	1,25	5,00	4	125,00	25	1,5	37,5	162,50
	0,5	1,00	1,50	1	100,00	100	1,5	150	250,00
3	0,2	2,50	5,50	2	250,00	50	1,5	75	325,00
	0,25	2,00	5,00	2	200,00	50	1,5	75	275,00
	0,3	1,67	4,00	2	166,67	50	1,5	75	241,67
	0,35	1,43	3,50	2	142,86	50	1,5	75	217,86
	0,4	1,25	2,50	2	125,00	50	1,5	75	200,00
	0,5	1,00	1,00	1	100,00	100	1,5	150	250,00

На следующем этапе для каждого рассматриваемого круга выбирается минимум технической нормы времени, после чего окончательно принимается характеристика круга и режим шлифования, обеспечивающие минимум из множества минимальных значений целевой функции (1).

Каждая кривая (рис. 3) – зависимость целевой функции (1) от режима обработки для определенного шлифовального круга. На каждой кривой имеется ряд конкурирующих точек – 1...6, соответствующие различным подачам. Из этих точек для каждого круга выбирается подача, обеспечивающая выполнение целевой функции. В рассматриваемом примере для круга № 1 это точка 3<sup>1</sup> (0,3 мм/мин), для круга № 2 – точка 5<sup>2</sup> (0,4 мм/мин) и для круга № 3 – точка 4<sup>3</sup> (0,35 мм/мин). Далее из этих трех точек выбирается та, которая обеспечивает минимум технической нормы времени. В данном случае это точка 4<sup>3</sup> (0,35 мм/мин) для круга № 3. Техническая норма времени при этом составит 107,5 мин. Этот круг и принимается для обработки партии заготовок, планируемых к поступлению на станок.

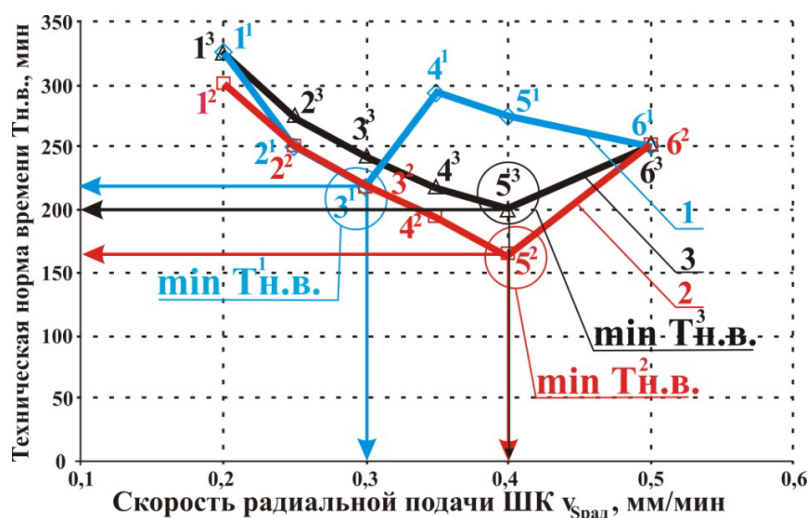


Рис. 3. Выбор характеристики круга и режима шлифования, обеспечивающих требования чертежа детали и выполнение целевой функции (см. формулу)  
(1 – круг № 1; 2 – круг № 2; 3 – круг № 3)

### Закключение

Таким образом, предложенная методика континуального проектирования операций шлифования подразумевает одновременный выбор характеристики шлифовального круга и режима шлифования, обеспечивающих выполнение всех требований чертежа, а также минимальные затраты времени по обработке всех партий заготовкой в планируемом периоде времени.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ардашев, Д.В. Определение периода стойкости шлифовального круга на основе его технологического эксплуатационного паспорта / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – СПб: Политехника, № 1 (55), 2010. – С. 23–27.
2. Ардашев, Д.В. Эксплуатационные характеристики шлифовального круга в виде технологического паспорта / Д.В. Ардашев // Технология машиностроения. – М.: Технология машиностроения, № 4 (94), 2010. – С. 26–28.
3. Корчак, С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С.Н. Корчак. – М., «Машиностроение», 1974. – 280 с.
4. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках / Часть 3: Протяжные, шлифовальные и доводочные станки / Издание 3-е. – М.: Изд-во ЦБНТ при НИИ Труда, 1978. – 360 с.
5. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин и др. – Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2007. – 394 с.

УДК 621.92

**В. В. Новиков**

### ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СИНТЕТИЧЕСКИХ СОЖ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ШЛИФОВАНИЯ СТЕКЛА\*

Ивановский государственный университет

Изучено влияние однокомпонентных водных растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) и гликолей на основные характеристики процесса абразивной обработки стекла. Получены данные о скорости сошлифования в различных условиях обработки. В эксперименте наблюдался экстремальный характер поведения параметров процесса от концентрации вещества в растворе. Оптимальная концентрация присадок, обеспечивающая максимальную скорость сошлифования материала, соответствует значениям концентрации 0.05...0.25 масс. %. Аналогичное действие на процесс оказывают не только присадки ПАВ, но и многоатомные спирты. Очевидно, что молекулы спиртов активно участвуют при формировании смазочных пленок на границе раздела «раствор–стекло», хотя и не являются ПАВ на границе раздела «раствор–воздух». Предложена теоретическая модель формирования и разрушения смазочного слоя. Модель основана на описании

процессов формирования ювенильной поверхности и формирования на ней смазочной пленки за счет диффузии ПАВ из СОЖ. Модель позволяет рассчитать концентрацию молекул ПАВ в растворе СОЖ, необходимую для формирования монослоя. Параметрами модели являются температура и вязкость СОЖ, размеры молекулы, скорость и давление на контакте, зернистость инструмента, твердость обрабатываемого материала. Результаты расчета соответствуют экспериментальным данным.

*Ключевые слова:* шлифование, стекло, смазочно-охлаждающая жидкость, поверхностно-активные вещества, присадки, смазочная пленка, моделирование.

The influence of single-component aqueous solutions of surface-active substances (surfactants) and glycol on the main process characteristics abrasive machining of glass was studied. The data about the speed of grinding in different processing conditions was obtained. In the experiment the extreme nature of the behavior of process parameters on the concentration of the substance in solution was observed. The optimal concentration of additives for maximum speed of grinding corresponds to concentrations of 0.05...0.25 of the masses. %. The effectiveness of the additives of the surfactant in the composition of the coolant depends on their chemical nature. The same action on the process have not only additive surfactants, but many-atomic alcohols. It is obvious that the molecules of alcohols are actively involved in the formation of the lubricant films at the interface "liquid glass", although not necessarily the surfactants at the interface "solution-air". The theoretical model of formation and destruction of a lubricant layer was proposed. The model is based on the description of processes of formation of the juvenile surface and formation on it of the film due to the diffusion of surfactant from the coolant. The model allows to calculate the concentration of surfactant molecules in solution coolants that are required for the formation of a monolayer. Parameters of the model are the temperature and viscosity of the coolant, the size of the molecules, the speed and pressure of the contact, the grain size of the tool, the hardness of the processed material. The results of the calculation correspond to the experimental data.

*Keywords:* grinding, glass, coolants, surfactant, lubricant film, modeling.

Развитие науки и техники ставит перед современным машиностроением задачу надежного обеспечения технических характеристик конструкций, работающих в широком диапазоне температур, при сложном сочетании переменных силовых и тепловых воздействий, в агрессивных рабочих средах. Решение этой задачи может быть достигнуто за счет разработки и внедрения технических стекол. Технологический процесс обработки изделий включают операции шлифования, на которых происходит их формообразование путем шлифования и финишные операции. Применение эффективных СОЖ может существенным образом улучшить основные показатели процесса шлифования стекла. Физико-химическая природа действия СОЖ при обработке стекла раскрыта в работах [1–2]. Если шлифование стекла происходит в жидкости, смачивающей тело, то жидкость проникает в микротрещины зоны и не дает им срастаться при удалении напряжения. Наиболее эффективными СОЖ для обработки стекла являются синтетические СОЖ, которые содержат в своей основе водорастворимые присадки полимеров и поверхностно-активных веществ (ПАВ). Несмотря на ясность физико-химической природы процесса в настоящее время до сих пор отсутствует математическая модель описываемого явления, позволяющая количественно описать наблюдаемые процессы взаимодействия абразивного инструмента и обрабатываемой поверхности стекла. Поэтому подбор составов СОЖ ведется исключительно эмпирически.

Целью нашей работы является разработка теоретического описания процессов кинетики смазочного процесса при шлифовании проверка его адекватности эксперименту.

### Эксперимент

Для установления оптимальной концентрации ПАВ в СОЖ нами был проведен эксперимент по шлифованию стекла в растворах ПАВ различной концентрации. Химический состав обрабатываемого стекла:  $\text{SiO}_2$  – 67...64%,  $\text{PbO}$  – 18...24%,  $\text{K}_2\text{O}$  – 13...17%. Микротвердость – 4500 МПа. Обработка производилась алмазным инструментом А1ПВ (зернистость абразива 250...200 мкм) при нагрузке 1,5 Н и средней скорости шлифования 10 м/с.

Были исследованы ряд однокомпонентных водных растворов ПАВ: динатриевая соль сульфогидратной кислоты (ДНСА), лаурилсульфат (ЛС), авироль ОГ и многоатомных спиртов – гликолей: этиленгликоль (ЭГ) и полиэтиленгликоль (ПЭГ).

Было установлено, что концентрация присадки, обеспечивающая максимальную скорость сошлифовывания материала, соответствует значениям концентрации 0.05...0.25 масс. %. При этом скорость сошлифовки в водном растворе ПАВ возрастает почти в 1.5 раза по сравнению со шлифованием без ПАВ (таблица).

Влияние концентрации присадки на среднюю скорость сошлифовки, мкм/с

Концентрация, масс.%	Присадки ПАВ			Гликоли	
	ДНСА	ЛС	Авириоль ОГ	ЭГ	ПЭГ
0	33	33	33	33	33
0,01	38	40	38	35	33
0,025	42	44	42	37	37
0,05	45	46	<b>44</b>	40	42
0,075	46	<b>48</b>	43	43	49
0,1	47	46	42	<b>45</b>	<b>55</b>
0,25	<b>48</b>	44	41	40	49
0,5	46	42	40	37	37
0,75	42	39	39	33	34
1,0	38	36	38	30	33

Аналогичное действие на процесс оказывают не только присадки ПАВ, но и многоатомные спирты. Очевидно, что молекулы спиртов активно участвуют при формировании смазочных пленок на границе раздела «раствор–стекло», хотя и не являются ПАВ на границе раздела «раствор–воздух».

#### Теоретическая модель

За основу решения взята ранее разработанная модель формирования смазочного слоя в зоне упруго-пластического контакта, описанная в работе [3]. Нами была получена формула, позволяющая рассчитать оптимальную концентрацию ПАВ в жидкости, при которой возможно формирование монослоя ПАВ на ювенильной поверхности материала за период между прохождением по ней абразивных зерен.

$$C_{opt} = \frac{a_m}{2} \sqrt{\frac{v}{D_a \cdot l_R}}, \quad (1)$$

где  $D_a$  – коэффициент диффузии,  $v$  – скорость шлифования,  $l_R$  – расстояние между пятнами воздействия выступов на поверхность.

Схема взаимодействия единичного абразивного зерна, моделируемого жесткой сферой, с обрабатываемой поверхностью представлена на рисунке.

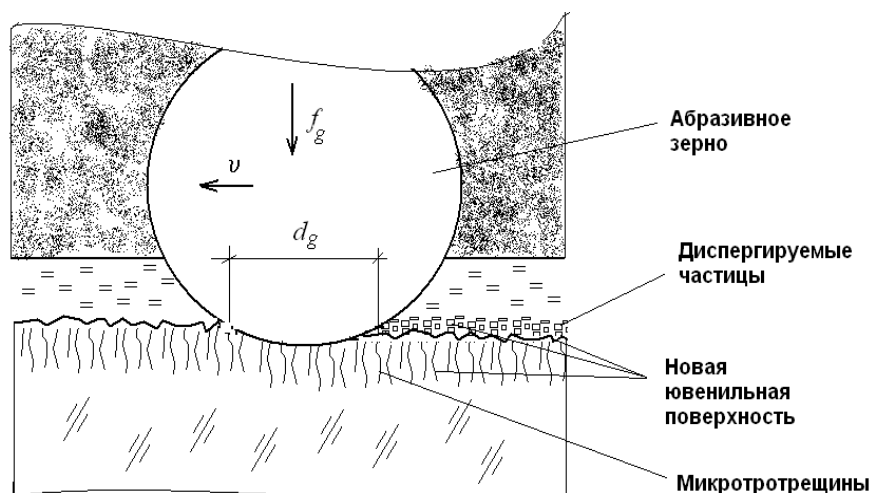


Схема взаимодействия единичного абразивного зерна, моделируемого жесткой сферой, с поверхностью стекла

Поскольку процесс абразивной обработки стекла – это процесс периодического воздействия на участок поверхности абразивных зерен и его разрушения, то эффективное действие СОЖ с содержанием ПАВ будет при таких условиях, при которых новая поверхность будет успевать покрываться монослоем молекул ПАВ в период между прохождением зерен. Расстояние между точками воздействия на материал

$$l_R = \frac{1}{N_g d_g} = \sqrt{\frac{\pi HV}{4p \cdot N_g}}, \quad (2)$$

где  $d_g$  – диаметр пятна контакта,  $N_g$  – поверхностная плотность абразивных зерен,  $HV$  – твердость материала,  $p$  – среднее давление на контакте абразивный инструмент – поверхность стекла.

Коэффициент диффузии можно вычислить по формуле Эйнштейна:

$$D = \frac{kT}{6\pi r_m \eta_{\text{ж}}}, \quad (3)$$

где  $r_m$  – радиус молекулы,  $\eta_{\text{ж}}$  – динамическая вязкость растворителя. Таким образом, все параметры, входящие в формулу (1) определены режимом обработки, видом абразивного инструмента и свойствами СОЖ.

Теоретический расчет при параметрах процесса, соответствующих эксперименту, дает следующие значения контактного взаимодействия:  $d_g \approx 3$  мкм, расстояние между пятнами последовательного воздействия на поверхность  $l_R \approx 16$  мкм. Если принять типичный размер молекул ПАВ  $a_m \approx (0.5 \dots 5)$  нм и температуру жидкости 330 К и вязкость  $\eta_{\text{ж}} = 0,41$  мПа·с коэффициент диффузии молекулы будет равен  $D_a = 2,3 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с. Подставляя условия в формулу (1) получаем  $C_{\text{опт}} \approx (0,6 \dots 2) \cdot 10^{-3}$ . Очевидно, что теоретический расчет дает хорошее совпадение с экспериментальными результатами, а построенная модель адекватна.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах деформации и разрушения // Успехи физических наук. Т. 108, Вып.1. Сентябрь 1972. С. 2–41.
2. Перцов Н.В. Механизмы действия поверхностно-активных веществ при разрушении материалов // Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. Киев, 1986. С.5–11.
3. Новиков В.В., Сырбу С.А. Кинетика формирования граничного смазочного слоя в зоне контакта стружкостружущего инструмента при резании металлов // Трение и износ. 2016, Т. 37

УДК 621.923.1

**В. Н. Тышкевич, В. А. Носенко, А. В. Саразов**

#### **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ТОРЦОВ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК МАЛОЙ ЖЕСТКОСТИ**

**Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ**

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

Предложена методика оптимизации режимов плоского шлифования периферией круга торцовых поверхностей призматических заготовок с начальной неплоскостностью базового торца, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности (параметр шероховатости поверхности  $Ra$ , отсутствие шлифовочных прижогов, допуск плоскостности торцевой поверхности) при максимальной производительности процесса. Входные факторы (твердость шлифовального круга, глубина шлифования, скорость подачи стола и наработка) являются параметрами оптимизации процесса шлифования. Математические модели выходных факторов предназначены для ограничения области допустимых значений параметров оптимизации. В качестве целевой функции выбрана производительность обработки. Оптимизацию параметров в области допустимых значений осуществляют из условия обеспечения максимальной производительности процесса.

Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе оптимизации режимов управлением величиной упругой деформации. Варьируемыми параметрами при управлении величиной максимальной упругой деформации являются силы резания и притяжения магнитного поля стола станка.

Представлены математические модели для определения упругой деформации призматических заготовок при закреплении и механической обработке. Для определения упругих деформаций при изгибе заготовки используется теория стержней. Максимальная упругая деформация при изгибе определяется методом Мора.

**Ключевые слова:** плоское шлифование, призматическая заготовка, малая жесткость, упругие деформации, качество поверхности, оптимизация процесса.

The authors propose the technique of optimizing the conditions for flat grinding of end surfaces of prismatic workpieces that guarantees obtaining predefined quality requirements by the machined surface (surface roughness parameter  $Ra$ , absence of grinding burns, required flatness tolerance of end surface) while ensuring the maximum efficiency of the process. The input factors (grinding wheel hardness, depth of grinding, table feed speed and run) are considered as the optimization parameters of the grinding process. Mathematical models of the output factors are used to limit the range of allowable values of the optimization parameters. The resulted efficiency is an objective function. The optimization of parameters in the range of allowable values is carried out with the view of ensuring maximum efficiency of the process.

The required admission of flatness is provided on the second stage of optimization of the workpieces by controlling the size of elastic deformation. The varied parameters at controlling the size of the maximum elastic deformation are cutting forces and attraction of magnetic field of a machine table.

The terms of providing of the required flatness tolerance of end surface are determined for workpieces, taking into account elastic deformation of the non-rigid workpieces under the magnetic field effect on the machine table and the radial component of the grinding force.

Mathematical models for determination of elastic deformation of prismatic workpieces when fixing and machining are presented. The theory of bars is used for determination of elastic deformations at the bending of prismatic workpieces. Maximal elastic deformation of prismatic workpieces at the bending is determined the method of More.

**Keywords:** flat grinding, prismatic workpiece, small rigidity, elastic deformations, quality of machined surface, process of optimization.

Особенность механической обработки деталей малой жесткости - возможность возникновения при закреплении и обработке упругих деформаций, величина которых превышает требуемый допуск отклонения формы обработанной поверхности. Обеспечение требуемого допуска в этом случае значительно увеличивает время и стоимость операции. Для решения проблемы повышения точности и эффективности механической обработки деталей малой жесткости необходимо управлять их упругим деформированием при закреплении и обработке [1-5]. Упругие деформации в направлении перпендикулярном поверхности стола станка при закреплении и шлифовании торцов заготовок рельсовых направляющих линейных подшипников (рис. 1) усложняют обеспечение заданного допуска плоскостности обработанной торцевой поверхности. Под нагрузкой при шлифовании заготовка деформируется, а после шлифования и снятия магнитного поля в результате упругих деформаций определенные отклонения от плоскостности возвращаются. Технологические способы их устранения значительно увеличивают время обработки и стоимость операции.

Цель исследований: разработка алгоритма и методики оптимизации режимов плоского шлифования торцов призматических заготовок малой жесткости путем управления их упругим деформированием при закреплении и обработке с обеспечением заданных требований к качеству обработанной поверхности при максимальной производительности процесса.

Предлагаемый авторами алгоритм [4, 5] предполагает выделение двух этапов оптимизации процесса. На первом этапе, при выборе оптимальных условий шлифования, заготовка принимается абсолютно жесткой, и оптимизация режимов осуществляется из условия выполнения требований к таким параметрам, как шероховатость, волнистость, отсутствие шлифовочных прижогов, трещин и др. С использованием математических моделей радиальной и касательной составляющих силы резания, параметра шероховатости и т. д. определяются области допустимых значений параметров характеристики абразивного инструмента и режимов, обеспечивающих выполнение требований к качеству торцевой поверхности. Дальнейшая оптимизация параметров в области допустимых значений производится по критерию максимальной производительности процесса. Эти оптимальные параметры определяют первый режим шлифования (режим 1) [4, 5].



Рис. 1. Направляющая роликового однорядного подшипника ЛРХ 6/350

В конкретных примерах реализации первого этапа [2-5] входными параметрами моделей являются данные характеристики абразивного инструмента (зернистость шлифовального порошка и твердость круга), режимные факторы (скорость подачи стола, глубина шлифования) и наработка (объем удаляемого металла). Из показателей качества выбраны шероховатость обработанной поверхности (параметр  $Ra$ ) и отсутствие шлифовочных прижогов. Математические модели приведенных к ширине образца составляющих силы резания ( $p_y, p_z$ ), коэффициента шлифования ( $K_{ш}$ ) и шероховатости обработанной поверхности (параметр  $Ra$ ) получены методом полного факторного эксперимента типа  $2^4$ , где 4 – число факторов [2–5].

Требуемый допуск плоскостности обеспечивается на втором этапе оптимизации режимов управлением величиной упругой деформации. Варьируемыми параметрами при управлении величиной максимальной упругой деформации являются силы резания и притяжения магнитного поля стола станка.

Условие обеспечения заданного допуска плоскостности торцевой поверхности заготовки без выхаживания при закреплении заготовки магнитным полем стола определяется неравенством:

$$w_{\max} = w_p + w_q + w_m + w_k \leq [\Delta],$$

где  $w_p, w_q, w_m, w_k$  – максимальная упругая деформация заготовки при изгибе под действием, соответственно силы резания, силы притяжения магнитного поля стола станка, собственного веса заготовки, контактные деформации при действии усилия резания и магнитного поля стола станка [5-6];  $[\Delta]$  – допустимая упругая деформация заготовки.

