

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ИЗВЕСТИЯ

ВОЛГОГРАДСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

Серия  
ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ

Выпуск 10

---

---

№ 20 (123)

Межвузовский сборник научных статей  
Издается с января 2004 г.

2013

---

---



Волгоград  
2013

Учредитель: ГОУ высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный технический университет»

Сборник зарегистрирован в Управлении регистрации и лицензионной работы в сфере массовых коммуникаций федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ № ФС77–25660 от 13 сентября 2006 г.

Главный редактор сборника «Известия ВолГТУ»

академик РАН *И. А. Новаков*

Редакционная коллегия серии: д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТМС *Ю. Н. Полянчиков* (научный редактор), г. Волгоград E-mail: techmash@vstu.ru  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. АПП *Ю. П. Сердобинцев* (зам. научного редактора), г. Волгоград E-mail: app@vstu.ru  
д-р техн. наук, проф. РГАТА *В. Ф. Безъязычный*, г. Рыбинск  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. СиСИТ МГТУ «СТАНКИН» *А. Г. Схиртладзе*, г. Москва  
д-р техн. наук, проф. каф. ТМС МГТУ им. Н. Э. Баумана *А. В. Мухин*, г. Москва  
д-р техн. наук, проф., первый проректор, зав. каф. ТМС ЛМЗ-ВТУЗ *Ю. М. Зубарев*, г. Санкт-Петербург  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. ТМС СГТУ *А. В. Королев*, г. Саратов  
д-р техн. наук, проф., ректор ВГИСИ, филиал ВолГАСУ, *В. М. Шумячер*, г. Волжский  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. СИ *Ю. И. Сидякин*, г. Волгоград  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. НГ и КГ *Г. В. Ханов*, г. Волгоград  
д-р техн. наук, проф., руководитель ИЛ ВолГТУ *Е. И. Тескер*, г. Волгоград  
д-р техн. наук, проф., проректор МГУПП *М. М. Благовещенская*, г. Москва  
д-р техн. наук, проф., первый проректор СевНТУ *Е. В. Пашков*, г. Севастополь, Украина  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. АБТС МГУПБ *В. И. Попов*, г. Москва  
д-р техн. наук, проф., зав. каф. АПП КТУ *С. П. Сердобинцев*, г. Калининград  
д-р техн. наук, проф. каф. АПП *А. Л. Плотников*, Волгоград  
канд. техн. наук, доц. каф. ТМС *Д. В. Крайнев* (ответственный секретарь), г. Волгоград

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Известия** Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 20 (123) / ВолГТУ. – Волгоград, 2013. – 124 с. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 10).

ISBN 978-5-9948-1334-8

Рассматриваются вопросы, связанные с природой и закономерностями работы режущих инструментов, формированием качественных характеристик поверхностного слоя обработанных деталей, систем автоматизации производственных процессов.

В статье отражаются вопросы, связанные с разработкой и применением прогрессивной оснастки и инструментов, а также систем автоматического управления и контроля.

Ил. 93. Табл. 17. Библиогр. : 219 назв.

ISBN 978-5-9948-1334-8

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### Часть 1. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

<i>Агапов С. И., Федянова Н. А., Абакумова С. Ю., Ширяев Н. В.</i> Шероховатость поверхности при ультразвуковом резании с позиций упругопластического контакта.....	5
<i>Антонов А. С., Криворучко Д. В., Банников А. И.</i> Имитационная модель стружкообразования при резании горячего металла методом конечных элементов.....	7
<i>Банников А. И., Бородкина А. М., Антонов А. С.</i> Исследование износа и подбор смазки в паре трения пластина–конус экспандера.....	9
<i>Бондарев А. А., Солодков В. А., Отений Я. Н.</i> Разработка математической модели формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием конструкционных углеродистых сталей.....	12
<i>Голованов В. К., Нестеренко П. С.</i> Устройство автоматического управления процессом токарной обработки....	15
<i>Егоров Н. И., Небыков И. А., Терпак П. И., Моисеева Д. В.</i> Расчет параметров процесса обкатки вибрирующим роликом впадины резьбы.....	18
<i>Зотов А. В., Драчев О. И., Семенченко Н. В.</i> Анализ напряженного деформированного состояния проволочных элементов гибкого инструмента.....	21
<i>Зуев В. А., Грамузов Е. М., Семенов Д. А.</i> Новые возможности модельных исследований ходкости ледоколов.....	23
<i>Корпелянский О. Ф., Агапов С. И., Травов А. Б.</i> Влияние введения ультразвуковых колебаний в зону переточки осевого режущего инструмента на радиус закругления режущей кромки.....	26
<i>Кравцов А. Н.</i> Обеспечение эксплуатационных характеристик поверхностей деталей с применением многоуровневой стандартизации.....	29
<i>Курсин О. А., Егоров Н. И., Кожемякин И. Ф., Филатов И. С., Полянчикова М. Ю., Као С. Ч.</i> Влияние присутствия водорода в поверхностном слое заготовки на микрогеометрию поверхности при финишной абразивной обработке.....	33
<i>Курченко А. И., Кормилицин С. И., Плотников А. Л.</i> Влияние процесса циклического стружкообразования при точении труднообрабатываемых материалов на износ инструмента.....	36
<i>Липатов А. А.</i> Особенности диффузионного изнашивания вольфрамокобальтового твердого сплава при точении высоколегированной аустенитной стали.....	39
<i>Носенко В. А., Белухин Р. А., Довгаль А. Н., Бондарчук Т. П.</i> Влияние твердости и структуры круга на показатели процесса шлифования жаропрочного сплава.....	42
<i>Носенко В. А., Федотов Е. В., Морозова Л. К.</i> Методика расчета распределения вершин зерен на рабочей поверхности шлифовального круга по профилограммам шероховатости обработанной поверхности.....	45
<i>Носенко С. В., Носенко В. А., Байрамов А. А.</i> Шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании титанового сплава на встречной и попутной подачах стола с постоянной правкой круга.....	47
<i>Переладов А. Б., Камкин И. П.</i> Вероятностная компьютерная модель рабочего слоя шлифовального круга.....	49
<i>Переладов А. Б., Камкин И. П., Кожевников И. В., Анохин А. В.</i> Стохастическая модель структуры абразивного инструмента.....	52
<i>Полянчикова М. Ю., Полянчиков Ю. Н.</i> Работоспособность металлокерамических пластин, полученных ударным прессованием.....	56
<i>Сенякина А. С., Макарова О. А.</i> Анализ влияния неметаллических включений на стойкость оправок прошивного стана.....	58

<i>Сенякина А. С., Макарова О. А.</i> Исследование микротвердости оправки прошивного стана и ее влияние на износостойкость.....	60
<i>Солодков В. А.</i> Влияние условий пластического деформирования на характеристики прерывистого резания.....	62
<i>Солодков В. А.</i> Особенности процессов пластического деформирования в зоне стружкообразования при врезании.....	65
<i>Трунин А. В., Сидякин Ю. И., Абакумова С. Ю., Маклецов В. Л.</i> Оценка интенсивности остаточных напряжений в валах при ППД.....	67
<i>Ханов Г. В., Тодоров А. Н., Дятлов М. Н.</i> Автоматизация проектирования несущих конструкций специальных машин на начальном этапе проектирования.....	71
<i>Ханов Г. В., Дятлов М. Н., Сазонова С. В., Федотов М. Ю.</i> Повышение функциональных возможностей и энергоэффективности портативного устройства для производства топливных брикетов из органического мусора.....	74
<i>Чигиринский Ю. Л., Полянчиков Ю. Н.</i> Формализованное проектирование планов механической обработки.....	76
<i>Схиртладзе А. Г., Полянчиков Ю. Н.</i> Определение надежности автоматизированной системы управления технологическими процессами ремонтного производства.....	80
<i>Схиртладзе А. Г., Полянчиков Ю. Н.</i> Моделирование изменения затрат при изготовлении машин.....	83
<i>Схиртладзе А. Г., Скрябин В. А., Жук А. П.</i> Определение влияния процесса глубинного шлифования элочного профиля хвостовика лопаток турбокомпрессора дизеля на качественные показатели поверхностного слоя.....	88
<b>Часть 2. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ</b>	
<i>Барабанов Г. П., Барабанов В. Г., Иванюк А. К.</i> Автоматизация контроля герметичности по манометрическому методу способом сравнения с непрерывной подачей давления.....	93
<i>Гданский Н. И., Карпов А. В.</i> Использование прогнозирующих моделей приведенной нагрузки для управления системами с двумя степенями свободы.....	96
<i>Гданский Н. И., Карпов А. В.</i> Расчет кинематических характеристик отдельных движителей транспортного средства с независимым приводом колес.....	99
<i>Деулин Б. И.</i> Влияние изменения площади поперечного сечения лазерного луча на его интенсивность.....	102
<i>Деулин Б. И., Карпович Э. В.</i> Твердотельный лазер на органических красителях с эпоксиполимерной матрицей-радиатором.....	103
<i>Карпович Э. В.</i> Автоматизированный расчет тепломассообмена в пористых структурах.....	106
<i>Кесоян А. Г., Кремлева Н. Г.</i> Влияние производственных погрешностей на собираемость прецизионных соединений.....	108
<i>Корзин В. В., Гольцов А. С., Горюнов В. А., Казакова Л. Г.</i> Результаты экспериментальных исследований струйно-электронной системы измерения температуры газовых потоков.....	111
<i>Корзин В. В., Гольцов А. С., Горюнов В. А., Рязанов А. Н.</i> Экспериментальная установка для исследования элементов струйных систем контроля.....	113
<i>Макаров А. М., Сердобинцев Ю. П., Сергеев А. С.</i> Исследование устройства для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом.....	114
<i>Поступаева С. Г., Грязнов И. Е.</i> Работа САУ, основанных на традиционных и нетрадиционных методах настройки регулятора.....	117
<i>Пушкарев В. В., Дроботов А. В.</i> Компоновка устройств для объемной печати экструдиремым расплавом деталей сложной формы.....	121

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.079:621.892

С. И. Агапов, Н. А. Федянова\*, С. Ю. Абакумова, Н. В. Ширяев, А. Б. Травов  
**ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ РЕЗАНИИ  
 С ПОЗИЦИЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА**

Волгоградский государственный технический университет  
 \*Волгоградский институт бизнеса

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

На основе математической модели упругопластического контакта тел с первоначальным касанием по линии предложена методика оценки шероховатости рабочих поверхностей мелкомодульных зубчатых колес, нарезанных с использованием энергии ультразвуковых колебаний. Рассчитанные по этой методике значения параметра шероховатости Ra вполне удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

*Ключевые слова:* шероховатость поверхности, упругопластическая деформация, зубчатое колесо, зубонарезание, стружкообразование.

An offered method of evaluation of surface roughness of small-moduled gears produced using ultrasonic vibrations is based on mathematical model of elastically plastic contact of physical agents with initial contact through the line. Roughness values (Ra) calculated with this method are quite consistent with experimental results.

*Keywords:* surface roughness, elastic-plastic deformation, gear, gear cutting, chip formation.

Процесс окончательного формирования рабочих поверхностей зубчатых колес с использованием ультразвуковых колебаний можно рассматривать с точки зрения упругостатического контакта при поверхностно-пластическом упрочнении. Рассмотрим процесс ультразвукового резания как нагружение рабочей поверхности зубчатого колеса цилиндром радиуса «г». Схема обработки представлена на рисунке.

Рассмотрим схему контакта упругого цилиндра с поверхностью заготовки, материал которой в общем случае деформируется в упругопластический. Начальное касание происходит по линии. С ростом нагрузки Р материал заготовки испытывает вначале чистую упругую, а затем упругопластическую контактную деформацию. После снятия нагрузки происходит упругое восстановление в контакте, в результате чего величина смещения поверхности заготовки вдоль линии действия силы уменьшается на величину W<sub>в</sub>. При этом рабочая поверхность цилиндра возвращается в исходное положение, т. е. становится цилиндрической с радиусом R<sub>вост.</sub>

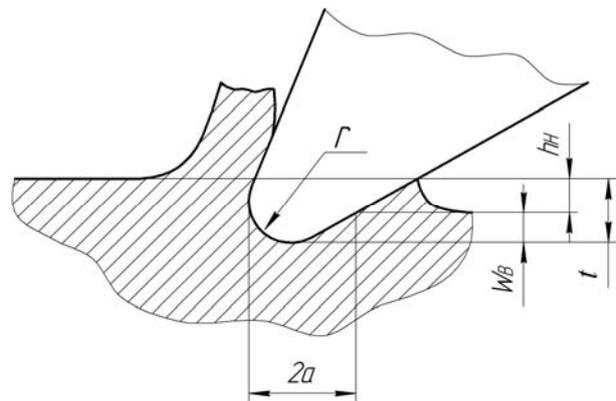


Схема процесса ультразвукового резания как нагружение рабочей поверхности зубчатого колеса цилиндром радиуса «г»: г – радиус сферы (в нашем случае это радиус режущей кромки инструмента), мм; 2а – диаметр остаточного отпечатка, мм; W<sub>в</sub> – упругое сжатие сферы под нагрузкой, мм; h<sub>н</sub> – глубина остаточного отпечатка, мм; t – полная глубина отпечатка под нагрузкой, мм.

При статическом сжатии ширина следа 2а связана с распределенной нагрузкой зависимостью

$$2a = \frac{3q}{20HД} + 0,05 \cdot r,$$

или

$$a = \frac{3q}{40HД} + 0,025 \cdot r, \quad (1)$$

$$\text{где } q = \frac{P}{B}, \text{ Н/мм} \quad (2)$$

$q$  – распределенная нагрузка, Н/мм;  $P$  – сила резания, Н;  $B$  – длина контакта, мм.

$$B = L_{\text{вх.кр.}} + L_{\text{вер.кр.}} + L_{\text{вых.кр.}} \approx (2,8 \div 3,0)m, \quad (3)$$

где  $L_{\text{вх.кр.}}$ ,  $L_{\text{вер.кр.}}$ ,  $L_{\text{вых.кр.}}$  – длины входной, вершинной и выходной кромок, мм;  $m$  – модуль нарезаемого зубчатого колеса, мм;  $НД$  – твердость обрабатываемой заготовки.

Согласно исследованиям [1]:

$$h = \frac{4a^2}{8r} - \frac{\alpha_y}{2} \quad \text{или} \quad h = \frac{a^2}{2r} - W_C, \quad (4)$$

где  $\alpha_y$  – упругое сближение заготовки и инструмента,

Если материалы контактирующих тел изготовлены из стали, то упругое сближение контактирующих тел определяется зависимостью:

$$W_C = 0,6 \cdot 10^{-5} \cdot q \quad (5)$$

Определим значения  $h$  и  $\alpha_y$  для различных модулей. По данным Н. А. Харламова [2] сила резания при нарезании зубчатых колес с  $m=0,5$ -1 мм составляет 275 и 400 Н соответственно.

Подставляя данные значения получим:

$$q = 186-196 \text{ Н/м для } m = 0,5 \text{ мм}$$

$$\text{и } q = 133-143 \text{ Н/м для } m = 1,0 \text{ мм.}$$

Из расчетов видно, что с уменьшением модуля распределения нагрузки возрастает.

По условиям обработки для получения качественных зубчатых колес ранее было принято  $r \leq 0,1$  для  $m \leq 0,5$  мм и  $0,1 \leq r \leq 0,2$ , при  $0,5 \leq m \leq 1$ , тогда

$$a = 0,055-0,059 \text{ мм – для } m = 0,5 \text{ мм}$$

$$\text{и } a = 0,044-0,043 \text{ мм – для } m = 1,0 \text{ мм.}$$

Подставляя полученные значения в формулу (5) получим:

$$W = 0,0011-0,0012 \text{ мм,}$$

принимаем  $W=1$  мкм – для  $m = 0,5$  мм;

$$W = 0,00080-0,00086 \text{ мм,}$$

принимаем  $W=0,8$  мкм – для  $m = 1,0$  мм,

тогда для  $m = 0,5$  мм  $h=1-4$  мкм и для  $m = 1,0$  мм  $h=3-4$  мкм.

Высота неровностей профиля по десяти точкам ( $R_Z$ ) определяется по формуле:

$$R_Z = \frac{S^2}{16 \cdot r} \left( 1 + \frac{2h}{2h + 0,5 \cdot \alpha_y} \right) \cdot K_p \cdot K_\Sigma, \text{ мкм,} \quad (6)$$

где  $S$  – путь режущей кромки за одно колебание;

$$S = \frac{V_{\text{рез}}}{f},$$

где  $V_{\text{рез}}$  – скорость резания при зубофрезеровании, м/с;  $f$  – частота ультразвуковых колебаний, Гц;  $K_p = 1$ ;  $K_\Sigma = 1,2 \div 2,1$ .

$$S = \frac{(0,48 \div 0,84)}{18 \cdot 10^3} = 0,027 \div 0,047 \text{ мм.}$$

Упругое сближение контактирующих поверхностей инструмента и заготовки определяется по формуле:

$$\alpha_y = 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot q, \text{ мм.} \quad (7)$$

Подставляя значения  $q$ , получаем:

$$\text{для } m = 0,5 \text{ мм } \alpha_y = 0,00212 \div 0,00277 \text{ мм,}$$

$$\text{принимаем } \alpha_y = 0,002 \text{ мм} = 2 \text{ мкм,}$$

$$\text{для } m = 1,0 \text{ мм } \alpha_y = 0,00154 \div 0,00168 \text{ мм,}$$

$$\text{принимаем } \alpha_y = 0,002 \text{ мм} = 2 \text{ мкм.}$$

Подставляя принятые значения в формулу (6) получаем:

$$\text{для } m = 0,5 \text{ мм } R_Z = 1,87 \div 5,07 \text{ мкм}$$

$$\text{и для } m = 1,0 \text{ мм } R_Z = 0,89 \div 2,7 \text{ мкм.}$$

Полученные значения  $R_Z$  соответствуют величинам средне- арифметического значения профиля для  $m=0,5$  мм –  $R_a \approx 0,45 \div 1,27$  мкм и для  $m=1,0$  мм –  $R_a \approx 0,21 \div 0,69$  мкм. Экспериментально установлено, что при нарезании зубчатого колеса со скоростью 0,66 м/с с применением ультразвуковых колебаний  $R_a=0,6$  мкм для  $m=0,5$  мм и  $R_a=0,78$  мкм для  $m=1,0$  мм [3].

Сравнивая полученные интервалы значений среднеарифметического отклонения профиля ( $R_a$ ) со значениями шероховатости, полученными экспериментальным путем, приходим к выводам: для модуля 0,5 мм значения  $R_a$  входят в рассчитанный интервал, для модуля 1 мм значения  $R_a$  выходят за расчетный интервал, погрешность составляет 11,5%, что вполне удовлетворительно при измерении шероховатости поверхности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, Г. С. Силы резания при зубофрезеровании мелко модульных колес червячными фрезами с различными схемами резания / Г. С. Попов, Н. А. Харламов. // В кн. : Технология и автоматизация производственных процессов в машиностроении : Межвуз. сб. научн. тр. / Пензенский политех. ин-т. – Пенза, 1978. – с. 17-20.
2. Медведицков, С. Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами / С. Н. Медведицков. – М. : Машиностроение, 1981. – 104 с.
3. Агапов, С. И. Нарезание зубчатых колес с использованием ультразвука: Монография / С. И. Агапов, Ю. И. Сидякин. – Волгоград, ИУНЛ, ВолгГТУ, 2010. – 148 с.

УДК 621.9.01

*А. С. Антонов, Д. В. Криворучко, А. И. Банников*

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РЕЗАНИИ ГОРЯЧЕГО МЕТАЛЛА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**\*Волгоградский государственный технический университет**

**\*\*Сумский государственный университет**

E-mail: aac001@yandex.ru

В статье рассмотрена термомеханическая конечно-элементная модель процесса ортогонального свободного резания горячей нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Была спрогнозирована форма и температурные поля стружки в процессе механической обработки.

*Ключевые слова:* стружкообразование, свободное резание, температура, модель.

In the article the thermo-mechanical finite element model of orthogonal free-cutting stainless steel hot 12Х18Н10Т. Was predicted shape and temperature fields of chips during machining.

*Keywords:* chip formation, free cutting, the temperature of the model.

Имитационное моделирование процессов механической обработки широко применяется в Европе и является наиболее эффективным средством теоретического анализа процесса резания. Метод конечных элементов позволяет сократить затраты при разработке новых изделий, так как позволяет уменьшить и даже совсем избавиться от необходимости натурных экспериментов, кроме того метод конечных элементов является наиболее информативным и наглядным современным способом исследования.

Моделирование процесса высокоскоростного резания горячего металла был произведено программой LS-DYNA с использованием конечно-элементной сетки [1, 2].

Расчетная схема модели ортогонального свободного резания представлена на рис. 1. Расчетная схема представляет собой лезвие из рессорной стали 50ХФА с передним углом  $\gamma = 5^\circ$  и задним  $\alpha = 15^\circ$ , движущееся с постоянной скоростью  $V = 6000$  м/мин срезающее постоянный припуск  $a = 1.1$  мм. Ширина заготовки принята равной 3,7125 мм, а длина 44 мм.

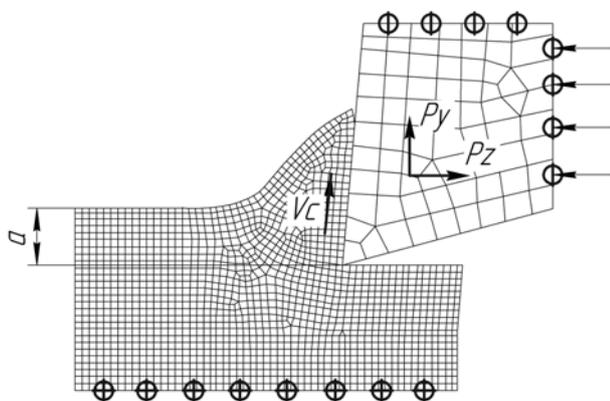


Рис. 1. Расчетная схема модели ортогонального свободного резания

В данном случае при компьютерном моделировании были приняты некоторые допущения: система считается абсолютно жесткой, инструмент - абсолютно жестким, радиус при вершине лезвия считается нулевым.

Заданы были следующие физико-механические характеристики материалов:

**Для заготовки (при 1100 °С)**

- плотность  $\rho = 7900$  кг/м<sup>3</sup>;
- модуль Юнга  $E = 110$  ГПа;
- предел текучести  $\sigma_t = 43$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0.31$ ;
- коэффициент теплопроводности  $\lambda = 31$  Вт/(м $\times$ °С);
- удельная теплоемкость  $C = 635$  Дж/(кг $\times$ °С);
- относительное удлинение  $\delta = 11\%$ ;
- коэффициент термического расширения  $\alpha = 21,2$  °С<sup>-1</sup>

**Для лезвия (при 26 °С)**

- плотность  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;
- модуль Юнга  $E = 218$  ГПа;
- коэффициент Пуассона  $\mu = 0.3$ ;
- коэффициент теплопроводности  $\lambda = 40$  Вт/(м $\times$ °С);
- удельная теплоемкость  $C = 485$  Дж/(кг $\times$ °С);

В качестве материала для заготовки выбрана модель материала «MAT\_ELASTIC\_VISCOPLASTIC\_THERMAL» под номером 106. Это вязкопластичный упругий материал с тепловым эффектом, учитывающий влияние пластической деформации, скорости пластической деформации и температуры [3].

Общий вид уравнения упрочнения материала имеет вид:

$$\sigma_s = \sigma_s(\epsilon^p \cdot \theta) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}^p}{C} \right)^{1/k} \right] \quad (1)$$

где,  $k$  и  $C$  – коэффициенты Cowper-Symond;  $\theta$  – температура;  $\varepsilon^p$  – эффективная пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость эффективной пластической деформации.

Деформация при разрушении задается соотношением:

$$\bar{\varepsilon}^p \geq \bar{\varepsilon}_{\max}^p, \sqrt{\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}} \geq \bar{\sigma}_{\max}, \sigma_1 \geq \sigma_{1\max} \quad (2)$$

где  $\bar{\varepsilon}_{\max}^p$  – величина накопленной пластической деформации при разрушении;  $\bar{\sigma}_{\max}$  – максимальные эквивалентные напряжения при разрушении;  $\sigma_{\max}$  – максимальные главные напряжения при растяжении.

Проблема искажения КЭ-сетки при большой пластической деформации решена путем регулярного перестроения КЭ-сетки с использованием карты «CONTROL\_ADAPTIVE».

### Результаты исследования и обсуждение

Анимация процесса прямоугольного свободного резания горячего металла представлена на рис. 2.

По сравнению с термофрикционным резанием горячего металла [4], отделение металла происходит не в виде перегретого металла, а в виде стружки.

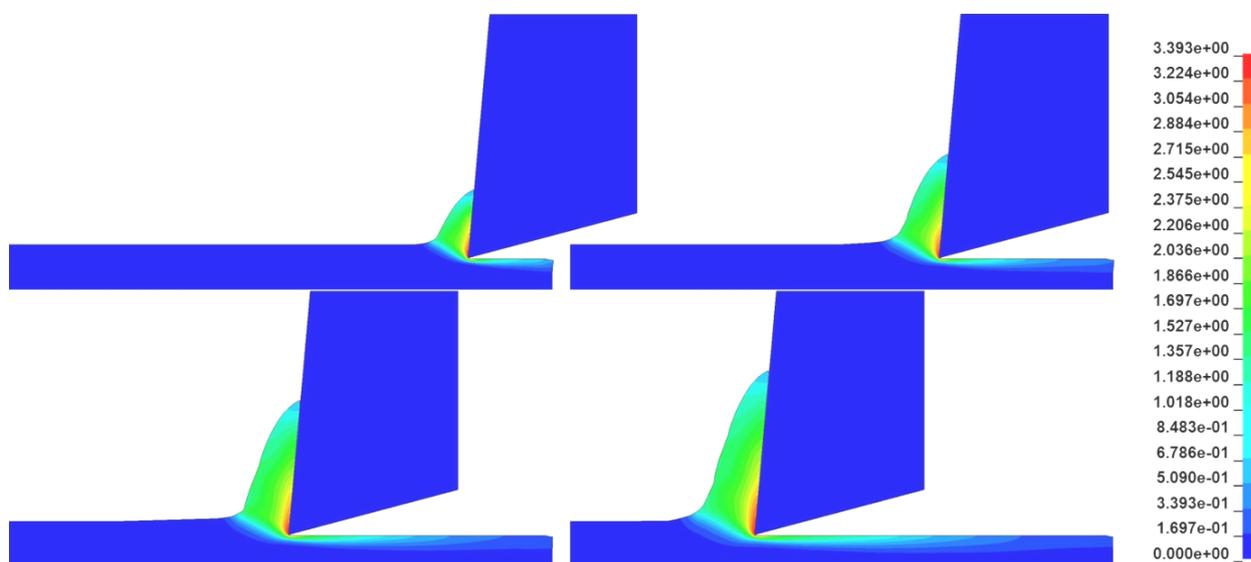


Рис. 2. Анимация процесса высокоскоростного резания горячей нержавеющей стали 12X18H10T:  $V=6000$  м/мин,  $a=1,1$  мм

В выполненных исследованиях геометрические параметры стружки, полученные с использованием имитационного моделирования имеют хорошее совпадение со стружкой, полученной в производственных условиях (рис. 3).