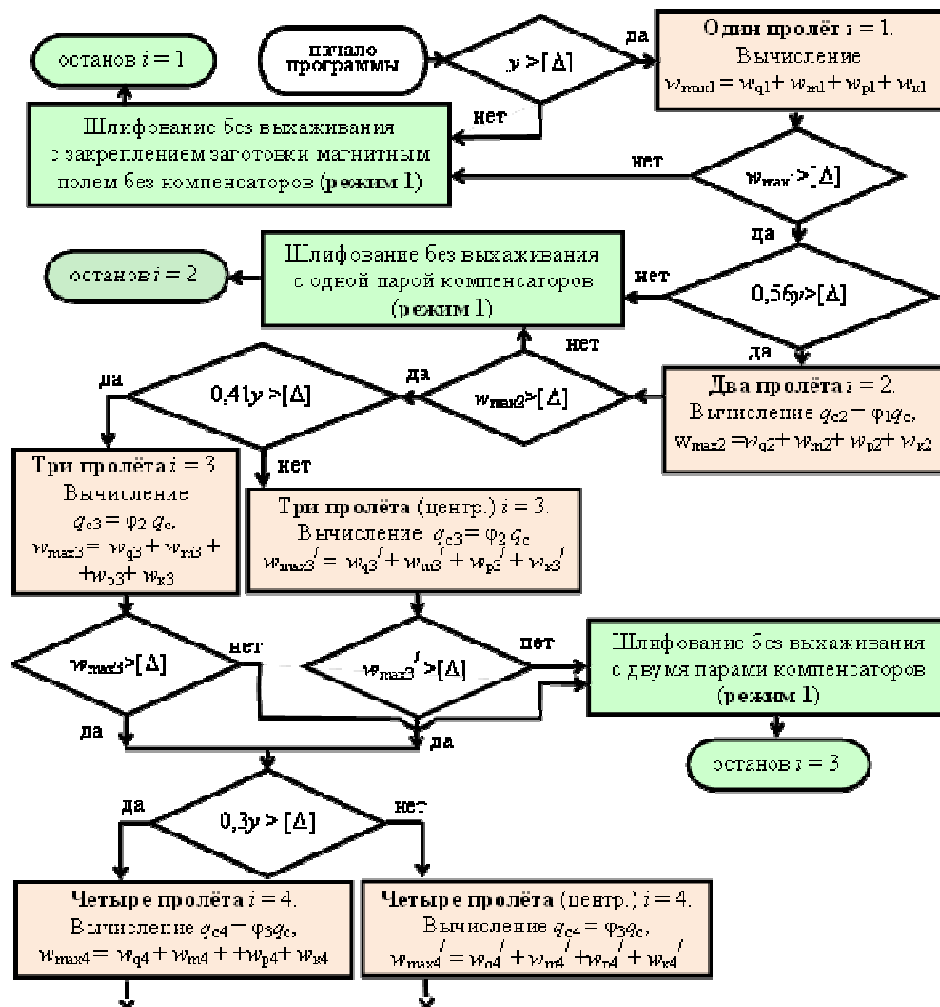


Рис. 2. Алгоритм управления упругой деформацией призматической заготовки под действием магнитного поля стола и радиальной составляющей силы резания



Максимальные упругие деформации  $w_{\max}$  определяются при моделировании призматической заготовки неразрезной балкой, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой по центральной оси интенсивностью  $q = q_c + q_m$  (от действия усилия притяжения магнитного поля стола  $q_c$  и массы заготовки  $q_m$ ) и сосредоточенной силы  $P_y$  – радиальной составляющей усилия резания. Геометрические параметры исследуемых заготовок позволяют использовать стержневую теорию. Начальное макроотклонение от плоскостности аппроксимируется полуволной синусоиды на основании экспериментальных исследований формы торцовых поверхностей исследуемых заготовок перед операцией шлифования.

Увеличение жесткости заготовки при изгибе осуществляется введением компенсаторов с разбиением пролета на равные части. Достаточное число пролетов и компенсаторов из условия обеспечения требуемого допуска плоскостности определяется по алгоритму управления величиной упругой деформации (рис. 2). В алгоритме обозначено  $y$  – начальное максимальное отклонение торцовой поверхности от плоскостности,  $w'$  – прогибы в центральном пролете для трех и более пролетных схем.

Для исследуемой направляющей (см. рис. 1) обеспечить требуемый допуск плоскостности обработанной торцовой поверхности 7 мкм шлифованием без выхаживания возможно при пяти пролетном опирании. Параметры оптимального режима (режим 1) по предложенному алгоритму и методике: максимальная производительность  $Q_{\max} = 260 \text{ мм}^2/\text{мин}$ ; глубина шлифования  $t_{\text{opt}} = 0,02 \text{ мм/ход}$ ; скорость подачи стола  $v_{\text{sopt}} = 13 \text{ м/мин}$ . Приведенные значения составляющих силы резания на данных режимах шлифования:  $p_y = 16 \text{ Н/мм}$ ,  $p_z = 6 \text{ Н/мм}$ , для круга, находящегося в середине диапазона рекомендуемой твердости  $K$  ( $c = 4500 \text{ м/с}$ ).

#### Выводы

Разработаны алгоритм и методика оптимизации режимов плоского шлифования торцов призматических заготовок малой жесткости путем управления их упругим деформированием при закреплении и обработке с обеспечением заданных требований к качеству обработанной поверхности при максимальной производительности процесса.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2/ Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение-1, 2001. – 944 с.
2. Оптимальные условия шлифования торцевых поверхностей колец крупногабаритных подшипников / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, С. В. Орлов, А. В. Саразов // Вестник машиностроения. 2015. - № 4. - С. 60–66.
3. Выбор оптимальных условий плоского шлифования стальных заготовок / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, С. В. Орлов, А. В. Саразов, Е. А. Сукочева // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2016. - № 6. - С. 73-81.
4. Управление осевыми упругими деформациями нежестких колец подшипников при плоском шлифовании торцов / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, А. В. Саразов, С. В. Орлов // Известия вузов. Машиностроение. - 2017. - № 1 (682). - С. 63-70.
5. Носенко, В. А. Повышение эффективности плоского шлифования нежестких заготовок путем управления упругими деформациями / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, А. В. Саразов // Вестник Рыбинского гос. авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. - 2017. - № 2 (41). - С. 342-348.
6. Определение контактных деформаций при плоском шлифовании торцов колец крупногабаритных подшипников / В. А. Носенко, В. Н. Тышкевич, А. В. Саразов, С. В. Орлов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. -2016. -№ 6 (320). - С. 50-54.

УДК 621.923

*А. Н. Унянин, Н. Е. Сарайнов***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АМПЛИТУДЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ  
НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРИ ШЛИФОВАНИИ КРУГАМИ ИЗ ЭЛЬБОРА****Ульяновский государственный технический университет**

С использованием разработанного программного обеспечения выполнено численное моделирование локальных температур и температуры заготовки в процессе шлифования кругами из эльбора. Физические и математические модели для расчета температур учитывают теплообразование в различных зонах микрорезания, наложение тепловых импульсов от отдельных зерен, взаимное перемещение зерен, стружки и заготовки, зависимость теплофизических и механических характеристик объектов от температуры и изменение кинематики микрорезания при наложении УЗК. Адекватность моделей доказана сравнением расчетных и экспериментальных значений средних контактных и локальных температур. При моделировании варьировали амплитудой УЗК и рабочей скоростью круга. Установлено, что увеличение амплитуды УЗК приводит к снижению силы микрорезания, мощности источников тепловыделения, локальных температур и температуры в поверхностных слоях заготовки. При использовании колебаний амплитудой 3 мкм локальные температуры уменьшаются на 44 ... 48 %, температура заготовки – на 10 %. Увеличение рабочей скорости круга с 35 до 70 м/с приводит к увеличению локальных температур на 11 ... 18 %. При скоростях круга 35 и 70 м/с степень влияния УЗК на локальные температуры практически одинакова.

*Ключевые слова:* шлифование, ультразвуковые колебания, локальные температуры, эльбор.

Numerical simulation of local temperatures and billet temperature in the grinding process with circles from an elbor has been performed using the developed software. Physical and mathematical models for calculating temperatures take into account heat formation in various zones of microcutting, the imposition of thermal impulses from individual grains, the mutual movement of grains, chips and billets, the dependence of the thermal and physical characteristics of objects on temperature, and the change in the kinematics of microcutting when applying ultrasound. The adequacy of the models is proved by comparing the calculated and experimental values of mean contact and local temperatures. In the modeling, the amplitude of ultrasonic vibrations and the working speed of the circle were varied. It is established that an increase in the ultrasonic amplitude leads to a decrease in the force of microcutting, the power of heat sources, local temperatures and temperature in the surface layers of the billet. When using oscillations with an amplitude of 3  $\mu\text{m}$ , the local temperatures are reduced by 44 ... 48 %, the temperature of the billet - by 10 %. Increasing the operating speed of the circle from 35 to 70 m/s leads to an increase in local temperatures by 11 ... 18 %. At velocities of 35 and 70 m/s, the degree of influence of ultrasonic vibrations on local temperatures is practically the same.

*Keywords:* grinding, ultrasonic vibrations, local temperatures, elbor.

Повышение эффективности процесса шлифования с использованием ультразвуковых колебаний (УЗК) во многом связано со снижением тепловой напряженности процесса. На работоспособность шлифовального круга и качество поверхностного слоя обработанной детали оказывают влияние, преимущественно, локальные температуры [1, 2]. Перспективным направлением повышения эффективности процесса шлифования является применение кругов из сверхтвердых абразивных материалов, в том числе из эльбора. Численное моделирование температурного поля, в том числе локальных температур, при шлифовании кругами из эльбора с наложением УЗК не выполнено и представляет актуальную задачу.

Физические и математические модели для расчета температур учитывают тепловыделения в зоне деформирования (плотность теплового потока  $q_d$  на рис. 1) и в зонах контакта абразивных зерен (АЗ) со стружкой ( $q_1$ ) и заготовкой ( $q_2$ ), взаимное перемещение контактирующих объектов (АЗ относительно заготовки и стружки относительно зерен), условия их охлаждения при подаче смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и наложение тепловых источников от отдельных зерен [3]. Рабочую часть АЗ приняли в виде усеченного конуса, диаметр малой окружности которого равен размеру площадки затупления, образующейся на зерне в процессе правки и эксплуатации. Такая модель широко используется при исследовании напряжений и теплообразования процесса шлифования.

Учтены зависимости параметров, характеризующих сопротивление материала заготовки диспергированию, а также теплофизических свойств взаимодействующих объектов (в том числе внешней среды) от температуры. Модели учитывают изменение кинематики микрорезания абразивными зернами, а также механических характеристик материала заготовки и условий проникновения СОЖ в зону шлифования при наложении УЗК. Моделирование температурного поля выполнено на основе совместного решения дифференциальных уравнений теплопроводности, записанных для заготовки, круга, стружки и АЗ.

Постановка задачи в таком виде ограничивает использование аналитических методов решения дифференциальных уравнений теплопроводности, поэтому использовали численный метод. Разработаны методика, алгоритм и пакет программ численного решения задачи с применением метода конечных элементов. Адекватность физических и математических моделей, принятых при расчете, реальным условиям проверяли путем сравнения экспериментальных значений средней контактной температуры в зоне шлифования и локальной температуры с расчетными значениями.

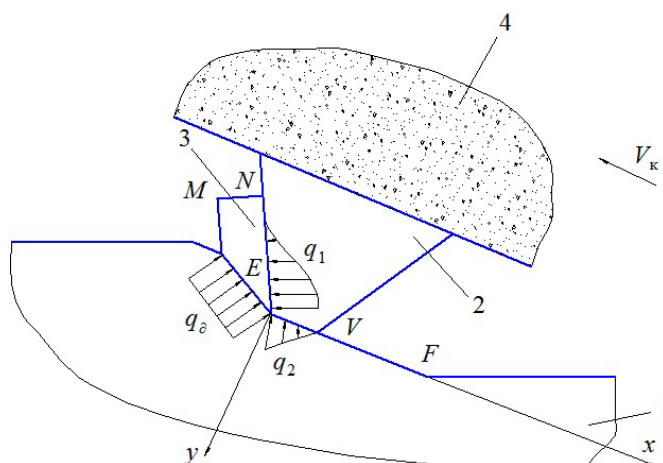


Рис. 1. Схема теплообмена в зоне контакта режущего зерна с заготовкой:  
1 – заготовка; 2 – АЗ; 3 – стружка; 4 – шлифовальный круг

Численное моделирование температур выполнено для плоского многопроходного шлифования периферией круга; материал заготовки – коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т; материал зерна шлифовального круга – эльбор марки ЛО зернистостью 125/100; рабочая скорость круга  $V_k = 35$  и  $70$  м/с; скорость продольной подачи  $10$  м/мин; глубина шлифования  $t = 0,01$  мм. Моделировали наложение УЗК частотой  $f = 22000$  Гц амплитудой  $A_y = 2$  и  $3$  мкм (в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности) и различными фазами. При наложении УЗК амплитудой более  $A_y = 3$  мкм увеличиваются высотные параметры шероховатости обработанной поверхности и износ круга, поэтому такие амплитуды при моделировании не использовали.

Фиксировали силу микрорезания  $P_z$ , мощности источников тепловыделения  $W_\delta$ ,  $W_{1T}$  и  $W_{2T}$ , возникающих как результат перехода в теплоту работы деформирования ( $W_\delta$ ) и работы сил трения стружки о зерно ( $W_{1T}$ ) и зерна о заготовку ( $W_{2T}$ ), локальные температуры на площадке контакта АЗ с заготовкой (участок  $EV$  на рис. 1) и со стружкой (участок  $EN$ ), а также температуру в поверхностных слоях заготовки при движении через зону шлифования 21-го зерна. В этом случае моделируется диспергирование материала заготовки, прогретого в результате работы предыдущих зерен.

Ниже приведены результаты, полученные при рабочей скорости круга  $V_k = 35$  м/с. При наложении УЗК сила микрорезания единичным зерном  $P_z$  снизилась при амплитуде  $A_y = 2$  мкм на  $9\%$ , при  $A_y = 3$  мкм – на  $44\%$  (рис. 2).

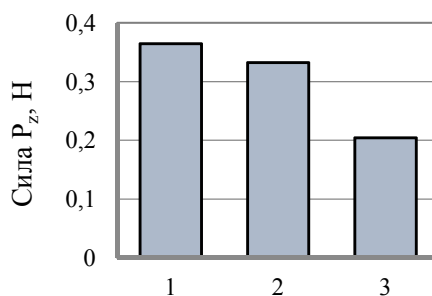


Рис. 2. Влияние амплитуды УЗК  $A_y$  на силу микрорезания  $P_z$ :  
1 –  $A_y = 0$  мкм; 2 –  $A_y = 2$  мкм; 3 –  $A_y = 3$  мкм

Причиной уменьшения силы является изменение кинематики микрорезания и предела прочности материала заготовки при наложении УЗК.

Мощности источников тепловыделения  $W_{1T}, W_{2T}, W_{\delta}$ , функционально связанные с силой  $P_z$  и силами трения, снижаются при  $A_y = 2$  мкм на 13, 13 и 7 %, при  $A_y = 3$  мкм – на 51, 13 и 46 % соответственно (рис. 3).

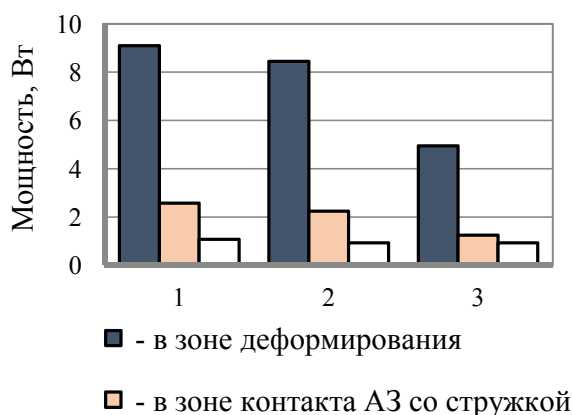


Рис. 3. Влияние амплитуды УЗК  $A_y$  на мощности источников тепловыделения:  
1 –  $A_y = 0$  мкм; 2 –  $A_y = 2$  мкм; 3 –  $A_y = 3$  мкм

При наложении УЗК в зоне контакта АЗ с заготовкой температура снизилась при  $A_y = 2$  мкм на 12 %, при  $A_y = 3$  мкм – на 44 %, в зоне контакта АЗ со стружкой при  $A_y = 2$  мкм – на 15 %, при  $A_y = 3$  мкм – на 48 % (рис. 4). Температура в поверхностных слоях заготовки также уменьшается с увеличением амплитуды и при амплитуде  $A_y = 3$  мкм ее значение меньше на 10 %.

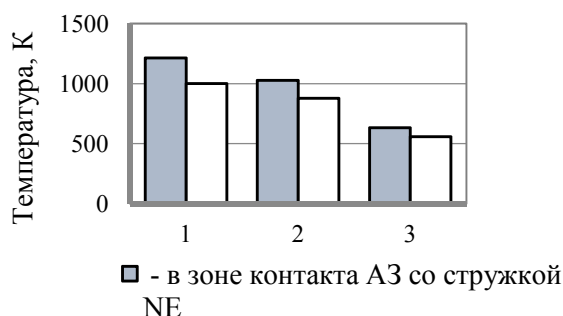


Рис. 4. Влияние амплитуды УЗК  $A_y$  на температуру  
в зоне контакта АЗ со стружкой и с заготовкой:  
1 –  $A_y = 0$  мкм; 2 –  $A_y = 2$  мкм; 3 –  $A_y = 3$  мкм

При увеличении рабочей скорости круга с 35 до 70 м/с, т.е. в два раза, локальные температуры увеличиваются в среднем на 11–18 %. Наложение на заготовку УЗК амплитудой 2 мкм обеспечивает снижение температуры в зоне контакта зерна с заготовкой и со стружкой на 14 и 15 % при скорости круга 35 м/с и на 8 и 15 % при скорости 70 м/с. Следовательно, степень влияния УЗК на локальные температуры при различных скоростях практически одинакова.

Таким образом, увеличение амплитуды УЗК приводит к снижению силы микрорезания, мощности источников тепловыделения, локальных температур и температур в поверхностных слоях заготовки. При использовании колебаний амплитудой 3 мкм локальные температуры уменьшаются на 44–48 %, температура заготовки – на 10 %. При рабочих скоростях круга 35 и 70 м/с степень влияния УЗК на локальные температуры практически одинакова.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Худобин Л. В. Влияние локальных температур на налипание материала заготовки на абразивные зерна / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин // СТИН. – 2008. – № 6. – С. 26 – 31.
2. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
3. Унянин А. Н. Исследование температур при шлифовании с наложением ультразвуковых колебаний // Вектор науки ТГУ. – 2015. – № 2 (32 - 2). – С. 191 – 195.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНТРОЛЯ И СБОРКИ МАШИН. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 658.562

*Н. С. Григорьева*

### РАЗВЕРТЫВАНИЕ ФУНКЦИИ КАЧЕСТВА ПРИ СБОРКЕ

Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина

vik\_shsbajkin@ukr.net

Рассмотрены преимущества развертывания функции качества как механизма управления с целью его повышения. Приведена диаграмма такого развертывания в сборочном производстве, показывающая понесенные затраты, а также объемная матрица 3D по этапам изготовления продукции.

*Ключевые слова:* качество, функция, развертывание, повышение, затраты.

The aim of the work is to increase the efficiency of assembly production, method - the provisions of the study the quality of products. The advantages of the deployment the quality function as a mechanism for management are considered. The diagram of such a deployment in assembly production is given, showing also the costs incurred, as well as 3D volume matrix for the stages of manufacturing of high-quality products.

*Keywords:* quality, function, deployment, diagram, increase, costs.

Известно, что качество изделий закладывается на этапе их проектирования и обеспечивается при изготовлении. При сборке качество закладывается при выборе сборочного оборудования и оснащения, обеспечивается технологиями изготовления и организацией производства. При этом качество не может быть обеспечено одним контролем, несмотря на то, каким бы детальным он не был, поскольку фиксируются достигнутые показатели качества при данном производстве, а не динамика их формирования, т.е. не выполняются меры по улучшению качества. С целью частичного устранения такого недостатка можно использовать развертывание функции качества (РФК), которая определяет потребности и требования потребителей и помогает производителю интегрировать их в конкретных планах повышения качества изделий, процессов или услуг. Это фактически и есть механизм обеспечения качества [1].

Современная глобализация предъявляет свои требования к управлению качеством продукции при разделении общества на богатых и бедных, которые должны быть дифференцированными. Так потребители развивающихся стран, ограничены низкой покупательной способностью. На рынке снижаются требования к качеству продукции, хотя общеизвестно, что качество не признает компромиссов, поскольку это абсолютная категория. В будущем разрыв между глобальными и местными корпорациями по управлению качеством продукции будет уменьшаться. Но для этого необходимо выйти на новые уровни информированности, мышления, понимания, автоматизации, унификации, систематизации и мастерства, что должно стать повседневным стилем жизни людей.

Разработки РФК были выполнены в Японии в конце 60<sup>-х</sup> годов и усовершенствованы в США. Толчком для разработки стала концепция всеобщего управления качеством (Total Quality Control). Идея заключалась в разработке метода качества продукции еще до ее изготовления. Для этого разрабатывались диаграммы «рыбьего скелета», то есть, причинно-следственные диаграммы или диаграммы Исикавы. В дальнейшем было систематизировано фактическое качество по требованиям потребителей в виде функций качества, а затем обнаружена зависимость между этими функциями и показателями качества. В конечном счете, все было обобщено как РФК. Первичное РФК было дано Фейгенбаумом в 1961 году по всем видам организационной деятельности. А вообще, создателями РФК считаются Милзуно и Акао. Известен и другой путь появления РФК, связанный с функционально-стоимостным анализом (Value Engineering), который разработал Исихара и представил способ определения функции качества продукции.

Главным в методологии Г.Тагути является повышение качества изделий с одновременным уменьшением затрат, для чего проводится их совместный анализ. Расходы и качество связаны общей характеристикой, которая называется функцией потерь качества. Функция потерь изображается параболой  $L(x)=c(x-x_0)^2$ , где:  $x$  - измеряемое значение показателя качества;  $L(x)$  - значение функции потерь Тагути в точке  $x$ ;  $c$  - коэффициент, подбираемый в зависимости от денежной единицы, используемой при определении потерь, хотя характер такой кривой будет зависеть от природы конкретного показателя качества. Предполагается, что на вершине параболы потери равны нулю в точке наилучшего значения - номинала. При удалении от номинала потери увеличиваются и на границе поля допуска достигают своего наибольшего значения, т.е., величин потерь от замены некачественного изделия на качественное. При анализе рассматриваются потери, как производителя, так и потребителя и незначительные, что вызывает разброс значений параметров, которые тяжело или дорого изменить. Такие потери могут увеличить расходы производства на обслуживание, уменьшая прибыль. Можно также все действующие факторы разделить на основные и вспомогательные и применить при проектировании, что особенно ценно.

Анализируя представленные РФК по Ф.Тейлору и Г.Тагути, можно отметить, что речь, скорее всего, идет не об изменении качества, а о его фиксации, которая может изменяться скачкообразно или плавно. В действительности все показатели качества изделий изменяются во времени криволинейно за исключением систем саморегулирования, где скачок является основным явлением.

Диаграмма РФК (рис. 1) охватывает все этапы изготовления изделия с его последующей эксплуатацией, начиная от маркетинга и эксплуатации, а также сопутствующие при этом расходы. РФК может рассматриваться как механизм произвольного разворачивания, как по этапам, так и затратам [2]. В дальнейшем развертывание идет по отдельным показателям качества. Поэтому диаграмма РФК может рассматриваться как механизм обеспечения качества продукции с учетом сопутствующих расходов. Маркетинг должен рассматриваться как обоснованное мероприятие создания конкурентоспособного изделия, поскольку только так можно установить как сам объект дальнейшей разработки, так и его необходимые качественные и затратные характеристики. Цепочка проста: на основании информации о подобных изделиях, после анализа требований потребителей производится выбор аналогов и прототипа, а также ожидаемые расходы, которые понесет производитель. Очевидно, что если этот объем работ будет выполнен некачественно, то организация выпуска изделий может привести к негативным последствиям, в том числе и возможного банкротства. При конструировании изделий закладываются основы качества, а для получения высокого качества с минимальными затратами необходимо использование современной методики проектирования, начиная от установления формы и состояния рабочих поверхностей деталей, формирования соединений, конструкций, в том числе и технологического оборудования с оснащением. Этапу отвечают основные затраты на само проектирование, программное обеспечение, изготовление опытных образцов, их испытание и доработку конструкций. Разработка технологии изготовления требует применения особенной методики.

Поскольку качество изделий зависит и от самих деталей, то обязательным является также разработка технологических процессов их изготовления, в которых и закладывается часть затрат. Выполнение этого сопровождается нужными расходами, которые должны быть проанализированы и уточнены. Далее анализируется производственный этап, который включает: затраты на технологическое оборудование, оснащение, диагностику и контроль изготовления, организацию производства и нужную инфраструктуру.

На этапе эксплуатации продукции разрабатываются технически и экономически обоснованные главные правила использования изделия, проведения диагностики при работе, основные виды обслуживания, рекомендации по необходимости текущих, средних и капитальных ремонтов, все виды обеспечения гарантированного срока службы и рециклинг. При этом, указываются требуемые затраты на проведение необходимых работ, топливо, энергию, стоимость ремонтов, хранение, выполнение других дополнительных работ, связанных с особенностями самого изделия (например, эксплуатация оружия, ракет, самолетов и т.д.).

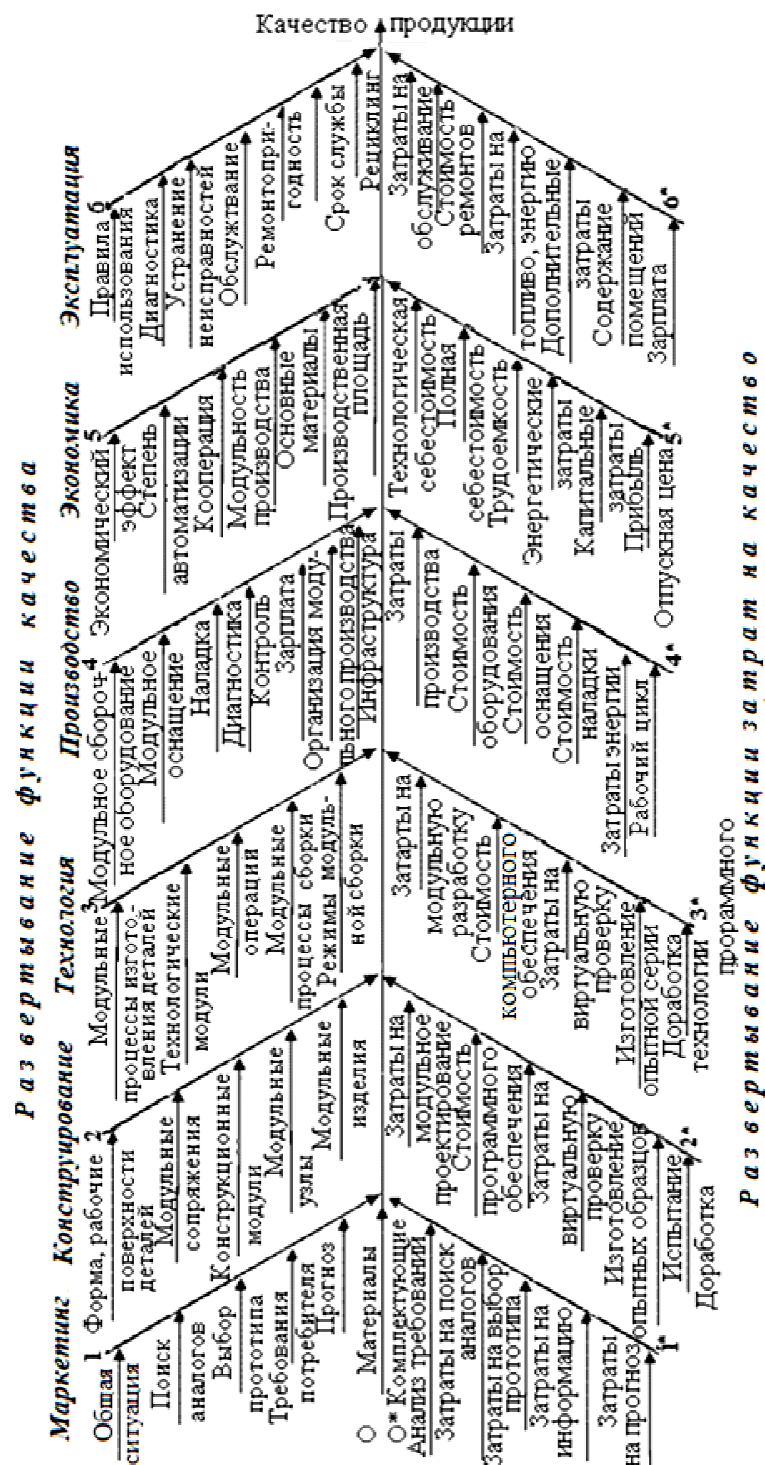


Рис. 1. Диаграмма РФК в сборочном производстве

В дальнейшем РФК проводится по отдельным показателям и затратам. Схема развертывания и полученная объемной матрицы приведена на рис. 2. Матрицы РФК по этапам изготовления  $W_{ij}$  расположены фронтально объемной матрице и разворачиваются вглубь ее по отдельным показателям качества, описывая их по каждому показателю, что соответствует ее вертикальным фронтальным сечениям. Поперечные матрицы  $V_{ij}$  РФК, перпендикулярны фронтальным и описывают затраты по отдельным показателям качества. Горизонтальные матрицы  $P_{ij}$  описывают показатели качества, достигаемые на отдельных этапах изготовления. Горизонтальные сечения вглубь объемной матрицы отвечают отдельным затратам.

Развертывание функции качества изготовления изделий можно представить матрицами, например, величины затрат по отдельным этапам

$$W_{ij} = \begin{vmatrix} w_{11} & w_{21} & \dots & w_{15} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{25} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{71} & w_{72} & \dots & w_{75} \end{vmatrix},$$

где  $w_{ij}$  - расходы обеспечения показателей качества по этапам изготовления изделия.

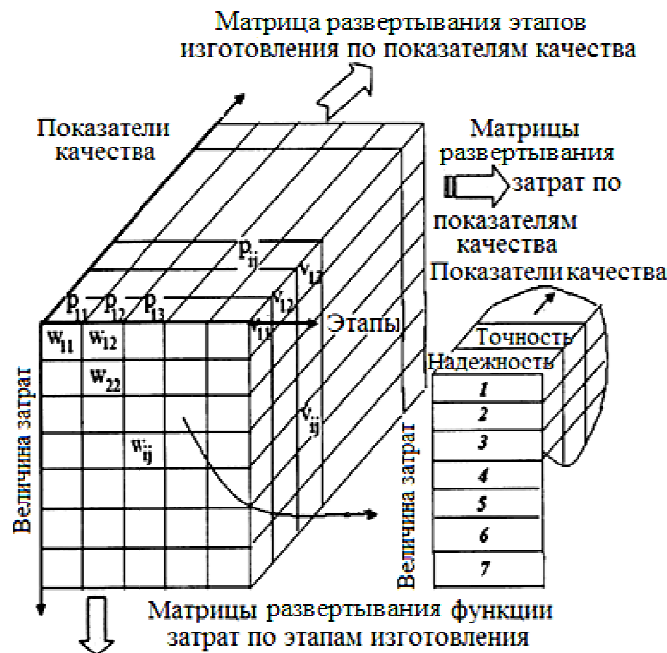


Рис. 2. Объемная матрица 3D РФК при изготовлении продукции

Из практических соображений для более полного РФК, т.е. механизма его обеспечения, следует установить степень влияния и конкретные зависимости между затратами по обеспечению отдельных показателей качества, то есть, какие нужно выполнить работы и соответственно расходы, чтобы обеспечить или повысить тот или иной показатель качества. Главной сложностью при заполнении описанных матриц является определение отдельных ее элементов, а именно, разделении затрат по отдельным показателям качества на различных этапах изготовления изделий. Необходимо четко представлять, за счет чего происходит повышение избранного показателя качества и сопутствующие затраты на это. Необходимые работы для повышения отдельного показателя качества требуют как знания функциональных и конструктивных особенностей конкретного изделия, так и владения инновационной методикой принятия решений. Но это может сделать только высококвалифицированный специалист, которому известны механизм формирования и повышения качества очерченной группы изделий и методика инновационных решений. Например, конструктор по изменению конструкции элементов изделия, технолог по разработке технологии изготовления, как обработки деталей изделия, так и их сборки, производитель по их практическому изготовлению и т.д. Другие специалисты указанных задач выполнить не смогут [3].

#### Заключение

Такой подход позволяет учитывать и реализовать требования потребителей относительно качества изделий за счет применения механизма его обеспечения. При изготовлении изделия это можно выполнить с помощью диаграммы, которая раскрывает взаимосвязь между качеством и соответствующими затратами. На ее основе составляется объемная матрица, которая описывает РФЯ, и схема формирования отдельных показателей качества на этапах изготовления изделий при



необходимых затратах. Схема является типовой и может быть использована в других отраслях промышленности для организации выпуска высококачественных изделий. При этом, можно решать как прямую, так и обратную задачу. Прямая задача заключается в определении расходов на обеспечение показателей качества изделия, а обратная - установлении по нужным показателям качества необходимых затрат.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ohfuji T.* (1995). Personal notes from the Second North American Quality Function Deployment Master Class, QFD Institute, Ann Arbor MI, 24-27 September 1995.
2. *Григорьева, Н. С.* Научно-технологические основы гибкого модульного автоматической сборки изделий. – Луцк: Надстырря, 2008. - 520 с.
3. *Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.* Развертывание функции качества (QFD): Методические указания / Самарский государственный аэрокосмический университет - Самара 2009, с. - 54 с.

УДК 658.562

*О. А. Горленко, Я. А. Вавилин*

#### МЕНЕДЖМЕНТ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОДУКЦИИ

**Брянский государственный технический университет**

Статья посвящена актуальной для промышленности проблеме обеспечения качества и конкурентоспособности продукции. В условиях окончательного перехода к техническим регламентам возникает задача обеспечения гарантий выполнения их требований. Однако в области машиностроения еще не сформировался единый подход к решению поставленной задачи. Авторами предлагается комплексный подход к менеджменту безопасности продукции машиностроительного профиля, который позволит обеспечить гарантии выполнения требований технических регламентов. При рассмотрении системы управления организацией, в частности системы менеджмента качества, появляется возможность интегрировать процессы менеджмента безопасности в общую систему. Такое решение позволит сократить издержки на вспомогательную деятельность и позволит сконцентрировать усилия на ключевых аспектах. Предлагаемая система менеджмента безопасности базируется на принципах процессного подхода и риск-ориентированного мышления.

*Ключевые слова:* безопасность, качество, менеджмент, машиностроение.

This article is devoted to a problem of ensuring quality, relevant for the industry, and competitiveness of production. In the conditions of final transition to technical regulations, there is a problem of providing guarantees of implementation of their requirements. However, in the field of mechanical engineering, uniform approach to the solution of an objective wasn't created yet. The authors offers an integrated approach to management of safety of production of a machine-building profile which will allow to provide guarantees of implementation of requirements of technical regulations. Considering control systems of the organization, in particular a quality management system, there is an opportunity to integrate processes, management of safety into the general systems. Such decision will allow to reduce costs for auxiliary activity and will allow to concentrate efforts on key aspects. The offered system of management of safety is based on the principles of process approach and risk - the focused thinking.

*Keywords:* safety, quality, management, engineering.

В условиях экономической нестабильности организациям, производящим машиностроительную продукцию приходится изыскивать новые способы повышения своего статуса на российском и международном уровне. Одним из таких направлений становится обеспечения безопасности выпускаемой продукции. Конструктивные особенности сложных изделий, к которым относится вся машиностроительная продукция, не позволяют собрать все требования в один документ. В этой связи возникает необходимость комплексного подхода к обеспечению безопасности продукции. Показатели качества продукции могут быть разделены на несколько категорий (эргономичность, безопасность, экологичность и др.) [1]. Внедрение технических регламентов выделяет показатели безопасности в особую категорию и увеличивает их весомость. Технические регламенты, содержащие требования в области безопасности, обязательны к исполнению на территории Таможенного союза.

При обеспечении безопасности продукции может быть выделено два принципиальных подхода – технологическое обеспечение и менеджмент безопасности. Технологические аспекты безопасности связаны с процессом производства и используемым оборудованием. Как правило, они предварительно разработаны и сведены в соответствующую документацию. Вопрос менеджмента безопасности для отечественно производителя остается мало изученным. Опыт применения систем управления качеством, существовавших в Советском Союзе, постепенно утрачен, а системы менеджмента качества на основе стандартов ИСО серии 9000, являющаяся основой управления в ведущих организациях, к сожалению, внедряются формально. В этой связи наблюдается парадокс управления – система управления есть, а результата нет [2].

Процессный подход (который в версии стандартов ИСО серии 9000 неразрывно связан с риск-ориентированным мышлением), положительно зарекомендовавший себя в менеджменте качества, должен стать основой менеджмента безопасности. Цикл постоянного совершенствования (PDC(S)A) подчеркивает необходимость пересмотра требований по безопасности и методов их обеспечения. Структура системы менеджмента безопасности продукции (СМБП), построенной на основе процессного подхода, представлена в таблице.

Для выполнения требований технических регламентов в рамках системы менеджмента безопасности машиностроительной продукции предлагается разработать и внедрить программу обеспечения безопасности (ПОБ) – документ, устанавливающий комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, методов, средств, требований и норм, подлежащих выполнению на стадиях жизненного цикла продукции и направленных на выполнение заданных в технических регламентах требований к безопасности.

**Структура системы менеджмента безопасности**

Раздел	Описание
Область распространения	Описывает все области деятельности, связанные с безопасностью, начиная с процессов проектирования и заканчивая утилизацией продукции.
Вспомогательные процессы	К вспомогательным процессам системы относятся такие виды деятельности как: управление ресурсами, лидерство руководства, планирование, анализ и улучшение системы и т.д.
Основные процессы	К ключевым процессам системы относятся: анализ опасностей, управление риском и возможностями, обеспечение безопасности на стадиях жизненного цикла продукции, анализ и улучшение продукции.

Основные разделы программы обеспечения безопасности: 1. Введение. 2. Общие сведения и область распределения программы обеспечения безопасности. 3. Характеристика продукции. 4. Методы анализа опасностей и возможностей. 5. Программа обеспечения безопасности на этапе жизненного цикла продукции (например, программа обеспечения безопасности на этапе проектирования включает в себя анализ требований технических регламентов (положений стандартов и/или условий договоров), управление рисками и возможностями.). 6. Распределение ресурсов и полномочий. 7. Приложение.

Деятельности по обеспечению безопасности, с рамках СМБП можно представить в виде последовательности шагов: 1) определение требований к продукции; 2) составление листа потенциальных дефектов, которые могут возникнуть в процессе производства и/или эксплуатации продукции; 3) применение методов управления рисками для минимизации или устранения выявленных дефектов; 4) внедрение таких инструментов как критические контрольные точки, статистические методы управления; 5) анализ показателей безопасности; 6) совершенствование деятельности [3, 4].

Для оценки эффективности функционирования процессов рекомендуется применять квалитетические шкалы уровней совершенствования: I – определенность; II – результативность; III – эффективность. Этим трем уровням совершенствования поставлена в соответствие 6-балльная числовая шкала (от 1 до 6 баллов). При этом в зависимости от полноты выполнения требований соответствующего уровня совершенствования по конкретному подкритерию может быть выставлена одна из следующих оценок: для 1-го уровня – 1–2; для 2-го уровня – 3–4; для 3-го уровня – 5–6. Это позволяет перейти от качественной оценки соответствующих подкритериев (видов деятельности, работ) к их количественной оценке по 6-балльной числовой шкале.

В дополнение к трехуровневой шкале предлагается использовать количественный показатель  $SPZ$ . Если процесс характеризуется  $m$  показателями, а каждый показатель –  $n$  критериями, то для него может быть составлена матрица

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix},$$

для которой, оценками для  $a_{mn}$  будут значения 0, 1, 2, 3. Тогда для такой матрицы всегда  $0 \leq SPZ \leq 100$ ;  $SPZ = 0$ , если все  $a_{mn} = 0$ ;  $SPZ = 100$ , если все  $a_{mn} = 3$ . Поэтому естественным образом возникает следующая шкала: 1) если  $SPZ = 100$ , то процесс имеет абсолютную (полную) зрелость; 2) если  $64 \leq SPZ < 100$ , то процесс имеет высокую зрелость; 3) если  $32 \leq SPZ < 64$ , то процесс имеет среднюю зрелость; 4) если  $0 < SPZ < 32$ , то процесс имеет низкую зрелость; 5) если  $SPZ = 0$ , то процесс имеет нулевую зрелость.

Внедрение предлагаемой системы привело к снижению количества рекламаций и затрат на устранение брака, что указывает на общее улучшения качества и безопасности продукции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горленко, О.А. Создание системы менеджмента качества в организации / О.А. Горленко, В.В. Мирошников. – М.: Машиностроение-1, 2002. – 126 с.
2. Гарднер, Р. Преодоление парадокса процессов / Р. Гарднер // Стандарты и качество. – 2002. – №1. – С. 82–88.
3. Вавилин, Я.А. О необходимости создания системы менеджмента безопасности продукции / Я.А. Вавилин // Социально-гуманитарный вестник. – 2013. – №1(10). – С. 24 – 28.
4. Горленко, О.А. Повышение качества машиностроительной продукции на основе обеспечения показателей ее безопасности / О.А. Горленко, Я.А. Вавилин // Вестник РГТУ им. П. А. Соловьева. – 2015. – №1 (32). – С. 112–118.