Рис. 3. Сравнение стружки, полученной в производственных условиях со стружкой, полученной при моделировании

На рисунке выше видно, что усадка стружки имеет достаточно большое значение, это объясняется низкими физико-механическими свойствами и высокой пластичностью обрабатываемого материала.

Используя имитационное моделирование процесса прямоугольного резания горячего металла, были получены температурные поля в стружке (рис. 4).

В силу того, что на сегодняшний день не существует экспериментального подхода определения градиента температур в стружке при высокоскоростном резании, перспективным подходом к решению указанной проблемы является применение численных методов для расчета температурных полей в системе резания [5].

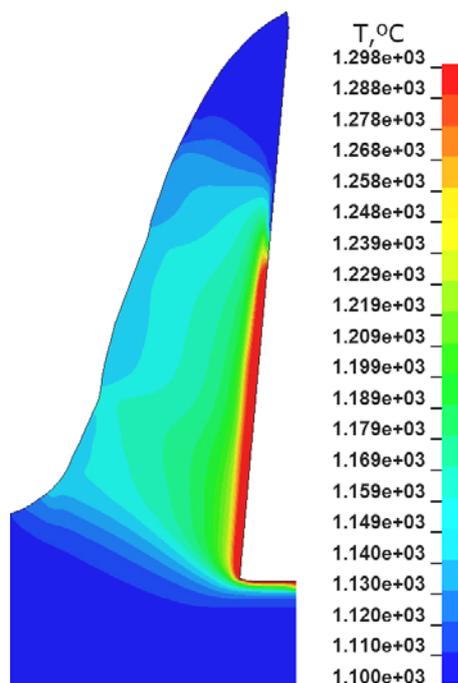


Рис. 4. Распределение полей температур в процессе резания горячей нержавеющей стали 12X18H10T

Таким образом, применение конечно-элементного исследования процессов механической обработки является перспективным методом замены натуральных экспериментов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. LS-DYNA. Keyword User's Manual / Volume I, II. – Livermore: LSTC, 2007. – 2206 с.
2. Hallquist, J. O. LS-DYNA Theory Manual / J. O. Hallquist – Livermore: LSTC, 2006. – 680 с
3. Основи 3D-моделювання процесів механічної обробки методом скінчених елементів: навчальний посібник/ Д. В. Криворучко, В.О. Залога, В.Г. Корбач.- Суми: Вид-во СумДУ, 2009. –208 с.
4. Износ при термофрикционном резании пилой с измененной геометрией [Текст]/ А.И. Банников, О.А. Макарова, А.А. Банников, А.И. Курченко// Известия ВолгГТУ вып. 4 №9, Волгоград, 2008, С.8..9.
5. Krivoruchko D. V., Zaloga V. A., Mazur N. P. Analiz sovremennyh metodov chislennogo modelirovaniya teplovyh javlenij pri rezanii materialov//Suchasni tehnologii u mashinobuduvanni: zbirnik naukovih prac. Н.: NTU «НПІ», 2007, Т.3, p.158 – 167

УДК 621.82

**А. И. Банников, А. М. Бородкина, А. С. Антонов**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА И ПОДБОР СМАЗКИ**  
**В ПАРЕ ТРЕНИЯ ПЛАСТИНА–КОНУС ЭКСПАНДЕРА**  
**Волгоградский государственный технический университет**  
 E-mail: nastya28061990@mail.ru

В данной работе исследуется износ пары трения пластина-конус экспандера, а также подбирается смазка для увеличения пятна контакта. Для устранения погрешностей формы трубы в поперечном сечении при производстве сварных труб большого диаметра применяют операцию экспандирования.

*Ключевые слова:* процесс экспандирования, пара трения пластина–конус экспандера, пятно контакта, смазывающая жидкость.

In this work wear of couple of friction an expander plate cone and as greasing, for increase in a spot of contact is selected is investigated. To elimination of errors of a form of a pipe in cross section by production of welded pipes of big diameter apply expansion operation.

*Keywords:* process of expansion, couple of friction an expander plate cone, the contact spot, greasing liquid.

Актуальность исследования связана с обеспечением надежной работы деталей пары трения пластина–конус экспандера в условиях ТЭСЦ ОАО «ВТЗ».

Деформация трубы при экспандировании осуществляется оправкой экспандера. Продольное перемещение конуса приводит к разжиму пластин экспандера с закрепленными накладками. Перемещение пластин по конусу при экспандировании сопровождается большими нагрузками и большим износом деталей в паре трения. Следует отметить, что для деталей, ра-

ботающих в закрытых корпусах и в условиях хорошей смазки, наиболее опасным является контактное выкрашивание - процесс накопления повреждений и развития разрушений контактных поверхностей [4]. Детали экспандера пары трения конус–пластина работают при больших нагрузках при воздействии температур в пределах 100–120°C. Вязкость смазывающих материалов значительно снижается. Давление в паре трения достигает 135 МПа. Возможно выдавливание смазочной пленки из зоны контакта и схватывание частиц металла

конуса и пластины. Это приводит к повышенному износу и дорогостоящему ремонту как пластины, так и конуса экспандера.

Целью данного исследования был подбор смазочного материала в паре трения конус – пластина экспандера. Критерием качества смазки служит износостойкость материала пластин.

Для обеспечения износостойкости смазочный материал должен удовлетворять следующим требованиям:

- высокую вязкость при повышенных температурах для обеспечения высокой нагрузочной способности в соединении;

- хорошие смазывающие свойства для предотвращения схватывания трущихся поверхностей;

- высокую антиокислительную стабильность для исключения коррозии деталей в паре трения бронза–сталь;

- хорошие эмульгирующие свойства для быстрого удаления смазки водой с поверхности трубы.

Назначение смазочных масел — обеспечить снижение трения и износа деталей промышленного оборудования. Одновременно смазочные масла должны отводить тепло от узлов трения, защищать детали от коррозии, очищать поверхности трения от загрязнения, быть уплотняющим средством, не допускать образования пены при контакте с воздухом, предотвращать образование стойких эмульсий с водой или быть способными эмульгировать, хорошо фильтроваться через фильтрующие элементы, быть нетоксичными, не иметь неприятного запаха.

В условиях применения смазочные масла подвергаются воздействию высоких температур и давлений, контактируют с различными металлами, воздухом, водой и различными агрессивными средами. Поэтому в период эксплуатации они окисляются – повышается вязкость, кислотное число, коррозионная активность, засоряются продуктами износа – усиливается абразивный износ, ухудшается фильтрация, появляются продукты деструкции.

В качестве исследуемых смазочных материалов были выбраны следующие:

- масло Rhenus EP4–CF (применяется на действующем оборудовании),
- масло ТНК ЭКСПАНДЕР ОЙЛ,
- масло на основе П–40 с присадками.

Масло для эспандера Rhenus EP4–CF специальное эмульгирующее масло–смазка для смазки головок экспандеров на операции экспандирования сварных труб большого диаметра.

Масло Rhenus EP4–CF обеспечивает высокую адгезионную способность хорошую смазываемость, и хорошие антикоррозионные свойства в паре бронза–сталь.

Для устранения фрикционной коррозии материалов в качестве присадки используется EP (эпоксидный полимер). Технические данные масла представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели	Значения и характеристики
Плотность при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	995
Вязкость при 40°C, мм <sup>2</sup> /с	420–460
Точка воспламенения, °C	164
Температура текучести (застывания), °C	–22
Эмульгирующая способность	Смешивается с водой в любом соотношении
Смываемость	Хорошо смывается водой
Свойства антикоррозионной защиты стали (24 ч при 60°C)	Коррозионное воздействие отсутствует
Антикоррозионное воздействие на медь (3 ч при 100°C)	класс 1a
Цвет	коричневый

В качестве масла-заменителя предлагается использовать смазывающее масло ТНК ЭКСПАНДЕР ОЙЛ.

Технические данные масла представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели	Значения и характеристики
Плотность при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	998
Вязкость при 40°C, мм <sup>2</sup> /с	345
при 100°C, мм <sup>2</sup> /с	37
Точка воспламенения, °C	155
Температура текучести (застывания), °C	–10
Эмульгирующая способность	Смешивается с водой в любом соотношении
Смываемость	Хорошо смывается водой
Антикоррозионное воздействие	Коррозионное воздействие выдерживает
Нагрузка сваривания, Н	4300
Число омыления, мг КОН/г	95
Показатель pH	8,55

Детали экспандера пары трения конус – пластина работают при больших нагрузках при воздействии температур в пределах 100–120°C. Вязкость смазывающих материалов значительно снижается.

Для оценки влияния вязкости на износ трения конус–пластина была составлена масляная композиция на основе высоковязкого масла селективной очистки П–40 со специальными присадками:

- моющее-диспергирующая присадка Д–300,
- противозадирная присадка ЛКФ–85,
- загущающая присадка КП–10.

Испытания смазочных масел проводились при температуре 40°C и 100 °C.

Нагрев образцов производился двумя инфракрасными лампами Эдисона ESEB мощностью 500 Вт.

Измерение и контроль температуры масла, а также образцов, подвергаемых истиранию, производилось с помощью лазерного пирометра ПИТОН-101.

Для моделирования условий трения в паре трения конус–пластина экспандера использовалась установка ШЛИФ.

Усилие прижима создавалось грузом весом 10,5 кг.

Диаметр рабочей части образцов равен 1 мм. Образцы закреплялись в специальной оснастке, не допускающей перекосов.

Давление в зоне контакта образца и контртела равно 131,0 МПа.

Частота вращения контртела 60 об/мин.

За один оборот образец проходит путь равный 0,141 м.

В качестве образцов в паре трения бронза–сталь использовались образцы:

- оригинальный импортный материал, используемый в действующем производстве (аналогом является алюминиевая бронза БрАЖ 9–4);
- бериллиевая бронза БрБ2 после закалки и старения.

Контртело сталь 34ХН1М, структура сорбит отпуска.

Образцы измерялись относительным методом с помощью микаторной головки 1–ИПМ ГОСТ 14712–69 с ценой деления 1 мкм, диапазоном измерения ±50 мкм, допускаемой погрешностью 0,5 мкм. После измерения каждого образца головка устанавливалась на 0 с помощью мерных плиток (ПКМД ГОСТ 9038–83) по размеру образца.

Сравнение данных по интенсивности износа позволит сделать вывод об смазочных матери-

лов и надежности их работы в паре трения конус–пластина экспандера. Критерием износостойкости был принят относительный износ материалов образцов в единицу времени.

Сравнительные результаты экспериментов для различных материалов пары трения приведены на рис. 1 и 2.

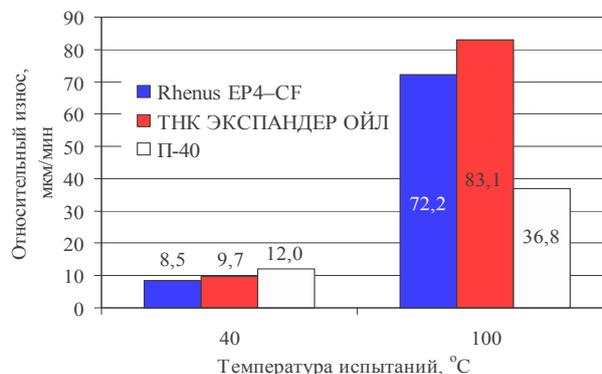


Рис. 1. Диаграмма зависимости относительного износа от температуры при истирании образца из импортного материала

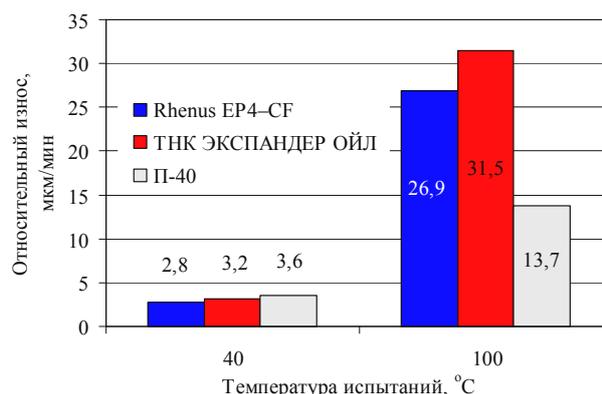


Рис. 2. Диаграмма зависимости относительного износа от температуры при истирании образца из БрБ2

### Вывод

Проведенные исследования по износостойкости в паре трения конус–пластина экспандера позволили рекомендовать масло ТНК ЭКСПАНДЕР ОЙЛ в качестве замены импортных аналогов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безыносность): Учебник – М.: «Издательство МСХА», 2001.
2. Шевакин Ю.Ф., Глейберг А.З. Производство труб М.: «Металлургия», 1974.
3. Смирязин А.П., Смирязина Н.А., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы М.: «Металлургия», 1974.
4. Контактная выносливость при начальном контакте по линии [Текст]/ М. М. Матлин, А. А. Стариков// Известия ВолгГТУ вып. 6 № 12, Волгоград, 2010, С.28..29.

УДК 621.9.015

*А. А. Бондарев, В. А. Солодков, Я. Н. Отений***РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОЧЕНИИ С ОПЕРЕЖАЮЩИМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Создана математическая модель, описывающая закономерности формирования шероховатости при точении с опережающим пластическим деформированием (ОПД) по обрабатываемой поверхности. Регрессионный анализ позволил выявить характер зависимости функции отклика и величину влияния каждого из факторов на нее. Предложена формула для расчета среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$ , расширяющая возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки.

*Ключевые слова:* математическая модель, шероховатость, точение, опережающее пластическое деформирование (ОПД), формула, расчет, углеродистые стали

A mathematical model describes formation of the regularities surface roughness in turning to the advanced plastic deformation (APD) on the treated surface. Regression analysis identified the dependence of the response function and the magnitude of the effect of each factor on it. The formula for calculating the arithmetic average roughness  $R_a$ , extending the possibility of applying the method of cutting with the APD in the practice of mechanical treatment.

*Keywords:* mathematical model, roughness, turning, advancing plastic deformation (APD), the formula, calculation, carbon steel

Конструкционные углеродистые стали широко применяются для изготовления деталей машин, шестерней, валов. В частности, операции обработки точением применяются в технологических процессах изготовления валов и других тел вращения, к которым предъявляются требования повышенной износостойкости и качества поверхности. Повышение эффективности обработки точением конструкционных углеродистых сталей является актуальной задачей.

Представленную задачу можно решить следующими способами: повышение работоспособности режущего инструмента, производительности процесса обработки и качества получаемых изделий. Резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД), совмещающее стадии предварительного поверхностного пластического деформирования и последующего съема припуска на обработку режущим инструментом, является комбинированным методом обработки, позволяющим получить комплексный результат повышения эффективности процесса по перечисленным выше направлениям. Изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала после стадии ОПД обуславливает формирование таких условий протекания физических процессов в зоне резания, которые способствуют снижению работы стружкообразования, нагрузок на режущий клин, улучшению условий контактного взаимодействия и формирования новой поверхности.

Исследованиями установлено, что точение конструкционных углеродистых сталей с ОПД по обрабатываемой поверхности позволяет значительно улучшить микропрофиль получаемой поверхности и повысить производительность процесса резания. Так, при точении с ОПД конструкционной углеродистой стали 20 происходило снижение значения среднего арифметического отклонения профиля  $R_a$  до 2-х раз по сравнению с традиционной обработкой. Были выявлены резервы существенного повышения производительности процесса резания. Одинаковые значения  $R_a$  получались при традиционном точении на одних подачах и при резании на больших подачах предварительно деформированного металла.

Для исследования закономерностей формирования шероховатости поверхности деталей из углеродистых сталей при точении с ОПД, прогнозирования результатов процесса и расширения возможностей практического применения способа резания в свете представленных его преимуществ необходимо построить математическую модель влияния основных параметров обработки на качество получаемой поверхности.

Исследования выполнялись для чистового точения (глубина резания  $t=0,5$  мм) углеродистой стали 20 (сортовой прокат, состояние поставки,  $\sigma_{0,2}=296$  МПа). Инструмент был представлен сменными многогранными твердосплавными пластинами формы W ( $\alpha=0^\circ$ ) (ISO 1832-

1991)); радиус сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок  $r=0,8$  мм. Обработка выполнялась без смазочно-охлаждающих технологических сред. В качестве факторов, определяющих значение функции отклика ( $Ra$ ), были выбраны: скорость резания, теплопроводность инструментального материала, подача и коэффициент ОПД.

$$K_{ОПД} = \frac{h_{нак}}{t}, \quad (1)$$

где  $h_{нак}$  – глубина наклепанного поверхностного слоя, мм;  $t$  – глубина резания, мм.

Принятые в исследовании натуральные и безразмерные значения факторов представлены в табл. 1.

Исследованиями выявлен экстремальный характер изменения влияния ОПД обрабатываемой поверхности на эффективность процес-

са точения. С увеличением  $K_{ОПД}$  до некоторой величины происходит снижение силы резания, достигая минимума при определенном отношении  $h_{нак}$  к  $t$  (для описанных в данной статье условий это соотношение равно 3,6. Дальнейший рост  $K_{ОПД}$  приводит к снижению эффективности процесса. Подобное влияние отмечено для обработки с ОПД в работах [2, 5]. Нижний уровень  $K_{ОПД}$  по экспериментам равен 0 (в данном случае процесс резания происходил без ОПД), но для построения модели принимается равным 0,001 для возможности выполнения дальнейших расчетов включающих логарифмирование. При этом допущении глубина наклепа была бы равна 0,0005 мм, что ничтожно мало. Таким образом, эта условность не повлияет на результат регрессионного анализа.

Таблица 1

Натуральные значения факторов

Факторы	Обозначение	Натуральные значения		
Нормированное значение (уровень)	$Z_i$	-1	0	+1
Скорость резания, м/мин	$X_1$	90	135	180
Теплопроводность инструментального материала, Вт/м·К	$X_2$	11 (ТН20)	27 (Т15К6)	50 (ВК6)
Продольная подача, мм/об	$X_3$	0,083	0,166	0,256
Коэффициент ОПД ( $K_{ОПД}$ )	$X_4$	0,001	1,8	3,6

На основании проведенных расчетов установлено, что выбранные факторы являются попарно взаимно независимыми, и каждый из них оказывает влияние на величину функции отклика. Для оценки степени влияния каждого из факторов была построена многофакторная регрессионная модель.

Построение модели после нормирования предполагало выполнение следующих, независимых от ее спецификации, последовательных расчетов [0, 4]: расчет коэффициентов регрессии для выбранных факторов; расчет коэффициента регрессии, определяющего влияние случайных факторов; расчет нормированных значений функции отклика; расчет критерия Стьюдента, определяющего существенность отличия коэффициентов регрессии от нулевых значений; оценка статистической значимости и определение степени влияния рассматриваемых факторов.

Анализ данных табл. 2 позволяет сделать следующие выводы.

Средняя относительная погрешность (рас-

хождение значений  $Ra$ , рассчитанных по модели и полученных опытным путем) линейной модели ниже аналогичных параметров степенной и показательной (8,78 % – линейная; 11,35 % – степенная; 10,43 % – показательная), что является преимуществом. Степень влияния на шероховатость поверхности случайных факторов, выражаемая соответствующим коэффициентом регрессии, у линейной модели равна по абсолютной величине 0,01, т. е. присутствие случайных факторов практически исключено. У степенной и показательной моделей влияние случайных факторов характеризуется абсолютной величиной 0,28, что весьма существенно на фоне принятых в исследовании факторов. Таким образом, линейная модель облегчает дальнейший прогноз качества поверхности после токарной обработки с ОПД, так как позволяет сделать вывод о том, что наиболее значимое влияние на шероховатость оказывают именно скорость резания, теплопроводность инструментального материала, подача, ОПД.

Сравнение регрессионных моделей

Параметр	Спецификация модели		
	Линейная	Степенная	Показательная
Оценка влияния факторов			
Случайные факторы	0,01	0,28	0,28
Скорость резания	-0,21	-0,16	-0,25
Теплопроводность инструментального материала	0,14	0,16	0,06
Подача	0,24	0,27	0,18
Коэффициент ОПД ( $K_{ОПД}$ )	-0,29	-0,11	-0,31
Достоверность адекватной модели, %	99,8	97,8	99,1
Оценка погрешности			
Стандартное отклонение	0,246	0,316	0,288
F-критерий	1,918	1,574	1,720
Средняя относительная погрешность, %	8,78	11,35	10,43

Коэффициенты регрессии линейной модели показывают, что на шероховатость поверхности после токарной обработки с ОПД в порядке возрастания оказывают влияние следующие факторы: теплопроводность инструментального материала, скорость резания, подача, ОПД. С увеличением скорости резания происходит уменьшение величины среднего арифметического отклонения профиля (коэффициент регрессии -0,21 для линейной модели), что соответствует традиционному представлению о влиянии скорости резания на шероховатость обработанной поверхности при точении углеродистых сталей. С ростом теплопроводности инструментального материала происходит повышение шероховатости получаемых поверхностей, которое объясняется воздействием теплофизических свойств контактирующих пар (инструмент-деталь) на характер протекания физических процессов в зоне резания (коэффициент регрессии +0,14 (линейная модель)). Применение ОПД позволяет значительно повысить качество обработанных деталей (коэффициент регрессии -0,29 (линейная модель)). С ростом подачи, в соответствии с традиционными сложившимися представлениями, шероховатость получаемых поверхностей становится хуже (коэффициент регрессии +0,24 для линейной модель).

Регрессионная математическая модель влияния основных параметров обработки резанием с ОПД на значение среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$  обработанной поверхности при точении углеродистой стали 20 реализуется в виде следующей зависимости:

$$Ra = 2,51 - 0,004 \times V + 0,008 \times \lambda + 3,08 \times S_o - 0,39 \times K_{ОПД}, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\lambda$  – теплопроводность инструментального материала, Вт/м·К;  $S_o$  – подача, мм/об;  $K_{ОПД}$  – коэффициент ОПД.

Эта формула позволяет рассчитать значение шероховатости при традиционном точении и с ОПД, т. е. спрогнозировать повышение эффективности процесса резания при изучаемом способе и учесть это в технологическом маршруте обработки. Диапазоны варьирования факторов (например, скорости резания 90-180 м/мин) и условия обработки для практического применения зависимости описаны в табл. 1.

Таким образом, создана математическая модель, позволяющая описать закономерности формирования шероховатости при точении углеродистых сталей с ОПД по обрабатываемой поверхности. Регрессионный анализ позволил выявить характер зависимости функции отклика и величину влияния каждого из факторов на нее. Предложена формула для расчета среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$ , расширяющая возможности применения способа резания с ОПД в практике механической обработки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
2. Ингеманссон, А. Р. Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартен-

ситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07 / А. Р. Ингеманссон. – Волгоград, 2012. – 209 с.

3. Разработка математической модели формирования шероховатости обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием / Ингеманссон А.Р., Зайцева Н.Г., Крайнев Д.В., Бондарев А.А. // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и ком-

плекующих изделий : межвуз. науч. сб. / ФГБОУ ВПО "Уфимский гос. авиац. техн. ун-т". - Уфа, 2012. - С. 54-60.

4. Чигиринский, Ю. Л. Стохастическое моделирование в машиностроении : Учеб. пособие. / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская. Ю. М. Быков. – Волгоград : ВолгГТУ, 2002. – 68 с.

5. Ярославцев, В. М. Точение с опережающим пластическим деформированием : Учебное пособие по курсу «Технология машиностроения». – М. : Изд-во МГТУ, 1991. – 38 с.

УДК 621.941

*В. К. Голованов, П. С. Нестеренко*

## УСТРОЙСТВО АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: ngig@vstu.ru

Представлена схема электромеханического автоматического устройства стабилизации силы резания, а также предложены способы его использования для снижения влияний вибраций при точении на качество обработанной поверхности.

*Ключевые слова:* токарная обработка, стабилизация силы резания, устройство автоматического управления.

The scheme of the electromechanical automatic device of stabilization of force of cutting is presented, and also ways of its use for reduction the influences of vibrations on quality of the processed surface at turning are offered.

*Keywords:* turning, stabilization of force of cutting, the automatic control device.

В процессе обработки детали сила резания постоянно изменяется, что приводит к колебаниям заготовки и инструмента, а также способствует формированию неодинаковых остаточных напряжений на поверхности детали, что приводит к потере точности формы поверхностей [1,2]. Особенно интенсивно это проявляется при обработке маложестких деталей типа “вал” и неблагоприятно сказывается на их эксплуатационной надежности.

Зная достоверно значение силы резания и регулируя значение подачи, глубины или скорости резания, можно добиться необходимых результатов по точности обработки. Так как при уменьшении подачи существенные потери возникают только лишь в производительности процесса обработки, качество поверхности при этом улучшается, следовательно, выгоднее всего регулировать точность, изменяя значение подачи [3].

Наибольшее распространение получили автоматические системы управления, базирующиеся на использовании двигателей постоянного тока или бесступенчатых вариаторов для регулирования скорости движения подачи с целью управления силой резания [4]. Основным недостатком таких автоматических систем управления является необходимость независимого привода подачи, в то время, как на многих

моделях станков вал привода подачи получает вращение от привода основного движения, поэтому применение таких систем на универсальных токарных станках связано с высокими дополнительными экономическими затратами на их модернизацию.

Устройство, описанное в Патенте РФ № 2226140 [5] устраняет вышеуказанный недостаток. Однако указанное устройство обладает относительно невысоким быстродействием, что связано с тем, что в конструкции используется упругий элемент пружинного типа, обладающий большой амплитудой и невысокой частотой его собственных колебаний. Также указанное устройство нуждается в его точной механической настройке на номинальное значение стабилизируемой составляющей силы резания в зависимости от условий обработки конкретной партии изделий.

Предлагаемое устройство позволяет решить все вышеуказанные недостатки. Устройство как автономный узел устанавливается в стандартный резцедержатель 2 токарного станка с помощью призматического хвостовика на базовом корпусе 1 (см. рисунок). В базовом корпусе 1 на продольных направляющих качения 3 установлен резцедержатель 4 с жестко закрепленным резцом 5. Между резцедержателем 4 и базовым корпусом 1 установлен силовой при-

вод. Силовой привод включает в себя упругий элемент 6, состоящий из наружного и внутреннего соосных упругих колец, соединенных продольными и поперечными тягами расположенными попарно вблизи противоположных торцевых поверхностей этих колец во взаимно перпендикулярных диаметральных направлениях, причем продольные и поперечные тяги снабжены левым и правым продольными рычагами и нижним и верхним поперечными рычагами соответственно, продольные оси которых параллельны оси упругих колец, и электромагнит 7, который крепится к нижнему поперечному рычагу, с подвижным элементом, выполненным в виде постоянного магнита, с конической формой рабочего конца, который крепится

на верхнем поперечном рычаге, максимальный ход которых ограничен винтом 8. Силовой привод устройства устанавливается в базовый корпус 1 при помощи правого продольного рычага и нижнего поперечного рычага. Тензорезисторы  $R_1..R_8$  навиты вблизи торцов наружного упругого кольца и на выступающих торцах внутреннего упругого кольца и попарно включены в плечи ( $R_1R_6$ ,  $R_2R_5$ ,  $R_3R_8$ ,  $R_4R_7$ ) электрического мостика Уинстона, выходы которого подключены к блоку автоматического управления, состоящему из последовательно соединенных тензорезисторного усилителя, устройства сравнения оснащенного блоком памяти, усилителя сигнала, выходы которого подключены к выводам электромагнита 7.