УДК 658.562

*О. А. Горленко, Т. П. Можяева*

#### ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИМИ РЕСУРСАМИ

**Брянский государственный технический университет**

В условиях усиления конкурентной борьбы среди производителей машиностроительной продукции обоснование влияния человеческого фактора на ее качество является актуальной. В статье рассмотрен подход к обеспечению качества машиностроительной продукции на основе управления человеческими ресурсами в системе менеджмента качества (СМК) предприятия в контексте идентификации и обоснования их двойственной природы. Проведен анализ места и роли человеческих ресурсов в зарубежных и отечественных системах управления качеством. Выявлено отсутствие в научном сообществе единства во взглядах на природу человеческих ресурсов. Определена двойственная природа человеческих ресурсов (одновременно ресурс и внутренний потребитель системы вознаграждения организации) и неоднородность объекта управления кадровых процессов. Предложен интегральный показатель результативности кадровых процессов – качество труда, учитывающий двойственную природу человеческих ресурсов и взаимосвязанный с качеством продукции. Предусматривается управление показателями результативности кадровых процессов, оказывающих влияние на качество продукции, с учетом выявленной специфики на основе метода анализа иерархий. Применение предлагаемого авторами подхода позволяет снизить уровень неопределенности в обеспечении качества выпускаемой продукции с учетом влияния на него человеческих ресурсов предприятия.

**Ключевые слова:** качество продукции, система менеджмента качества, человеческие ресурсы, качество труда.

In conditions of increasing competition among manufacturers of engineering products a study of influence of human factor on quality is important. The article considers the approach to quality assurance of engineering products on the basis of human resources management in the quality management system (QMS) of the enterprise in the context of the identification and justification of their dual nature. The analysis of place and role of human resources in foreign and national quality management systems. The identified lack in the scientific community of unity in views on the nature of human resources. Defined the dual nature of human resources (both resource, and internal consumer reward system of the organization) and the heterogeneity of the object of control of HR processes. The proposed integrated indicator of the effectiveness of HR processes – the quality of work, taking into account the dual nature of human resources and associated with quality products. Provides management performance indicators HR processes influencing product quality, based on the identified specificity based on the method of analysis of hierarchies. Application of proposed approach allows to reduce the level of certainty in ensuring the quality of manufactured product taking into account the impact on its human resources.

*Keywords:* quality products, quality management system, human resources, the quality of work.

Повышение качества продукции является одной из приоритетных задач, стоящих перед предприятиями. Перспективным для ее решения является эффективное управление ресурсами в системе менеджмента качества (СМК) предприятия, в частности человеческими ресурсами. В научном сообществе персоналу, как фактору, влияющему на качество продукции, уделяется особое внимание. Президент компании «Сони» А. Морита отмечал: «Многие иностранцы, посещая нашу фирму, удивляются, как мы, используя ту же технологию, то же оборудование и то же сырье, что в Европе и США, добиваемся более высокого качества. Они не понимают, что качество дают не станки, а люди» [1].

Понимание значимости человеческих ресурсов в обеспечении качества производимой продукции прослеживается практически во всех моделях совершенствования деятельности организации на основе применения СМК (Премия Деминга, 1950 г. – Япония; Система бездефектного изготовления продукции, 1955 г. – СССР; Премия Малкольма Болдриджа, 1987 г. – США; Стандарты ISO серии 9000 : 1987, 1994, 2001, 2008, 2015 – Европа и т. п.).

На это обстоятельство в свое время обратили внимание и отечественные специалисты в Советском Союзе, разрабатывая системы управления качеством. Примером таких систем стали, в частности [2]: саратовская система бездефектного изготовления продукции (БИП, 1955 г.), в основе которой лежал принцип самоконтроля труда непосредственного работника, направленного на обеспечение качества изготавливаемой продукции и устранению причин дефектов продукции; львовская система бездефектного труда (СБТ, 1961 г.), направленная на обеспечение бездефектности труда как работника, так и коллектива в целом; краснодарская комплексная система повышения эффективности производства (КСПЭП, 1975 г.), предусматривающая повышение качества продукции на основе оптимизации использования, в том числе и трудовых ресурсов, и т.п.

С внедрением новой версии стандарта ISO 9000 : 2015, отводящего особую роль человеческим ресурсам как важнейшим ресурсам предприятия возникает необходимость в переосмыслении теоретических и методологических подходов к управлению ими. Очевидно, что большинство предприятий, внедривших СМК, не получили ожидаемых результатов, в том числе и в повышении качества продукции. Данный факт объясняется, в частности: формальным подходом к человеческим ресурсам, не учитывающим их специфику, что приводит к недостаточной разработанности кадровых процессов; несоответствием показателей результативности целевому предназначению кадровых процессов, что не позволяет эффективно управлять ими.

В настоящее время в научном сообществе отсутствует единство во взглядах на природу человеческих ресурсов. Персонал определяется как ключевой ресурс (ценный актив), который по своим характеристикам должен соответствовать стратегическим целям предприятия, и которым нужно рационально управлять как любым другим ресурсом [3]. Однако объект управления кадровых процессов, как представляется, не однороден, а сами кадровые процессы обладают агрегированными поставщиками и потребителями. Если для большинства кадровых процессов потребителем является предприятие, а поставщиком персонал, то для мотивационных процессов – наоборот.

В этой связи представляется целесообразным определить природу человеческих ресурсов как двойственную, где персонал рассматривается, с одной стороны, как важнейший, специфический ресурс, определяющий конкурентоспособность предприятия, а с другой стороны, как внутренний потребитель системы вознаграждения, предлагаемой работникам за качественный труд [4].

В контексте данного подхода показатели результативности кадровых процессов должны быть ориентированы на интеграцию достижения интересов работодателя и работника. При традиционном подходе показателями кадровых процессов являются профессионально-квалификационная укомплектованность и компетентность персонала, необходимые и достаточные для решения предприятия своих корпоративных целей. Однако показатели результативности, выраженные только через характеристики персонала, практически не обладают четко установленной связью с качеством выпускаемой продукции. В этой связи показателем результативности кадровых процессов целесообразно рассматривать интегральный показатель – качество труда.

При этом предпочтительной является точка зрения, излагаемая в ГОСТ 15467-79, где под качеством труда понимают совокупность свойств процесса трудовой деятельности, обусловленных способностью и стремлением работника выполнить задание в соответствии с установленными требованиями. Из чего следует, что качество труда зависит от содержания труда, компетентности работника и его отношения к труду. Разрабатываемые показатели качества труда по каждому из параметров отражают ожидаемые результаты их потребителями: организацией, заинтересованной в установленном уровне содержания труда и компетентности работника; персоналом, демонстрирующим мотивированность к качественному труду через свое отношение к нему.

Управление частными показателями результативности, которые представляют собой достаточно разветвленную структуру в системе интегрального показателя – качество труда, возможно на основе метода анализа иерархий [5]. Метод позволяет установить иерархии целей, факторов и альтернатив повышения качества труда, а также определить приоритеты элементов каждого уровня в структуре иерархии. Это, в свою очередь, применительно к сфере управления человеческими ресурсами в СМК создает возможности получения более точной информации как по процессу в целом, так и по отдельным его составляющим, организации управления и обеспечения адекватных мер по устранению выявленных отклонений, а также определения направления для улучшений.

Предлагаемый подход позволяет разработать и управлять, учитывая двойственную природу человеческих ресурсов, показателями результативности кадрового менеджмента, базирующиеся на удовлетворении предприятия ресурсом, выраженным в обеспечении высокого уровня качества и производительности труда, а также на удовлетворении персонала системой вознаграждения, предлагаемой предприятием, что позволит обеспечить качество выпускаемой продукции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морита, А. Сделано в Японии / А. Морита. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. – 290 с.
2. Горленко, О.А. Развитие систем менеджмента качества / О.А. Горленко, В.В. Мирошников // Научные труды в машиностроении. – 2015. – № 8 (50). – С. 44-48.
3. Армстронг, М. Практика управления человеческими ресурсами: учебник / М. Армстронг [; пер. с англ.]. – СПб.: Питер, 2012. – 848 с.
4. Можяева, Т.П. Концепция управления человеческими ресурсами в системе менеджмента качества организации / Т.П. Можяева // Качество. Инновации. Образование. – 2014. – № 7 (110). – С. 52 – 61.
5. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати; перевод с англ. Р.Г. Вачнадзе. – М.: «Радио и связь», 1993. – 278 с.

УДК 621.757

*Ю. З. Житников, В. В. Пискунов*

### ОБОСНОВАНИЕ НАДЕЖНОЙ ОРИЕНТАЦИИ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ СБОРКЕ ИЗДЕЛИЙ

**Ковровская государственная технологическая академия**

Предлагается конструкция патрона для удержания резьбовых деталей с податливым креплением к шпинделю завинчивающего устройства и обоснование доориентации соединяемой детали при роботизированной сборке изделий.

*Ключевые слова:* самодоориентация, податливое крепление, завинчивающее устройство, роботизированная сборка.

It is proposed to hold chuck design for threaded parts with compliant mount to the spindle screwing device and justification of the self orientation of the connected parts during the assembly robot products.

*Keywords:* self orientation, compliant mount, screwing device, the robotic assembly.

Главная причина, по которой промышленные роботы не находят широкого применения при сборке изделий – это недостаточная точность позиционирования руки робота в пространстве. Для обеспечения гарантированной и качественной сборки резьбовых соединений, согласно [2,3], относительное смещение осей не должно превышать 0,05–0,2 мм, а перекос осей -  $1^{\circ}30'$ , в то время как погрешности положения оси детали в руке робота значительно больше.

Метод пассивной адаптации, предложенный для сборки резьбовых деталей в работах [3,4], позволяет осуществлять доориентацию в процессе сборки. Для пассивной адаптации необходимо одновременное выполнение трех условий: силового взаимодействия соединяемых деталей, податливости одной из деталей и вращения одной из деталей.

Данный метод применим для обеспечения качественной роботизированной сборки. Предлагается конструкция, в которой податливость одной из деталей обеспечивается за счет податливости патрона для удержания резьбовой детали (рис. 1).

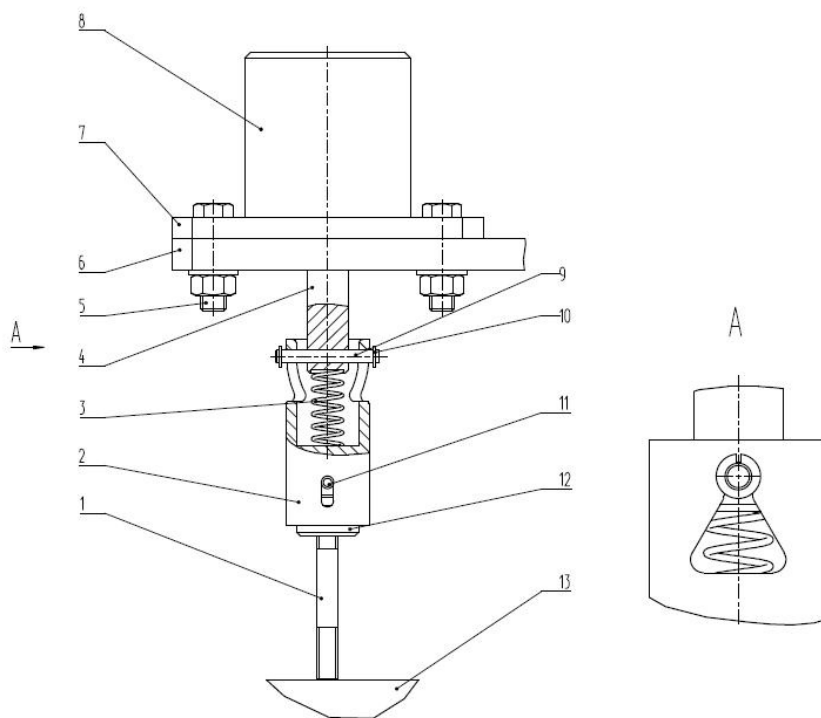


Рис. 1. Конструктивное исполнение патрона

На рис. 1 представлено конструктивное исполнение патрона, где 1 – шпилька (резьбовая или цилиндрическая деталь); 2 – патрон; 3 – пружина патрона; 4 – шпindelь заворачивающего устройства; 5 – болты жесткого крепления заворачивающего устройства к руке робота; 6 – плита исполнительного органа сборочного робота; 7 – фланец заворачивающего устройства; 8 – заворачивающее устройство; 9 – штифт крепления патрона к шпинделю; 10 – стопорное кольцо, препятствующее выпадению штифта 9; 11 – штифт кулачков; 12 – разрезные резьбовые кулачки патрона; 13 – собираемый узел.

За счет зазора между диаметром шпинделя заворачивающего устройства и внутренним диаметром патрона, а также наличием фигурного паза под штифт в патроне обеспечивается угловая и относительная податливость патрона. Стабильное исходное положение патрона обеспечивается цилиндрической или конической пружиной, которая расположена между торцом шпинделя и дном отверстия в патроне.

Процесс автоматизированного совмещения осей соединяемых деталей опишем математическими уравнениями. Для исследования процесса сборки составим дифференциальные уравнения движения патрона с резьбовой деталью в процессе самодоориентации с резьбовым отверстием.

Воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = Q_j,$$

где  $Q_j = \delta A_j / \delta q_j$  – обобщенная сила;  $T$  – кинетическая энергия механической системы;  $\dot{q}_j$  – скорость от обобщенной координаты;  $q_j$  – обобщенная координата;  $\delta A_j$  – элементарная работа;  $\delta q_j$  – элементарное изменение обобщенной координаты.

На рис. 2 представлено произвольное положение механической системы.

OXYZ – неподвижная система координат;  $O_1X_1Y_1Z_1$  – подвижная система координат, жестко связанная с корпусом патрона заворачивающего устройства и движущаяся вместе с ним.

Патрон 2 (рис. 1) с резьбовой деталью 1 вращается вокруг оси  $O_1Z_1$  под действием пары сил –  $M_{кр}$ . Равнодействующая давления резьбовой детали на поверхность узла равна  $N_l$ . Вес патрона равен  $G_2$  и приложен в центре масс в точке C, длина которого  $l_2$ . Вес шпильки –  $G_1$ , а длина  $l_1$ . Патрон 2 имеет пружину 3 с жесткостью  $c$ , которая при подводе к собираемому узлу предварительно поджимается. От этой пружины на заворачивающее устройство действует восстанавливающий момент, пропорциональный углу нутации  $\theta$  ( $M_{np} = K_{np} \cdot \theta$ ), где  $K_{np}$  – угловая жесткость пружины. Скользящий по плоскости узла конец шпильки и поворачивающийся патрон вокруг штифта 9, а также гистерезисное трение в пружине создают сопротивление вращению  $M_c$  вокруг оси Z.

Исследуемая механическая система совершает сложное движение, имеет шесть степеней свободы, четыре обобщенных координаты [1]. Примем углы Эйлера  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\theta$  и координату  $z$  в качестве обобщенных координат, где  $\varphi$  – угол собственного вращения патрона заворачивающего устройства вокруг оси  $Z_1$ ;  $\psi$  – угол прецессии – поворот корпуса патрона заворачивающего устройства вокруг оси Z;  $\theta$  – угол нутации – поворот патрона вокруг линии узлов ON, т.е. вокруг линии пересечения плоскостей неподвижной системы отсчета OXY и подвижной  $O_1X_1Y_1$ . Z – координата перемещения центра масс патрона.

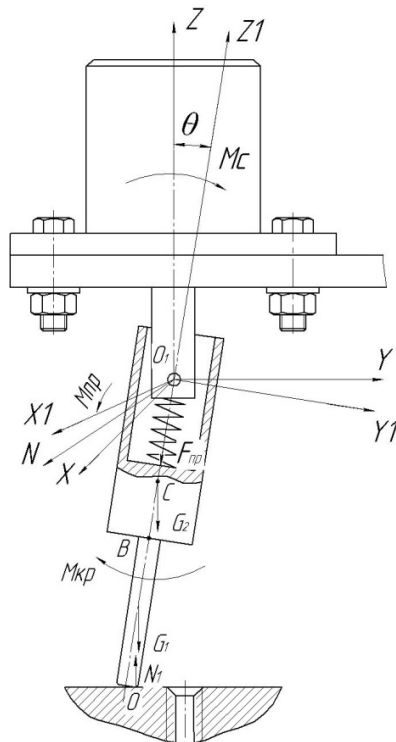


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия заворачивающего устройства с собираемым узлом

Дифференциальные уравнения движения патрона со шпилькой (механической системы) запишутся:

$$\begin{cases} I_1 (2\theta\dot{\varphi} + \theta^2\ddot{\varphi}) + I'_3 (\ddot{\varphi} + \ddot{\psi}) = M_{кр} - M_c; & (1) \\ I'_3 (\ddot{\varphi} + \ddot{\psi}) = M_{кр} - M_c; & (2) \\ I_1\ddot{\theta} - I_1\dot{\varphi}^2\theta = -M_{np} - G_2 \cdot CO_1 \cdot \theta - G_1 \left( \frac{OB}{2} + BO_1 \right) \theta - N_l \cdot l_1; & (3) \\ m\ddot{z} = G_1 + G_2 + F_{np}, & (4) \end{cases}$$

где (1) - дифференциальное уравнение собственного вращения патрона и резьбовой детали; (2) – дифференциальное уравнение прецессионного движения патрона; (3) – дифференциальное уравнение нутационного движения патрона; (4) – дифференциальное уравнение движения центра масс патрона с резьбовой деталью;  $I_1 = I_2$  – момент инерции закручивающего устройства относительно  $O_1X_1$  и  $O_1Y_1$ ,  $I'_3$  - приведенный момент инерции подвижных частей закручивающего устройства относительно оси  $O_1Z_1$ ,  $l$  - расстояние от оси штифта крепления патрона к шпинделю до торца шпильки.

При одновременном подводе закручивающего устройства и вращении шпинделя конец шпильки, перекачиваясь по поверхности узла, движется по спирали Архимеда, т.е. конец шпильки сканирует поверхность и даже при значительном (1-3 мм) относительном смещении осей шпильки и резьбового отверстия она попадает в зону отверстия, обеспечивается относительное совмещение осей соединяемых деталей.

Учитывая, что угол нутации мал, первым членом дифференциального уравнения (1) можно пренебречь, и оно становится аналогичным уравнению (2).

При установившемся движении (вращении шпинделя с постоянной угловой скоростью) момент сопротивления движению равен крутящему моменту:

$$M_{кр} = M_c. \quad (5)$$

Тогда уравнение (2) будет равно нулю, если угловые скорости собственного вращения -  $\dot{\phi}$  и прецессии -  $\dot{\psi}$  - постоянные величины.

Отсюда угловая скорость прецессии в первом приближении равна угловой скорости собственного вращения:

$$\dot{\phi} = \dot{\psi} = const. \quad (6)$$

Обоснуем возможность углового совмещения осей шпильки и резьбового отверстия, т.е. условие, при котором произойдет автоматизированное наживление резьбовых деталей.

Конец шпильки, попадая в зону резьбового отверстия, перекачивается по фаске. Считая их взаимодействие цилиндрическим «шарниром» и учитывая, что патрон со шпилькой совершает сложное движение относительно резьбового отверстия, запишем дифференциальное уравнение (4) нутационного движения патрона с шпилькой относительно их оси. После преобразования оно будет иметь вид:

$$\ddot{\theta} - \theta \cdot \left[ \dot{\phi}^2 + \frac{G_2 \cdot CO_1}{I_1} + \frac{G_1}{I_1} \left( \frac{OB}{2} + BO_1 \right) \right] = -\frac{1}{I_1} (Mnp + N_1 \cdot l). \quad (7)$$

Решение уравнения (7) представляет собой закон нутационного движения оси системы - патрон-шпилька относительно «шарнира» - резьбовое отверстие – конец шпильки:

$$\theta = \frac{\theta_{\Sigma} - B}{2} (e^{kt} + e^{-kt}) + B, \quad (8)$$

где  $\theta_{\Sigma}$  - максимальный угол перегиба осей отверстия и резьбовой детали в момент начала самоориентации резьбовой детали,  $B = \frac{1}{k^2 I_1} (Mnp + N_1 \cdot l)$ ,  $k^2 = \dot{\phi}^2 + \frac{G_2 \cdot CO_1}{I_1} + \frac{G_1}{I_1} \left( \frac{OB}{2} + BO_1 \right)$ .

С учетом прецессионного движения возникают расходящиеся колебания оси патрона со шпилькой, при которых в какой-то момент оси резьбового отверстия и шпильки совместятся, а учитывая собственное вращение шпильки, произойдет ее автоматизированное наживление.

Учитывая, что процесс самой сборки (закручивания) аналогичен процессу предварительной ориентации, можно утверждать, что при закручивании также происходит пассивная адаптация соединяемых деталей, исключая заклинивание и обеспечивающая качественную сборку.

Следовательно, обоснован процесс доориентации соединяемых резьбовых деталей на основе использования патрона для удержания шпильки, обеспечивающего пассивную адаптацию при роботизированной сборке изделия.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бутенин Н.В., Луцк Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. Т.2. М.: Наука, 1979.
2. Гусев А.А. Адаптивные устройства сборочных машин. – М. Машиностроение, 1979.
3. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, А.Г. Схиртладзе, А.Л. Симаков, Д.С. Воркуев; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2009г.
4. Житников Ю.З. Автоматизация сборки резьбовых соединений. Ч.1. Теоретические основы автоматизированной сборки изделий с резьбовыми соединениями: учеб. пособие / Ю.З. Житников. – Ковров: КГТА, 1996г.

УДК 621.91.002.

**Ю. З. Житников<sup>1</sup>, А. А. Клычев<sup>2</sup>**

**ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ НАДЕЖНОГО ЗАКРЕПЛЕНИЯ ЗАГОТОВОК  
В ТРЕХКУЛАЧКОВОМ ПАТРОНЕ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ  
ИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С КУЛАЧКАМИ**

<sup>1</sup> КГТА им. В. А. Дегтярева<sup>2</sup> ООО «ЭКТА-СПМ»

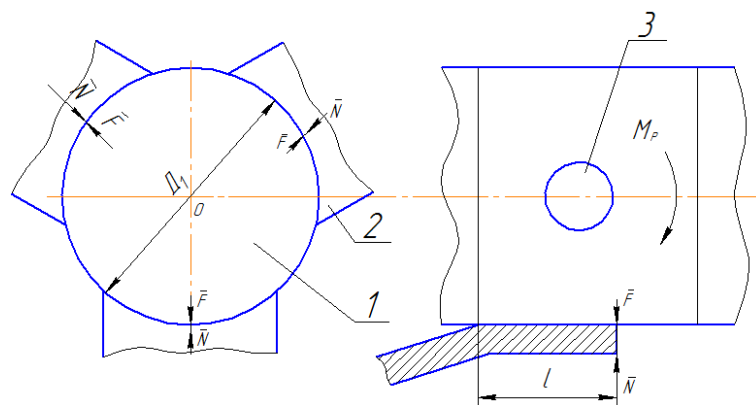
Приводятся теоретически обоснованные требования надежного закрепления заготовок в трехкулачковом патроне на станках с ЧПУ с учетом упругих деформаций их взаимодействующих поверхностей с кулачками патрона. Найден предельный момент резания, при котором на поверхности заготовки будут возникать только упругие деформации.

*Ключевые слова:* станки с ЧПУ, трехкулачковый патрон, заготовка, закрепление, упругие деформации.

Theoretically grounded requirements of reliable fastening of blanks in three-jaw chucks on CNC machines are given, taking into account the elastic deformations of their interacting surfaces with the chucks of the cartridge. The limiting cutting torque is found at which only elastic deformations will appear on the surface of the workpiece.

*Keywords:* CNC machines, three-jaw chuck, workpiece, fastening, elastic deformation.

Наиболее опасное положение кулачков патрона при фрезеровании (сверлении) боковой поверхности заготовки, когда на один из кулачков воздействует одна из сил нормального давления (схема представлена на рисунке). Под действием момента резания заготовку, как бы «разворачивает» и она давит на нижний кулачек.



Расчетная схема:

1 – заготовка, 2 – кулачки патрона, 3 – торцевая или концевая фрезы или сверло

«Разворот» заготовки происходит под действием момента резания  $M_p$ . Сила, которая пытается раскрывать кулачек и ослабить закрепление заготовки, равна:

$$F = \frac{M_p}{l}, \quad (1)$$

где  $M_p$  – момент резания при фрезеровании;  $l$  – длина взаимодействия кулачка с заготовкой.

Необходимое условие надежного закрепления заготовки запишется:

$$N > F, \quad (2)$$

где  $N$  – сила закрепления заготовки.

С учетом выражения (1) и коэффициента запаса силы выражение (2) примет вид:

$$N = \frac{k \cdot M_p}{l}. \quad (3)$$

Необходимое условие надежного закрепления заготовки в трех кулачковом патроне при фрезеровании или сверлении ее боковой поверхности обеспечивается при выполнении условия (3).

Достаточное условие надежного закрепления заготовки будет обеспечено при условии, если сила нормального давления  $N$  будет меньше предельной силы смятия  $F_{см}$ :

$$N < F_{см}. \quad (4)$$

Предельная сила смятия запишется:

$$F_{см} = [\sigma_{см}] \cdot S_{см}. \quad (5)$$

И с учетом выражений (3) выражение (4) примет вид:

$$\frac{k \cdot M_p}{l} < \frac{[\sigma_{см}]^2 \cdot l \cdot R_1 R_2 (E_1 + E_2) 6,18}{E_1 \cdot E_2 (R_2 - R_1)}. \quad (6)$$

При выполнении условия (6) на поверхности взаимодействия заготовки с кулачками патрона будут возникать только упругие деформации.

При невыполнении условия (6) необходимо увеличить площадь взаимодействия кулачков с заготовкой за счет длины кулачка « $l$ ».

Из выражения (6) найдем минимальную длину взаимодействия кулачков с заготовкой:

$$l_{\min} > \frac{1}{[\sigma_{см}]} \sqrt{\frac{k M_p E_1 E_2 (R_2 - R_1)}{6,18 R_1 R_2 (E_1 + E_2)}}. \quad (7)$$

При выполнении условия (6), учитывая, что согласно выражения (3) левая часть выражения (6) – это сила нормального давления (закрепления), найдем ее:

$$N < \frac{[\sigma_{см}]^2 \cdot l \cdot R_1 R_2 (E_1 + E_2) 6,18}{E_1 \cdot E_2 (R_2 - R_1)}. \quad (8)$$

Из условия, что длина кулачка задана, предельные режимы обработки, т.е. предельный момент резания  $M_p$ , при котором на поверхности заготовки от воздействия кулачков патрона будут возникать только упругие деформации, находится из выражения (6):

$$M_p < \frac{[\sigma_{см}]^2 \cdot l^2 \cdot R_1 R_2 (E_1 + E_2) 6,18}{E_1 \cdot E_2 (R_2 - R_1) k}. \quad (9)$$

В результате работы обоснованы достаточные условия надежного закрепления заготовок в трех кулачковом патроне, при котором на взаимодействующих с кулачками патрона поверхностях заготовки будут возникать только упругие деформации. Найден предельный момент резания, что позволит повысить режимы обработки.

УДК 631.361.83

*Н. И. Лебедь, Н. М. Антонов, А. М. Макаров, А. Е. Новиков*

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РОТОРНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ

Волгоградский государственный технический университет

Представлены общий вид и описание работы автоматизированного роторного измельчителя плодово-овощного сырья. Указаны конструктивные параметры измельчителя, и определен положительный эффект его влияния на процесс резания.

*Ключевые слова:* резание, измельчение, плоский нож, корнеплоды, плоды, режущий аппарат.

A general view and description of the operation of an automated rotary shredder for fruits-and-vegetables raw materials have been presented. The design parameters of the shredder have been indicated and positive effect of its influence on the cutting process have been determined.

*Keywords:* cutting, chopping, flat knife, root crops, fruits, cutting apparatus.

Важным направлением повышения эффективности производства перерабатывающей промышленности Российской Федерации, в частности механической и тепловой обработки продукции растениеводства, является решение проблемы, связанной с глубоким изучением, разработкой и внедрением современных ресурсосберегающих научно-обоснованных технологий, технических средств, обеспечивающих минимизацию всех видов затрат и получение конкурентоспособной готовой продукции, а именно натуральных яблочных и картофельных чипсов с повышенными сроками хранения.

На основе материалов, изложенных в работах Н.М. Антонова [1], С.М. Ведищева, А.В. Брусенкова и других ученых [2], нами выделено направление в совершенствовании процесса резания плодовоовощного сырья, а именно снижение общей энергоемкости технологического процесса путем снижения эффекта стесненного резания.

Анализ работ, а также проведенные ранее самостоятельные исследования показали, что указанное направление может быть реализовано уменьшением силы трения продукта о ножи. В результате чего была предложена новая конструкция автоматизированного роторного измельчителя плодовоовощного сырья.

#### Материалы и методы исследования

Устройство (патент №163146 РФ) относится к сельскому хозяйству, предназначено для измельчения плодов и корнеклубнеплодов и может быть использовано в индивидуальных фермерских и крестьянских хозяйствах, а также в пищевой промышленности и общественном питании [3].

На рис. 1, а изображен роторный измельчитель плодовоовощного сырья, общий вид, на рис. 1, б – роторный измельчитель плодовоовощного сырья, разрез А-А, на рис. 1, в – схема расположения ножей ножевого корпуса, вид А.

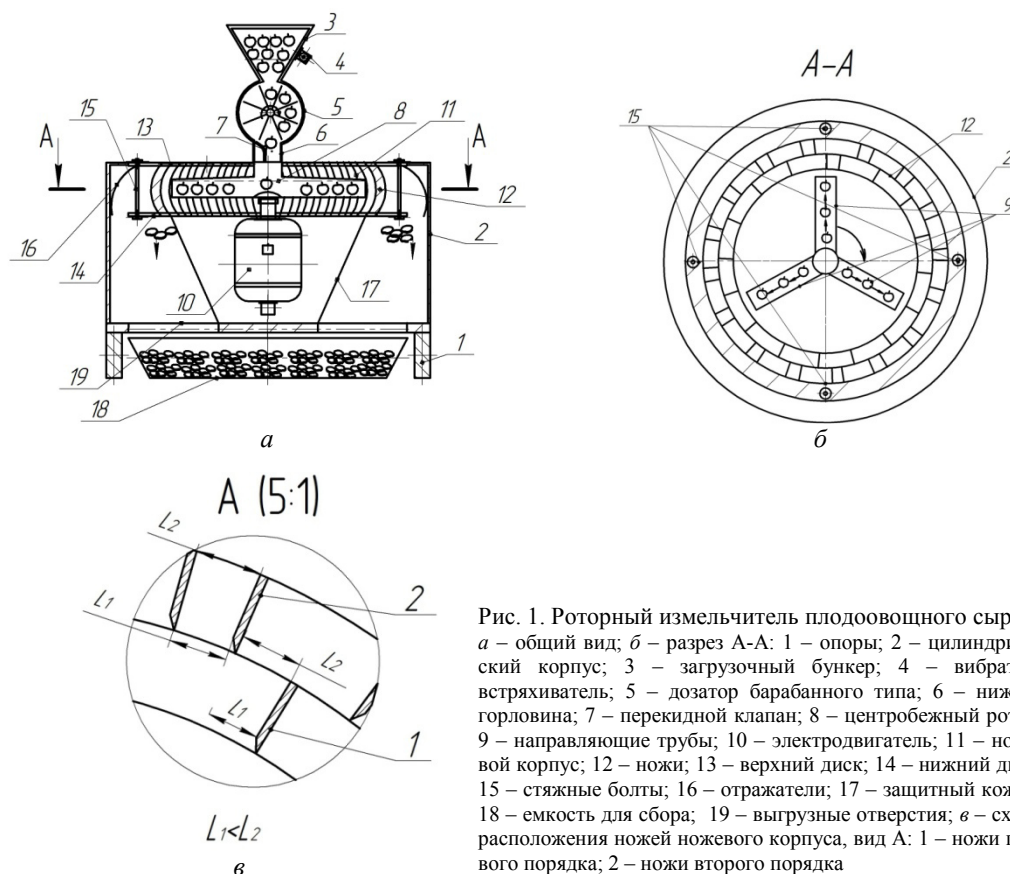


Рис. 1. Роторный измельчитель плодовоовощного сырья: а – общий вид; б – разрез А-А: 1 – опоры; 2 – цилиндрический корпус; 3 – загрузочный бункер; 4 – вибратор-встряхиватель; 5 – дозатор барабанного типа; 6 – нижняя горловина; 7 – перекидной клапан; 8 – центробежный ротор; 9 – направляющие трубы; 10 – электродвигатель; 11 – ножевой корпус; 12 – ножи; 13 – верхний диск; 14 – нижний диск; 15 – стяжные болты; 16 – отражатели; 17 – защитный кожух; 18 – емкость для сбора; 19 – выгрузные отверстия; в – схема расположения ножей ножевого корпуса, вид А: 1 – ножи первого порядка; 2 – ножи второго порядка

Устройство работает следующим образом.

Перед загрузкой материала запускали электродвигатель 10 устройства, чтобы задать центробежному ротору 8 необходимую частоту вращения. Обработываемый материал через загрузочный бункер 3 и дозатор барабанного типа 5 поступал в центробежный ротор 8. Посредством передачи крутящего момента валом электродвигателя 10 центробежный ротор 8 равномерно распределял плодовоовощной материал по трем направляющим трубам 9. В результате центробежной силы материал удалялся в направлении дугообразных ножей 12 ножевого корпуса 11 с линейной скоростью, необходимой для полного разрезания. При этом плодовоовощной материал проникал сквозь дугообразные ножи 12, измельчался на ломтики необходимой толщины и далее через отражатели 16 и выгрузное отверстие 19 поступал в емкость для сбора измельченного материала 18.

Нами проведены экспериментальные исследования по определению качественных характеристик резания плодовоовощной продукции с использованием экспериментального стенда для исследования процесса резания роторным измельчителем (рис. 2).

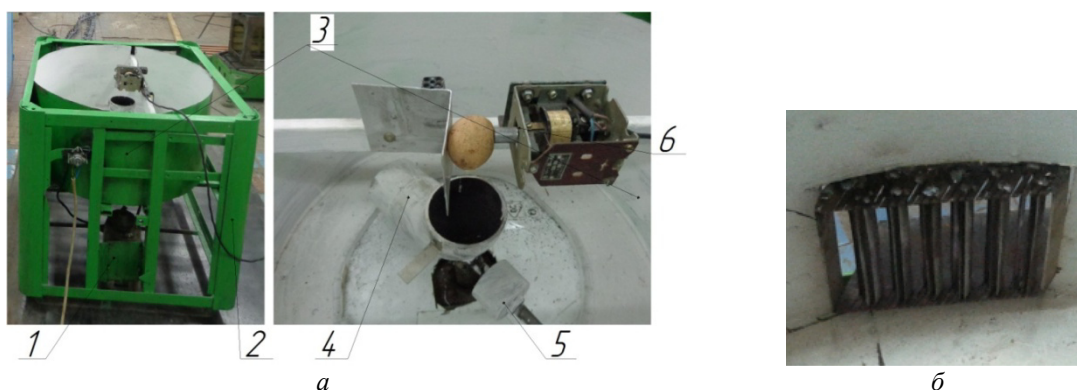


Рис. 2. Экспериментальный стенд для исследования процесса резания роторным измельчителем:  
а – экспериментальный стенд для исследования процесса резания роторным измельчителем (общий вид), б – элемент ножевого корпуса:  
1 – привод, 2 – станина, 3 – корпус, 4 – направляющая труба, 5 – балансир, 6 – механизм подачи материала в направляющую трубу

Экспериментальный стенд содержит привод 1, закрепленный на станине 2, корпус 3, внутри которого вращается ротор в виде направляющей трубы 4 с балансиром 5, а также механизм подачи материала в направляющую трубу 6. Внутри корпуса 3 предусмотрена установка ножевого корпуса с различным расположением ножей. Частота вращения ротора регулируется посредством подбора шкивов различного диаметра, а длины ротора – корректировкой количества дополнительных секций трубы. Для целей эксперимента ножевой корпус выполнен не полностью, а представлен в виде сегмента «дуги», с закрепленными в ней ножами.

Привод представлен асинхронным электродвигателем мощностью 1,1 кВт с частотой вращения выходного вала 300...450 мин<sup>-1</sup>. Электропривод соединен с промышленной сетью 380 В и частотой 50 Гц.

### Результаты и их обсуждение

В ходе опытов было определено влияние составляющих элементов процесса резания обрабатываемого сырья на точность соответствия заданной толщине резания с получением оптимальных значений:

- угол атаки ножей – 59...60 град.;
- ширина ножа – 9...11 мм;
- диаметр трубы ротора – 70...72 мм.

При этом точность соответствия заданной толщине резания составит 97,5 %.

Результатами применения разработанного роторного измельчителя является [4, 5]:

- высокая производительность – до 4,5 т/час;
- толщина среза ломтика – 2,1 мм;
- низкий процент нестандартного сырья – 4...5 %;
- минимальное соковыделение при резании – не более 1,2 % от массы исходного сырья.

Кроме этого, применение разработанного режущего аппарата с ножами дугообразной формы, радиально расположенных относительно центробежного ротора, позволяет снизить энергоемкость

измельчения у корнеплодов картофеля на 35 %, что характеризует более выгодное положение ножей относительно друг друга и разрезаемого материала.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов, Н.М. Оптимизация конструктивных параметров измельчителя плодов и корнеплодов / Н.М. Антонов, Н.И. Лебедь, А.К. Мамахай // Известия нижегородского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. ВолГАУ. – Волгоград, 2016. – №3 (43). – С. 231-238.
2. Брусенков, А.В. Разработка технологического процесса и устройства для измельчения корнеклубнеплодов с вальцовым подпором: диссертация ... кандидата технических наук: 05.20.01 / Александр Владимирович Брусенков. – Тамбов, 2015. – 222 с.
3. Патент на полезную модель № 1631461 РФ, МПК B02C18/00. Измельчитель плодов и корнеплодов / Н.М. Антонов, Н.И. Лебедь, В.А. Минаков, Н.А. Линева, Л.С. Цыганкова; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный аграрный университет; заявл. 26.01.2016; опубл. 10.07.2016.
4. Lebed, N.I. Influence of a zigzagging location of the knives in the cutting unit on the energy consumption during the cutting process of horticultural produce / N.M. Antonov, N.I. Lebed, A.M. Makarov. – Электронный периодический научный журнал «Journal of Food Process Engineering». 2015. №3 С. 262-270. URL: <http://authorservices.wiley.com/bauthor/onlineLibraryTPS.asp?DOI=10.1111/jfpe.12162&ArticleID=1420272> (дата обращения 19.04.2015)
5. Antonov, N.M. Energetic calculation of an apple chopper with zigzagging knife location in the cutting unit / N.M. Antonov, N.I. Lebed, A.M. Makarov. – Электронный периодический научный журнал «Journal of Food Process Engineering». 2016. – doi:10.1111/jfpe.12352 – URL: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jfpe.12352/full>

УДК 621.9

*А. В. Назарьев, П. Ю. Бочкарев*

#### **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КОМПЛЕКСА ПРОЕКТНЫХ ПРОЦЕДУР ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина**

Проблема совершенствования машиностроительных производств приобретает первостепенное значение. Требуемая точность высокоточных изделий достигается при традиционных методах изготовления усложнением технологического оборудования и использованием информационных и измерительных технологий. В настоящее время функциональная точность высокоточных изделий превзошла точность обрабатывающего и сборочного оборудования почти на порядок. Это привело к возникновению проблемы достижения заданного качества и точности высокоточных изделий при их изготовлении. На сегодняшний день наблюдаются разрозненные решения отдельных задач этой проблемы, отсутствует наиболее приближенная к реальным требованиям концепция системы в целом. В данной статье формируется структура комплекса проектных процедур, который основывается на установлении связи между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств. Также в статье рассматриваются математическая модель представления и анализа деталей и сборок (исходными данными являются полученные графы сопряжений сборочной единицы и графы размеров) и подход для автоматизации расчета технологических размерных цепей (исходными данными являются граф технологического процесса и размерные цепи).

**Ключевые слова:** сборочное производство, комплекс проектных процедур технологической подготовки производства, высокоточные изделия, граф размеров, граф сопряжений элементов сборочной единицы, граф технологического процесса, многокритериальная оптимизация, генетический алгоритм.

The problem of improving machine-building production is of paramount importance. The required precision is achieved with the traditional methods of manufacturing. They are: the complication of the processing equipment and the applying of the information technologies and measurement technologies. At present, the functional precision of the high-precision products (the devices and the machines) has surpassed the precision of the machining equipment and the assembly equipment almost by a decade. This leads to the problem of the achieving of the specified quality and accuracy of the high-precision products during their manufacture. Now there are just the segmental solutions for some specific tasks of these issues, such as the upgrading of the quality and the precision of the production, the reduction of the material costs, the adoption of the resource-saving technologies and so on. But the unifying vision of the system meeting the real requirements does not exist. In the present paper the discipline of the holistic approach (complex of design procedures) which provide the effectiveness of the realization of the assembly operations is considered. The effective realization of the assembly operations is based on the links between the process design of the manufacturing of the high-precision products and the process design of the assembly production of the high-precision products. Moreover, mathematical models and approaches of realization of the complex are considered in this paper.

**Keywords:** assembly production, complex of design procedures, process design, high-precision units, graph of the sizes, graph of the mating of elements of assembly, system of automated sequencing of manufacturing methods, multicriterion optimization, genetic algorithm.

Сборка изделий (особенно высокоточных) является наиболее ответственным этапом изготовления машин. В настоящее время функциональная точность высокоточных изделий превзошла точность обрабатывающего и сборочного оборудования почти на порядок. Это привело к возникновению проблемы достижения заданных характеристик высокоточных изделий при их изготовлении, решение которой в большинстве случаев приводит к применению затратных способов таких как многочисленные переборки, доработки и уточнения конструкции [1-2].

Именно поэтому необходимо проведение исследований по созданию комплексного подхода к решению существующих задач в машиностроении, особенно сборки высокоточных изделий, т.к. основными особенностями эффективного функционирования машиностроительных предприятий являются сжатые сроки и высокое качество технологической подготовки производства (ТПП) [2]. На сегодняшний день наблюдаются разрозненные решения отдельных задач этой проблемы, таких как повышение качества и точности собираемых изделий, снижение затрат на материалы, внедрение ресурсосберегающих технологий и т.п. Отсутствует отвечающая реальным требованиям концепция системы в целом [1].