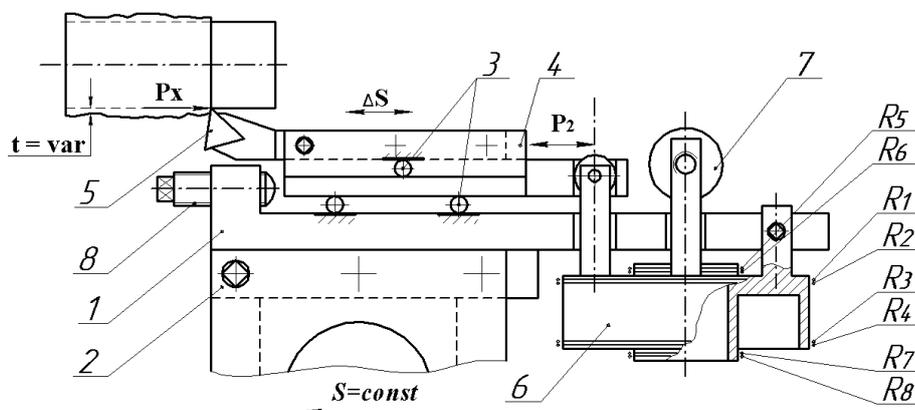


Схема устройства автоматического управления процессом токарной обработки

В процессе обработки резец 5 воспринимает силу резания и по средствам резцедержателя 4 передает усилие, равное величине осевой составляющей силы резания  $P_x$ , на левый продольный рычаг. Под действием этого усилия упругий элемент 6 деформируется таким образом, что тензорезисторы  $R_1, R_2, R_5, R_6$  сжимаются, а  $R_3, R_4, R_7, R_8$  растягиваются, что приводит к разбалансу электрического моста, величина которого пропорциональна измеряемой силе  $P_x$ . Электрический сигнал о величине  $P_x$  поступает в блок автоматического управления, где, в тензорезисторном усилителе усиливается и поступает в устройство сравнения, в блоке памяти которого записано значение электрического сигнала о величине номинального значения осевой составляющей силы резания  $P_x^{ном}$ . Устройство сравнения в свою очередь вырабатывает сигнал рассогласования, который с учетом знака передается на усилитель сигнала и усиливается, после чего подается на электромагнит 7, при этом электромагнит 7 притягива-

ется или отталкивается от постоянного магнита с требуемой силой  $P_m$ .

Номинальное значение осевой составляющей силы резания  $P_x^{ном}$  рассчитывается по типовым нормативам режимов резания или определяется экспериментальным путем. Предпочтительнее определять величину  $P_x^{ном}$  экспериментальным путем, так как ошибка расчета составляющих силы резания по любым существующим типовым нормативам превышает 12% [6].

При точении заготовки с номинальным припуском сила резания постоянна и равна номинальному значению, при этом сигнал рассогласования равен нулю и резцедержатель 4 находится в статическом состоянии относительно базового корпуса 1. При мгновенном отклонении глубины резания или (и) твердости материала от номинальных значений продольная составляющая силы резания изменяется на величину  $\Delta P_x$ , а выработанный сигнал рассогласования приводит в действие электромагнит 7.

В случае если величина осевой составляющей силы резания  $P_x$  превышает номинальное значение, электромагнит 7 и постоянный магнит отталкиваются, за счет чего поперечные рычаги отдаляются, при этом деформируя упругий элемент 6, вследствие чего продольные рычаги сближаются и со стороны левого продольного рычага на резцедержатель 4 начинает действовать усилие  $P_2$  сонаправленное с продольной составляющей силы резания  $P_x$  и под воздействием этого усилия резцедержатель 4 смещается относительно базового корпуса 1 на величину  $\Delta S$  противоположно направлению подачи. При этом реальная подача при резании становится равной  $S-\Delta S$ , что вызывает снижение силы резания.

В случае если величина продольной составляющей силы резания  $P_x$  меньше номинального значения, электромагнит 7 и постоянный магнит притягиваются. При этом возникающее усилие  $P_2$  направлено противоположно продольной составляющей силы резания  $P_x$ . Под действием усилия  $P_2$  резцедержатель 4 смещается относительно базового корпуса 1 на величину  $\Delta S$  по направлению подачи. При этом реальная подача при резании становится равной  $S+\Delta S$ , что вызывает увеличение силы резания. Таким образом, происходит силовая стабилизация процесса резания.

Использование упругого элемента вышеуказанной конструкции позволяет добиться высоких показателей быстродействия и чувствительности устройства, что обусловлено достаточно высокой жесткостью и небольшой величиной деформаций в рабочей плоскости (до 0,5 мм во всем рабочем диапазоне усилий) упругого элемента 6, а как следствие и небольшой амплитудой и высокой частотой его собственных колебаний [7].

Исполнение силового привода в виде упругого элемента 6 вышеуказанной конструкции и связанного с ним электромагнита 7 с подвижным элементом, выполненным в виде постоянного магнита, с конической формой рабочего конца, по средствам обратной связи реализованной в виде схемы автоматического управления, состоящей из тензорезисторов  $R_1..R_8$  включенных в электрический мост Уинстона, выхо-

ды которого подключены к блоку автоматического управления выходы которого подключены к выводам электромагнита 7 позволяет стабилизировать силы резания при чистовой токарной обработке без механической настройки устройства на номинальное значение стабилизируемой составляющей силы в зависимости от условий обработки конкретной партии изделий.

Таким образом, применение предлагаемого устройства позволит повысить точность и качество обрабатываемых точением поверхностей за счет мгновенной стабилизации осевой составляющей силы резания при чистовой токарной обработке. Устройство может быть установлено на универсальных токарных станках в качестве одноконтурной системы автоматического управления для стабилизации осевой составляющей силы резания, а также на станках, оснащенных автоматическими системами управления, в качестве первого быстродействующего контура системы, реагирующего на вибрационные процессы при резании.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Силин, С.С.* Метод подбора при резании материалов. - М.: Машиностроение, 1979, - 152 с.
2. *Яцерицын П.И., Еременко М.Л., Фельдштейн Е.Э.* Теория резания: Физические и тепловые процессы в технологических системах. - Минск: Высшая школа, 1990. - 512 с.
3. *Плотников А.Л.* Способы регулирования точности при обработке нежестких валов на токарных станках с ЧПУ / Плотников А.Л., Чигиринский Ю.Л., Шмаров А.А., Ключков Д.С. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - № 13 (100). - С. 39-43.
4. *Балакшин Б.С.* Адаптивное управление станами / Под ред. Б.С. Балакшина. - М.: Машиностроение, 1973. - 688 с.
5. Пат. 2226140 РФ. МПК В 23 В 1/00. Устройство для токарной обработки нежестких деталей/ С.А. Васин, Л.А. Васина, О.А. Ямникова, Е.И. Федин. - Оpubл. 27.03.2004 г., Бюл. № 25.
6. *Плотников, А.Л.* Проблемы обеспечения расчетной точности токарной обработки в САПР ТП и методы их решения / Плотников А.Л., Мустафаев Э.И., Шмаров А.А. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 13. - С. 87-90.
7. *Осадчий Е.П.* Проектирование датчиков для измерения механических величин /Под ред. Е.П. Осадчего. - М.: Машиностроение, 1979 - 480с.

УДК 621.791.019

Н. И. Егоров, И. А. Небыков, П. И. Тернак, Д. В. Мусеева

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОБКАТКИ ВИБРИРУЮЩИМ РОЛИКОМ  
ВПАДИНЫ РЕЗЬБЫ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: egorov\_ni@mail.ru

Проведено исследование зависимости параметров процесса обкатки радиуса впадины резьбы вибрирующим роликом. Результаты исследований предложено использовать для расчета параметров процесса обкатки вибрирующим роликом резьбы штоков поршневых компрессоров.

*Ключевые слова:* вибрирующий ролик, наклеп, радиус впадины резьбы.

The studies of the process parameters for the carving cavity radius by the vibrating roller were conducted. The results of the research are proposed to be used for the calculation of the process parameters for the reciprocating compressors carving by the vibrating roller.

*Keywords:* vibrating roller, cold-hardening, cavity radius.

Для повышения эксплуатационной долговечности штоков поршневых компрессоров рекомендуется упрочнение резьбы методом пластической деформации - наклепом. Для создания наклепа во впадине резьбы применяется упрочнение вибрирующим роликом.

Для подготовки технологических рекомендаций по повышению прочности и эксплуатационной долговечности резьбы штоков компрессоров провели теоретический расчет параметров процесса обкатки резьбы вибрирующим роликом.

При вдавливании ролика на глубину припуска  $t_p$  образуется площадка контакта -  $S_p$ . Из геометрических расчетов рис. 1 получили зави-

симость площади контакта при вдавливании ролика во впадину резьбы  $S_p$  от припуска и параметров резьбы:

$$S_p = \frac{\pi^2 \cdot R \cdot d_p}{90^\circ} \operatorname{arcSin} \sqrt{\frac{t_p \cdot (d_1 - t_p)}{d_p (d_p - 2t_p + d_1)}} \quad (1)$$

Определили зависимость усилия вдавливания ролика во впадину резьбы  $F$  от припуска, твердости заготовки и параметров резьбы:

$$F = HB \cdot \frac{\pi^2 \cdot R \cdot d_p}{90^\circ} \operatorname{arcSin} \sqrt{\frac{t_p \cdot (d_1 - t_p)}{d_p (d_p - 2t_p + d_1)}} \quad (2)$$

где  $HB$  – твердость по Бринеллю Н/м<sup>2</sup>;

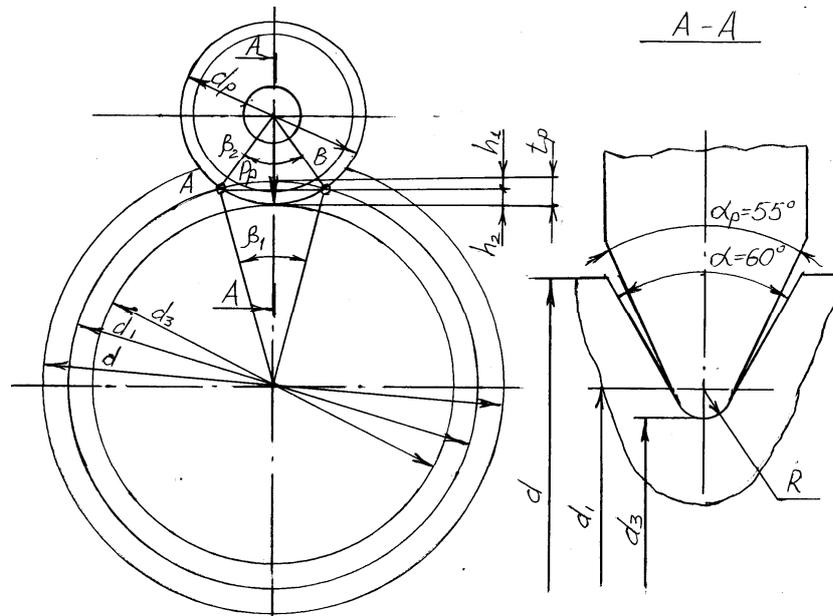


Рис. 1. Схема обкатки роликом впадины резьбы:

$d$  – наружный диаметр резьбы;  $d_1$  – внутренний диаметр резьбы;  $d_3$  – диаметр впадины резьбы с радиусом закругления;  $R$  – радиус закругления впадины резьбы;  $d_p$  – наружный диаметр ролика;  $\beta_1$  – центральный угол контакта резьбы;  $\beta_2$  – центральный угол контакта ролика;  $t_p$  – глубина вдавливания ролика во впадину резьбы;  $h_1$  – высота сегмента резьбы;  $h_2$  – высота сегмента ролика;  $\alpha$  – угол профиля метрической резьбы;  $\alpha_p$  – угол профиля ролика

Для подбора вибрирующего инструмента (отбойного молотка) рассчитали зависимость энергии удара ролика от припуска, твердости заготовки и параметров резьбы по формуле:

$$G = F \cdot t_p = HB \cdot \frac{\pi^2 \cdot R \cdot d_p \cdot t_p}{90^0} \times \arcsin \sqrt{\frac{t_p \cdot (d_1 - t_p)}{d_p (d_p - 2t_p + d_1)}} \quad (3)$$

При цикличности ударов ролика на поверхности впадины резьбы могут образоваться микронеровности. Для обеспечения заданной шероховатости поверхности необходимо определить скорость обкатывания исходя из числа ударов вибрирующего инструмента (отбойного молотка). Из геометрических построений, приведенных на рис. 2, определили зависимость частоты вращения заготовки в зависимости от диаметра ролика, частоты ударов отбойного молотка и требуемой шероховатости поверхности впадины резьбы после обработки:

$$n_3 = \frac{n_p}{\pi} \cdot \arcsin \sqrt{\frac{Rz}{d_p}} \quad (4)$$

В предыдущих расчетах было установлено, что энергия деформации пропорциональна диаметру ролика  $d_p$ . При выборе отбойного молотка необходимо стремиться к минимальным затратам энергии деформации, а следовательно к минимальному диаметру ролика. По

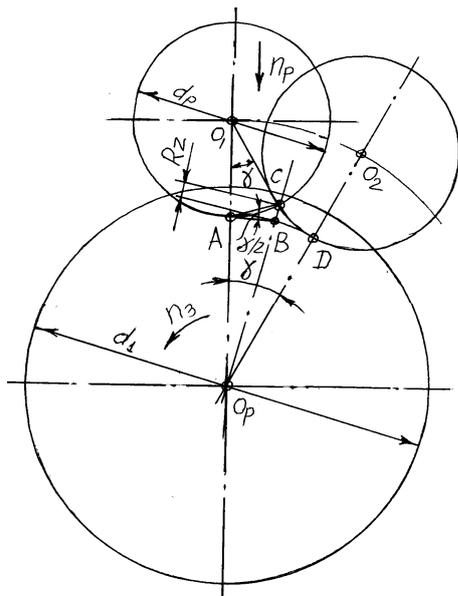


Рис. 2. Схема обкатывания вибрирующим роликом:  $d_1$  – внутренний диаметр резьбы;  $d_p$  – наружный диаметр ролика;  $Rz$  – высота микронеровностей;  $\gamma$  – угол поворота заготовки за один удар отбойного молотка;  $n_p$  – число ударов вибрирующего инструмента (отбойного молотка);  $n_3$  – число оборотов заготовки

этому был проведен расчет для определения минимального диаметра ролика, оси и вилки приспособления.

Из схемы приспособления (рис. 3) получили формулы зависимости размеров ролика, оси и вилки от шага резьбы.

Размер конической части ролика:

$$H_1 = 0,613P \quad (5)$$

Ширина ролика:

$$B = 0,875P \quad (6)$$

Ширина вилки:

$$B_T = 1,75P \quad (7)$$

Расчет диаметра оси производим из условия прочности:

$$d_o = 2,21 \cdot P \quad (8)$$

Диаметр ролика

$$d_p = 5,87P \quad (9)$$

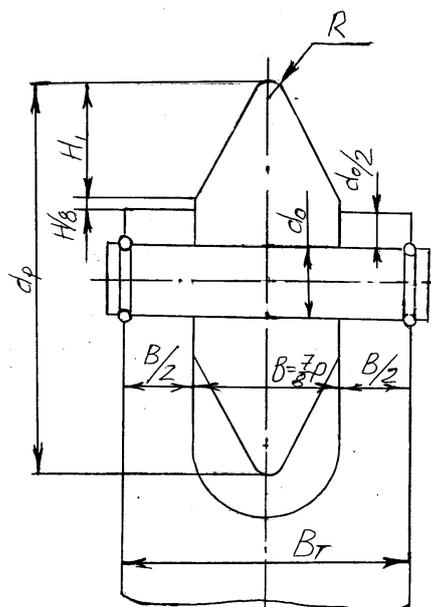


Рис. 3. Расчетная схема для определения оптимальных размеров ролика, оси и вилки

На основании расчетных зависимостей разработано приспособление для упрочнения резьбы штоков компрессоров вибрирующим роликом (рис. 4). Приспособление крепится в резцедержателе токарновинторезного станка. Приспособление представляет отбойный молоток модели *SDS-plus D25330K* мощностью 650 Вт, частотой вибрации 4200 мин<sup>-1</sup> и энергии удара 3,1 Дж. В патроне отбойного молотка установлена вилка, в которой установлен ролик, свободно вращающийся на оси Ø 8мм. Наружный диаметр ролика 24 мм. Угол профиля 55°. Радиус при вершине R=0,58мм.

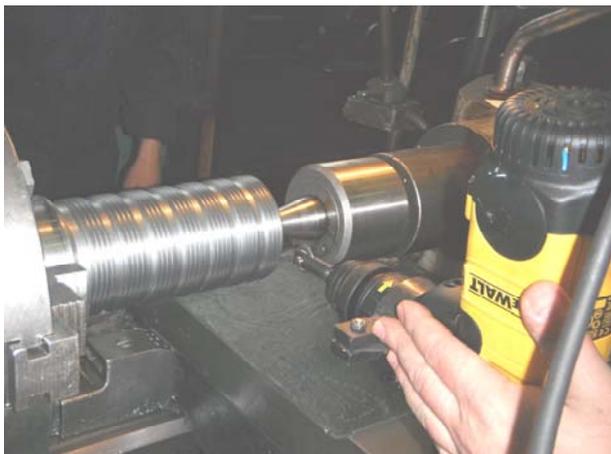


Рис. 4. Установка приспособления для обкатки вибрирующим роликом в резцедержателе токарно-винторезного станка

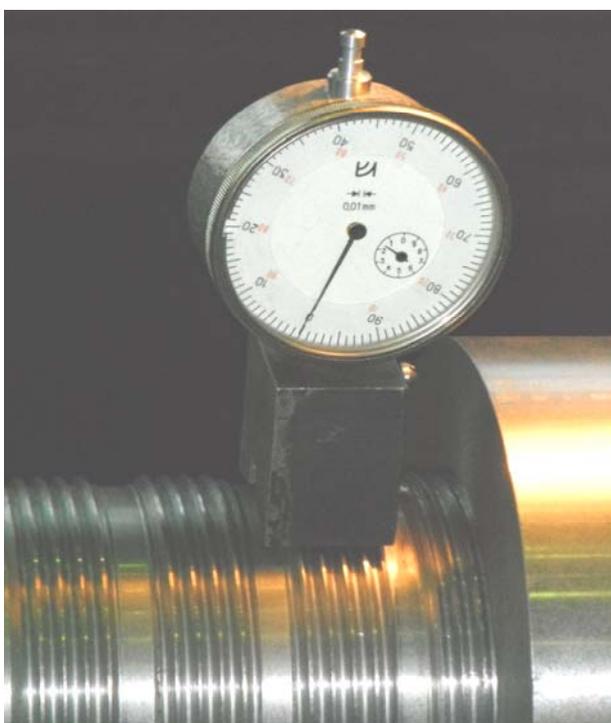


Рис. 5. Установка приспособления для измерения деформации радиуса впадины резьбы на наружный диаметр резьбы до обкатки вибрирующим роликом

Для измерения деформации радиуса впадины резьбы  $t_p$  разработано приспособление, состоящее из призмы, в которой закреплен индикатор часового типа ИЧ-10 (рис. 5). На штоке индикатора крепится специальный наконечник для измерения впадины резьбы. Угол профиля  $30^\circ$ . Радиус при вершине  $R0,3$  мм.

Призма устанавливается на наружный диаметр резьбы, индикатор устанавливается на ноль. После обкатки радиуса впадины резьбы приспособление вновь устанавливается на наружный диаметр и измеряется деформация радиуса впадины резьбы.

### Выводы

1) Предложено для повышения предела выносливости резьбы штоков обкатывать радиус впадины вибрирующим роликом, что позволит упрочнить слой металла в районе радиуса впадины резьбы за счет наклепа; создать остаточные напряжения сжатия, которые компенсируют эксплуатационные напряжения растяжения; снизить высоту микронеровностей шероховатости поверхности радиуса впадины резьбы.

2) Установлена зависимость оптимальных параметров технологии обкатки резьбы методом вибрирующего ролика от размеров резьбы, твердости заготовки и припуска на обработку (1,2,3,4).

3) Установлена зависимость оптимальных размеров ролика, оси и вилки приспособления обкатки резьбы методом вибрирующего ролика от размеров резьбы (5,6,7,8,9).

4) На основании расчетных зависимостей разработаны приспособления для упрочнения резьбы штоков компрессоров вибрирующим роликом и для измерения деформации впадины резьбы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егоров, Н.И. Способ исключения трещин после механической обработки при ремонте деталей, содержащих растворенный водород / Н.И. Егоров, О.А. Курсин // СТИН. - 2012. - № 11. - С. 37-40.

2. Полянчиков, Ю.Н. Повышение параметров резания путем поверхностного наводороживания заготовок / Ю.Н. Полянчиков, Н.И. Егоров, М.Ю. Полянчикова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. - 2012. - № 2-2 (292). - С. 30-35.

3. Исследование влияния твердости обрабатываемого материала на качество поверхности при хонинговании / Ю.Н. Полянчиков, О.А. Курсин, Д.А. Мартус, М.Ю. Полянчикова, Н.И. Егоров // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - № 13 (100). - С. 51-54.

УДК 621.793

А. В. Зотов, О. И. Драчев, Н. В. Семенченко

## АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБКОГО ИНСТРУМЕНТА

Тольяттинский государственный университет

E-mail: Zottof@yandex.ru

В статье рассмотрено влияние режимов процесса деформационного плакирования на напряженное состояние проволочных элементов гибкого инструмента. Представлены данные сравнительного анализа, полученные аналитическим методом и САЕ-моделированием.

*Ключевые слова:* плакирование, гибкий инструмент, напряжения.

The article considers the influence of the regimes of the deformation cladding process on the stress state of wire elements flexible tool. Presents the comparative analysis of the obtained analytical method and CAE simulation.

*Keywords:* cladding, flexible tool, stress.

Обработка деталей машин с минимальной себестоимостью и при этом хорошего качества всегда будет приоритетной задачей любой отрасли машиностроения. При этом количество технологий, нацеленных на ресурсосбережение, в последнее время, существенно возросло. На этом фоне все больше выделяется простой, экологичный и высокопроизводительный способ комбинированной обработки изделий – плакирование гибким инструментом (ПГИ) [1, 2].

Суть метода ПГИ заключается в нанесении на поверхность обрабатываемых изделий тонкого слоя сплава материала-донора термомеханическим способом, посредством проволочной дисковой щетки (гибкого инструмента). Одним из препятствий широкого распространения данного способа плакирования является низкая стойкость самого инструмента.

Корректная оценка долговечности проволочных элементов гибкого инструмента является одним из основополагающих факторов, как при ПГИ, так и при упрочняющей обработке без нанесения покрытий.

Установлено, что проволочный ворс подвергается трем видам разрушения: выпадение ворса с корпуса щетки, истирание рабочей поверхности щетки и усталостный излом ворсинок [3].

Выпадение ворса устраняется грамотной технологией изготовления инструмента, а второй и третий вид разрушения требуют более детального рассмотрения.

Удельное изнашивание, т.е. изнашивание торцовой рабочей контактирующей части проволочного элемента при обработке конструкционных сталей в режиме зачистки составляет 0,07...0,1 мм/ч, а общая стойкость щеток при многократном реверсировании составляет 200...300 часов [3]. Но эти данные справедливы

только при естественном износе гибких элементов, а при усталостном - они сокращаются в 15..30 раз в зависимости от используемого материала ворса.

Рассмотрим пути повышения стойкости гибкого инструмента при плакировании.

В качестве материала ворса возьмем хорошо зарекомендовавшую себя пружинную проволоку по ГОСТ 14959-79.

Расчет максимальных напряжений, возникающих в гибких элементах при деформационной обработке, произведем в соответствии с теорией гибких упругих стержней по формуле [4]:

$$\sigma_{\max i} = \frac{\omega_i}{\beta_i} \cdot P_{\max i} \cdot l_{II} \cdot \frac{d_g}{2J} \quad (1)$$

где  $\omega_L$  - моментный коэффициент подобия;  $\beta$  - силовой коэффициент подобия;  $P_{\max i}$  - максимальная контактная сила на участке скольжения ворса, Н;  $l_{II}$  - длина изгибающейся части проволочки, мм;  $d_g$  - диаметр ворсинки, мм;  $J$  - осевой момент инерции площади поперечного сечения, мм<sup>4</sup>.

Оценку усталостной прочности выполним, используя известное условие выносливости [5].

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_r}{k_0 \cdot \alpha_{к.д} \cdot \alpha_m} = [\sigma_r], \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max}$  - наибольшее напряжение, возникающее в проволочных элементах, МПа;  $\sigma_r$  - предел выносливости при несимметричном цикле, МПа;  $k_0$  - основной коэффициент запаса;  $\alpha_{к.д}$  - действительный коэффициент концентрации;  $\alpha_m$  - масштабный коэффициент.

На рис. 1 представлена зависимость максимальных напряжений, возникающих в проволочных элементах при скольжении сжато-изогнутого ворса по поверхности обрабатываемой детали и соответствующих пределов выносливости, от натяга  $N$  гибкого инструмента к обра-

батываемой поверхности ( $\sigma_{\max 1}$ ,  $[\sigma_r]_1$ ), радиуса фиктивной заделки  $r_3$  ( $\sigma_{\max 2}$ ,  $[\sigma_r]_2$ ) и длины изгибающейся части проволоочки  $l_{II}$  ( $\sigma_{\max 3}$ ,  $[\sigma_r]_3$ ).

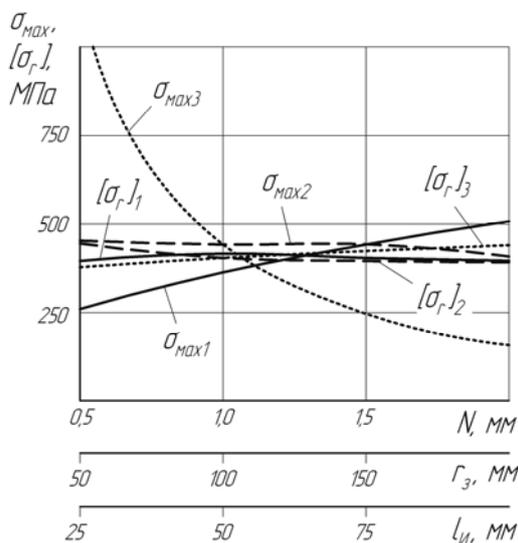


Рис. 1. Зависимость максимальных напряжений и предела выносливости от параметров гибкого инструмента и режимов обработки

Результаты представлены для условий деформационного плакирования плоских поверхностей (элемент материала покрытия – оловянная бронза БрОЦС5-5-5) гибким инструментом с диаметром ворса  $d_6 = 0,2$  мм при прочих параметрах:  $r_3 = 100$  мм;  $l_{II} = 50$  мм;  $N = 1,5$  мм.