Предлагается подход (комплекс проектных процедур), который основывается на установлении связи между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств, с учетом требований, заложенных при проектировании изделия. В общем виде связь представлена на рис. 1. Данный подход позволит в зависимости от складывающейся производственной ситуации выбирать оптимальные технологические процессы обработки элементов, учитывающих требование последующей сборки. Что, в свою очередь, позволит снизить трудоемкость, время изготовления и себестоимость, повысить качество и точность высокоточных изделий, сократить время и трудоемкость при ТПП.



Рис. 1. Связь между технологической подготовкой механообрабатывающего и сборочного производств

Структура комплекса проектных процедур включает в себя анализ требований к сборке высокоточных изделий и возможных технологических процессов обработки деталей, входящих в высокоточные изделия (далее технологических процессов), и выбор на основе анализа рациональных технологических процессов. Структура комплекса в общем виде приведена на рис. 2.

Анализ исходных данных и разработка рациональных технологических процессов в системе автоматизированного планирования технологических процессов (САПЛ-ТП) [3-4] включает в себя несколько этапов.

На начальных этапах проводится конструкторский размерный анализ сборочного изделия и деталей, задействованных в сборке, и технологический размерный анализ множества возможных ва-

риантов технологических процессов, разработанных в САПЛ-ТП. Исходными данными для проведения конструкторского размерного анализа являются конструкторская документация на сборочное изделие и детали, задействованные в сборке, и, полученные на основе обработки конструкторской документации, базы данных.



Рис. 3. Структура комплекса проектных процедур

На основе исходных данных проводится конструкторский размерный анализ сборочного изделия и деталей, участвующих в сборке. В ходе него определяются критичные требования сборки и детали, входящие в эти требования. В результате конструкторского размерного анализа формируются графы сопряжений сборочной единицы и графы размеров. Для автоматизации данного этапа применена математическая модель представления и анализа деталей и сборок, исходными данными для которой являются полученные графы сопряжений сборочной единицы и графы размеров [5].

Проектирование технологических процессов неавтоматизированными методами приводит к субъективному подходу при принятии решений на стадии ТПП и, как следствие, снижению показателей эффективности работы производственных систем при реализации технологических про-



цессов. Кроме того, подобная разработка технологических процессов в условиях многономенклатурного производства позволяет анализировать ограниченное число вариантов на отдельных этапах проектирования, что приводит к потере качества технологических решений и увеличению сроков ТПП. Одним из подходов, позволяющих автоматизировать ТПП, является САПЛ-ТП, обеспечивающая параллельное проектирование технологических процессов для заданной группы деталей в рассматриваемый период времени с учетом реально складывающейся производственной ситуации [3-4].

Исходными данными для технологического размерного анализа является множество вариантов технологических процессов изготовления деталей, задействованных в сборке, полученное в САПЛ-ТП.

Технологический размерный анализ заключается в построении графов возможных технологических процессов изготовления деталей. На рис. 3 (а, б) представлены размерные схемы (радиальное направление) двух вариантов технологических процессов для детали «Ось» и их расчет на точность с применением теории графов, где  $A$  - конструкторские размеры,  $T$  - технологические размеры,  $Z$  – размер исходной заготовки,  $Z$  – припуски на механическую обработку.

Для автоматизации расчета технологических размерных цепей использован подход, исходными данными для которого являются граф технологического процесса и размерные цепи. В нем используются две матрицы: номинальных размеров и допусков [6].

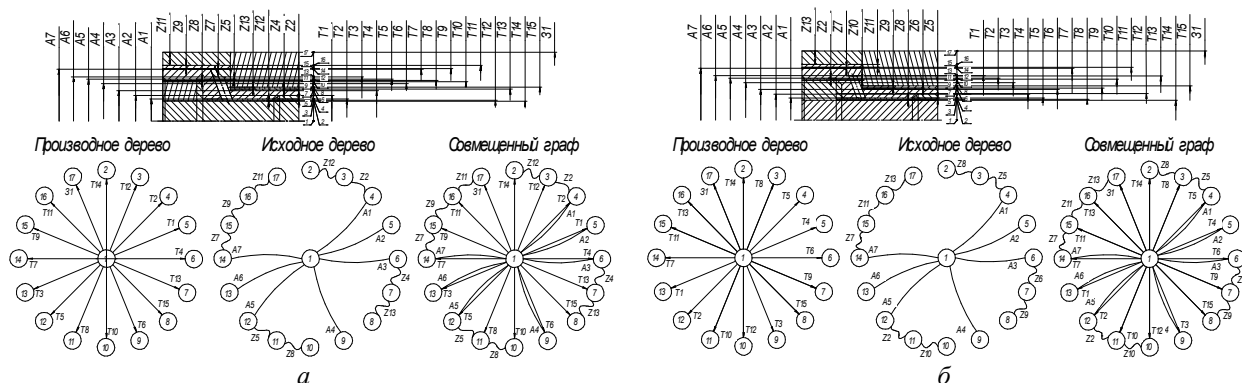


Рис. 3. Размерная схема и расчет на точность для технологического процесса:  
а – № 1 детали «Втулка»; б – № 2 детали «Втулка»

На заключительном этапе выбирается множество технологических процессов изготовления деталей, удовлетворяющих требованиям сборки, из которых определяется вариант рационального технологического процесса с учетом складывающейся производственной ситуации. Выбор варианта рационального технологического процесса осуществляется по следующим критериям: время реализации технологического процесса; количество операций технологического процесса; производственные мощности предприятия (наличный парк станков, технологическая оснастка, средства измерения и прочие условия, при которых должна осуществляться обработка детали); себестоимость изготовления детали.

Выбор рационального технологического процесса осуществляется методом многокритериальной оптимизации с применением генетического алгоритма [7].

#### Заключение

В данной статье представлена структура и проанализированы возможные решения реализации комплекса проектных процедур, обеспечивающего эффективное выполнение сборочных операций на основе связи между ТПП обрабатывающего и сборочного производств высокоточных изделий. Данный комплексный подход позволит учитывать реально складывающуюся производственную ситуацию и выбирать рациональные технологические процессы обработки деталей с учетом требований сборки. Что, в свою очередь, позволит снизить трудоемкость, время изготовления и себестоимость, повысить качество и точность высокоточных изделий, сократить время и трудоемкость при ТПП.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. - М. : Машиностроение, 2002. - 684 с.
2. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения : учебник / Б. М. Базров. - М. : Машиностроение, 2005. - 736 с.
3. Митин, С. Г. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем [Текст] / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2014. - № 11 (41). - С. 44-47.
4. Назарьев А. В. Обеспечение эффективного выполнения сборочных операций высокоточных изделий машиностроения и приборостроения / П. Ю. Бочкарев, А. В. Назарьев // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2016. Т. 1. №12. С. 28-34.
5. Гречников, Ф. В. Проектирование технологических процессов сборки по критериям точности / Ф.В. Гречников, С.Ф.Тлустенко // Вестник СГАУ. - 2011. №3-4. С.38-43.
6. Мухомозов, А.В. Алгоритм модуля автоматизированного расчета технологических размерных цепей [Текст] / А. В. Мухомозов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2015. – Т.15, №3. – С. 48-55.
7. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы и их применение. – Таганрог: изд. ТРГУ, 2002. – 244с.

УДК 621.7:658.12

*И. А. Разманов, С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ  
МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТКИ  
СИСТЕМЫ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ**

**Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина**

Рассматриваются вопросы повышения эффективности многономенклатурных механообрабатывающих производств путем комплексной автоматизации технологической подготовки. Основой является система автоматизированного планирования технологических процессов, в рамках которой существует необходимость формирования набора показателей для оценки уровня проектных решений на каждом этапе проектирования технологических процессов. В результате исследования процессов принятия решений в системе автоматизированного планирования технологических процессов, предложен обобщенный критерий оценки эффективности технологической подготовки, направленный на проектирование технологических процессов, обеспечивающих минимальное время механической обработки запланированной номенклатуры деталей.

*Ключевые слова:* технологическая подготовка производства, автоматизация проектирования, поддержка принятия решений.

The efficiency of multinomenclature machining operations increasing problems by means of integrated automation of technological preparation are considered. The basis is the computer-aided process planning system within which there is a need to form a set of indicators for assessing the level of design solutions at each stage of the process planning. As a result of research into decision-making processes in the computer-aided process planning system a generalized criterion for assessing the effectiveness of technological preparation is proposed aimed at the process plan that ensure minimum machining time for the planned part numbering.

*Keywords:* technological preparation of production, computer-aided process planning, design decision support.

Повышение эффективности технологической подготовки производства (ТПП) выражается в резком сокращении сроков и повышении качества проектирования. Решению этих задач способствует полная автоматизация всех проектных процедур, необходимых для проектирования технологических процессов (ТП). Это становится возможным на основе создания интегрированной системы автоматизированного планирования технологических процессов (САПлТП), обеспечивающей взаимодействие между системами конструкторской и технологической подготовки производства и конкретной производственной системой [1]. Ключевым вопросом в обеспечении взаимодействия является разработка новых методик и моделей, формализующих процессы принятия решений, исключающих субъективный характер проектирования, и алгоритмов, обеспечивающих возможность создания комплексных систем автоматизированного проектирования, способных учитывать особенности конкретных производственных систем и складывающуюся производственную ситуацию [2].

Все этапы ТПП взаимосвязаны, поэтому необходимо определить на каждом из них, как и насколько влияет то или иное решение на дальнейшую эффективность подготовки производства и изготовления изделий. Для оценки удобно использовать количественные показатели, поэтому для каждого этапа ТПП необходимо обосновать критерии оценки и разработать методику для расчета показателей. Это представляет собой сложную задачу, которая ранее не ставилась и не решалась.

В рамках САПлТП разработаны дополнительные показатели оценки производственной технологичности, которые оказывают поддержку принятия решений по формированию рациональной номенклатуры обрабатываемых деталей и рациональному использованию оборудования [3]. Однако их расчет производится перед этапом проектирования ТП, что не позволяет влиять на выбор рациональных решений при разработке маршрутных и операционных ТП. Главная трудность заключается в том, что оценка на ранних стадиях подготовки производства неизбежно проводится в условиях недостатка информации, например при разработке маршрутного технологического процесса еще не приняты решения по структуре операции, не подобран инструмент, не рассчитаны режимы обработки, но уже необходимо рассчитать себестоимость изготовления по различным вариантам маршрута, чтобы выбрать лучший из них.

САПлТП представляет собой многоуровневую иерархическую систему, состоящую из двух страт: проектирования и реализации технологических процессов (ТП), объединяющих несколько эшелонов [4]. Каждый эшелон САПлТП, состоящий из слоев, представляет собой множество проектных процедур, направленных на решение конкретной задачи проектирования. Для исследования процессов принятия решений в каждой проектной процедуре составим таблицу.

**Критерии и методики принятия решений в проектных процедурах САПлТП**

Эшелон	Проектная процедура	Критерий
1. Разработка принципиальной схемы обработки элементарных поверхностей деталей	Генерация схем обработки элементарных поверхностей деталей	Принцип технологической наследственности
	Отсев нерациональных схем обработки	Отсев вариантов с наибольшим числом использованных технологических переходов
	Выбор оптимальных схем обработки	Минимальное время реализации технологических переходов, рассчитанного по известным укрупненным формулам
2. Определение рационального объединения обработки элементарных поверхностей деталей в технологические операции	Генерация всех возможных технологических баз	Соответствие базовой поверхности размерным и точностным требованиям, требованиям по взаимному расположению базовой и обрабатываемой поверхностей
	Генерация возможных последовательностей кортежей переходов	Общность видов обработки, базирования и оснастки для нескольких обрабатываемых поверхностей
	Отсев нерациональных последовательностей кортежей технологических переходов	1. Технологические переходы должны в последовательности кортежей идти в том же порядке, что и в схеме обработки элементарных поверхностей. 2. Соблюдение конструкторских ограничений на взаимное расположение поверхностей деталей. 3. Последовательности, имеющие минимальное значение числа различных баз, предпочтительны. 4. Отсекаются ветки алгоритма, в которых получается количество кортежей технологических переходов больше заданного значения
	Выбор рациональных последовательностей	Более высокий приоритет имеют кортежи, содержащие поверхности, связанные общими размерами и конструкторскими требованиями

Окончание таблицы

Эшелон	Проектная процедура	Критерий
3. Выбор технологического оборудования	Генерация возможных вариантов оборудования	Соответствие технологических возможностей оборудования техническим требованиям
3. Выбор технологического оборудования	Отсев нерациональных вариантов оборудования	1. Показатель однородности ТП по применяемым методам изготовления изделий. 2. Показатель однотипности технологических переходов
	Выбор рациональных вариантов оборудования	Минимизация времени изготовления всего комплекта деталей
4. Выбор средств технологического оснащения	Генерация возможных вариантов режущего инструмента (РИ) и вспомогательного инструмента (ВИ)	Соответствие РИ и ВИ вариантам оборудования по конструктивным и технологическим параметрам, соответствие РИ обрабатываемым поверхностям по методу обработки, требованиям к точности и качеству обработки
	Отсев нерациональных вариантов РИ и ВИ	Критерий однородности оснастки
	Выбор рациональных вариантов РИ и ВИ	Минимизация суммарного основного времени обработки всей номенклатуры деталей
5. Определение рациональной структуры технологических операций	Генерация возможных вариантов последовательностей переходов в операции	Соответствие стадий обработки, взаимного расположения обрабатываемых поверхностей.
	Отсев нерациональных последовательностей переходов	Возможность параллельной обработки.
	Выбор рациональных вариантов структур	Минимизация оперативного времени.
6. Формирование управляющих переходов	Расчет режимов обработки	
	Оптимизация режимов	Минимизация основного времени.

Анализ информации, представленной в таблице, позволяет заметить, что в процедурах принятия решений присутствуют как количественные, так и качественные критерии. Качественные критерии в большинстве случаев присущи процедурам генерации возможных вариантов решений, когда не требуется оценка их эффективности. В процедурах отсева нерациональных и выбора рациональных вариантов преобладают количественные критерии, большинство из которых прямо или косвенно связаны с временем непосредственно механической обработки или временем реализации технологической операции. Следовательно, в качестве обобщенного критерия оценки эффективности принятых решений при ТПП целесообразно использовать суммарное время реализации технологических операций, необходимых для обработки заданной номенклатуры деталей.

Таким образом, проведенное исследование дает возможность выявить взаимосвязи между проектными процедурами и определить набор показателей для оценки уровня проектных решений. В ходе дальнейших исследований необходимо разработать модели и методики расчета каждого показателя, что позволит сформировать единую систему критериев выбора вариантов решений, направленную на достижение максимальной эффективности ТПП по обобщенному критерию оценки эффективности принятых решений при технологической подготовке для изготовления заданной номенклатуры изделий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митин С.Г. Принципы создания системы автоматизированного проектирования технологических операций в условиях многономенклатурного производства / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2-2.- С. 117-122.
2. Митин С.Г. Инновационные аспекты автоматизации проектирования операций механической обработки в многономенклатурном производстве / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев // Инновационная деятельность.- 2013.- № 4.- С. 36-41.
3. Митин С.Г. Автоматизация оценки производственной технологичности изделий в условиях многономенклатурных производственных систем / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев, Л.Г. Бокова // Наукоемкие технологии в машиностроении.- 2014.- № 9 (39).- С. 44-48.
4. Митин С.Г. Проектирование операций со сложной структурой в многономенклатурных механообрабатывающих системах: монография / С.Г. Митин, П.Ю. Бочкарев; Саратов. гос. техн. ун-т.-Саратов: СГТУ, 2016.-108 с.

УДК 621.01

*Е. П. Решетникова, П. Ю. Бочкарев*

**ФОРМАЛИЗАЦИЯ ВЫБОРА КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ  
ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ  
СО СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина**

В статье предложен алгоритм выбора контрольно-измерительных средств изделий со сложнопрофильными поверхностями с целью повышения качества проектных решений на этапе разработки технологического процесса их обработки.

Проведенный анализ подходов к технологической подготовке производства и организации изготовления сложнопрофильных деталей показал свое несовершенство, а именно одним из недостаточно проработанных вопросов при автоматизации процесса проектирования является способ контроля обработанной сложной поверхности. Разработка системы выбора контрольно-измерительных средств предполагает проведение анализа и совершенствование организации контроля деталей сложной геометрии в процессе их изготовления посредством создания алгоритма для назначения рационального комплекта средств измерения. Представленная задача формализации выбора комплекта средств измерения при реализации технологических процессов актуальна, так как является одной из важнейших задач экономической эффективности производства. От правильности ее решения зависит качество конечной продукции, промежуточного и входного контроля на этапах производства.

*Ключевые слова:* детали со сложнопрофильными поверхностями, производственная система, высокоточные изделия, автоматизация проектирования, методика выбора контрольных средств, повышение качества проектных решений.

In article the algorithm of a choice of control and measuring means of the articles with geometrically-complex surfaces with the aim of improving the quality of design solutions at the development stage of the technological process of their processing. The analysis of approaches to technological preparation of production and organization of manufacture of such parts showed his imperfection, namely, one of insufficiently explored issues in the automation of the design process is a method of inspection of the processed complex surfaces. Development of the system of selection of instrumentation involves the analysis and improvement of organization of control of parts with complex geometry in the manufacturing process through the creation of an algorithm to assign a rational set of measuring instruments. Pressing is the task of assign a rational set of measurement tools in implementation of technological processes control also the need to implement the choice of measurement depending on the complexity of the control parameters of the surface of the part made. The formation of the optimal choice of the set of control and measuring means of one of the most important tasks of economic efficiency of production. From the correctness of its solution depends on the quality of final products, intermediates and incoming control at the stages of production.

*Keywords:* complex-surfaces details, precision parts, design automation, industrial system, process engineering, improvement of quality design choices.

Особой трудоемкостью отличается изготовление сложнопрофильных деталей таких, как детали летательных аппаратов и автомобилей, пресс-формы для получения деталей давлением, оснастка для литейного производства. Процесс контроля получаемой сложной поверхности детали при механической обработке является неотъемлемой частью технологического проектирования их производства. С целью автоматизации и оптимизации проектирования этапа контрольных операций необходимо создание системы классификации изделий на основе информации о реальной производственной системе [1]. А именно безграничному разнообразию деталей при автоматизированном проектировании необходимо противопоставить конечное число типов деталей для решения задачи - создания классификации деталей сложной геометрии с применением аппарата кластерного анализа с целью:

- обеспечения процедуры рационального выбора и назначения контрольно-измерительного средства;
- определения способа сбора точек сложной поверхности (контактный/бесконтактный);
- определения методики оценки собранных данных, которая обеспечит требуемое качество выполнения обработки деталей на протяжении реализации всего технологического процесса.

Следовательно, необходимо определить основные типы обрабатываемых деталей, провести целенаправленную смысловую обработку, на основе которой создать классификатор, интегрирующий данные о детали, формализовать ряд признаков, относящихся к описанию деталей, получаемых в конкретной производственной системе.

Объединение поверхностей обрабатываемых деталей в группы по однородности с позиции контролируемых параметров позволяет автоматизировать процесс контроля и обработки данных его результатов. Предложено разделить объекты исследования на группы: корпусные детали, детали типа диск, детали типа вал и т.п.

Проведенный анализ группирования поверхностей показал, что кластерный анализ является количественным инструментом классификации поверхностей деталей с позиции измерения, для описания которых необходимы их размерные характеристики. Он позволяет провести выборку на несколько групп по исследуемому признаку, проанализировать группы (как группируются признаки), группировку объектов (как группируются объекты). С применением аппарата кластерного анализа определяем основные признаки, оказывающее основное влияние на точность и целесообразность контроля и определяем коэффициент сложности измерения (см. формулу), который является количественным выражением идеологии предлагаемой методики процесса контроля (показатель, прогнозирующий эффективность использования средств контроля, имеющихся в производственной системе).

$$1 - \frac{\sum_{zi} K_{zi}}{\sum_{zij} V_{zij}},$$

где  $K_{zi}$  - показатель на основе возможности группирования поверхностей по однородности с позиции контролируемых параметров;  $V_{zij}$  - возможное средство измерения, которое можно использовать для контроля  $j$ -го контролируемого параметра,  $i$ -й поверхности  $z$ -й детали.

В рамках работы рассмотрена задача рационального использования автоматизированных измерительных средств при реализации технологических процессов контроля, также необходимость осуществления выбора средства измерения в зависимости от сложности контроля параметров поверхности изготавливаемой детали (рисунок), на основании особых требований к созданной модели изготавливаемой сложнопрофильной детали и технологии ее получения. Формирование оптимального варианта выбора комплекта контрольно-измерительных средств одна из важнейших задач экономической эффективности производства. От правильности ее решения зависит качество конечной продукции, промежуточного и входного контроля на этапах производства.