Анализ зависимостей (рис. 1) позволяет подобрать для этих условий обработки необходимые параметры процесса плакирования, обеспечивающие с одной стороны получение поверхностного слоя требуемого качества, а с другой стороны, повышение выносливости проволоочных элементов, вплоть до обеспечения естественного износа.

В работе [6] предложено устройство, позволяющее подобрать требуемые параметры гибкого инструмента при минимальном времени перенастройки оборудования, а в работе [4] дан пример подбора режимов процесса ПГИ, обеспечивающих естественный износ ворса гибкого инструмента на всем диапазоне изменения натяга, используемого при плакировании.

Для проверки адекватности приведенных закономерностей был произведен САЕ-анализ напряженного состояния ворса механической щетки в программе NX Advanced Simulation.

В качестве объектов моделирования были выбраны гибкие элементы используемого ранее инструмента с параметрами:  $d_6 = 0,2$  мм;  $r_3 = 100$  мм при скольжении с натягом  $N = 1,5$  мм.

На рис. 2 и рис. 3 представлены соответственно зависимости изменения максимальных напряжений и максимальных прогибов, возникающих в гибких элементах при скольжении сжато-изогнутого ворса по поверхности обрабатываемого изделия, от варьирования длины изгибающейся части ворса.

На процентной оси показано расхождение расчетных и смоделированных значений, где наглядно видно, что максимальная разница значений при сравнении напряжений составляет около 5 %, а при сравнении прогибов не превышает 4,7 %.

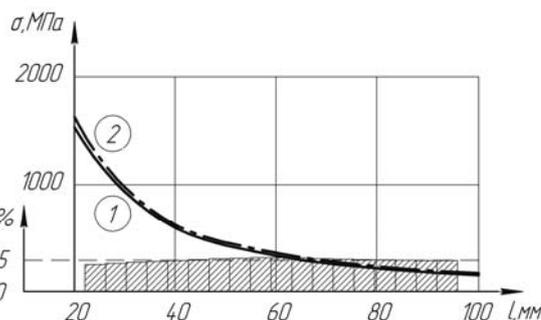


Рис. 2. Максимальные напряжения при изменении длины ворса:

1 – данные, рассчитанные по методике [4], 2 – данные моделирования в NX Advanced Simulation

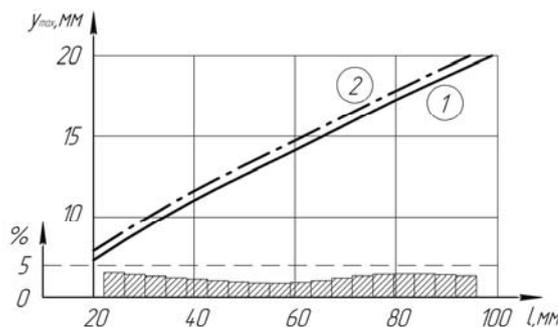


Рис. 3. Максимальные прогибы при изменении длины ворса: 1 – данные, рассчитанные по методике [4], 2 – данные моделирования в NX Advanced Simulation

Таким образом, напряжения, рассчитанные по формуле (1), как и максимальные прогибы показали хорошую корреляцию с результатами САЕ-моделирования. Данные результаты ценны тем, что еще раз подтверждают адекватность математической модели расчета геометрических и энергосиловых параметров зоны контакта, построенной посредством метода эллиптических параметров [4].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анцупов, В. П. Теория и практика плакирования изделий гибким инструментом / В. П. Анцупов. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 1999. – 241 с.

2. Завалицин, А. Н. Модификация поверхности металлических изделий с использованием покрытий / А. Н. Завалицин, О. М. Смирнов, С. А. Тулупов. – М. : Орбита-М, 2012. – 336 с.

3. Перепичка, Е. В. Очистно-упрочняющая обработка изделий щетками / Е. В. Перепичка. – М. : Машиностроение, 1989. – 136 с.

4. Зотов, А. В. Математическое моделирование расчета геометрических и энергосиловых параметров при деформационном плакировании / А. В. Зотов, О. И. Драчев // Перспективные технологии XXI века. В 2 книгах. К. 2 : монография / В. Н. Ардачев, Ю. В. Бахтина, П. П. Бескид и др. –

Одесса : КУПРИЕНКО СВ, 2013. – Разд. 2.4. – С. 79–94.

5. Никифоров Б. А. Исследование выносливости гибкого плакирующего инструмента и совершенствование его конструкции / Б. А. Никифоров, В. Б. Савельев, А. И. Боков, В. П. Анцупов // Процессы и оборудование металлургического производства: Сб. науч. тр. – Магнитогорск : МГТУ, 1999. С. 136–143.

6. Пат. 2360034 Российская Федерация, МПК С 23 С 24/02. Устройство для нанесения покрытий / Драчев О.И., Зотов А.В. ; заявитель и патентообладатель Тольяттинский государственный университет. – № 2007127977/02 ; заявл. 20.07.2007 ; опубл. 27.06.2009, Бюл. № 18. – 3 с.

УДК 629.124

*В. А. Зуев, Е. М. Грамузов, Д. А. Семенов*

**НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХОДКОСТИ ЛЕДОКОЛОВ**

**Нижегородский государственный технический университет  
имени Р. Е. Алексеева**

E-mail: Semenov-DMAL@yandex.ru, ShaNaMix@yandex.ru, ship@nntu.nnov.ru

Рассмотрены вопросы создания новой физической модели ледяного покрова для имитации модельных исследований взаимодействия судов со льдом и технологии проведения испытаний

*Ключевые слова:* ледовые условия, сопротивление, битый лед, судно, физико-механические характеристики.

The questions of creation of new physical model of ice cover for imitation model research of interaction of courts with ice and test operation technologies are considered.

*Keywords:* ice conditions, resistance, broken ice, vessel, physical and mechanical characteristics.

Модельные испытания в ледовом бассейне являются универсальным способом оценки ледовых качеств судов и плавучих сооружений в различных ледовых условиях.

Моделирование ледовых условий предполагает решение ряда задач, в том числе: разработку метода моделирования, модели лабораторного льда и методики эксперимента.

Теоретические основы моделирования движения судна во льдах были разработаны Л.М. Ногидом [1] и Ю.А. Шиманским [2].

Из нее вытекает требования к материалу модели льда:

$$\begin{aligned} \rho_n^л &= \rho_m^л; \quad \rho_n^в = \rho_m^в; \quad E_n = \frac{E_n}{\lambda}; \\ \sigma_{p\ m} &= \frac{\sigma_{p\ m}}{\lambda}; \quad v_n = v_m; \quad f_n = f_m; \\ \sigma_{p\ m} &= \frac{\sigma_{p\ m}}{\lambda}; \quad \left(\frac{E}{\sigma}\right)_n = \left(\frac{E}{\sigma}\right)_m, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho_л, \rho_в$  – плотность льда и воды,  $E, \mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона для льда и воды,  $\sigma_p$  – предел прочности корпуса льда на изгиб,  $f$  – коэффициент трения льда о корпус судна,  $\lambda$  – геометрический масштаб, «н», «м» - индексы относятся к натуре и модели.

Кроме того модель ледяного покрова должна иметь подобные диаграммы деформирова-

ния, вязкостные свойства. При выполнении условий (1) пересчет с модели на натуре производится по зависимостям [3]: толщина льда  $h_n = \lambda h_m$ ; скорость хода  $v_n = \sqrt{\lambda} v_m$ ; сопротивление  $R_n = \lambda^3 R_m$ .

Трудности выполнения условий (1) общеизвестны особенно в отношении упругих и прочностных характеристик ( $E, \sigma$ ), поэтому модель льда, полностью отвечающая этим условиям пока не создана. Сложность также заключается и в том, что при разрушении льда значительных толщин, которое, как и для малых происходит от изгиба, необходимо учитывать влияние смятия и среза в местах контакта с корпусом.

Обеспечение частичного подобия, наиболее полно удовлетворяющего требованиям при разрушении ледяного покрова и при движении в обломках льда, приводит к раздельному моделированию составляющих сопротивления [4].

Полное сопротивление при движении судна в сплошном льду можно предоставить в виде [1, 3, 4, 5, 6, 7, 10 и др.]:

$$R = R_p + R_{обл} + R_в, \quad (2)$$

где  $R_p$  - сопротивление от разрушения сплошного ледяного покрова и трения корпуса о кром-

ку неразрушенного льда;  $R_{обл}$  - сопротивление от взаимодействия корпуса с обломками льда (от притапливания, поворота, раздвигания обломков о корпус судна) и от трения обломков о корпус;  $R_b$  - сопротивление воды.

При моделировании выделяют чисто ледовое сопротивление и сопротивление воды:

$$R_{чл} = R_p + R_{обл}. \quad (3)$$

Одним из путей проведения испытаний моделей судов во льдах является использование в качестве модели естественного льда, намораживаемого в бассейне при отрицательных температурах воздуха. Естественный лед имеет повышенную прочность по сравнению со строгой теорией моделирования, поэтому, по-видимому, получило распространение мнение о невозможности его использования. Однако при использовании естественного льда компенсировать повышенную прочность при изгибе можно меньшей толщиной, чем требуется (моделируется разрушение ледяного покрова).

Для получения условий подобия при разрушении ледяного покрова ледоколом необходимо, чтобы напряженно-деформированное состояние ледяной пластины модели и натуры было подобным.

Для определения этих условий воспользуемся уравнением динамического изгиба системы «лед - вода» [3, 6, 7]. Масштаб толщины льда при этом:

$$\lambda_h = \lambda^{4/3} \lambda_p^{1/3} \lambda_E^{-1/3} \quad (4)$$

$$\text{где } \lambda_p = \frac{\rho_{вн}}{\rho_{вм}}, \quad \lambda_E = \frac{E_n}{E_m}.$$

Если испытания модели проводятся в пресной воде, пересчет на натуру ведется для этих же условий  $\lambda_p = 1,0$ . При пересчете на морскую воду при  $\rho_n \approx 1,025 \text{ т/м}^3$ ,  $\lambda_p = 1,008$  и его можно также принять равным 1,00.

При оценке модуля пересчета  $\lambda_E$  воспользуемся зависимостью изгибной прочности льда от толщины, полученной экспериментально В. В. Лавровым [8] ( $\sigma_p = \frac{0,6}{\sqrt[3]{h}}$  ( $h$  - в м;  $\sigma_p$  - в МПа)) и связью между изгибным напряжением и модулем упругости [9].

Учитывая эти зависимости можно получить:

$$\lambda_h = \lambda^{4/3} \lambda_E^{-1/3} = \lambda^{4/3} \lambda_h^{1/9} = \lambda^{3/2}, \quad (5)$$

Модуль упругости, измеренный динамическим методом, несколько различается для морского и пресного льда. Очевидно, это различие может сказываться, если испытания модели проводятся в пресной воде, а пересчет ведется на морскую воду. Однако, как показывают исследования [5], разброс не превышает допустимых значений, поэтому можно считать, что в принятых пределах солености модуль упругости в пресном и морском льду близки.

Для определения сопротивления при разрушении ледяного покрова воспользуемся выражением для наиболее полной характеристики работы на ломку льда:

$$A_p = \int_0^{w_p} P(w) dw, \quad (6)$$

где  $P(w)$  - вертикальная сила, приложенная к ледяной пластине,  $w$  - прогиб, при котором происходит полное разрушение льда.

Формулы проломной нагрузки и прогиба ледяной пластины под действием вертикальной силы [7] позволяют получить масштабы сил и прогибов, а учитывая (6), и масштаб работы:

$$\lambda_A = \lambda_p \lambda_w = \lambda_h^{5/2} \lambda_E^{-1/2} \quad (7)$$

Масштаб подобия сопротивления разрушения льда можно определить по формуле:

$$\lambda_R = \frac{R_{pn}}{R_{pm}} = \frac{A_{pn} l_m}{A_{pm} l_n} = \frac{1}{\lambda} \frac{A_{pn}}{A_{pm}} = \lambda^3 \quad (8)$$

Формула (8) не противоречит строгой теории моделирования, но расширяет поиск модели льда.

При моделировании составляющей сопротивления обломков  $R_{обл}$  используется критерий Фруда. Если  $\rho_n^l = \rho_m^l$ ,  $f_n = f_m$  и толщины обломков соответствуют  $h_n = \lambda h_m$ , то силы сопротивления пересчитываются по кубу масштаба  $R_n = \lambda^3 R_m$  [3,4,7].

Однако геометрическое подобие в отношении толщин льда, как было показано не выполняется ( $\lambda_h \neq \lambda$ ), поэтому для этой составляющей совместное моделирование сил разрушения и сопротивления обломков невозможно. Наибольшее несоответствие возникает из-за сил плавучести и трения обломков, линейно зависящих от толщины льда. Инерционные составляющие, связанные с поворотом и раздвиганием льдин, а так же с присоединенными массами воды меньше зависят от толщины, а больше от площади льдин. Поэтому для более строгого

моделирования  $R_p$  и  $R_{обл}$  используется способ экспериментального разделения составляющих, требующих дополнительных испытаний в битом льду. Кстати, эти испытания могут быть и самостоятельными при определении сопротивления при движении в битых льдах.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность характеристик битых льдов делают достаточно сложным точно зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку (в том числе форму и размеры отдельных льдин, их сплоченность). Поэтому в эксперименте приближенно моделируется движение судна в некоторой условной среде с осредненными характеристиками. Условия подобия соблюдаются лишь в отношении наиболее важных характеристик битого льда (толщины, сплоченности, ширине канала, коэффициента трения льда о корпус).

Это дает возможность моделировать битый лед с помощью пластинок из полиэтилена высокого давления ( $\rho_l=0,92 \text{ т/м}^2$ ,  $f \cong 0,15$ , что соответствует условиям подобия (1)) одинаковой формы и размеров и обеспечивать повторяемость опытов, которые можно проводить в обычном (не ледовом) бассейне.

При пересчете результатов на натуру используются формулы, полученные выше:

$$h_n = \lambda h_m; v_n = \sqrt{\lambda} v_m; R_{n_{обл}} = \lambda^3 R_{m_{обл}} \quad (9)$$

Формулы (9) справедливы, если испытания проводятся в пресной воде и пересчет ведется на пресную воду. При пересчете на морскую воду необходимо вводить коэффициент, учитывающий изменение сил плавучести и трения из-за изменения плотности воды и льда. Этот коэффициент имеет вид:

$$k = \frac{\rho_n^g - \rho_n^l}{\rho_m^g - \rho_m^l}; R_{обл} = k \lambda^3 R^3 \quad (10)$$

Для получения полного сопротивления льда при отдельном моделировании необходимо:

а) из сопротивления модели вычесть сопротивление обломков и воды, полученные в дополнительных испытаниях в тонком битом льду после прогонки модели в сплошном льду;

б) сопротивление разрушения льда пересчитывается по зависимостям  $h_n = \lambda^{3/2} h_m$ ,  $v_n = \sqrt{\lambda} v_m$ ,  $R_{p_n} = \lambda^3 R_{p_m}$ ;

в) проводятся испытания в среде полиэтиленовых пластинок, и определяется сопротивление обломков  $h_n = \lambda h_m$ ,  $v_n = \sqrt{\lambda} v_m$ ,  $R_{n_{обл}} = \lambda^3 R_{m_{обл}}$ ;

г) сопротивление воды определяется отдельно общепринятым способом;

д) полное сопротивление натуре  $R_n = R_{p_n} + R_{обл_n}$ .

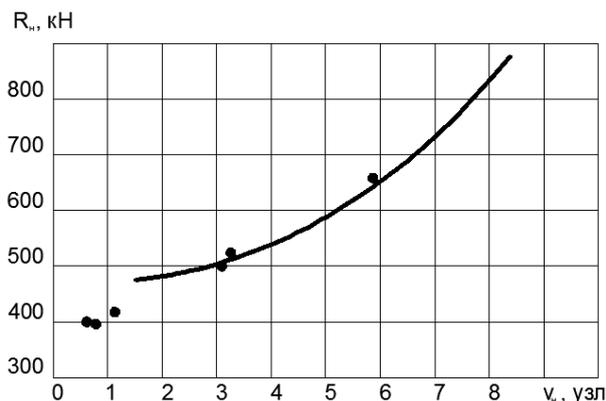


Рис. 1. Полное сопротивление во льду толщиной 0,7 м: — данные натуральных испытаний, • - пересчет на натуру.



Рис. 2. Фрагменты движения ледокола во льду

По предлагаемой методике были проведены испытания масштабной серии моделей речного ледокола Р-47, ледоколов пр.16 и 1105, тестовые испытания морского ледокола R-50, которые показали удовлетворительную сходимость с натурными результатами (рис. 1). Фрагменты испытаний в тонком сплошном и битом льду приведены на рис. 2.

Кроме этого подвергался проверке упрощенный метод пересчета без разделения сопротивления на составляющие. Эксперименты показали, что удовлетворительных результатов можно добиться, пересчитывая полное сопротивление модели по зависимостям [7]

$$h_n = \lambda^{4/3} \lambda; \quad v_n = \sqrt{\lambda} v_m; \quad R_n = \lambda^3 R_m.$$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ногид Л.М.* Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и в битых льдах. Труды ЛКИ, вып. XXVIII. – Л. - С.179-185.

2. *Шиманский Ю.А.* Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. Современные вопросы ледоколостроения / Ю.А. Шиманский. – Л.: Гидрометеоздат, 1960., 89 с.

3. *Зуев В.А., Грамузов Е.М., Семенов Д.А.* Моделирование взаимодействия судна со льдом // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова: СПб., 2011. Вып. 63 (347), - с.51-58.

4. *Семенов Д.А.* Моделирование солёности воды и льда при модельных испытаниях судов в битых льдах. / Известия КГТУ, научный журнал Калининградского государственного технического университета, Калининград, 2012, №25, с.127-134.

5. *Доронин Ю.П.* Морской лед/ Ю.П. Доронин, Д.Е. Хейсин. – Л.: Гидрометеоздат, 1975, 318 с.

6. *Зуев В.А.* Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. - Л.: Судостроение, 1986 г., 206 с.

7. *Ионов Б.П.* Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001, 512 с.

8. *Лавров В.В.* Деформация и прочность льда / В.В. Лавров. – Л.: Гидрометеоздат, 1969, 206 с.

9. *Богородский В.В.* Лед / В.В. Богородский, В.П. Гаврило. – Л.: Гидрометеоздат, 1980, 384 с.

10. *Сазонов К.Е.* Теоретические основы плавания судов во льдах / К.Е. Сазонов. - СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010 г., 274 с.

УДК 621.9.048.6

*О. Ф. Корпелянский, С. И. Агапов, А. Б. Травов*

### ВЛИЯНИЕ ВВЕДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЗОНУ ПЕРЕТОЧКИ ОСЕВОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА РАДИУС ЗАКРУГЛЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: stanki@vstu.ru

В статье описывается влияние введения ультразвуковых колебаний в зону переточки режущего инструмента на формирование радиуса закругления режущих кромок. Также приводится описание изменения этого параметра в течение времени работы инструмента.

*Ключевые слова:* осевой инструмент, заточка, радиус закругления режущей кромки.

The article describes the impact of the introduction of ultrasound vibrations in the resharpening area of cutting tools for the formation of the curvature radius of cutting edges. It also includes a description of the change this parameter for the time of work tools.

*Keywords:* axial tool, the sharpening. curvature radius of cutting edge.

Предлагаемый авторами способ заточки осевого металлорежущего инструмента был подробно описан в нескольких ранее опубликованных работах авторов (1, 2). Также в этих работах описаны закономерности изменения некоторых технологических факторов, при использовании предлагаемого авторами способа заточки инструмента. В частности установлено, что шероховатость режущих поверхностей инструмента, заточенного с применением ультразвуковых колебаний существенно снижается, по отношению к традиционно заточенному инструменту. Эта особенность справедлива для

всех видов рассмотренного осевого режущего инструмента (сверла, зенкера, развертки). Также установлено, что отверстия, обработанные инструментом, заточенным предложенным способом имеют более низкую шероховатость.

Вследствие полученных экспериментальных результатов по снижению шероховатости поверхности деталей, обработанных инструментом, заточенным с введением ультразвуковых колебаний в зону переточки, перед авторами встала задача определить основные факторы присущие инструменту, влияющие на качество поверхности детали при обработке отверстий.

Многие авторы сходятся во мнении, что на качество обработанной поверхности детали влияют следующие факторы:

- технологические параметры резания (скорость, подача, глубина)
- шероховатость режущих кромок инструмента
- силы резания
- твердость режущей поверхности инструмента
- остаточные поверхностные напряжения на рабочих поверхностях инструмента

Однако, одним из ключевых факторов, влияющих на качество обработанной поверхности является «острота режущего клина», которая по сути зависит от двух параметров:

- угол заострения режущего клина (фактически неизменный параметр в процессе обработки);
- радиус закругления режущей кромки инструмента (параметр, непосредственно характеризующий остроту режущего клина, зависящий от нескольких факторов и существенно изменяющийся в процессе обработки);

Как выяснилось в ходе экспериментов радиус закругления режущей кромки инструмента, один из ключевых факторов, влияющих на качество обработанной поверхности.

Эксперимент проводился следующим образом: заточенный инструмент устанавливался в патрон станка и производилась обработка отверстий. Через каждые пять минут наработки, инструмент снимался и с режущего клина делался оттиск на нумерованной свинцовой пластине.

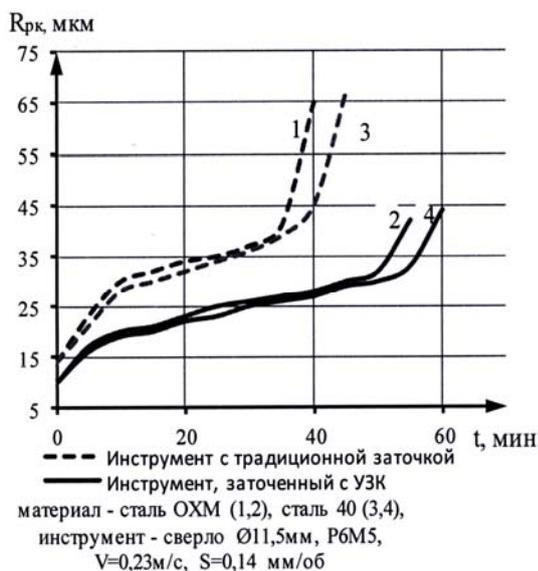


Рис. 1. Зависимость радиуса закругления режущей кромки инструмента от времени наработки при сверлении отверстий

тине. Радиус закругления режущей кромки определялся под микроскопом по оттискам на пластинах, а на соответствующем обработанном отверстии замерялся параметр шероховатости. Результаты данного эксперимента при сверлении представлены на рис. 1.

Как видно из приведенных графиков, инструмент заточенный с введением ультразвуковых колебаний в зону переточки изначально имеет меньший радиус закругления режущих кромок  $R_{рк}$ , предложенный способ заточки позволил снизить данный параметр для сверл из быстрорежущей стали марки Р6М5 на 28%.

Результаты аналогичных опытов, проведенных при зенкероании, представлены на рис. 2. При заточке зенкеров предложенным способом, параметр  $R_{рк}$  снизился на 33%. Помимо получения изначально более низкой величина  $R_{рк}$ , также наблюдается существенно более низкий его рост, по отношению к традиционно заточенному инструменту, о чем говорят более пологие линии 3 и 4 на графике.

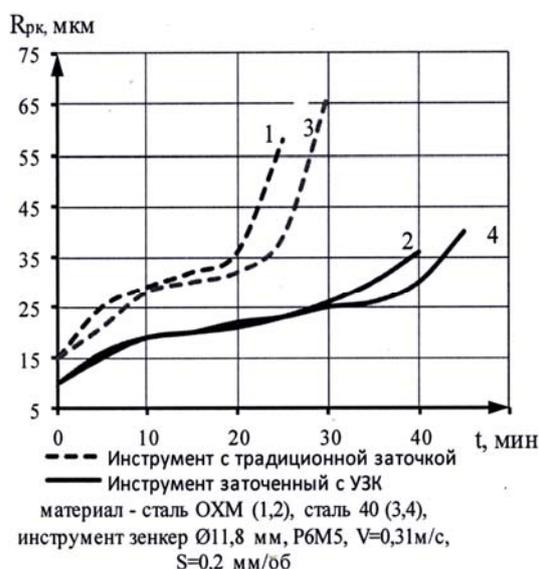


Рис. 2. Зависимость радиуса закругления режущей кромки инструмента от времени наработки при зенкероании отверстий

Характер изменения радиуса закругления режущей кромки инструмента очень схож с характером износа металлорежущего инструмента – изначально наблюдается существенное увеличение данной величины, происходящее в первые 5 – 10 минут наработки. Затем следует стабильное и плавное увеличение радиуса  $R_{рк}$ , характерное периоду устойчивой работы при рассмотрении износа инструмента. А затем происходит резкое увеличение скорости роста радиуса  $R_{рк}$ , характерное началу катастрофического износа инструмента.

На рис. 3 представлен график, отражающий результаты аналогичного эксперимента, проведенного для процесса развертывания. Изначально, развертка, заточенная с введением ультразвуковых колебаний в зону переточки, имела радиус закругления режущей кромки на 25% ниже относительно данного параметра инструмента заточенного традиционным способом. Но наиболее интересной особенностью, наблюдаемой на рис.2 и рис.3, является тот момент, что по истечению периода стойкости инструмента, который определялся величиной максимально допустимой фаски износа по задней поверхности инструмента ( $h_{z,max}=0,45$  мм), по достижении которой инструмент отправлялся на переточку, изменения радиуса закругления режущей кромки инструмента, носит характер плавного увеличения. Т.е. в момент на-

чала катастрофического износа инструмента, когда величина фаски износа начинает резко возрастать в течение небольшого очередного периода наработки, кривые характеризующие изменение радиуса закругления режущей кромки еще не успевают дойти до точки начала резкого увеличения данного параметра. Данная особенность наблюдается только на получистовых и чистовых операциях, что можно объяснить небольшими силами и глубиной резания и соответственно невысокими температурами в зоне снятия стружки. В виду вышесказанного, радиус  $R_{рк}$  инструмента, заточенного ранее предложенным авторами способом, по истечении периода стойкости инструмента при чистовых операциях удалось снизить на 58% при обработке стали 40 и на 50% при обработке стали ОХМ.