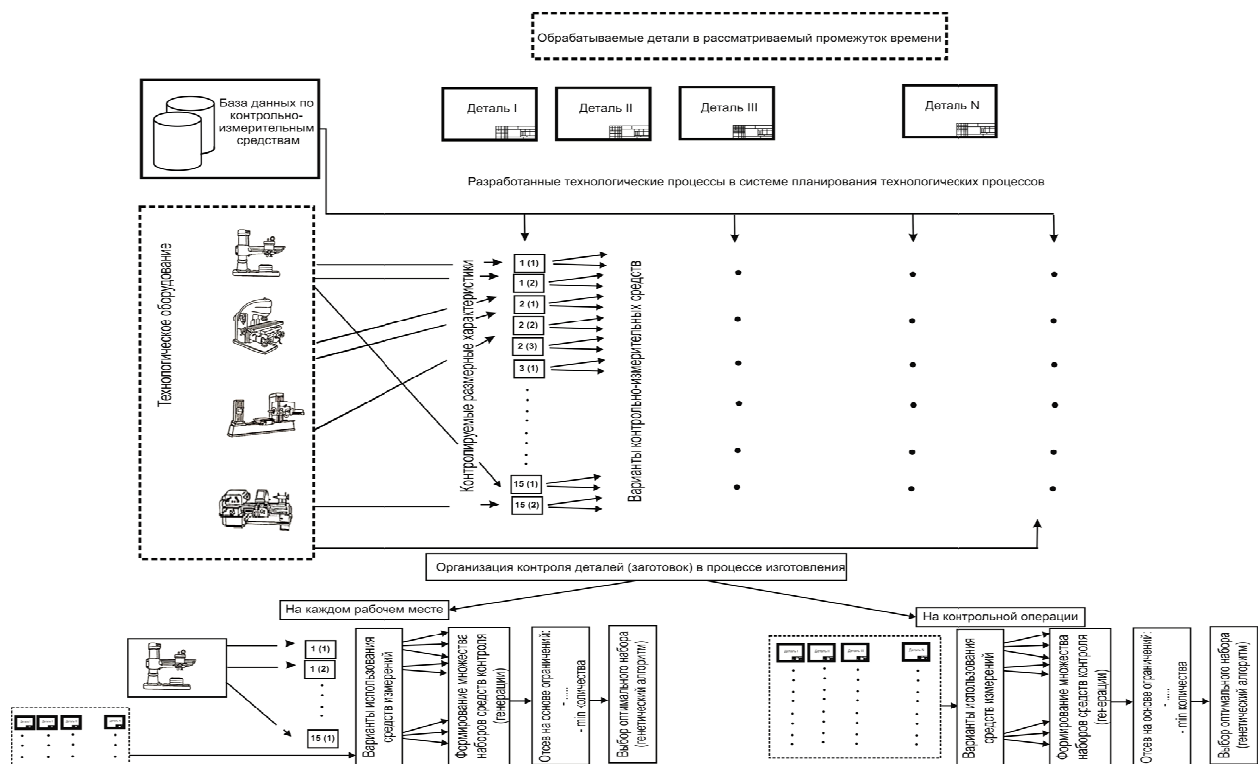


Схема выбора средства измерения

Экономию от уменьшения погрешности измерений при измерительном контроле размерных характеристик заготовок, а также выходном контроле качества продукции, предлагается получить за счет назначения целесообразного комплекта средств контроля на этапе проектирования на основе генерации возможных вариантов применения контрольно-измерительных средств для оценки заданных характеристик заготовок и обрабатываемых деталей в соответствии с технологическим процессом их производства.

Полученные по результатам контроля реальные размерные характеристики заготовки позволяют вносить корректировку допусков на размерные характеристики и получить их конкретные значения [2, 3]. Таким образом, полученные размерные параметры поверхностей обрабатываемой детали используются для формирования рабочей конструкторско-технологической документации и на основе, которой принимается решение об обоснованности изготовления данной детали в конкретной производственной системе. Принятые размерные данные служат для разработки технологии обработки и соответственно достижения требуемой точности изготовления в системе планирования многономенклатурных технологических процессов [4, 5] при наименьших затратах на процесс производства детали.

Таким образом, возрастающие требования к решению производственных задач с развитием наукоемких технологий, определяют необходимость принятия эффективных проектных решений в минимальные сроки с целью достижения требований качества. Добиться этого возможно за счет разработки современных технологических методов обработки, разработки подходов ко всем этапам и проектным процедурам технологической подготовки производства, отвечающих требованиям современного прибор- и машиностроительного производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решетникова Е. П. Классификация деталей со сложнопрофильными поверхностями в технологической подготовке механообрабатывающих производств / Е. П. Решетникова, П. Ю. Бочкарев // Журнал «Механика XXI века» №16.2017.- С.174-178.
2. Решетникова Е. П. Совершенствование разработки технологического процесса изготовления сложнопрофильных деталей в условиях механообрабатывающих производств / Е. П. Решетникова, П. Ю. Бочкарев // науч. сб.: Современные тенденции развития науки и технологий.-2016.-№ 7-1.-С.116-120.
3. Решетникова Е. П. Совершенствование контрольно – измерительных процедур сложнопрофильных поверхностей в технологической подготовке машиностроительных производств / Е. П. Решетникова, П. Ю. Бочкарев // сб. мат. науч.-техн. конф. «Инновации. Технологии. Производство», Рыбинск.-2015.-С.90-94.
4. Бочкарев П. Ю. Системное представление планирования технологических процессов механообработки [Текст] / П. Ю. Бочкарев // Технология машиностроения. - 2002. - N 1. - С. 10-14.
5. Митин С. Г. Автоматизация принятия конструкторских решений в соответствии с технологическими возможностями многономенклатурных производственных систем [Текст] / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии в машиностроении. - 2014. - № 11 (41). - С. 44-47.

УДК 621.798.34

**Ю. П. Сердобинцев, О. В. Мушкин, А. М. Макаров, М. П. Кухтик**

#### **УСЛОВИЯ ВЫБОРА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАСФАСОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

**Волгоградский государственный технический университет**

Рассмотрены условия выбора эксплуатационных режимов работы расфасовочного оборудования с учетом вероятности ее пребывания в той или иной фазе жизненного цикла. Для повышения износостойкости и надежности функционирования наиболее нагруженных подвижных узлов рычажно-шарнирного захватного устройства расфасовочной машины получен композитный материал с улучшенными технологическими и эксплуатационными характеристиками. Приведены результаты исследований плазменного покрытия из разработанного материала.

*Ключевые слова:* расфасовка, автоматизация, надежность, износостойкость, трение, смазка, гетерогенное покрытие, самовосстанавливающийся сплав.

Selection conditions of operating modes for increase of packaging equipment reliability at have been considered taking into account its being in one or another life cycle stage. Composite material with improved technological and operational characteristics has been obtained for improvement of the most loaded mobile nodes' wear resistance of packaging machine lever-hinged gripping device. Investigations' results of plasma coating of developed material have been adduced.

*Keywords:* packaging, automation, reliability, wear resistance, operating mode, tribocoupling, heterogeneous coating.

На сегодняшний день обеспечение максимально возможной работоспособности и надежности машин является первостепенной задачей при создании любой механической, в том числе мехатронной системы. Часто работоспособность технологической машины определяют триботехнические свойства наиболее нагруженных ее сопряжений, которые зависят от различных факторов: вида нагружения, среды в которой они эксплуатируется, динамических параметров. В работе рассмотрены условия выбора эксплуатационных режимов работы расфасовочного оборудования, позволяющих повысить его надежность.

Исследования проводились при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых - кандидатов наук МК-2619.2017.8.

### Материалы и методы исследования

Одним из методов обеспечения эффективности управления эксплуатационными свойствами (режимами) работы технологического оборудования на отдельных этапах его жизненного цикла является аппарат, основанный на построении оптимизационных матриц [1]. Для управления жизненным циклом машины в фазе эксплуатации оптимизационная матрица имеет вид, представленный в таблице.

**Матрица оптимизации эксплуатационных режимов**

$X_{1min}$	$X_{2min}$	$X_{imin}$	$Y_1$
$X_{1max}$	$X_{2min}$	$X_{imin}$	$Y_2$
$X_{1max}$	$X_{2max}$	$X_{imin}$	$Y_3$
$X_{1max}$	$X_{2max}$	$X_{imax}$	$Y_j$

В данном случае  $X_1, X_2, X_i$  – управляемые факторы или режимы эксплуатации (скорость относительного скольжения в узлах трения машин, нагрузки и т.д.),  $Y_1, Y_2, Y_3, Y_j$  – параметр оптимизации (износ поверхностей контакта, плавность относительных перемещений, контактная жесткость и сдвигоустойчивость для неподвижных соединений и т.д.).

Условием выбора оптимальной совокупности режимов эксплуатации, например, по износу, является:

$$Y_j = Z_j \cdot f(X_1, X_2, \dots, X_i) \rightarrow \min,$$

где  $Z_1, Z_2, \dots, Z_i$  – затраты на реализацию соответственно  $Y_1, Y_2, \dots, Y_i$  – совокупности внешних механических параметров.

При этом в фазе эксплуатации при расчете суммы затрат необходимо рассчитывать затраты на возможный ремонт узла вследствие внезапного отказа либо на проведение планово-предупредительного технического обслуживания.

Таким образом при решении проблемы управления эксплуатационными свойствами технологического оборудования необходим вероятностный подход, учитывающий состояние объекта в текущий момент времени, обусловленное соответствующей фазой его жизненного цикла [1].

Для определения вероятности пребывания трибосопряжения в той или иной ситуации при заданном ресурсе был предложен [1] критерий выбора наиболее эффективного технологического решения, направленного на обеспечение работоспособности механизма:

$$K_{ij} = \min \left| \sum_{k=1}^m Z_{ijk} \cdot H_{ijk} \cdot P_{ijk} \right|,$$

где  $K_{ij}$  – приведенный критерий, оценивающий эффективность  $j$ -го уровня  $i$ -ой технологии, примененной для обеспечения работоспособности;  $k$  – номер фазы (ситуации), возникающей с вероятностью  $P_{ijk}$ ;  $Z_{ijk}$  – затраты;  $H_{ijk}$  – износ.

Построена модель жизненного цикла технологической машины в виде графа переходов. Фаза эксплуатации жизненного цикла разбита на несколько составляющих (подфаз) и является центральным звеном модели, так как конечной целью проектировщиков, конструкторов и технологов является увеличение продолжительности именно этой фазы в общем балансе жизненного цикла.

С учетом модели жизненного цикла в виде графа переходов получена зависимость вероятности пребывания детали или узла в фазе эксплуатации:

$$P_{ij3,n} = \frac{\sum_{k=0}^n p_{3,n}(3, n-1) + p_{3,n}(5)}{1 + \sum_{k=0}^{T-1} p_k(k-1)},$$

где  $T=7$  – общее количество фаз (ситуаций): от проектирования изделия до его утилизации.

В качестве объекта исследования рассмотрим машину (техническую систему) для автоматической расфасовки сыпучих материалов [2]. При декомпозиции системы выделим отдельные узлы машины, которые ограничивают ее работоспособность и снижают надежность. Такими узлами являются узлы трибосопряжений. Система имеет недостаточно износостойкий поверхностный слой ответственного трибосопряжения, расположенного в рычажно-шарнирном захватном устройстве (РШЗУ) [3] данной машины, осуществляющим манипулирование гибким контейнером при расфасовке. Из структурно-параметрического анализа системы [4] и опыта эксплуатации наиболее нагруженными узлами являются шарнирные узлы, совершающие вращательное движение, и узлы, совершающие возвратно-вращательное движение, в которых из-за различных перекосов под нагрузкой при наполнении и транспортировке гибкого контейнера с сыпучим материалом увеличивается износ. Использование обильной смазки данного узла может привести при потере герметичности, к ее попаданию в расфасовываемый материал (например, пищевые продукты), что недопустимо. Поэтому требуется увеличить износостойкость поверхностного слоя шарнирного узла [5].

В настоящее время широкое распространение получило направление повышения износостойкости, которое имеет своей целью воздействие на поверхностный слой особо нагруженных деталей машин и механизмов. Это направление включает большое количество способов воздействия: наплавка, магнитная обработка, механическое упрочнение, термический способ, электрофизический, ионно-плазменное напыление и др.

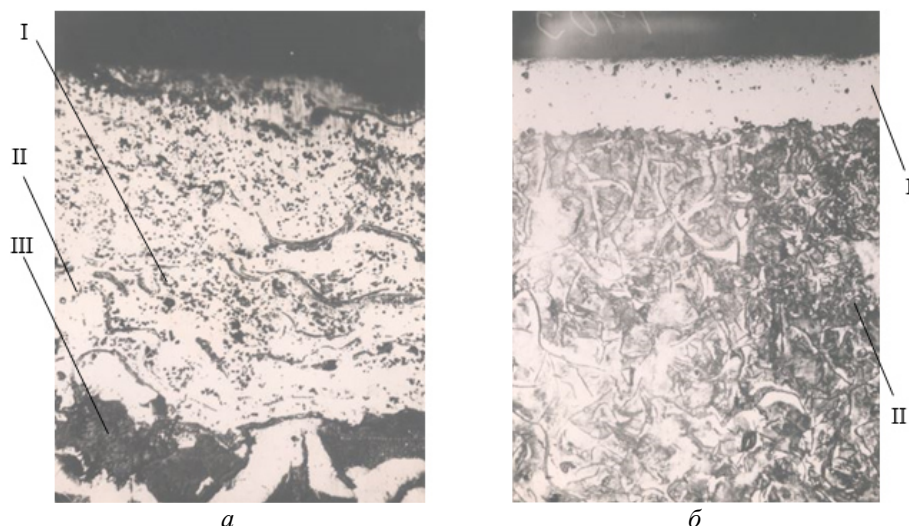
Для повышения износостойкости поверхностного слоя подшипникового узла предлагается использование износостойких порошковых композиционных материалов, наносимых на деталь методом газотермического покрытия. Традиционно используемые для повышения износостойкости самофлюсующиеся никелевые порошки содержат кроме никеля следующие ингредиенты: хром – 12-18%, бор – 2-4%, кремний – 2-4%, что экономически невыгодно для их применения при обычных температурах и вне коррозионных сред. В [5] было предложено для удешевления порошков никелевую основу частично заменить на железную. Основное внимание при разработке составов порошка уделялось получению композиционного состава материала для газопорошковой наплавки плотных бездефектных покрытий, обладающих свойствами самофлюсования без явлений хрупкости и окисляемости на границе с основным металлом.

#### Результаты и их обсуждение

Для разработанного механически легированного порошка системы Fe-Ni-Cr-B-Si-Cu-C-Zn [6] было проведено комплексное металлографическое, рентгеноструктурное, электронномикроскопическое исследование структуры покрытия и переходной зоны. На рис. а, приведена микрофотография самофлюсующегося сплава системы Fe-Ni-Cr-B-Si-Cu-C-Zn при 400-кратном увеличении, а на рис. б – микрофотография оплавленного газопламенного покрытия из порошка системы Fe-Ni-Cr-B-Si-Cu-C-Zn. Усадка покрытия составляет около 20% [5].

Благодаря значительному содержанию меди, никеля и цинка при оплавлении покрытия в матрице образуются металлографические объемы, заполненные легкоплавким твердым раствором Ni-Zn-Cu, выдавливаемым и размазываемым при трении по рабочим поверхностям и способствующим образованию сервовитной пленки, обеспечивающей высокие антифрикционные свойства при сухом и граничном трении.





а – микрофотография самофлюсующегося сплава системы Fe-Ni-Cr-B-Si-Cu-C-Zn:

а – микрофотография самофлюсующегося сплава системы Fe-Ni-Cr-B-Si-Cu-C-Zn (I-карбоборидная фаза, II-эвтектика, III-твердый раствор); б – микрофотография оплавленного газопламенного покрытия из порошка системы Fe-Ni-Cr-B-Si-Cu-C-Zn (I-упрочняющий слой, II-исходный металл)

Это позволяет продлить фазу эксплуатации жизненного цикла РШЗУ, что благоприятно сказывается на работоспособности и надежности функционирования всего расфасовочного оборудования. Результаты исследования могут быть использованы на различных этапах жизненного цикла расфасовочного оборудования от его проектирования до эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сердобинцев, Ю. П. Обеспечение эффективности управления эксплуатационными свойствами трибосопряжений технологического оборудования в процессе жизненного цикла: монография / Ю. П. Сердобинцев, О. В. Бурлаченко. – Волгоград, ВолгГТУ, 2005. – 353 с.
2. Пат. 2469928 РФ, МПК В 65 В 7/02, В 65 В 5/00. Устройство для автоматического раскрытия, удержания и закрытия мешков / А. М. Макаров, Л. А. Рабинович, Ю. П. Сердобинцев; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет; заявл. 31.05.2011; опубл. 20.12.2012.
3. П. м. 169411 Российская Федерация, МПК В 65 В 67/12. Устройство для автоматического захвата, раскрытия и удержания гибких контейнеров / А. М. Макаров, М. А. Лапиков, О. В. Мушкин, Ю. П. Сердобинцев; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет; заявл. 29.08.2016; опубл. 16.03.2017.
4. Структурно-функциональный анализ систем автоматического дозирования сыпучих материалов / О. В. Мушкин, А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, М. А. Лапиков // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2017. - № 5 (200). - С. 73-76.
5. Сердобинцев, Ю. П. Технологические методы обеспечения требуемых свойств поверхностного слоя сопряжений технологического оборудования: дис. д-ра техн. наук: 05.02.08 / Ю. П. Сердобинцев. – Москва, СТАНКИН, 1991. – 601 с.
6. А.С. 1750264 СССР. Самофлюсующийся порошок на основе никеля для газотермического нанесения покрытий / Ю. П. Сердобинцев и др., 1990.

УДК 621.822

**С. В. Сорокин**

#### **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ПОГРЕШНОСТИ УСТАНОВКИ ЗАГОТОВКИ В ПРИСПОСОБЛЕНИИ В СРЕДЕ CAD/CAM-СИСТЕМ**

**Брянский государственный технический университет**

[irb18@yandex.ru](mailto:irb18@yandex.ru)

В статье рассматриваются вопросы автоматизации расчета погрешности базирования заготовки в станочном приспособлении и конструирования установочных элементов при синтезе приспособлений с применением интегрированных САПР. Предлагаемая методика основана на применении метода интерактивной формализации исходной технологической информации в среде CAD/CAM-систем.

**Ключевые слова:** погрешность базирования, проектирование приспособлений, технологическая оснастка, CAD/CAM-системы.

In the article the questions of automation of calculation of an error of basing of the workpiece in the machine tool fixture design and installation of elements during the synthesis of devices using integrated CAD. The proposed technique is based on the interactive application of the method of formalization of the initial information in the process of CAD/CAM systems.

*Keywords:* error based, design fixtures, tooling, CAD/CAM system.

С самого основания машиностроения развитие производства неразрывно связано с техническим оснащением и модернизацией производственных мощностей путем применения последних достижений науки и техники. При переходе на новый вид продукции и, как следствие переподготовке производства, около 50% от всего объема технологического оснащения приходится на техническое переоснащение и модернизацию производства, включающего в себя процессы конструирования технологической оснастки, так как ее качество является одним из важнейших факторов, влияющих на качество выпускаемой продукции машиностроительного предприятия. Затраты на изготовление оснастки приближаются к затратам на производство металлорежущих станков. В связи с этим возникла проблема повышения эффективности и качества проектирования станочных приспособлений, а так же необходимость сокращения сроков ее проектирования и изготовления. В современном машиностроении эта задача стала одной из важнейших проблем.

Среди систем станочных приспособлений (универсально-безналадочных, универсально-наладочных, специализированных наладочных и безналадочных, универсально-сборных, сборно-разборных, неразборно-специальных) на особом месте стоят неразборные специальные приспособления (НСП), так как они обладают длительным циклом оснащения – проектирование, изготовление, сборка, внедрение, и как следствие, на них приходится большая часть затрат оснащения производства. НСП применяют для обработки одного вида продукции, т. е. детали и узлы этих приспособлений не предназначены для использования в конструкциях других приспособлений. Их используют в серийном и массовом производстве и работают до полного физического износа. Другие системы станочных приспособлений не подвергаются этапу проектирования.

В число наиболее значимых и трудоемких этапов проектирования станочных приспособлений входит выбор оптимальной схемы установки заготовки и ее конструктивной реализации [1], определяющий будущую конструкцию приспособления. В свою очередь он включает в себя:

- выбор схемы базирования и закрепления заготовки в приспособлении;
- расчет сил зажима;
- выбор конструкции, размеров материала и метода упрочняющей обработки установочных элементов (УЭ);
- расчет погрешности положения заготовки, включающей погрешность базирования, закрепления, размерного износа установочных элементов и др. составляющие;
- определение межремонтного периода.

Следовательно, от решений, принимаемых на этом этапе, зависят основные показатели качества приспособлений:

- точность положения заготовки;
- время установки и снятия заготовки;
- срок службы;
- стоимость будущего приспособления.

Вопрос обеспечения качества конструирования можно решить путем создания автоматизированной системы [2], которая позволит:

- снизить затраты материальных средств и времени на конструирование и изготовление;
- сократить цикл производства и значительно снизить себестоимость;
- улучшить качество конструирования приспособлений и получаемой технологической документации.

На данный момент на российском и зарубежном рынке систем автоматизированного проектирования (САПР) преобладают универсальные системы, предназначенные для проектирования изделий машиностроения любой сложности. Некоторые из них имеют специализированные модули для разработки технологической оснастки, но они включают в себя только проектирование форм для литья, штампов, пресс-форм, в то время как конструирование станочных приспособлений проводится по схеме конструирования обычного изделия. Такой подход не рационален, так как ста-

ночные приспособления это специализированные конструкции, к которым предъявляются специальные требования при проектировании. Следовательно, конструкторские модули САПР необходимо дополнять специализированными блоками разработки станочных приспособлений. При использовании интегрированных САПР разработка таких систем имеет особенно актуальное значение, так как мощные и функциональные конструкторские модули (CAD) стыкуются с отечественными модулями создания технологических процессов (CAM).