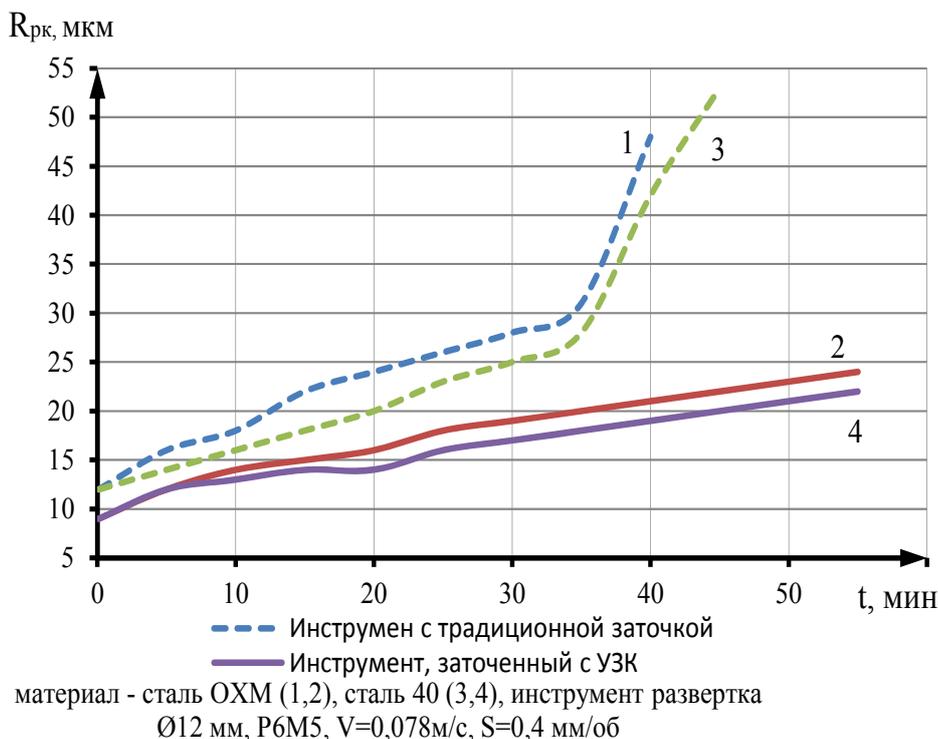


Рис. 3. Зависимость радиуса закругления режущей кромки инструмента от времени наработки при развертывании отверстий

Описанные эксперименты проводились на вертикально-сверлильном станке мод. 2Н135. Заточка сверл и зенкеров производилась на заточном полуавтоматическом станке мод. 3Г653, а разверток на заточном станке мод. 3М642. Для введения ультразвуковых колебаний в зону переточки использовалось специально разработанное и изготовленное приспособление, описанное в статье (1).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корпелянский, О. Ф. Способ заточки осевого инструмента с введением ультразвуковых колебаний в зону перешлифовки /О.Ф. Корпелянский//Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 7/ВолгГТУ. -Волгоград, 2013. - (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»).
2. Корпелянский, О. Ф. Ультразвуковое приспособление для заточки осевого инструмента /О.Ф. Корпелянский//Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 7 / ВолгГТУ. -Волгоград, 2011. -(Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»).

3. Смольников, Н.Я. Анализ возможности введения ультразвуковых колебаний в зону резания /Н.Я. Смольников, С.И. Агапов, Н.А. Федянова, О.Ф. Корпелянский// Известия ВолгГТУ: междуз. сб. науч. ст. № 5/ВолгГТУ. -

Волгоград, 2009. -(Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»).

4. Марков А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов - М.: Машиностроение, 1968. - 367 с.

УДК 621.9.015 + 621.91.01

*А. Н. Кравцов*

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОЙ СТАНДАРТИЗАЦИИ**

**Закрытое акционерное общество «ОНИКС» (г. Ирбит, Россия)**

E-mail:zao-oniks@yandex.ru

Рассмотрена система комплексных параметров, применяемая при обеспечении эксплуатационных характеристик поверхностей деталей в условиях многоуровневой стандартизации.

*Ключевые слова:* эксплуатационные характеристики, поверхностный слой, качество, стандартизация.

The system of complex state variables is considered with was applied to technological maintenance of the field-performance data of surfaces of parts in a multi-level standardization.

*Keywords:* field-performance data, surface layer, quality, standardization.

В условиях рыночной экономики в машиностроении на первый план вышли вопросы качества изделий. Опыт плановой экономики показал несостоятельность жесткой государственной регламентации и стандартизации, однако полный отказ от государственных стандартов не дает желаемых результатов. Рассматривая вопрос стандартизации в машиностроении, при обеспечении качества изделий, с современных позиций формализации можно выделить три уровня стандартизации: а) применение стандартов ISO и государственных стандартов ГОСТ, как массива накопленного опыта достижений науки и производства (первый уровень); б) отраслевой уровень стандартизации (второй); в) производственная стандартизация (третий).

На стадии разработки промышленного образца первый уровень вполне способен обеспечить базы данных САПР для формирования массива исходных данных. При этом необходимо отметить, что этот уровень требует постоянных фундаментальных научных и экспериментальных исследований, что позволит ему отражать последние достижения науки и производства. По своему назначению эти исследования требуют общегосударственного финансирования и государственной поддержки. Первый уровень должен обеспечить общность терминологии и стандартизацию основных понятий. Формализация терминологии с позиций этого уровня остается актуальной задачей фундаментальных научных исследований и организационных решений стандартизации.

Второй уровень стандартизации отличен от первого, стандарты этого уровня должны взаимно учитывать потребности производителя и потребителя. Они формируются на основе функционально-стоимостного анализа (ФСА), который представляет собой метод системного исследования функций объекта, направленный на минимизацию затрат в сферах проектирования, производства и эксплуатации. А также функционально-физического анализа (ФФА), анализа причин и последствий дефектов для потребителей (FMEA), развертывание функций качества (QFD) (см. [1]). Такой подход формирования отраслевых стандартов используется в большинстве развитых стран, как средство конкурентной борьбы и особенно эффективен при использовании CALS-технологий [1].

Стандарты второго уровня должны взаимно учитывать потребности производителя и потребителя, и поэтому необходимо представить потребителю объективные доказательства способности поставщика к производству товаров и услуг определенного уровня качества, а также конкурентоспособности, повышения обеспечения климата доверия.

Под обеспечением качества изделий понимается, в большей степени, обеспечение эксплуатационных характеристик (свойств) контактирующих поверхностей деталей. Для обеспечения качества поверхностей в настоящее время применяется система параметров (параметрический подход), основанная на исторически сложившихся условиях разделения неров-

ностей на шероховатость, волнистость, микро-рельеф и макро-отклонения [2]. Этот подход создает возможности наиболее доступной регламентации состояния поверхностей контактирующих деталей.

Перечень свойств, характеризующих качество для каждого изделия или их определенной группы, определяются условиями рынка. Задача отраслевой стандартизации состоит в том, чтобы сделать их понятными для производителя и потребителя, описать и формализовать эти свойства. В научных исследованиях [1] предлагается разделить их на три вида: эксплуатационные, экономические и производственно технические. В рамках ГОСТ 15467-79 (Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения) была сделана попытка введения формализованных показателей, некоторые из которых могут использоваться при создании базы данных показателей качества изделий. Задача отраслевой стандартизации состоит в том, чтобы разработать регламенты для различных их видов.

Производственно-технические (эксплуатационные характеристики (ЭС), в этой статье под аббревиатурой «ЭС» понимается именно этот термин) – это свойства, имеющие вполне определенно выраженную и эмпирически описанную характеристику и соответствующую ей единицу измерения. Экономические - это свойства, имеющие формально выраженные экономические категории, оцениваемые в денежном выражении. Эксплуатационные - это свойства, имеющие аналитические характеристики, оцениваемые на основе статистических и вероятностных данных исследования.

В условиях рынка весь набор свойств, влияет на вероятность успешного продвижения на потребительском рынке, а степень влияния можно оценивать показателями весомости [3]. Показатели качества являются характеристиками изделия в целом как продукта потребления и обеспечиваются системой конкретных свойств деталей и узлов. Решение задач стандартизации второго уровня дают возможность формализовать данные о конструкции изделия, также они занимают значительную часть в общем объеме информации, используемой в ходе его жизненного цикла. На основе этих данных решается ряд задач производства, материально-технического снабжения, сбыта и эксплуатации продукции.

Третий уровень стандартизации представляет собой систему формализованных правил и

приемов, применяемых при производстве, как правило, это НОУ-ХАУ. Стандарты этого уровня - это стандарты организации, позволяющие техническими, организационными и др. методами достичь качества технологических регламентов, разработанных и принятых при выработке стандартов второго уровня (производственная стандартизация).

Как показывают исследования в работах [2, 3], применение ГОСТ 2789-73 (Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики) не решает проблемы обеспечения эксплуатационных характеристик поверхностного слоя деталей, т.к. его состояние характеризуется геометрическими, физико-механическими параметрами, многие из которых не охватывает стандарт. Эксплуатационный показатель узла трения представляется в виде [2]:  $I = \Phi(Q_1; Q_2; Q_3 \dots Q_n)$ , а комплексные параметры поверхностей контактирующих деталей:  $Q_1 = f(MO_1, B_1, Ш_1, Y_1, H_1, \Phi C_1, \Phi X C_1), \dots, Q_i = f(MO_i, B_i, Ш_i, Y_i, H_i, \Phi C_i, \Phi X C_i)$ . Здесь,  $MO_i, B_i, Ш_i, Y_i, H_i, \Phi C_i, \Phi X C_i$  – показатели макроотклонений, волнистости, шероховатости, упрочнения, напряженности, физического и физико-химического состояния контактирующих поверхностей соответственно;  $Q_1, \dots, Q_n$  – комплексные параметры состояния поверхностей;  $I$  – эксплуатационный показатель;

Проблема решается при введении системы параметров, комплексно характеризующих эксплуатационные характеристики деталей машин, которые рассмотрены в работе [2]. На базе принятой системы параметров применяются комплексные параметры, характеризующие несущую способность и равновесное состояние поверхностей при трении и износе, а также возможность использовать их для непосредственного обеспечения эксплуатационных характеристик.

Комплексный параметр состояния поверхности характеризует определенную ее эксплуатационную характеристику через систему параметров качества поверхности, как например  $C_x$  [2], он изменяет свои значения в процессе приработки поверхностей, не завися от исходных значений, полученных обработкой. При этом комплексные параметры состояния поверхности являются безразмерными комплексами. К таким параметрам относятся: комплексный параметр равновесного состояния поверхностей трения  $C_x$ , комплексный параметр несущей способности (контактная жест-

кость)  $\Pi$ , комплексный параметр, характеризующий усталостную прочность поверхностей  $C_y$ , комплексный параметр поверхностей, взаимодействующих с внешней средой  $F$ , комплексный параметр посадок с натягом поверхностей  $C_M$ , комплексный параметр шероховатости поверхностей, характеризующий трение и износ  $\Delta$  [2], комплексный параметр равномерного износа поверхностей  $I$ , комплексный параметр долговечности поверхностей  $D$ , комплексный параметр подвижных упорных соединений поверхностей  $H$  [3], комплексный параметр искрозащиты и взрывозащиты соединений  $K_x$  и др.

Использование комплексных параметров состояния поверхностей при построении стандартов производственных организаций наиболее удобно производить при помощи системной оптимизации технологического обеспечения эксплуатационных характеристик, которая рассмотрена в работе [3]. Она основана на двухступенчатой схеме технологического обеспечения эксплуатационных характеристик с разделением задач технолога и конструктора, и заданием комплексных параметров на каждой из этих стадий. При этом критериями по определению метода обработки на финишном этапе являются необходимые условия максимума площадей области эффективного значения ЭС

при рассматриваемом методе обработки (ОЭМО), минимума проекции функции затрат на их ось, а также максимума плотности распределения вероятности при ограниченном наборе регламентируемых параметрах состояния поверхности (см. рис. 1 и табл. 1).

Выходной информацией конструктора и исходными данными для технолога служит область регламентируемых значений ЭС - ОРЭС. Она включает все ЭС, которые конструктор задает технологу. А значение этой области не зависит от, тех, которые достигнуты технологически. Нахождение наиболее оптимального варианта технологического обеспечения эксплуатационных характеристик, на стадии подготовки производства, эффективно решается с применением принципов функционально-стоимостного анализа ФСА. Эта задача решена в работе [3].

В случае непересечения области ОЭМО с областью ОРЭС возможны следующие пути решения задачи технологического обеспечения эксплуатационных характеристик: а) смена метода обработки поверхности на финишном этапе технологического процесса; б) смена регламентируемого(-ых) параметра(ов) состояния поверхностного слоя; в) увеличение числа этапов обработки поверхностей в технологическом процессе.

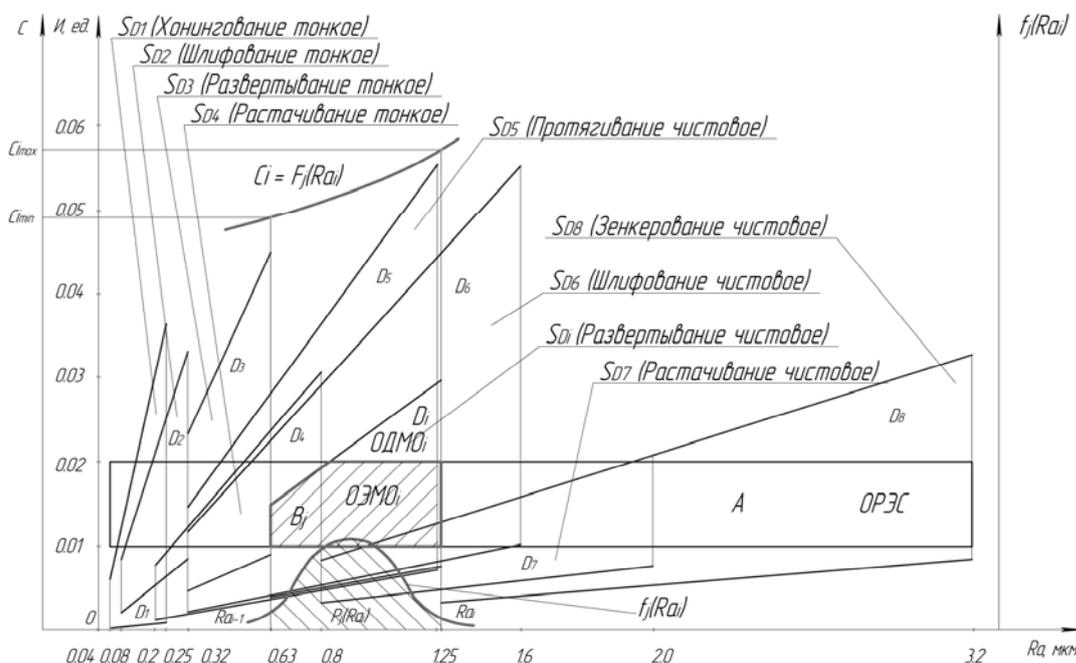


Рис. 1. Схема расположения областей ОДМО\* комплексного параметра И при обработке внутренних поверхностей тел вращения\*\*:

(\* - ОДМО – область достижимых значений эксплуатационных характеристик методом обработки поверхностей; \*\* - схемы построены для поверхностей деталей из конструкционных сталей; ОРЭС – зависит только от физико-механических свойств поверхности и условий эксплуатации; ОДМО – определяется системой параметров поверхностного слоя, полученного после обработки; ОЭМО – определит набор параметров поверхностного слоя, необходимых для обеспечения заданной эксплуатационной характеристики поверхности)

**Критерии выбора оптимального варианта технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей деталей и точности конструкторских и технологических размеров**

Критерий оптимальности технологического перехода (рис. 1)		
I-й критерий оптимальности	II-й критерий оптимальности	III-й критерий оптимальности
Максимум площади ОЭМО (СОЭМО)	Минимум величины затрат $C_i$	Максимум вероятности $P_j(Ra_i)$
$\forall MOEDEDC ;$ $\exists B_{jonn}. S_D \rightarrow \max ;$ $D = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_i\};$ $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_i\};$	$\exists B_{jonn}. C_i \rightarrow \min ;$ $C_i = F(x_i); A \cap D = B ;$ $B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_j\}; B_{onn} \in B ;$	$\exists B_{jonn}. P_j(Ra_i) \rightarrow \max ;$
Критерий оптимальности технологической операции (рис. 2)		
I-й критерий оптимальности	II-й критерий оптимальности	
Обеспечение точности линейных технологических размеров	Обеспечение точности линейных конструкторских размеров	
$Z_{Lmax}/Z_{Lmin} < 3$	$TK_i \geq \sum TL_i$	
III-й критерий оптимальности	IV-й критерий оптимальности	
Обеспечение точности технологических размеров основных отверстий	Обеспечение точности конструкторских размеров основных отверстий	
$Z_{Rmax}/Z_{Rmin} < 3$	$TR_{Ki} \geq \sum TR_i$	

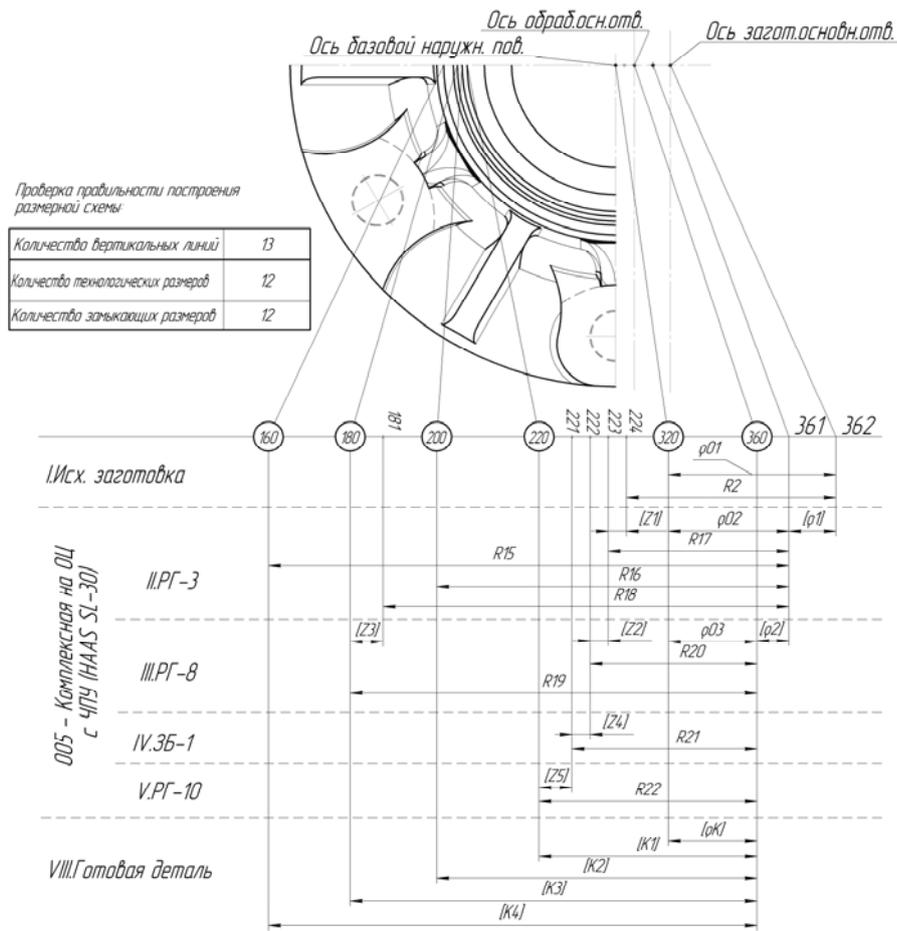


Рис. 2. Размерная схема обработки основного отверстия (на одном установе):  $T_{Ki}$  – допуски размеров, заданных конструктором,  $T_{Ri}$  – допуски технологических размеров, ПГ<sub>j</sub> и ЗБ<sub>k</sub> – позиции инструментальной головки технологического оборудования и задняя бабка соответственно, Z<sub>i</sub> и ρ – номинальные припуски и величина отклонения формы поверхности при изготовлении

При оптимизации технологических процессов важно определить критерии оптимальности, которые могут заключаться не только в обеспечении эксплуатационных характеристик поверхностей детали, но и точность ее размеров. А также уровни оптимальности, как например перехода и операции.

Таким образом, на уровне перехода, это необходимые условия максимума площадей ОЭМО ( $S_{ОЭМО}$ ), которая образуется пересечением области достижимых значений ЭС при рассматриваемом методе обработки (ОДМО) с областью ОРЭС. А также минимума проекции функции затрат  $C_i$  на ось  $C$ , и максимума плотности распределения вероятности  $P_j(Ra_i)$  (см. таблицу).

И, на уровне операции, соблюдение условия отношения максимального и минимального припусков  $Z_{Lmax}/Z_{Lmin} < 3$  ( $Z_{Rmax}/Z_{Rmin} < 3$ ) на чистовых и отделочных переходах, а также то, чтобы допуск конструкторского размера  $TK_i$  ( $TR_{Ki}$  – при наличии основных отверстий в конструкции заготовки) был больше, либо равным сумме допусков технологических размеров  $TL_i$  ( $TR_i$ ), входящих в размерную цепь:  $TK_i \geq \sum TL_i$  ( $TR_{Ki} \geq \sum TR_i$ ) (рис. 2).

При необеспечении условий оптимальности технологической операции (см. таблицу) необходимо перестроить размерные схемы технологического процесса таким образом, чтобы (I – IV) критерии не нарушались.

Этого можно добиться различными способами, некоторые из которых, могут быть такими: увеличение числа этапов обработки поверхностей, в т.ч. и замена методов их обработки, смена технологических баз, замена типа и способа получения исходной заготовки и другие.

Применение стандартов с разделением их по уровням применения позволяют эффективно регулировать качество эксплуатационных характеристик изделий. Как показывают результаты работ [2, 3], государственные стандарты не решают задачи обеспечения гибкости в подходах обеспечения качества, однако этот информационный пласт открывает возможности создания базы общероссийских и отраслевых стандартов. Данные задачи решаются при применении комплексных параметров состояния поверхностного слоя при обеспечении эксплуатационных характеристик изделий на третьем уровне стандартизации (производственная стандартизация).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломенцев Ю.М. Информационно-вычислительные системы в машиностроении: CALS-технологии [Текст] / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, В.В. Павлов, А.В. Рыбаков. – М.: «Наука», 2003. – 292 с.: ил.
2. Инженерия поверхностей деталей [Текст] / Колл. авт.; Под ред. А.Г. Сулова. М.: «Машиностроение», 2008. – 320 с.: ил.
3. Инструментальные средства менеджмента [Текст] / В.Н. Тисенко [и др.]; Закрытое акционерное общество "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур); - Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 217 с.: ил.

УДК 621.923

*О. А. Курсин, Н. И. Егоров, И. Ф. Кожемякин, И. С. Филатов, М. Ю. Полянчикова, С. Ч. Као*

### ВЛИЯНИЕ ПРИСУТСТВИЯ ВОДОРОДА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ЗАГОТОВКИ НА МИКРОГЕОМЕТРИЮ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФИНИШНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vstu.ru

В работе исследованы проблемы, возникающие при хонинговании низкоуглеродистых сталей. Предложены пути повышения качества поверхности при финишной обработке. Рассмотрены преимущества наводороживания перед обработкой над цементацией и азотированием. Изучена микрогеометрия обработанных хонингованием поверхностей различной твердости.

*Ключевые слова:* хонингование, наводороживание, качество поверхности, аустенитная сталь, абразивная обработка.

The paper studies problems arising at honing of low carbon steels. Propose ways improving the quality of surface at finishing processing. Discusses the advantages hydrogen saturation of the surface prior to processing over carburizing and nitriding. Studied microgeometry processed honing surfaces of different hardness.

*Keywords:* honing, saturation of the surface by hydrogen, quality of a surface, steel of an austenite class, abrasive processing.

Развитие современного машиностроения, повышение производительности и качества поверхности требует совершенствования техно-

логических процессов обработки деталей машин, в особенности на финишных операциях. Именно на окончательных операциях формиру-

ется поверхностный слой детали, определяющий их эксплуатационные свойства.

Однако на производстве при финишной абразивной обработке гидро- пневмоцилиндров, цилиндров компрессоров из «мягких» низкоуглеродистых морозостойких и аустенитных коррозионностойких сталей в нефтяной, химической и пищевой промышленности не удается достичь высокого качества обработанной поверхности: образуется большая шероховатость, задиры и наплывы металла вследствие пластичности обрабатываемого материала. Для повышения качества требуется многократная машинно-ручная доводка или полирование, что характеризуется высокой трудоемкостью и нестабильностью качества обработанной поверхности.

В настоящее время для обработки гидро- и пневмоцилиндров из подобных материалов на производстве часто применяют раскатывание вместо хонингования. Однако, раскатывание отверстий дает низкую точность размеров и геометрической формы. Также, после раскатывания возможен перенаклеп поверхности, что приводит к образованию микротрещин и разрушению поверхности в процессе работы.

Кроме того, известные прогрессивные методы финишной обработки хонингованием позволяют улучшить микрогеометрию на «мягких» материалах не более чем на 20%.

Для решения данной проблемы предлагается повышать твердость поверхности перед обработкой. Установлено, что твердость поверхности оказывает существенное влияние на величину ее шероховатости. Так, например, при хонинговании «мягкой» аустенитной стали 12Х18Н10Т (НВ 270) достигается параметр шероховатости  $Ra$  1,3 мкм, а при обработке закаленной стали ШХ15 (HRC 58)  $Ra = 0,3$  мкм.

Известные способы повышения твердости поверхности, такие как азотирование [1], цементация и нитроцементация [2], лазерное легирование поверхностного слоя [3] имеют общие недостатки: снижение коррозионной стойкости изделий, вследствие выбивания атомов хрома атомами углерода или азота, что особенно значимо для химической и пищевой промышленности, а также возникают тепловые деформации, возникающие при распределении внутренних напряжений, вследствие нагрева до температур 700-950 °С. Поэтому данные направления в ряде случаев неприменимы.

Авторами, для устранения указанных недостатков, предлагается перед процессом абра-

зивной обработки производить следующие виды низкотемпературной обработки: опережающее пластическое деформирование [4, 5] или наводороживание [6]. Однако, опережающее пластическое деформирование, при обработке морозостойких сталей типа 09Г2С, в отличие от аустенитных, дает слабый эффект. Следовательно, рассмотрим процесс наводороживания.

Экспериментально установлено, что насыщение поверхности водородом при помощи электролиза [6] эффективно повышает твердость низкоуглеродистых морозостойких и нержавеющей сталей типа 09Г2С, Ст3, 12Х18Н10Т и т.д.

Рассмотрим более подробно способ хонингования низкоуглеродистых сталей с предварительным наводороживанием.

Данный способ заключается в том, что перед обработкой хонингованием поверхность предварительно насыщают водородом. Насыщение поверхности водородом производится в электролитической установке с титановым анодом, покрытым окисью рутения (рис. 1).

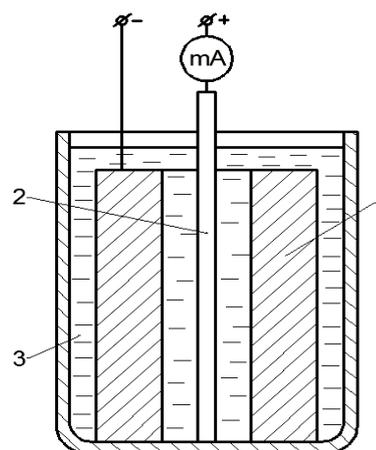


Рис. 1. Схема электролитической установки:  
1 - заготовка; 2 - титановый анод; 3 - электрод

В качестве электролита используется 0,1 н. р-р  $H_2SO_4$  + 0,5 г/литр тиомочевины. Плотность тока наводороживания составляет 0,75 – 2  $mA/cm^2$ .

Предлагаемый способ хонингования с предварительным наводороживанием позволяет снизить параметр шероховатости  $Ra$  до 40%. Это видно из представленных профилограмм (рис. 2, 3).

Полученный результат достигается увеличением твердости поверхности, вследствие чего абразивные зерна при хонинговании внедряются на меньшую глубину, что уменьшает следы обработки и наплывы металла вдоль следа. Это

может значительно увеличить срок службы изделия и его конкурентоспособность.

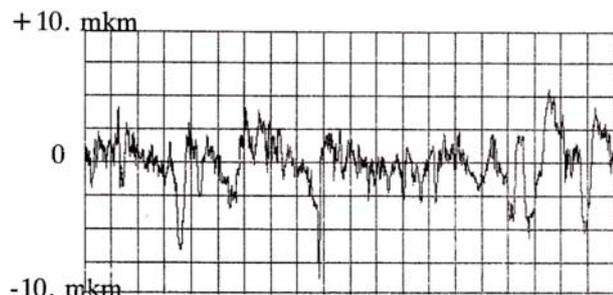


Рис. 2. Микропрофиль поверхности, полученной после обработки нержавеющей стали 12X18H10T обычным способом хонингования ( $R_a = 1,35 \text{ мкм}$ )

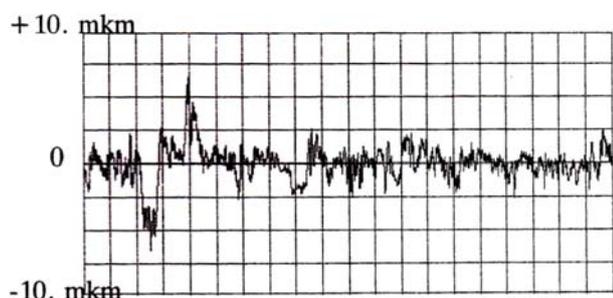


Рис. 3. Микропрофиль поверхности, полученной после обработки нержавеющей стали 12X18H10T хонингованием с предварительным наводораживанием ( $R_a = 0,85 \text{ мкм}$ )

Увеличение твердости достигается в результате того, что в поверхность поступает водород в атомарном состоянии и превращается в молекулярное, увеличивает объем, разжимает поверхность изнутри и вызывает ее наклеп. В процессе наводораживания происходят следующие процессы: общее уравнение диссоциации электролита –  $H_2SO_4 \rightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}$ ; процесс происходящий на катоде (поверхность заготовки) – притягиваются катионы  $H^+$ , восстанавливаются ионы  $H^+$ :  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ ; процесс на аноде (титановый стержень) – притягиваются анионы  $SO_4^{2-}$  и молекулы  $H_2O$ , окисляется вода:  $H_2O - 2e^- \rightarrow 1/2O_2 + 2H^+$ .

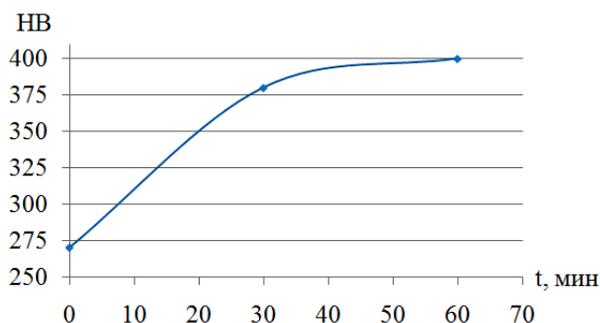


Рис. 4. Зависимость твердости НВ от времени наводораживания нержавеющей стали 12X18H10T

Оптимальное время наводораживания составляет 30 мин., так как интенсивность процесса с течением времени снижается. Зависимость твердости поверхности от времени наводораживания приведена на рис. 4.

Кроме того, предлагаемый способ обработки позволяет снизить износ абразивного инструмента до 20% благодаря уменьшению сил резания из-за меньшей глубины внедрения зерен, что снижает затраты на изготовление изделий.

Предварительное наводораживание поверхностного слоя также положительно отражается на качестве обработанной поверхности при хонинговании с возрастающей скоростью резания [7, 8] и другими прогрессивными способами.

Таким образом, предлагаемые модернизации известных способов финишной абразивной обработки позволяет эффективно применять их и на «мягких» труднообрабатываемых сталях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лахтин, Ю.М.* Азотирование стали / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган. - М.: Машиностроение, 1976. – С. 81 – 88.
2. *Прженосил, Б.* Нитроцементация. М.: Машиностроение, 1969. – 212 с.
3. *Григорьянц, А.Г.* Технологические процессы лазерной обработки. / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюрлов - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. - 664 с.
4. *Полянчиков, Ю.Н.* Исследование влияния твердости обрабатываемого материала на качество поверхности при хонинговании / Ю.Н. Полянчиков, О.А. Курсин, Д.А. Мартус, М.Ю. Полянчикова, Н.И. Егоров // Известия ВолГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 8: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2012. – № 13. – С. 51-54.
5. *Полянчиков, Ю.Н.* Получение оптимальных характеристик поверхностного слоя деталей при резании по методу с опережающим пластическим деформированием / Ю.Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев, П. А. Норченко, Г. В. Геронтиди, А. Р. Ингеманссон // Известия ВолГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2009. – № 8. – С. 31-33.
6. *Полянчиков, Ю.Н.* Повышение параметров резания путем поверхностного наводораживания заготовок. / Ю.Н. Полянчиков, Н.И. Егоров, М.Ю. Полянчикова // Научно-технический журнал «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» № 2-2 (292) 2012 март-апрель. – С. 30 – 34.
7. Пат. РФ № 2305620. Способ обработки отверстий. / Полянчиков Ю. Н., Полянчикова М. Ю., Курсин О. А., Кожевникова А. А. – Опубл. 10.09.2007 г., Бюллетень № 25, МПК В24В 1/00, В24В 33/02.
8. *Полянчиков, Ю. Н.* Преимущества способа хонингования с возрастающей скоростью резания. / Ю.Н. Полянчиков, М.Ю. Полянчикова, А.А. Емельяненко, О. А. Курсин, А. И. Курченко // Известия ВолГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолГТУ, 2008. – вып. 4, № 9. – С. 38 – 39.

УДК 621.9.025

*А. И. Курченко, С. И. Кормилицин, А. Л. Плотников***ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ЦИКЛИЧЕСКОГО СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Исследованы закономерности образования циклических стружек и износа инструмента при точении титановых сплавов.

*Ключевые слова:* циклическая стружка, титановый сплав, труднообрабатываемые стали, твердосплавный инструмент, износ, адиабатический сдвиг.

The regularities of formation of cyclic turnings and wear of carbide tools in turning of titanium alloys.

*Keywords:* cyclic turning, titanium alloy, carbide tools, tool wear, adiabatic shift.

Теория и практика точения титановых сплавов и жаропрочных сталей считает, что причиной их низкой обрабатываемости является совокупность высоких механических свойств, низкой теплопроводности, приводящих к формированию циклических стружек с резким колебанием сил резания и температур на рабочих поверхностях резцов.

В работе [1] показано, что при точении титанового сплава ВТ-5 наблюдается формирование зубчиков стружки с резким колебанием их размеров, что усиливает негативное влияние перепада сил и температур на режущем клине инструмента. Фрактографическими исследованиями корней стружек доказано, что причиной таких колебаний размеров зубчиков стружки является структурное строение сплава ВТ-5, который содержит крупные кристаллиты  $\alpha$ -фазы. В зону стружкообразования обычно попадает 2-3 таких кристаллита. В процессе резания они по разному ориентируются по отношению к плоскости сдвига, своими главными плоскостями скольжения и как правило, на границе кристаллитов попадающей в зону стружкообразования провоцируется формирование микротрещины, дающей начало адиабатическому пластическому сдвигу в нижней части плоскости скольжения. При изучении ряда микрошлифов корней стружек на скоростях резания, применяемых на реальном производстве (40-50 м/мин) можно предположить, что основной формирования верхней половины зубчиков явилось хрупкое разрушение по полосе сдвига, которое подавляется в нижней части стружки, где большие сжимающие напряжения. Так же был зафиксирован процесс стружкообразования [1], где на определенном фрагменте стружки, содержащем однородную структуру, не сформировались зубчики, а это уже предполагает то, что низкий коэффициент теплопровод-

ности титановых сплавов не всегда является основной причиной формирования циклических стружек при определенных температурно-деформационных условиях. При высоких скоростях резания (80-90 м/мин) на корнях стружек можно уже различать полосы адиабатического сдвига.

Для развития работ по циклическому стружкообразованию труднообрабатываемых материалов были проведены исследования по точению титанового сплава ВТ-6 с  $\alpha+\beta$  структурой, которая характеризуется относительно однородным строением и точением жаропрочного сплава ЭИ-481 тоже с относительно однородной структурой.

Исследования процесса точения титанового сплава ВТ-6 проводились на скорости 30 м/мин (0,5 м/с), при подаче – 0,4 мм/об, глубине – 2 мм; стали ЭИ-481 на скорости 50 и/мин, подаче – 0,4 мм/об и глубине резания – 2 мм.

Корни стружек титанового сплава ВТ-6 и осциллограмм колебания сил резания были получены на скорости резания 30 м/мин (0,5 м/с), при подаче 0,4 мм/об, глубине резания – 2 мм. Для исследования стали ЭИ-481 бралась скорость резания 50 м/мин (0,42 м/с), подача 0,4 мм/об, глубина резания – 2 мм. Для сопоставления результатов был взят титановый сплав ВТ-3-1 с наличием крупных кристаллитов и режимами точения как для сплава ВТ-6.

В качестве инструмента применялся резец марки ВК-8. На рисунке 1 (а, б) приведены осциллограммы сил резания при точении сплава ВТ-6 и стали ЭИ-481. Усредненное значение силы  $P_z$  при точении сплава ВТ-6 равно 1450 Н, силы  $P_y$  – 900 Н,  $P_x$  – 750 Н; для обработки стали ЭИ-481 усредненное значение силы  $P_z$  – 2762 Н,  $P_y$  – 2500 Н,  $P_x$  – 2100 Н, отношение  $\frac{\Delta P_z}{P_{zcp}}$  для сплава ВТ-6 равно 24%;  $\frac{\Delta P_z}{P_{zcp}}$  для ста-

ли ЭИ-481 равно 51%, где  $\Delta P_z$  - амплитуда колебания силы  $P_z$ . При точении титановых сплавов ВТ-3-1 и ВТ-5, характеризующихся неомогенной структурой, соотношение  $\frac{\Delta P_z}{P_{zcp}}$  было в пределах 80÷90%.

Из приведенных данных видно, что титановый сплав ВТ-6 и жаропрочная сталь ЭИ-481, характеризующиеся гомогенной структурой, име-

ют меньший удельный вес амплитуды колебания сил резания по отношению к усредненному значению сил резания. Это должно снижать негативное влияние цикличности процесса на стойкость режущего инструмента (при относительной близости прочностных характеристик). Справочные данные по обрабатываемости титановых сплавов с  $\alpha$ -структурой и с  $(\alpha+\beta)$ -структурой подтверждают лучшую обрабатываемость сплавов с  $(\alpha+\beta)$ -структурой [2].

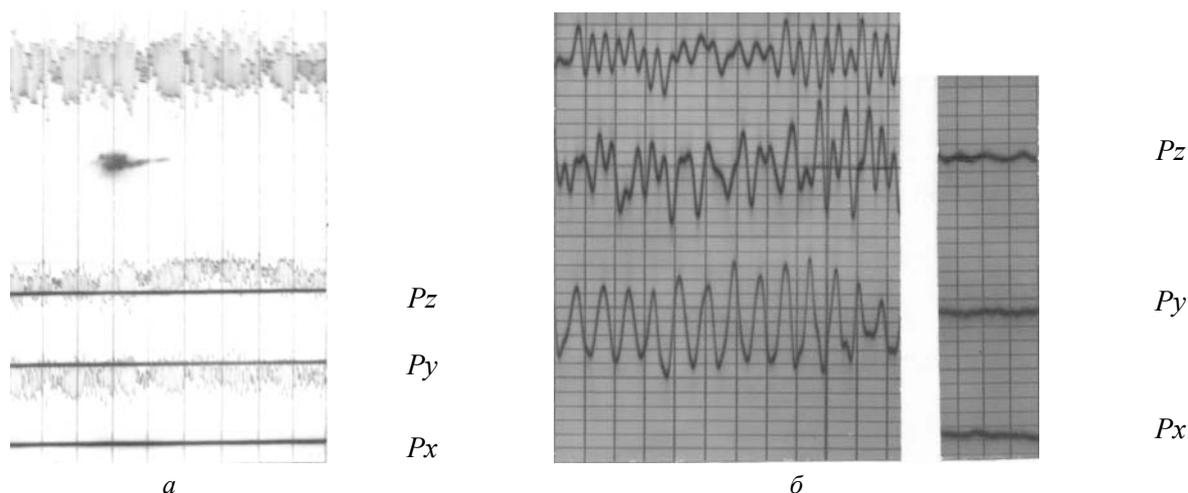


Рис. 1. Осциллограммы записи составляющих сил резания при точении титанового сплава ВТ-6 (а) и жаропрочной стали ЭИ-481(б); нижняя черная линия это отсечка нулевого значения силы  $P_x$ , средняя линия это отсечка нулевого значения силы  $P_y$ , верхняя линия отсекает нулевое значение силы  $P_z$

Исследование микрошлифов корней стружек титановых сплавов ВТ-6, ВТ-3-1, ВТ-5 и жаропрочной стали показывают, что обрабатываемые материалы с гомогенной структурой имеют примерно одинаковые размеры зубчиков и стружку (рис. 2, а, б). Данный факт подтверждает выводы по записанным осциллограммам сил резания и выводы по обрабатываемости данных марок титановых сплавов и жаропрочной стали.

На приведенных микрошлифах корней стру-

жек титанового сплава ВТ-6 при скорости резания не превышающей 30 м/мин полосу локализованного пластического сдвига визуально невозможно выявить, вероятно она составляет буквально несколько микрон. Для сплавов с крупнокристаллитным строением ВТ-5, ВТ-3-1 лишь на высоких скоростях – до 80 м/мин можно зафиксировать полосы адиабатического сдвига, аналогично этот факт можно приложить и к титановому сплаву ВТ-6.

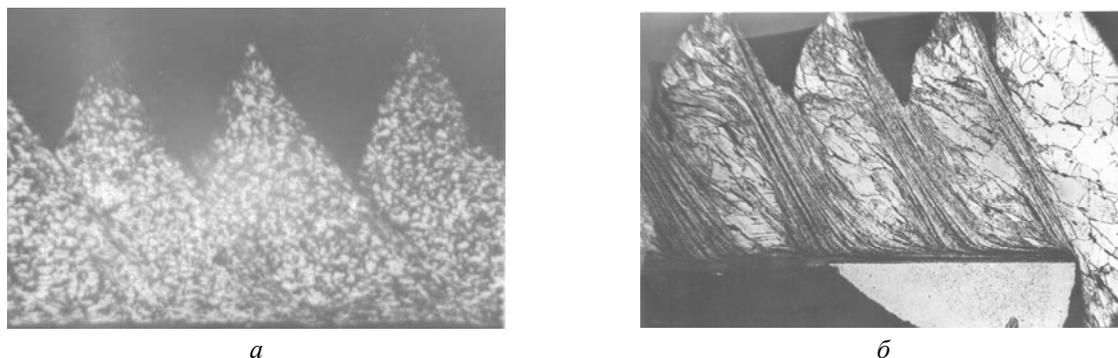
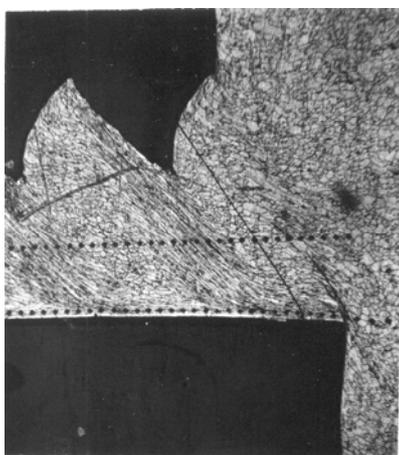


Рис. 2. Фотографии микрошлифов корней стружек при точении титанового сплава ВТ-6(а), и жаропрочной стали ЭИ-481 (б); режимы обработки приведены в тексте (x70)

Так же подобное видимое отсутствие пластифицированного контактного слоя у титановой стружки на практически применяемых скоростях резания наблюдалось при точении всех марок титановых сплавов. При малых скоростях резания до 7-8 м/мин в прирезцовых слоях стружки можно наблюдать локальные деформированные участки – типа деформируемого нароста, который затем уносится стружкой, синхронно сформированному циклическому процессу. При точении стали ЭИ-481 формируются четко наблюдаемая полоса локализованного сдвига в зоне стружкообразования. Данная сталь по сравнению с титановым спла-

вом обладает повышенными пластическими свойствами из-за своего кристаллического строения и физико-механических свойств.

При точении стали ЭИ-481 формируется классический контактный слой в стружке, в нем, согласно современным научным взглядам, скорость граничных слоев близка к нулю, а далее по высоте слоя скорость перемещения слоев возрастает по закону треугольника. Наличие такого слоя сглаживает негативное влияние на поверхность резца колебаний тангенциальной силы резания  $P_T$  и резкое колебание скорости перемещения стружки в момент окончания фазы сжатия и начала фазы локализованного сдвига.



а



б

Рис. 3. Фотографии микрошлифов корней стружек при точении стали ЭИ-481 (а) и титанового сплава ВТ-3-1 (б); фаза окончания сжатия формируемых зубчиков стружки (x70)

Рассмотрение на микрошлифах корней стружек окончания фазы сжатия при формировании зубчиков стружки для титанового сплава ВТ-3-1 и стали ЭИ-481 (рис. 3, а, б) показывает, что к моменту окончания этой фазы уже определен объем металла для формируемого зубчика за счет упруго-пластических деформаций слева от будущей полосы локализованного сдвига. Явно видно «выпячивание» объема вершины будущего зубчика от деформации сжатия и для стали ЭИ-481 и для титанового сплава ВТ-3-1. Такое накопление упруго-пластических деформации предполагает, что идет процесс сжатия, а процесс локализованного сдвига для предшествующего зубчика завершен, возможна даже кратковременная остановка перемещения стружки (на 0,00015-0,0002 с. по представленным осциллограммам сил резания) или существенное замедление ее скорости. При возникновении фазы локализованного сдвига зубчика резка должна увеличиться скорость перемещения

стружки. Такое движение стружки по передней поверхности резца при точении титановых сплавов, когда не формируется классический контактный текущий слой предполагает возможность появления микро и макровыворотов поверхностных слоев твердосплавного резца, что практически всегда наблюдается при точении титановых сплавов (рис. 4, а, б) за первые минуты резания.

При практически применяемых режимах точения жаропрочной стали ЭИ-481 на передней грани образуется классический контактный слой с пластическим ламинарным течением, исключая внешнее трение стружки на участке контакта, прилегающем к режущей кромке. Это предотвращает микро и макро сколы с рабочей поверхности инструмента на этом участке. Сколы поверхностных слоев режущего инструмента могут наблюдаться при повторных врезаниях резца, когда он будет вести обработку другой детали или другой поверхности

на данной детали. Это объясняется тем, что после окончания обработки жаропрочной стали на передней поверхности резца может остаться вырванный участок контактного слоя прочно схватившийся с инструментом и при повторном врезании он может срываться вместе с поверх-

ностными слоями твердосплавного резца. [3]. Для предотвращения этого процесса надо за несколько секунд до окончания обработки плавно уменьшать подачу о величины, рекомендуемой для титанового точения. Это несложно сделать на станках с ЧПУ и на универсальных станках.

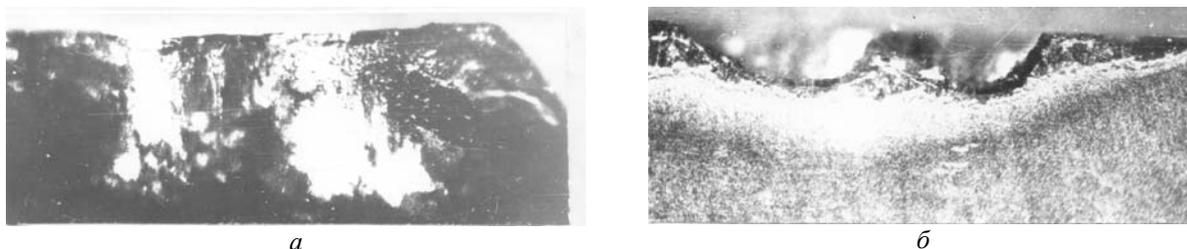


Рис. 4. Микровыворы «сколы» передней (а) и задней граней (б) резца марки ВК8 при точении титанового сплава ВТ-3-1; время точения 360с (x70)

При точении титановых сплавов для предотвращения сколов и макрорывов (рис. 4) с инструмента необходимо применять высококачественные марки твердосплавных резцов с мелкозернистой структурой, хорошо сопротивляющихся износу такого вида. В этом случае такой вид износа возможно наблюдать после  $8 \div 9 \times 10^6$  стружкообразующих циклов. Если увеличить скорость резания титановых сплавов о появления контактного текущего слоя, то вследствие значительного повышения температуры в режущем клине резца он будет подвергаться процессу ползучести, что резко снизит стойкость инструмента.

При предварительном нагреве поверхностных слоев детали до  $500 \div 700^\circ\text{C}$  можно исключить

циклический процесс стружкообразования за счет увеличения пластичности металла, но такой метод повышения обрабатываемости энергоонок и требует применения специальной оснастки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курченко А.И. Исследование процесса циклического стружкообразования при точении  $\alpha$ -титанового сплава / А. И. Курченко, С. И. Кормилицин // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»: междуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 20012. – Вып. 8, № 13. – С. 27-30.
2. Петруха, П. Г. Резание труднообрабатываемых материалов / П. Г. Петруха. – М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
3. Липатов, А. А. О природе адгезионных сколов / А. А. Липатов // Физические основы процесса резания: междуз. сб. науч. тр. / ВолгПИ. – Волгоград, 1993. – С. 24-27.

УДК 621.94.1

А. А. Липатов

### ОСОБЕННОСТИ ДИФфуЗИОННОГО ИЗНАШИВАНИЯ ВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА ПРИ ТОЧЕНИИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОЙ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: leandrej@yandex.ru

Рассмотрены результаты исследований диффузионного изнашивания вольфрамокобальтового твердосплавного инструмента при точении высоколегированной аустенитной стали. Показано, что с ростом скорости и температуры резания активизируется составляющая диффузионного изнашивания, обусловленная проникновением химических элементов стали в связующую кобальтовую фазу твердого сплава. Подтверждена возможность асимметричной диффузии – преобладания проникновения атомов карбидообразующих элементов из стали в твердый сплав над диффузией кобальта в сталь.

**Ключевые слова:** точение, высоколегированная аустенитная сталь, твердый сплав, диффузионное изнашивание, карбидообразующие элементы, проникновение в связующую кобальтовую фазу, асимметричная диффузия.

Considered the results of the research of diffusional wear of tungsten–cobalt hard-alloy tool when turning high-alloy austenitic steel. It is shown that with increase in cutting speed (and temperature) is activate the component to the diffusional wear on account of penetration of chemical elements from the steel into binder cobalt phase of hard alloy. The possibility of asymmetrical diffusion, predominance of penetration of atoms of carbide-forming elements from the steel into the hard alloy for the diffusion of cobalt into the steel, is confirmed.

**Keywords:** turning, high-alloy austenitic steel, hard-alloy, diffusional wear, carbide-forming elements, penetration into the binder cobalt phase, asymmetrical diffusion.

Основными механизмами изнашивания твердосплавного инструмента при резании сталей (в том числе – высоколегированных) считаются адгезионно-усталостное и диффузионное. С ростом скорости (и температуры) резания преобладание в суммарной интенсивности адгезионно-усталостного изнашивания сменяется доминированием диффузионных процессов [1–3].

Различают два основных подвида диффузионного изнашивания:

1. Прямое растворение в стали контактных объемов инструмента (в гораздо большей степени свойственно твердым сплавам группы ВК).

2. Разрушение образующегося на контактных площадках дефектного слоя твердого сплава, основной причиной формирования которого считается диффузия в связующую кобальтовую фазу химических элементов из стали, что ослабляет силы, удерживающих в связке карбидные зерна [3].

Признано, что с ростом скорости и температуры резания вклад прямого диффузионного растворения в суммарную интенсивность изнашивания увеличивается, а вклад, обусловленный разрушением поверхностных объемов твердого сплава из-за изменения его свойств, – уменьшается [2, 3].

Однако фундаментальные источники [1–3] фактически уклоняются от детального объяснения *механизма* второй составляющей диффузионного изнашивания, не отвечая на некото-

рые вопросы: Почему при легировании кобальта железом уменьшаются силы, удерживающие карбиды в связке? Какая сила вырывает карбиды из связки (нормальная составляющая силы на контактной площадке должна вдавливать карбиды в твердый сплав)?

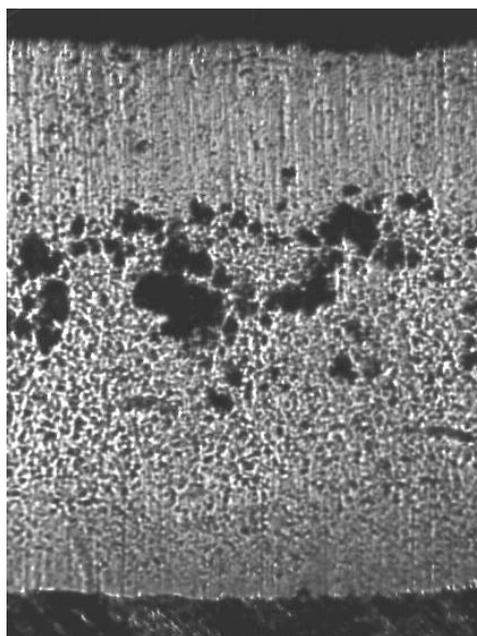
Нашими исследованиями установлено, что при точении высоколегированной аустенитной стали 12Х18Н10Т с увеличением скорости резания  $v$  интенсивность изнашивания резцов из ВК6 монотонно возрастает [4], что является доказательством преобладания диффузионного изнашивания.

В то же время, были получены и не вполне укладывающиеся в это представление результаты. На рисунке представлены фотографии протравленных площадок износа резцов из ВК6 после резания с существенно отличающимися скоростями (подача  $S = 0,3$  мм/об; глубина резания  $t = 1,5$  мм; основные геометрические параметры резцов:  $\gamma = 0^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ).