В связи с этим, данная работа, направленная на автоматизацию выбора оптимальной схемы базирования и ее конструктивной реализации, является актуальной для решения всего комплекса проблем автоматизации технологической подготовки производства.

Целью работы ставится автоматизация выбора оптимальной схемы установки заготовки в станочном приспособлении на основе интерактивного расчета погрешности базирования с использованием современных CAD систем. Достижение заявленной цели работы должно обеспечить решение следующих задач:

- проведение анализа существующих подходов к формализации исходной технологической информации при автоматизации конструирования станочных приспособлений;
- разработка информационного и программного обеспечения автоматизированного программного модуля, а также расчетных элементов управления выбора оптимальной схемы базирования с использованием современной CAD системы;
- разработка принципов формализации считывания технологической информации в рамках процесса автоматизации расчета погрешности базирования;
- разработка математической модели и алгоритмов автоматизации интерактивного расчета погрешности базирования при проектировании схемы установки.

При выполнении научных исследований и реализации поставленных задач были использованы методы системного подхода, объектно-ориентированного проектирования и анализа, для разработки математических моделей проектных процедур использовались основные положения технологии машиностроения.

Практической ценностью выполненной работы стали предложенная методика формализации технологической информации способом интерактивного считывания параметров чертежа для ускорения и, как следствие удешевления конструирования технологической оснастки и программный модуль, интегрированный в CAD систему, позволяющий расширить стандартные возможности для наиболее полной автоматизации конструирования оптимальной схемы установки заготовки.

В процессе проектирования станочных приспособлений (СП) разрабатывают нескольких вариантов конструкций приспособления, количество которых определяет выбранная технологом теоретическая схема базирования и геометрические особенности заготовки. Далее они сравниваются, и выбирается оптимальный вариант СП, наиболее отвечающий показателям качества: точности расположения заготовки в приспособлении, надежности, и технико-экономическим показателям (минимум затрат материальных средств на изготовление приспособления, и времени на установку и снятие заготовки).

Выполнение первого показателя можно оценить по следующему условию:

$$JT \geq E_y + \omega,$$

$$E_y = \sqrt{E_b^2 + E_{zo}^2} + E_{zi} + E_u + E_{yc} + E_c + \omega,$$

где  $JT$  – допуск на выполняемый размер, мм;  $E_y$  – погрешность установки заготовки в станочном приспособлении, мм;  $E_b$  – погрешность базирования, мм;  $E_{zo}$  – погрешность закрепления, мм;  $E_{zi}$  – погрешность, связанная с изменением формы поверхности контакта установочного элемента при его износе, мм;  $E_u$  – погрешность от прогрессирующего износа установочных элементов, мм;  $E_{yc}$  – погрешность, определяемая ошибками изготовления и сборки установочных элементов, мм;  $E_c$  – ошибка установки и фиксации приспособления на станке, мм;  $\omega$  – средняя точность метода обработки, мм.

Затраты материальных средств на изготовление приспособления и времени на установку и снятие заготовки определяется проведением экономических расчетов и нормированием. Однако их можно ориентировочно оценить при анализе схем установки заготовки для разных вариантов конструкции станочных приспособлений.

На рисунке изображена обобщенная схема, отражающая последовательность этапов проектирования станочных приспособлений. Из схемы видно, что все основные характеристики приспособлений, необходимые для обеспечения ими требуемой точности и надежности, можно определить еще при проектировании схемы установки заготовки в приспособлении, до полного завершения проектирования приспособления.

Точность положения заготовки, исходя из геометрических характеристик заготовки и УЭ, определяется погрешностью базирования. Расчет погрешности закрепления и размерного износа УЭ может выполняться без проведения расчета параметров механизма закрепления. Совокупность значений этих параметров приспособления позволяет провести отсев вариантов конструкций, не удовлетворяющих требуемой точности положения заготовки в СП.

Определенные ранее погрешности дают возможность определения межремонтного периода и выбора конструкций приспособлений, удовлетворяющих условию надежности. Окончательный выбор конструкции приспособления можно выполнять по условиям стоимости и времени вспомогательного времени.

Для выбора оптимальной схемы установки заготовки, определяющей требуемое качество проектируемого приспособления, необходимо выполнить следующие этапы проектирования:

- сформировать список возможных схем установки заготовки в станочном приспособлении;
- определить погрешность базирования;
- выбрать расположение установочных элементов и схему закрепления (точки приложения и направление сил закрепления);
- определить величину сил закрепления;
- выбрать геометрические и физико-механические характеристики установочных элементов;
- определить погрешность закрепления и погрешность, связанную с размерным износом установочных элементов;
- отсеять схемы установки, которые не удовлетворяют условию точности положения заготовки в станочном приспособлении.



Схема алгоритма проектирования станочных приспособлений

Многие из этапов проектирования технологической оснастки требуют проведения соответствующих расчетов, причем для нескольких вариантов схемы установки. Это требует значительных затрат времени на проектирование и увеличивает вероятность ошибок напрямую влияющих на точность выполнения технологических операций и обеспечение приспособлением заданного межремонтного периода. Поэтому создание автоматизированной системы, ориентированной на решение этого круга задач, позволит устранить подобные недостатки проектирования и значительно повысит качество проектных решений.

При выполнении работы были получены следующие результаты:

- разработан программный модуль, интегрированный в среду CAD системы, и расширяющий ее возможности для более комплексной автоматизации выбора оптимальной схемы установки заготовки в станочном приспособлении;
- при анализе практической реализации разработанного программного модуля выяснено, что полученные результаты расчетов и конструкторские решения обеспечивают качество проектируемой схемы установки; проведенная оценка экономической эффективности внедрения системы показала положительные результаты при условии, что предприятие уже обладает CAD системой трехмерного твердотельного моделирования;
- в результате программной реализации были созданы логическая и динамическая модели работы системы; сформирована структура программного модуля в виде схемы, отражающей основные блоки системы их взаимосвязи;
- разработана математическая модель автоматизации процесса выбора оптимальной схемы установки заготовки в станочном приспособлении с использованием современных CAD технологий; с использованием методов системного анализа общая задача автоматизации была разбита на отдельные иерархически связанные задачи, выявлены информационные взаимосвязи между ними и CAD системой, при этом был сформирован и описан алгоритм расчета погрешности базирования заготовки в станочном приспособлении для каждого выполняемого на операции технологического размера.

В промышленности с технологической подготовкой производства непосредственно связаны: освоение выпуска новых изделий, повышение технического уровня и качества продукции, улучшение всех технико-экономических показателей работы предприятий. Первостепенное значение при этом приобретает максимальное уменьшение длительности циклов подготовки производства. Сокращение сроков, отводимых на ТПП, трудоемкость и многовариантность технологического проектирования, необходимость оптимизации проектных решений, требует коренных изменений методов проектирования, всестороннего использования вычислительной техники. Наибольший эффект от применения ЭВМ в технологии достигается при комплексном решении технологических задач. На сегодняшний день проблема автоматизации ТПП решается путем применения интегрированных САПР – CAD/CAM/CAE-систем. В ближайшее время именно этот подход будет преобладающим вследствие своей высокой эффективности. В связи с вышесказанным актуальной является задача интеграции автоматизированной системы конструирования элементов схемы установки заготовки при синтезе станочных приспособлений в состав CAD/CAM/CAE-систем. Перспективность данной системы заключается в интерактивном автоматическом считывании входных параметров со сборочных чертежей и детализовок, из технических условий и требований. Выходная информация может передаваться в САМ-модуль (условия обработки), а на бумажные носители выводятся маршрутно-операционные карты обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Польский, Е.А. Модель комплексного анализа размерных связей для обеспечения точности сборочных соединений / Е.А. Польский, Д.М. Филькин // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». ОрелГТУ, Орел. 2009. №5/277 (576). С. 59-66.
2. Сорокин, С.В. Автоматизация расчета погрешности базирования в среде интегрированных САПР // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 8-9 апреля 2015г.) / под ред. В.К. Шелег. – Минск: Бизнесофсет, 2015. – 196 с. С. 159-161.

УДК 658.55:621

*В. А. Шабайкович***МАЛОЗАТРАТНОЕ ИЗГОТОВЛЕНИЕ КАЧЕСТВЕННОЙ  
И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОЙ ПРОДУКЦИИ****Луцкий национальный технический университет, г. Луцк, Украина**

vik\_shabajkin@ukr.net

Целью работы является повышение эффективности малозатратного производства, а методом – положения исследования качества и конкурентности производимой продукции. Освещено такое обеспечение за счет мониторинга и управления затратами, а также использование предпринимательства как наиболее отвечающего малозатратному производству.

*Ключевые слова:* малозатратное производство, качество, конкурентность, управление, затраты, предпринимательство.

The aim of this work is to increase the efficiency of low-cost production, and method - state study of the quality and competitiveness of products. Lit of such security by monitoring and controlling costs, and using entrepreneurship as the most responsible low-cost production.

*Keywords:* low-cost production, quality, competitiveness, management, cost, entrepreneurships.

Современное производство - это место рождения качественной и конкурентной малозатратной продукции, обеспеченное необходимыми ресурсами и эффективной организацией. Качество – это душа продукции, которая рождается при ее разработке, зависит от составляющих элементов, способов разработки и изготовления, формируется при получении и сохраняется при использовании. В современных условиях рыночной экономики и глобализации главными проблемами являются качество, конкурентоспособность продукции и эффективное производство, где она изготавливается. Повышение эффективности современного производства невозможно без знания его сущности и особенностей. Поэтому без их изучения мероприятия по улучшению производства и экономики в целом будут напрасными [1].

Выпуск качественной и конкурентоспособной продукции включает широкий круг проблем от проектирования продукции, выбора необходимых дешевых, но качественных материалов и сырья, необходимой дешевой энергии, технологии изготовления продукции, до создания нужной материально-технической базы производства, обеспечения минимальных затрат изготовления и достаточной квалификации производственного и руководящего персонала, организации производственных процессов, поставки и сбыта продукции.

Объективная необходимость повышения уровня отечественного производства заключается в его удешевлении при обеспечении качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Эта проблема на производстве решается в тесной взаимосвязи с другими общими функциями предприятия, такими как маркетинг, инженерное сопровождение, квалификация персонала и т.п. Проблема по своей сущности в первую очередь является технически-организационной и финансовой, которая должна решаться инженерными методами. Четко определяется схема рациональных решений проблем основ современного производства - применение экономного предпринимательства, эффективного производства продукции при различных условиях выпуска, организации, технологических процессов изготовления, инноваций и инвестиций, внедрения отечественного опыта предприятий ВПК, международного опыта и многих других.

Большое влияние на эффективность производства оказывает налоговая система, которая сейчас загоняет производство в теневую сферу (по данным СМИ более 50%), а также непродуманное и даже бездарное законодательное сопровождение производственной деятельности, направленное на быстрое обогащение олигархов. Это подтверждает многолетняя статистика и увеличение миллионеров и миллиардеров во всех структурах общества, но особенно в правительстве и разных высокопоставленных руководителей, о чем красноречиво говорят их декларации. При этом все хорошо знают, что, их суммы доходов не покрываются официально задекларированными. Так и просится принятие закона об обосновании законности полученных доходов.

При реорганизации производства на первое место должно выдвигаться внедрение бережливого производства (Lean Production), которое обеспечивает изготовление качественной и конкурентоспособной продукции при минимальных затратах. Сегодня бережливое производство широко применяется на Западе и Востоке, а в Украине и России – используется только отдельными компаниями, что свидетельствует о безразличии к нововведениям и непонимании его сущности.

Не следует забывать, что проблема затратности и обеспечения высокого качества и конкурентоспособности продукции решается в тесной связи с другими функциями предприятия. Такая интеграция предполагает постоянное сопровождение производства инжинирингом и экономингом, что приведет к повышению эффективности производства и обеспечит рост производительности труда и подъем экономики страны.

Качество продукции должно быть оптимальным, соответствующим высоким показателям и минимальным затратам. Управление качеством продукции должно осуществляться одноступенчато, т.е. проводить технологическое обеспечение непосредственно эксплуатационных свойств, которые определяют показатели качества. При этом технологические факторы являются производными от конструкционных и охватывают изготовление продукции. В основе управления качеством продукции лежат нормативные документы. Потребителю нужно качество, а не его сертификат или аккредитация и море бумажек. В целом, качество – это в первую очередь светлая голова инженера и золотые руки рабочего, а не руководство, системы, сертификации, инструкции и т.п. Должны также использоваться зарубежные системы TQM, TQ, TPM, JIT, KANBAN, KAIZER и другие. Известен опыт зарубежных стран Японии, США, Китая, Европы.

Стратегия производства качественной продукции заключается в долгосрочных мерах при ее изготовлении, а тактика – в методах, способах, средствах и формах достижения долгосрочных целей. Экономика качества продукции состоит в определении необходимых затрат по всей цепочке формирования качества. В затраты на обеспечение качество продукции, которые составляют 5-25 % от ее стоимости, входят: проведение маркетинга, обеспечение качества при разработке, изготовлении и других мероприятиях. Для их уменьшения проводится анализ технической, организационной и экономической целесообразности применения выбранных средств разработки и изготовления продукции.

Проблема качеств и конкурентоспособности не является экономической проблемой, как многие ошибочно считают, а инженерно-технической, решаемой своими методами. Качество и конкурентоспособность продукции закладываются инженерами в продукцию, а экономисты могут это только фиксировать, т.е. оценивать [2].

Концепция конкурентоспособности продукции предполагает быстрое изготовление на эффективном оборудовании качественной продукции по запросам рынка с малыми затратами, обоснованной цене и недорогим использованием (эксплуатацией). Или короче, то это: скорее, качественнее, дешевле и дольше. В область управления должна входить вся цепочка жизненного цикла продукции. Концепция управления конкурентоспособностью включает формирование цели и стратегии, методов управления, организации технической поддержки. Основу концепции составляют программно-целевые комплексные блоки, отражающие мероприятия по осуществлению такого управления.

Формирование конкурентоспособности должно начинаться с проведения маркетинга, разработки современной малозатратной продукции, технической подготовки производства, сервиса. Известен целый набор зарубежных различных мероприятий повышения конкурентоспособности продукции, которые следует широко применять. Методами повышения конкурентоспособности продукции являются: виртуальная разработка продукции, использование нанотехнологий, инновационных решений, компьютеризации, информатики, информационно-коммуникационных технологий, технической и экономической обоснованности принимаемых решений.

Большое значение будет иметь комплексная система управления конкурентоспособностью продукции. Все ее элементы в отдельности известны, но их совместное использование как системы – нет. Структура этой системы предусматривает взаимосвязь и совместную работу четырех подсистем: управления качеством продукции, сопровождающими затратами, ценообразованием, продажей и эксплуатацией. Стержнем системы является менеджмент качества, затрат, прибыли и цены. При этом большое значение имеет логистическое обеспечение конкурентоспособности, позволяющее значительно повысить конкурентоспособность продукции за счет взаимосвязи и со-

вместного рассмотрения проходящих при этом финансовых, материальных, энергетических и других потоков.

Таким образом, для конкурентоспособности продукции необходимо на предприятиях разработать широкий круг мероприятий (качественные конструкции изделий, технологии изготовления, оборудование, организация, квалификация). При этом большое значение имеет инновационный подход к решению всех вопросов. Одновременно обязательно следует изменить отрицательное действие факторов со стороны государства (законы, налоги и т.п.).

Изготовление качественной и конкурентоспособной продукции сопровождается затратами, которые должны быть оптимальными, допускающими увеличение некоторых расходов при уменьшении общих. При их установлении используется комплексный анализ организационной и экономической целесообразности. Используются также различные системы управления затратами. Но в основе существенного уменьшения затрат лежат не системы управления затратами, а малозатратная продукция и высокоэффективная технология ее изготовления с высокоэффективным оборудованием и оснащением. Системы управления затратами могут их уменьшить, но в пределах минимума необходимых затрат конкретной продукции и технологии. Если продукция и технология старые и затратные, то уменьшить затраты ее изготовления просто невозможно. К современным системам управления затратами производства продукции относятся системы: анализа и управления затратами и себестоимостью продукции, безубыточности CVP производства, управления по видам деятельности ABC, управления затратами standart-costing, direct-costing, FMEA-анализ затрат, метод анализа затрат бенчмаркинг, система целевой калькуляции затрат Target Costing, финансовый анализ и другие, успешно применяемые в зарубежной практике. Экономичность изготовления конкурентоспособной продукции в первую очередь зависит от состояния экономики страны и поэтому считается, что выпуск такой продукции обеспечивается только в высокоразвитых странах.

Известно, что цену продукции должен устанавливать рынок с учетом затратности, но ее увеличение и часто необоснованное, влияет на конкурентоспособность продукции. Доказательств необоснованности цен достаточно много. Из этого можно сделать вывод, что такая продукция на зарубежном и отечественном рынках будет неконкурентной, а ценообразование сейчас подчиняется другим законам, а именно - получению наибольших прибылей. И с этим никто не может справиться, даже антимонопольный комитет. Для обоснованности цены продукции и борьбы со сверхприбылями необходимы также законодательные ограничения величины прибыли по сравнению с затратами. Это же относится и к активной борьбе с коррупцией и прочими мелкими и крупными, особенно уголовными нарушениями. Сейчас, пожалуй, выход один – ужесточение борьбы и в первую очередь однозначное лишение лицензий занятием таким производством и торговлей некачественной продукцией.

Разработана методика восстановления и регулирования обоснованных цен продукции. Сущность ее состоит в рассмотрении всей цепочки возникновения продукции от материалов, сырья, энергии, технологической и полной себестоимости как основы цены, до законодательного регламентирования накладных расходов, зарплаты, различных затрат, налогов и прибыли. Только на такой базе возможно установление отпускной цены изделий, процессов и услуг. При этом обязательным будет устранение промежуточных звеньев продвижения продукции, увеличивающих ее цену в разы.

Успешно решает проблему малозатратного производства предпринимательство, которое является одной из лучших форм производственной деятельности, базируется на экономическом творчестве, в которое заложена новая коммерчески творческая инициатива, новый метод и способ хозяйствования, самостоятельность и стратегическое видение. Предпринимательство возникло достаточно давно, начиная от антрепренерства (посредничества) и до интрапренерства. На данном этапе предпринимательство многоаспектное и рассматривается на нескольких уровнях.

Предпринимательство является особым типом хозяйствования, где главным субъектом является предприниматель, который рационально сочетает факторы производства на инновационной основе и собственную ответственность, организует и руководит производством с целью получения прибыли, т.е. это особый тип хозяйственника со своими новаторскими способностями, а успех построен на инновационной деятельности. Успешное проведение предпринимательства возможно лишь при условии твердого знания его основ, хотя сейчас наблюдается положительная ментальная ориентированность на предпринимательство. Однако одного желания мало, необходима соответ-



ствующая квалификация. Знание динамичности процессов, проходящих в предпринимательстве, является необходимым условием его успешности. Поэтому предпринимательство обязательно должно рассматриваться как процесс, успешность проведения которого зависит не только от желания им заняться, но и проведения анализа среды, обоснованности выбранного объекта предпринимательства, наличия необходимой материально-технической базы, квалификации управленческого и рабочего персонала, действующего законодательства. Для предпринимательства основным условием является самостоятельность, независимость субъектов хозяйствования, экономическая заинтересованность и ответственность за принятие, и выполнение производственных решений. Базовыми элементами предпринимательства считается инициативная творческая работа персонала, частный и открытый ее характер. К основным препятствиям занятия предпринимательством можно отнести нелепые законы, коррупцию, произвол, лживость, плохую среду, рэкет, клановость, преступность и т.п.

Предпринимательству уделяется внимание не только как производству на самостоятельной и независимой основе, но и его внутреннему характеру или интрапренерству. Это связано с переходом производственных структур на предпринимательскую форму организации производства. Причиной появления интрапренерства стало использование новых конструкций и технологий.

#### Заключение

Современное производство должно быть малозатратным, обеспечивающим выпуска качественной и конкурентоспособной продукции. Для этого вначале анализируется продукция на предмет ее подготовленности к такому производству. Далее решаются вопросы обеспечения производства современными технологиями, оборудованием, а также кадрами. Важным является постоянный мониторинг затрат и качества и использование предпринимательства как наиболее отвечающему малозатратному производству.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шабайкович В.А.* Современное производство продукции. – Львов, изд-во ЛИМ, 2014. - 330 с.
2. *Машиностроение. Энциклопедия в 40 т. Стандарты и сертификация в машиностроении. Том 1-5, - М.: Машиностроение, 2002. - 672 с.*

---

Выпускающий редактор  
**Н. Н. Кваша**

Компьютерная верстка:  
**Е. В. Макарова**

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61113 от 19 марта 2015 г.  
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

---

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.  
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)  
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00  
**E-mail:** president@vstu.ru

---

План выпуска заказных изданий 2017 г. Поз. № 17з. Подписано в печать 11.09.2017 г. Формат 60 × 84 1/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,21. Уч.-изд. л. 16,55.

Тираж 170 экз. Свободная цена. Заказ №  
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолгГТУ  
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.  
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ  
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.