Топография поверхности площадки износа на рисунке *a* ( $v = 60$  м/мин) свидетельствует о превалировании диффузионного износа (причем в варианте прямого растворения). Тем не менее, на ровной и гладкой в целом поверхности имеются следы вырванных карбидов, что может свидетельствовать о сохранении адгезионно-усталостной составляющей изнашивания, обусловленной неустойчивостью стружкообразования [4–6].



a



б

Топография площадок износа (ширина порядка 0,3 мм) на задних поверхностях резцов из ВК6 после обработки стали 12Х18Н10Т ( $\times 250$ ):

$a - v = 60$  м/мин;  $b - v = 120$  м/мин

При вдвое большей скорости  $v = 120$  м/мин (рисунок б) поверхность площадки, в полном соответствии с общепринятыми взглядами, становится более гладкой (следов вырванных карбидов меньше) – но только в начале и конце контакта. В средней же части наблюдаются многочисленные следы вырывания не только отдельных карбидов, но и блоков карбидов. Объяснить это возвратом к преобладанию адгезионно-усталостного изнашивания нельзя, так как при резании труднообрабатываемых материалов именно в средней части площадки износа контактная температура предположительно максимальна [2, 7]. Явление может быть связано только с активизацией при высоких температурах второй составляющей диффузионного изнашивания, обусловленной проникновением химических элементов стали в твердый сплав. Таким образом, изнашивание, вызванное диффузией химических элементов из стали в твердый сплав, с возрастанием температуры может снова возобладать над растворением. Основная причина этого – торможение растворения твердого сплава в высоколегированной стали процессами реактивной диффузии [8].

Для выявления другой причины следует остановиться на поднятом в начале статьи вопросе – физическом механизме вырывания частиц из твердого сплава. Проанализируем еще два экспериментальных результата.

Во-первых, опыты [9] по высокотемпературному ( $1100$  °С) поверхностному насыщению твердосплавных образцов (ВК8 и ТТ20К9) в смеси порошков железа и никеля (при их равном содержании) показали: на равных расстояниях от границы раздела концентрация Fe в твердом сплаве оказалась выше, чем Ni, а глубина проникновения Fe была больше глубины проникновения Ni. Было предположено, что «повышенная интенсивность диффузии железа инициируется углеродом карбидов» твердого сплава [9].

Во-вторых, нашими исследованиями по отжигу диффузионных пар «сталь 12X18H10T – твердый сплав» (при  $800$  °С) [10] зафиксировано проникновение в связующую фазу твердых сплавов железа и хрома. При этом массовое соотношение Cr : Fe в кобальтовых прослойках достигало величины 0,55 (в стали 12X18H10T – 0,25). Диффузии же в твердые сплавы никеля обнаружено не было. По химическому сродству к углероду эти металлы располагаются в следующем порядке: наиболее сильным карбидо-

образующим элементом является Cr, затем следует Fe, а Ni практически не образует карбидов. Таким образом, подтверждается предположение [9] о том, что склонность к диффузионному проникновению в твердый сплав прямо зависит от способности элемента вступить в соединение с углеродом.

Отметим, что в опытах по отжигу диффузионных пар [10] обратная диффузия – кобальта в сталь – не зафиксирована, что было объяснено распределением атомов Co, сосредоточенных в твердом сплаве в относительно малом объеме связки, на большой объем стали. Однако весьма вероятна и гипотеза [9] о более интенсивной диффузии обладающих сродством к углероду металлических элементов стали в твердый сплав – по сравнению с встречным потоком атомов кобальта, в химические соединения ни с чем в стали не вступающими. Сталь 12X18H10T содержит 18 % Cr – более сильного карбидообразующего элемента, чем Fe. Поэтому асимметричность диффузии может быть выражена гораздо сильнее, чем при резании углеродистых и низколегированных сталей. Перенасыщение атомами приводит к возникновению в контактных объемах твердого сплава внутренних напряжений и выдавливанию частиц из инструмента. С ростом  $v$  и, соответственно, температуры этот процесс интенсифицируется (рисунок б).

Таким образом, имеет место не обратный переход от диффузионного изнашивания к адгезионно-усталостному. Активизируется вторая составляющая диффузионного изнашивания, обусловленная проникновением химических элементов стали в твердый сплав (при подавлении первой составляющей – прямого растворения). При этом неустойчивость стружкообразования способствует активизации вырывания – диффузионное и адгезионно-усталостное изнашивание смыкаются и действуют как одно целое.

При обработке углеродистых и низколегированных сталей подобной трансформации механизма изнашивания с ростом  $v$  не наблюдается. В этих сталях нет (или почти нет) сильных карбидообразующих элементов, и реактивная диффузия на контактных поверхностях, препятствующая растворению твердого сплава, практически отсутствует. Кроме того, в инструмент диффундирует только железо. В результате при возрастании скорости резания с переходом к преобладанию диффузионного изнашивания сразу и окончательно устанавливается

превалирование его первой составляющей – прямого растворения. Проникновение достаточного для реализации второй составляющей количества атомов из стали в твердый сплав просто не успевает произойти из-за растворения поверхностных слоев инструмента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В. Н. Подураев: учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. школа, 1974. – 587 с.
2. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
3. Талантов, Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
4. Липатов, А. А. Влияние неустойчивости стружкообразования и особенностей контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности твердосплавного инструмента на его изнашивание при точении аустенитной стали / А. А. Липатов // Известия ВолгГТУ: межвуз сб. науч. ст. № 13 (100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 30–34.
5. Липатов, А. А. Связь адгезионно-усталостной составляющей механизма износа с неустойчивостью стружкообразования при резании аустенитной стали / А. А. Липатов // Известия ВолгГТУ: межвуз сб. науч. ст. № 4 (30) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 3). – С. 51–52.
6. Липатов, А. А. Влияние размера карбидных зерен на режущие свойства вольфрамокобальтовых твердых сплавов при точении стали 12X18H10T / А. А. Липатов, С. И. Агапов // Известия ВолгГТУ: межвуз сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 1). – С. 18–19.
7. Smart, E. F. Temperature Distribution in Tools Used for Iron, Titanium and Nickel / E. F. Smart, E. M. Trent // Int. J. Prod. Res. – 1975. – Vol. 13, N 3. – PP. 265–290.
8. Lipatov, A. A. Reactive diffusion in cutting high-alloy steel by means of a hard-alloy tool / А. А. Липатов // Rus. Eng. Res. – 2013. – Vol. 33, № 3. – PP. 144–149. – Англ.
9. Роль диффузии железа и никеля в износе инструмента при резании сталей / М. Е. Дудкин, Н. М. Цыганова, Е. Ф. Уткин и др. // Физические процессы при резании металлов: сб. науч. тр. / ВПИ. – Волгоград, 1987. – С. 126–135.
10. Липатов, А. А. Моделирование диффузионных процессов в контакте «твердый сплав – сталь» / А. А. Липатов // Известия ВолгГТУ: межвуз сб. науч. ст. № 9 (47) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 4). – С. 22–26.

УДК 621.923

*В. А. Носенко, Р. А. Белухин, А. Н. Довгаль, Т. П. Бондарчук*

### ВЛИЯНИЕ ТВЕРДОСТИ И СТРУКТУРЫ КРУГА НА ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА

**ВПИ (филиал) ГОУ ВПО «ВолгГТУ»**

E-mail: nosenko@volpi.ru

Приведены результаты исследования параметра Ra при глубинном шлифовании сплавов на основе титана. Установлено, что при встречном шлифовании дисперсия и среднее арифметическое значение Ra обработанной поверхности больше, чем при попутном, на этапе выхода круга наблюдается тенденция к уменьшению шероховатости.

*Ключевые слова:* глубинное шлифование, титановый сплав, среднее арифметическое отклонение профиля, направление подачи стола, дисперсионный анализ.

Results of research of the Ra parameter are given at deep grinding of alloys on the basis of the titan. It is established that at counter grinding dispersion and an arithmetic average Ra value of the processed surface is more, than at passing, at a stage of an exit of a circle the tendency to roughness reduction is observed.

*Keywords:* deep grinding, titanic alloy, arithmetic average profile deviation, direction of giving of a table, dispersive analysis.

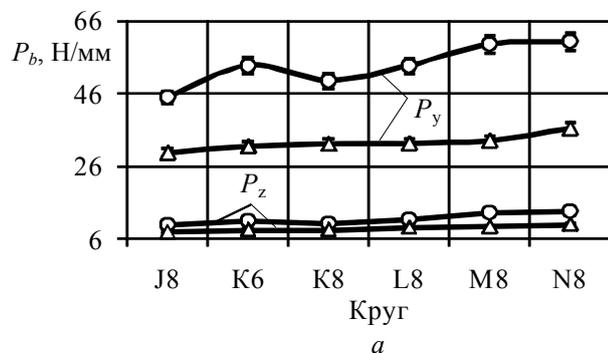
Ведущим производителем абразивного инструмента в России является ОАО «Волжский абразивный завод». В последнее время на заводе освоена новая технология производства с использованием микросфер, что позволяет получать высококачественный абразивный инструмент повышенной структуры. В связи с этим была поставлена задача по определению рациональных областей использования данного инструмента.

В качестве базового абразивного инструмента принят круг 25AF46K6V (условное обозначение – K6). Опытные круги имели следующую характеристику: 25AF46J8V (J8); 25AF46K8V (K8); 25AF46L8V (L8); 25AF46M8V (M8); 25AF46N8V (N8).

Эксперименты выполнены на операции плоского врезного шлифования на испытательном стенде, смонтированном на базе станка мод. 3Г71. Контролировали следующие показатели

качества процесса шлифования: составляющие силы резания ( $P_y$  – радиальная,  $P_z$  – касательная); износ круга и коэффициент шлифования  $K_g$ ; среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$  обработанной поверхности; наличие шлифовочных прижогов и трещин.

В качестве обрабатываемого материала выбран жаропрочный сплав ЖС6К, который применяется при литье лопаток с равноосной и направленной структурой для высокотемпературных газовых турбин. Испытания проведены по методике [1] на режимах: глубина шлифования 0,005 и 0,015 мм/ход; скорость подачи стола – 12 м/мин. В качестве СОЖ использовали 3% эмульсию из концентрата «Авазол». Каждый опыт повторяли 3 раза.



Во всех опытах припуск был равен 0,8 мм, поэтому число ходов определяется глубиной шлифования. При  $t=0,005$  мм/ход сделано 160 ходов, при  $t=0,015$  мм/ход – 53 хода. Размер обрабатываемой поверхности заготовки 6×75 мм. При удалении полного припуска объем удаляемого материала или наработка  $V=360$  мм<sup>3</sup>. С целью унификации данных составляющие силы резания и наработку приводили к единице ширины заготовки (приведенная сила резания  $P_b$ , далее – сила резания, Н/мм; приведенная наработка  $V_b$ , далее – наработка, мм<sup>2</sup>).

Рассмотрим влияние твердости круга на составляющие силы резания и их отношение  $P_z/P_y$  на этапе установившегося шлифования (рис. 1).

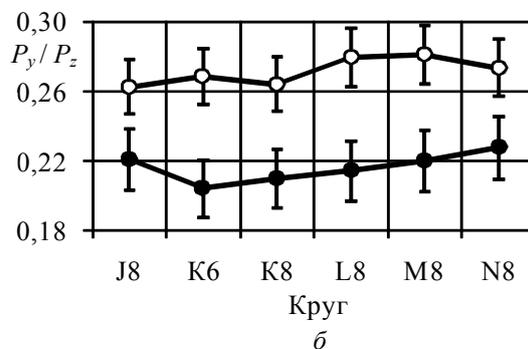


Рис. 1. Изменение  $P_{bz}$ ,  $P_{by}$  (а) и  $P_z/P_y$  (б) от твердости и структуры круга: ○ – 0,005 мм/ход; ● – 0,015 мм/ход

С увеличением твердости кругов 8 структуры от J до N составляющие силы резания на глубине 0,005 мм/ход возрастают в среднем на 25 %, на глубине 0,015 мм/ход – на 33 % (рис. 1, а). Отношение  $P_z/P_y$  от твердости круга практически не зависит (рис. 1, б).

С увеличением глубины шлифования в интервале 0,005 – 0,015 мм/ход или в 3 раза сила  $P_{by}$  при обработке кругами различной твердости возрастает в среднем в 1,66 раза,  $P_{bz}$  – в 1,34 раза. В результате отношение сил снижается на 24 %, т.е. с увеличением глубины шлифования составляющая  $P_{by}$  растет быстрее  $P_{bz}$ .

Износ инструмента с увеличением его твердости снижается, в результате возрастает коэффициента шлифования  $K_g$  (рис. 2, а). На глубине 0,005 мм/ход  $K_g$  с увеличением твердости от J до N возрастает в среднем на 26 %, на глубине 0,015 мм/ход – на 18 %. Следует отметить, что при шлифовании жаропрочного сплава на глубине 0,005 мм/ход износ круга оказался больше, чем на глубине 0,015 мм/ход. В результате  $K_g$  с увеличением глубины возрастает на 17 %.

Шероховатость поверхности  $Ra$  с увеличе-

нием глубины шлифования возрастает в среднем на 18 % (рис. 2, б).

Увеличение твердости круга от J до M при шлифовании на глубине 0,005 мм/ход практически не влияет на  $Ra$ . Только у круга твердостью N наблюдается снижение  $Ra$ . На глубине 0,015 мм/ход твердость круга также практически не влияет на  $Ra$ . Можно говорить лишь о тенденции снижения шероховатости с увеличением твердости круга.

Для круга твердостью K структура была снижена с 8 до 6 (стандартный круг). Испытания показали, что при шлифовании кругом K6 на глубине 0,005 мм/ход различий в составляющих силы резания по сравнению с кругом той же твердости 8 структуры нет. Не установлено различий между данными кругами по  $K_g$  и  $Ra$ .

С увеличением твердости круга до L коэффициент шлифования по сравнению с кругом K6 возрастает всего на 7 %,  $Ra$  в обоих случаях одинаково. Составляющие силы резания при шлифовании кругом L8 возрастают в среднем на 5%, что несколько увеличивает вероятность образования шлифовочных прижогов и трещин.

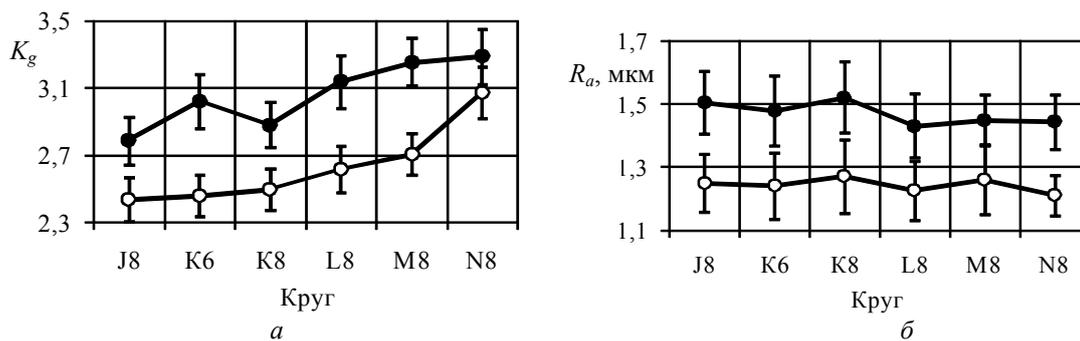


Рис. 2. Изменение  $K_g$  (а) и  $R_a$  (б) от твердости и структуры круга:  
 ○ – 0,005 мм/ход; ● – 0,015 мм/ход

С увеличением твердости круга до М и N коэффициент шлифования и составляющие силы резания возрастают соответственно на 7 и 10 %,  $R_a$  практически не изменяется.

При шлифовании кругом J8 составляющие силы резания по сравнению с кругом K6 снижаются на 6 – 8 %. Учитывая, что круг J8 по остальным параметрам процесса не уступает K6, его можно рекомендовать для шлифования жаропрочного сплава на чистовых режимах обработки.

Таким образом, на чистовых операциях шлифования жаропрочного сплава ЖС6К можно использовать круги J8, K8 и K6, обеспечивающие приблизительно одинаковые значения эксплуатационных показателей. На операциях, где высока вероятность образования шлифовочных прижогов и трещин, целесообразно применять круг J8.

При обработке кругом K6 на глубине 0,015 мм/ход по сравнению с кругом K8 параметры  $R_a$  и  $K_g$  достаточно близки, но в результате увеличения силы резания на обработанной поверхности появились шлифовочные трещины. Поэтому при шлифовании на черновых режимах из кругов K6 и K8 предпочтение следует отдать кругу K8. Преимущество 8 структуры наблюдается и при шлифовании кругами меньшей зернистости стали ШХ15 [2].

С увеличением твердости круга до L, M и N составляющие силы резания изменяются в следующей пропорции:  $P_{by}$  – 1,00:1,11:1,12;  $P_{bz}$  – 1,11:1,19:1,25. Влияние твердости на  $R_a$  можно считать незначимым,  $K_g$  возрастает в пропорции: 1,04:1,08:1,09. Но с увеличением твердости на обработанной поверхности появляются трещины. Поэтому из кругов твердости К – N для практического применения рекомендуется круг K8.

С уменьшением твердости до J составляющие силы резания по сравнению с кругом K6 снижаются:  $P_{by}$  – на 16 %;  $P_{bz}$  – на 9 %. Шероховатость  $R_a$  не изменяется, но износ круга возрастает на 8 %. Составляющие силы резания кругом J8 по сравнению с K8 снижаются на 6–

9 %,  $R_a$  и  $K_g$  практически одинаковы. Поэтому круг J8 также можно рекомендовать для чернового шлифования жаропрочного сплава.

Основные выводы.

1. С увеличением глубины шлифования в 3 раза с 0,005 до 0,015 мм/ход  $P_{by}$  возрастает в среднем в 1,65 раза,  $P_{bz}$  – в 1,31 раза, т.е.  $P_{by}$  растет в среднем на 24% больше, чем  $P_{bz}$ ; коэффициент шлифования и шероховатость поверхности  $R_a$  возрастают в среднем на 17-18 %.

2. С увеличением твердости круга 8 структуры от J до N составляющие силы резания  $P_{bz}$  и  $P_{by}$  возрастают приблизительно в равной степени, поэтому отношение  $P_z/P_y$  практически не изменяется; при шлифовании на глубине 0,005 мм/ход  $K_g$  возрастает в среднем на 26 %, на глубине 0,015 мм/ход – на 18%, т.е. влияние твердости круга с увеличением глубины шлифования снижается; шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  от твердости круга практически не зависит.

3. На чистовых операциях шлифования жаропрочного сплава ЖС6К можно использовать круги J8, K8 и K6, обеспечивающие приблизительно одинаковые значения эксплуатационных показателей. На черновых режимах рекомендуется круг K8.

На черновых и чистовых операциях, где высока вероятность образования шлифовочных трещин, целесообразно использовать круг J8.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белухин, Р.А. Методика проведения испытаний абразивных кругов и смазочно-охлаждающих жидкостей в процессе плоского шлифования / Р.А. Белухин, Цибермановский Д.В. // 7-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ (г. Волжский, 2008 г.): сб. матер. конфер. Серия – Механика, машины, материаловедение. ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – С. 68-70.
2. Белухин, Р.А. Шлифование стали ШХ15 кругами различной структуры / Р.А. Белухин, Носенко В.А., Довгаль А.Н. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении": Вып. 4: межвуз. сб. научн. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2008. № 9.

УДК 621.787.4

*В. А. Носенко, Е. В. Федотов, Л. К. Морозова*

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРШИН ЗЕРЕН  
НА РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА  
ПО ПРОФИЛОГРАММАМ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Волжский политехнический институт (филиал ВолгГТУ)

E-mail: nosenko@volpi.ru

Представлена методика расчета распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента по профилограммам шероховатости обработанной поверхности.

*Ключевые слова:* шлифование, абразивный инструмент, рабочая поверхность, зерно, модель, закон распределения, шероховатость.

The article is devoted to the description of the new methodology of modeling of the working surface abrasive instrument using roughness of the processed surface.

*Keywords:* grinding, abrasive tools, work surface, grain, model, distribution law, roughness.

Шероховатость обработанной поверхности, получаемую при шлифовании может, обычно представляют в виде результирующего профиля, который получается в результате наложения большого количества элементарных профилей режущего инструмента, проходящих через рассматриваемое сечение обрабатываемой поверхности. Число таких элементарных профилей определяется кинематикой шлифования. Расстояние между элементарными профилями может быть принято равным расстоянию между зернами. Имея один элементарный режущий профиль, можно построить модель результирующего профиля, который является реализацией шероховатости обработанной поверхности. Можно решить и обратную задачу: по профилограмме шлифованной поверхности получить распределение вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента.

Контакт вершин зерен с обрабатываемым материалом является случайным событием и достоверность его возникновения определяется вероятностью контакта. Вероятность можно определить экспериментально, как математическое ожидание относительной опорной длины профиля, или теоретически, воспользовавшись математической моделью, предложенной Ю.К. Новоселовым [1].

Методика расчета включает следующие основные этапы.

По профилограммам находим число контактирующих зерен  $N$ , оставивших след на обработанной поверхности. Распределив это число по соответствующим уровням, получаем их распределения по высоте профиля [2].

При определении количества вершин зерен, принимаем, что каждая впадина на профиле

поперечного сечения шероховатости является следом от одного зерна, и это зерно имеет лишь одну режущую вершину. Координату впадины профиля определяли с учетом неравенств:

$$\Delta y_i = \frac{y_i - y_j}{y_i} \geq k; \quad y_i > y_j \quad \text{и} \quad y_{i+1} > y_j,$$

где  $y_i$  – предыдущая точка из набора данных;  $y_j$  – проверяемая координата;  $y_{i+1}$  – последующая точка из набора данных;  $k$  – порог чувствительности прибора.

Делим слой, в котором распределена шероховатость, на заданное количество уровней  $h$  и определяем частоту попадания вершин зерен в соответствующий уровень (рис. 1):

$$h_n < y_j \leq h_{n+1},$$

где  $h_n, h_{n+1}$  – нижняя и верхняя граница уровня соответственно.

Проходя через зону контакта, рассматриваемое сечение контактирует с вершинами абразивных зерен. Среднее количество этих вершин в единицу времени неодинаково и зависит от положения сечения в зоне взаимодействия. Большее число вершин зерен проходит через сечение в середине зоны взаимодействия, меньшее соответствуют положениям входа и выхода из этой зоны.

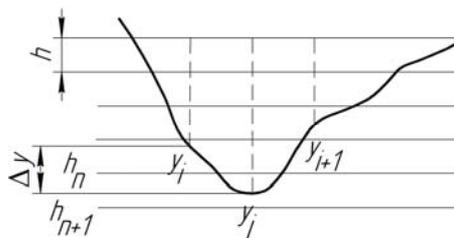


Рис. 1. Схема определения координаты впадины профиля шероховатости

Разобьем сечение обрабатываемой поверхности и рабочую поверхность абразивного инструмента на слои  $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_i$  и проанализируем механизм взаимодействия каждого слоя

с кругом. В каждом слое выделяем одинаковые интервалы от вертикальной оси круга  $\Delta x$ . Нумерацию слоев будем вести снизу вверх от наиболее глубоких впадин сечения (рис. 2).

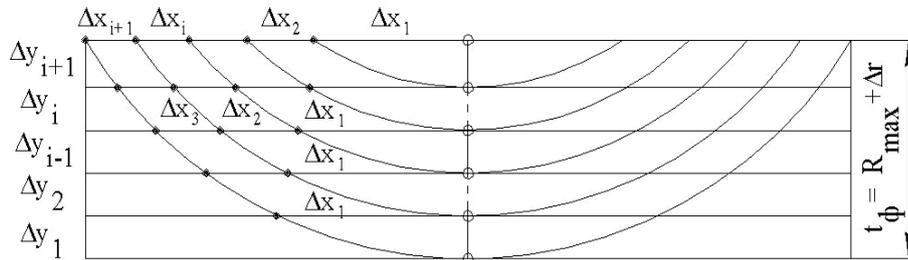


Рис. 2. Зоны контакта круга и детали

Рассмотрим первый слой. Данный слой пересекается вершинами зерен расположенных только в одном первом слое рабочей поверхности  $\Delta x_1$ . Его движение через зону контакта осуществляется за время

$$t_1 = \frac{\Delta x_1}{V_u}$$

Число вершин, которое пройдет за это время равно:

$$n_{y1} = \frac{\Delta N_{y1}}{P_K(y_1)} = \frac{2 \cdot n_z \cdot V_K}{V_u} \cdot (f(\Delta y_1) \cdot \Delta x_1 + f(\Delta y_2) \cdot \Delta x_2 + \dots + f(\Delta y_i) \cdot \Delta x_i)$$

Производя последовательные вычисления от нижнего слоя профиля неровностей шероховатости поверхности к верхнему, находим распределение вершин зерен по слоям рабочей поверхности абразивного инструмента.

Согласно данной методике точность вычисления плотности распределения вершин зерен по глубине рабочей поверхности абразивного инструмента будет зависеть от величины слоя.

С целью автоматизации обработки данных

$$n_{y1} = \frac{\Delta N_{y1}}{P_K(y_1)} = n_z \cdot f(\Delta y_1) \cdot V_K \frac{2 \cdot \Delta x_1}{V_u}$$

Из последнего выражения определяем плотность вершин зерен в данном слое:

$$f(\Delta y_1) = \frac{\Delta N_{y1} \cdot V_u}{P_K(y_1) \cdot n_z \cdot 2 \cdot \Delta x_1 \cdot V_K}$$

Для  $i$ -го слоя  $y_i$ :

разработано программное обеспечение для реализации расчетов на ПЭВМ.

Для экспериментальной проверки предлагаемой методики и программных продуктов обработаны результаты измерений шероховатости при шлифовании нержавеющей стали 12X18H10T кругом 200x20x76 25AF90K7V с охлаждением 3% содовым раствором на режимах:  $t = 10$  мкм/ход,  $V_{кр} = 28$  м/с;  $V_{ст} = 12$  м/мин.

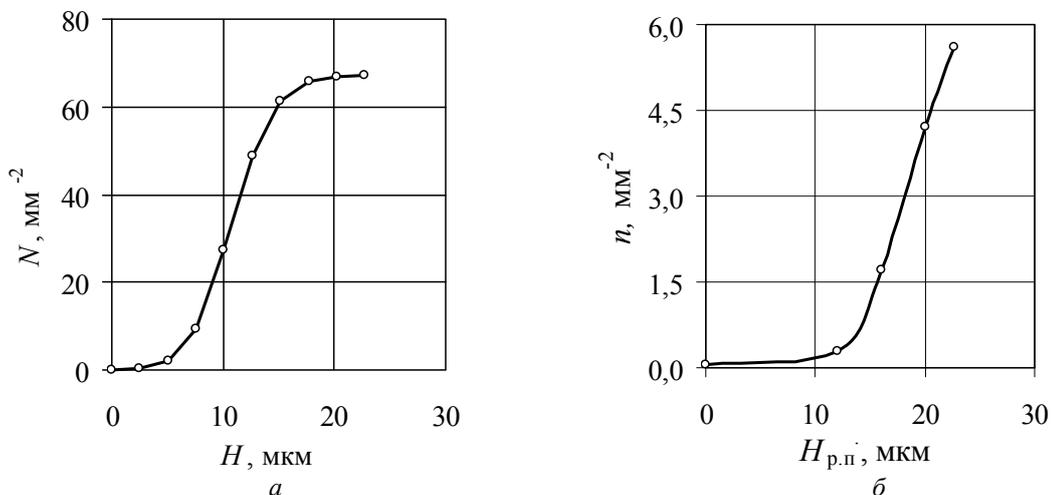


Рис. 3. Накопленная частота вершин зерен, оставивших след на обработанной поверхности (а) и функция распределения вершин зерен шлифовального круга (б) от глубины рабочей поверхности

Количество вершин зерен, оставивших след на обработанной поверхности, и их распределение по высоте профиля приведены на рис. 3, а. Форма кривых графиков распределений свидетельствует о близости к нормальному закону. В результате проверки гипотезы о нормальном законе распределения по критерию согласия Пирсона установлено, что для уровня значимости 0,05 распределение числа вершин зерен, оставивших след на обработанной поверхности, подчиняется нормальному распределению.

Наглядное представление о числе зерен и их распределении по высоте профиля шероховатости дает график накопленной частоты (рис. 3, а).

#### Выводы

Разработана методика расчета распределения вершин зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента с использованием профилеграмм обработанной поверхности, что позволяет получать информацию о состоянии рабочей поверхности круга в различные периоды его работы без снятия инструмента со шпинделя;

для автоматизации обработки данных разработаны специальные программные продукты.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с.
2. Носенко, В.А. Разработка методики и исследование распределения вершин зерен на рабочей поверхности инструмента / В.А. Носенко, Л.К. Морозова, А.П. Митрофанов // Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров – Сб.к трудов III Международного науч.-методич. семинара – Донецк: ДонНТУ, 2011. – С. 267-269.
3. Носенко, В.А. Математическая модель формирования рабочей поверхности круга при шлифовании / В.А. Носенко, Е.В. Федотов, М.В. Даниленко // Инструмент и технологии. – 2006. – Вып. 1. – №24-25. – С. 151-154.
4. Носенко, В.А. Определение износа шлифовальных зерен скалыванием и закона его распределения / В.А. Носенко, Е.В. Федотов, М.В. Даниленко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – №8. – С. 43-48.
5. Носенко, В.А. Теоретико-вероятностная модель формирования рабочей поверхности абразивного инструмента при шлифовании / В.А. Носенко, Е.В. Федотов // Инструмент и технологии. – 2003. – №15-16. – С. 58-61.

УДК 621.922

С. В. Носенко<sup>1</sup>, В. А. Носенко<sup>1</sup>, А. А. Байрамов<sup>2</sup>

### ШЕРОХОВАТОСТЬ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ГЛУБИННОМ ШЛИФОВАНИИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА НА ВСТРЕЧНОЙ И ПОПУТНОЙ ПОДАЧАХ СТОЛА С ПОСТОЯННОЙ ПРАВКОЙ КРУГА

Волжский политехнический институт (филиал)  
Волгоградский государственный технический университет<sup>1</sup>  
Казанское моторостроительное производственное объединение<sup>2</sup>

E-mail: nosenko@volpi.ru

Приведены результаты исследования параметра Ra при глубинном шлифовании сплавов на основе титана. Установлено, что при встречном шлифовании дисперсия и среднее арифметическое значение Ra обработанной поверхности больше, чем при попутном, на этапе выхода круга наблюдается тенденция к уменьшению шероховатости.

*Ключевые слова:* глубинное шлифование, титановый сплав, среднее арифметическое отклонение профиля, направление подачи стола, дисперсионный анализ.

Results of research of the Ra parameter are given at deep grinding of alloys on the basis of the titan. It is established that at counter grinding dispersion and an arithmetic average Ra value of the processed surface is more, than at passing, at a stage of an exit of a circle the tendency to roughness reduction is observed.

*Keywords:* deep grinding, titanic alloy, arithmetic average profile deviation, direction of giving of a table, dispersive analysis.

Актуальной задачей машиностроения является повышение производительности и качество обработки. Этим требованиям в полной мере отвечает глубинное шлифование [1-3].

Основное отличие между глубинным и обычным шлифованием заключается в глубине резания, которая при глубинном шлифовании на два – три порядка выше. Большая глубина предполагает наличие достаточно протяженных

этапов врезания, выхода и добора глубины, условия существования которых определены в работах [4, 5]. На всех этапах, кроме постоянной дуги контакта, изменяется объем материала, удаляемый в единицу времени, толщина сечения срезаемого слоя и фактическая глубина резания. На этапах врезания и выхода изменяется еще и длина дуги контакта. Перечисленные факторы, несомненно, влияют на эксплуа-

тационные показатели процесса. Например, сила резания изменяется от нуля до своего максимального значения [6].

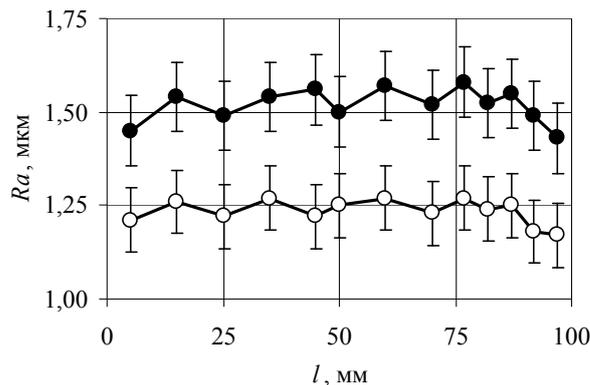
Важным резервом повышения эффективности глубинного шлифования титановых сплавов является применение непрерывной правки абразивного инструмента с учетом особенностей обработки на встречной и попутной подачах [7, 8]. Тем не менее, влияние перечисленных факторов на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании титановых сплавов изучено недостаточно.

В связи с этим цель данной работы заключалась в исследовании влияния направления движения стола на шероховатость обработанной поверхности при глубинном шлифовании сплавов на основе титана с учетом особенностей, возникающих на различных этапах процесса.

Параметр шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  измеряли прибором Form Talysurf Intra. Результаты измерений  $Ra$  обрабатывали методами математической статистики [9]. Эксперименты выполнены при шлифовании сплавов BT8 и OT4 абразивным инструментом характеристики 63CF120H12V на станке-полуавтомате мод. ЛШ-220. Режимы шлифования: скорость и глубина шлифования соответственно  $v=25$  м/с и  $t=3$  мм, скорость подачи стола  $v_s=50$  мм/мин. В качестве СОТС использовали водный раствор с присадкой  $Na_3PO_4$  [10]. При длине обрабатываемой поверхности  $l=100$  мм на выбранных режимах шлифование осуществлялось в три этапа: этапы врезания и выхода  $l_1=l_3=35,8$  мм, постоянной длины дуги контакта  $l_2=l-l_1=64,2$  мм.

Поскольку наибольшие изменения показателей процесса глубинного шлифования связаны с этапом выхода,  $Ra$  на расстоянии 30 мм со стороны выхода круга измеряли через 1 мм по длине образца. На остальной части обработанной поверхности  $Ra$  измеряли через 2 мм. Всего по длине образца сделано 65 замеров поперечной шероховатости. Затем выборку делили на интервалы таким образом, чтобы в каждом было 5 измерений. При трех параллельных опытах в каждой группе получили 15 значений  $Ra$ , по которым рассчитывали исправленную групповую дисперсию  $S^2_i$ , групповое среднее арифметическое  $Ra_i$  и относили к середине соответствующего интервала  $l_i$  (см. рисунок).

Оценку однородности групповых дисперсий  $S^2_i$  (степень свободы  $f_i=14$ ) осуществляли по критерию Кохрена. Установлено, что наблю-



Изменение  $Ra$  по длине шлифования  $l$ :

● – встречное шлифование; ○ – попутное шлифование

даемые значение критерия меньше теоретического распределение, т.е. групповые дисперсии параметра  $Ra$  на выделенных участках поверхности по длине заготовки в можно считать однородными. Методом сравнения дисперсий по критерию Фишера-Снедекора исследовано влияние направления подачи заготовки уточненное значение групповой дисперсии. Установлено, что наблюдаемое значение критерия меньше табличного, что свидетельствует о незначимости влияние фактора направления подачи на разброс параметра шероховатости в группах.

Для ответа на вопрос о влиянии направления подачи на обеспечение стабильности  $Ra$  по всей обработанной поверхности проведено сравнение общих дисперсий. В этом случае наблюдаемое значение критерия оказалось больше табличного. Следовательно, влияние фактора направления подачи на общую дисперсию следует считать значимым: при встречном шлифовании разброс значений  $Ra$  на обработанной поверхности больше, чем при попутном.

Выполненные сравнения дисперсий позволяет перейти к статистическому анализу изменения средних арифметических значений  $Ra_i$  в группах (см. рис.). Сравнение проведено методом дисперсионного анализа. В основе анализа лежит сопоставление факторной дисперсии  $S^2_{jf}$  с остаточной или уточненной групповой дисперсией  $S^2_{jy}$ . Во всех рассмотренных случаях остаточная дисперсия больше факторной, что для принятого способа группировки данных свидетельствует об отсутствии влияния фактора длины образца на  $Ra$ . Тем не менее, на всех графиках наблюдается тенденция снижения  $Ra$  в конце этапа выхода. Аналогичная закономерность изменения  $Ra$  по длине образца установлена при глубинном шлифовании сплава OT4 на встречной подаче стола [11].

С целью более детального анализа данного фактора длина образца была разбита на несколько участков с новыми значениями границ интервалов представлены в таблице.

Для уровня значимости 0,05 функция Лапласа  $Z_{кр} = 0,475$ , наблюдаемые значения  $Z_{нб}$  приведены в табл. Таким образом, можно утверждать, что групповое среднее  $Ra$  в конце этапа выхода на длине 90-100 мм значимо меньше, чем на остальной длине.

**Границы интервалов и статистические характеристики выборок измерений  $Ra$**

Границы интервала, мм	Встречное		Попутное	
	$Ra$ , мкм	$S^2(Ra)$ , мкм <sup>2</sup>	$Ra$ , мкм	$S^2(Ra)$ , мкм <sup>2</sup>
0-90	1,53	0,0348	1,24	0,0160
90-100	1,46	0,0378	1,18	0,0218
$Z_{нб}$	1,81		2,42	

В целом  $Ra$  при шлифовании на попутной подаче меньше, чем на встречной. Все значения параметра  $Ra$  в каждой серии экспериментов были объединены в одну выборку. При шлифовании на встречной подаче среднее значение 1,28 мкм, на попутной – 1,13 мкм, т.е. на попутной подаче  $Ra$  в среднем 20 % ниже.

#### Основные выводы

1. Изменение направления подачи оказывает значимое влияние на общую дисперсию  $Ra$ : при встречном направлении подачи стола общая дисперсия  $Ra$  больше, чем при попутном.

2. При шлифовании с постоянной правкой  $Ra$  на всей обработанной поверхности, кроме участка выхода круга, можно считать одинаковой. На этапе выхода наблюдается снижение шероховатости обработанной поверхности.

3. При попутном движении стола  $Ra$  меньше, чем на встречном.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старков В. К. Шлифование высокопористыми кругами. – М.: Машиностроение, 2007. 688 с.
2. Полетаев В. А., Волков Д. И. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2009. 272 с.
3. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов: монография. – Старый Оскол: ТНТ, 2012. – 616 с.
4. Специфика удаления материала на различных этапах плоского глубинного шлифования / В.А. Носенко, В.К. Жуков, С.А. Зотова, С.В. Носенко // СТИН. – 2008. – № 3. – С. 23–27.
5. Носенко В.А., Носенко С.В. Математические модели наработки и режущей способности для различных этапов плоского глубинного шлифования горизонтальных поверхностей кругом прямого профиля // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 92–98.
6. Носенко В.А., Авиллов А.В., Носенко С.В. Закономерности изменения силы плоского глубинного шлифования // Справочник. Инженерный журнал. 2009. № 7. С. 10–26.
7. Носенко, В.А. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с непрерывной правкой круга / В.А. Носенко, С.В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2010. – № 11. – С. 57–61.
8. Носенко, В.А. Попутное и встречное глубинное шлифование титанового сплава с периодической правкой круга / В.А. Носенко, С.В. Носенко // Вестник машиностроения. – 2010. – № 10. – С. 66–71.
9. Носенко В.А., Носенко С.В. Плоское глубинное шлифование пазов в заготовках из титанового сплава с непрерывной правкой шлифовального круга // Вестник машиностроения. 2013. № 4. С. 74–79.
10. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 С.
11. Носенко В.А., Васильев А.А., Носенко С.В. Шероховатость поверхности при плоском глубинном шлифовании титанового сплава // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2007. № 9. С. 66-70.

УДК 621.922

*А. Б. Переладов, И. П. Камкин*

#### **ВЕРОЯТНОСТНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ РАБОЧЕГО СЛОЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА**

**Курганский государственный университет**

E-mail: tp@kgsu.ru

В статье описаны методика, экспериментальная установка и результаты изучения рабочего слоя шлифовального круга. Определена зависимость изменения плотности вершин абразивных зерен по высоте рабочего слоя. Результаты исследований используются при создании компьютерных моделей рабочей поверхности шлифовального круга и процесса шлифования.

*Ключевые слова:* шлифовальный круг, рабочий слой, распределение зерен, экспериментальная установка, компьютерное моделирование.

This article describes method of experimental equipment and results of studying worksurface of grinding wheel. The dependence of the change in the density peaks of the abrasive grains on the height of the working layer. Researching results are used in creating computer models of working surface and grinding processes.

*Keywords:* grinding wheel, worksurface, grain distribution, research facility, computer modeling.

Важнейшая роль в металлообработке по-прежнему отводится операциям шлифования (ОШ), которые сегодня остаются, по ряду важных показателей, наиболее эффективными методами механической обработки деталей, изготовленных из сложнолегированных сталей и других труднообрабатываемых материалов.

Однако, эффективное проектирование операций шлифования сегодня практически невозможно по причине отсутствия адекватных модельных представлений шлифовального круга (ШК) и его рабочего слоя (РС). Наиболее распространенный и доступный сегодня способ проектирования ОШ – это приближенный подбор, с использованием справочных таблиц, характеристик ШК и режимов обработки с последующим уточнением значений других параметров на основе имеющегося собственного и заимствованного субъективного опыта эксплуатации абразивного инструмента. Такой подход не позволяет эффективно решать задачи, связанные с оптимизацией факторного пространства ОШ и обеспечением требуемых показателей процесса обработки.

Необходимость использования статистических методов описания строения РСШК и их применения при анализе процесса шлифования отмечалась многими известными исследователями (Байкалов А.К., Корчак С.Н., Маслов Е.Н., Островский В.Н., С. Малкин, Дж. Пекленик и другие), которые в своих исследованиях стремились использовать наиболее адекватные вероятностные модели строения РС при получении теоретических зависимостей, достоверно описывающих ПШ. Такой подход к изучению показателей РС является наиболее верным и позволяет решать научно-исследовательские задачи, связанные, например, с изучением параметров кинематического взаимодействия ШК с заготовкой и раскрытием существующей неопределенности – степени перекрытия зерен друг другом в процессе срезания припуска, сформулированную Дж. Элденом, еще в 1911 году, одним из ведущих американских ученых в области металлообработки, как «основное уравнение шлифования».

Однако, по различным причинам, связанным в основном с различием характеристик исследуемых образцов, методического и аппаратно-инструментального оснащения проводимых исследований, сделанных допущений при анализе и представлении полученных результатов, сегодня отсутствует единство мнений,

относительно показателей плотности распределения вершин зерен в объеме РСШК. В приведенном в работе Байкалова А.К. [1] обзоре и более поздних работах, содержатся достаточно разноречивые данные по данному показателю. Были получены следующие законы распределения вершин АЗ по высоте РС: нормальный (Сасаки, Окамура, Ито, Ома), параболический (Ориока, Ида и др.), равномерный (Пекленик, Брюкнер, Мацуи, Седзи, Накаяма, Сато). Некоторые ученые склоняются к комбинации вышеуказанных законов. Имеется так же значительный разброс и в количественной оценке плотности распределения зерен.

В подавляющем большинстве случаев, как показал проведенный обзор, изучение рельефа РСШК осуществлялось в статическом режиме, без учета силовых показателей реального процесса шлифования, что не позволяло учесть величину упругих перемещений зерен под действием сил резания.

Поэтому, с учетом вышеизложенного, было принято решение о проведении собственных исследований строения РСШК в условиях, наиболее приближенных к реальному процессу обработки. Основной целью исследований было получение данных об изменении плотности расположения вершин АЗ по высоте РС ( $h$ ) инструмента.

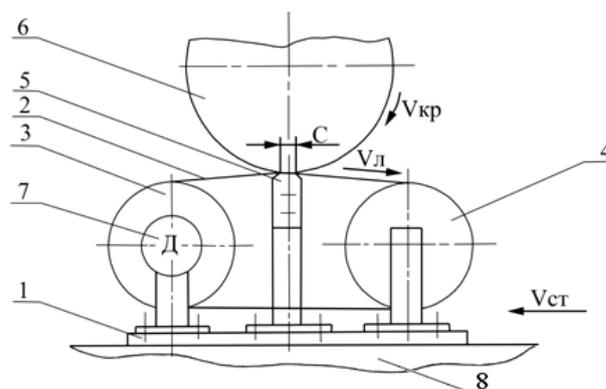


Рис. 1. Экспериментальная установка:  
1 – платформа установки; 2 – металлическая лента; 3, 4 – ведущий и ведомый шкивы; 5 – опорная поверхность; 6 – шлифовальный круг; 7 – электропривод; 8 – стол станка;  $V_l$  – скорость движения ленты;  $V_{ст}$  – скорость стола;  $V_{кр}$  – окружная скорость круга (36,6 м/с);  $C$  – длина опорной площадки (10 мм)

Для достижения поставленной цели, были разработаны методика проведения исследований и экспериментальная установка (рис. 1), реализующая взаимодействие РСШК с заготовкой в соответствии с заданными режимами. Суть испытаний заключалась в том, что ШК

однократно шлифовывал с заданной глубиной движущуюся по опорной поверхности металлическую ленту толщиной 0,4 мм., оставляя при этом на ее поверхности царапины различной длины, которые позволяют судить о глубине внедрения каждого зерна в материал ленты и, следовательно, о координате расположения вершины АЗ в объеме РС ШК.

В качестве образца использовался ШК с характеристиками 1 250x20x76 25A F40 L 6 V. Перед началом эксперимента рабочая поверхность круга правилась алмазным карандашом (тип “С”) с глубиной 0,02 мм в несколько проходов и прирабатывалась путем плоского многоходового шлифования стальной закаленной детали по схеме врезания посредством вертикальной подачи. Для обеспечения контрастности получаемых царапин поверхность ленты затемнялась, путем протирки 3% раствором хлорного железа. Скорость шлифования ( $V_{ш}$ ) составляла 60 м/с. Скорость ленты определялась как разница  $V_{ш}$  и  $V_{кр}$ . Требуемая скорость ленты обеспечивалась скоростью вращения приводного шкива и контролировалась с точностью  $\pm 0,13$  м/с. Глубина шлифования равнялась 0,01 мм. Для исключения повторного взаимодействия ШК с уже отшлифованным участком ленты, скорость стола ограничивалась следующим условием:

$$V_{cm} \geq \frac{C \cdot V_l}{l_l}$$

На рис. 2 приведена фотография участка ленты со следами, оставленными вершинами АЗ.



Рис. 2. Участок поверхности ленты со следами вершин АЗ

Замеры длин царапин осуществлялись с использованием инструментального микроскопа с точностью 0,005 мм. Расчет глубины внедрения зерен осуществлялся по формуле:

$$a_z = \frac{l}{4 \cdot D_{кр} \cdot \left(1 + \frac{V_l - V_{cm}}{V_{кр}}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $l$  – длина царапины на поверхности ленты,  $D_{кр}$  – диаметр ШК.

Статистическая обработка данных эксперимента позволила построить график распределения числа вершин зерен по глубине РП ШК (рис. 3).

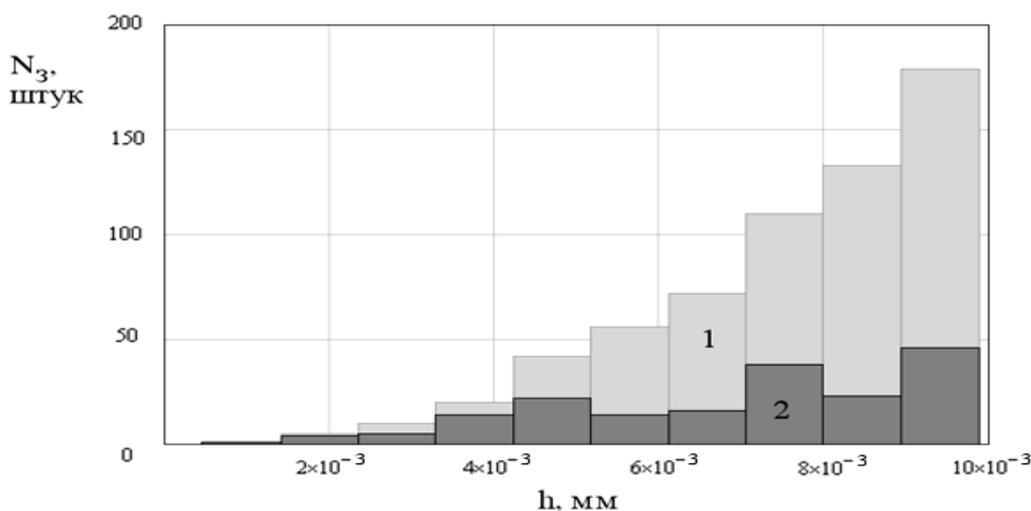


Рис. 3. Гистограмма распределения числа АЗ по глубине РС ШК (объем выборки 179 шт.): 1 – количество АЗ на глубине  $h$  нарастающим итогом; 2 – количество АЗ в слое

В результате обработки экспериментальных данных был определен закон изменения плотности вершин АЗ по глубине РС ШК:

$$\rho_z = K \cdot h^{2,15}, \quad (2)$$

где  $K$  – комплексный коэффициент, учитывающий зернистость и номер структуры ШК.

Подготовка и реализация проведенного эксперимента осуществлялись Переладовым А. Б. в рамках диссертационных исследований (научный руководитель к.т.н., доцент В. И. Курдюков).

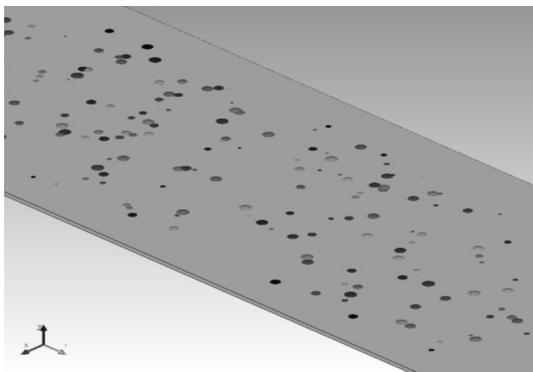


Рис. 4. Фрагмент развертки вероятностной 3D модели РСШК 25AF40L6V (глубина РС 20 мкм)

С использованием полученных результатов была создана вероятностная компьютерная модель РСШК (рис. 4) в системе T-Flex CAD 12 (номер лицензионного ключа 1A4FA6A7). Использование данного программного комплекса позволило значительно упростить технологию моделирования за счет использования набора реализованных базовых функций параметрического создания сложных многоэлементных геометрических объектов. Модели вершин АЗ вставлялись как отдельные фрагменты, а сама модель РС являлась файлом 3D-сборки. Такой подход позволяет изменять параметры модели с минимальной доработкой. Моделирующая программа (макрос) была написана на языке C#, с использованием встроенного в T-Flex компилятора.

Изменяемые параметры модели: общее количество вершин зерен в модели, средний диаметр основной фракции зерен, доля объемного содержания материала АЗ в единичном объеме круга, высота круга, высота рабочего слоя, угол при вершине зерна.

В качестве модели АЗ был принят конус с углом при вершине  $160^\circ$  в соответствии с рекомендациями ряда исследователей (Ваксер Д.Б., Кенинг, Лорц, Мецуи).

Ширина модели поверхности круга и глубина РС задавались во входных параметрах, а длина поверхности вычислялась исходя из плотности расположения вершин АЗ по площади модели РП ШК. Плотность расположения АЗ зависит от глубины рабочего слоя и определялась по формуле 2.

Результаты исследований используются при создании вероятностных моделей взаимодействия ШК с поверхностью заготовки в процессе шлифования, с целью определения статистических параметров микрорезания обрабатываемого материала активными режущими зернами [2].

Исследования выполняются по государственному контракту № 11474р/20982 с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Программа СТАРТ – 13, направление Н1).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Байкалов, А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – К.: Наукова думка, 1978. – 208 с.
2. Переладов, А. Б. Моделирование процесса шлифования с использованием программного комплекса T-Flex/ А. Б. Переладов, И. П. Камкин // Зауральский научный вестник. – 2013. – №1(3). – С. 30-33.

УДК 621.922

*А. Б. Переладов, И. П. Камкин, И. В. Кожевников, А. В. Анохин*

#### СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Курганский государственный университет

E-mail: tp@kgsu.ru

Разработана компьютерная программа для имитационного моделирования дисперсных систем (ДС) с простым и сложным зерновыми составами. Возможности программы позволяют определять степень заполнения объема ДС материалом частиц в зависимости от соотношений зернистостей и объемов составляющих ее компонентов, координационное число, плотность системы, оценивать степень неоднородности ДС, определять другие показатели. Результаты исследований используются для проектирования абразивного инструмента с оптимальным зерновым составом составляющих его шлифматериалов и структурных наполнителей.

*Ключевые слова:* абразивный инструмент, структура, компьютерное моделирование, вероятностная модель, дисперсная система, зерновой состав.

A computer program for simulation of dispersed systems with simple and complex grain compositions is designed. The program allows determining the degree of filling of the volume of dispersed system material particles, depending on the ratios grits and volumes of their components, the coordination number, the density of the system, assessing the degree of heterogeneity of the dispersed system and determining the other indicators. Results of researches are used for the design of the abrasive tool with the optimal grain distribution of its grinding materials and structural fillers.

*Keywords:* abrasive tool, structure, computer modeling, likelihood models, dispersed system, grain distribution.

Совершенствование методик проектирования операций абразивной обработки на основе использования автоматизированных средств расчета сегодня по-прежнему является актуальной научно-практической задачей, эффективное решение которой значительно облегчит поиск оптимальных решений. Одним из наиболее значимых элементов системы операции абразивной обработки является абразивный инструмент (АИ), обоснованный выбор статических характеристик которого (твердость, прочность закрепления абразивных зерен на его рабочей поверхности инструмента, пористость и другие) во многом определяет производительность и качество процесса обработки.

Обеспечение требуемых характеристик АИ осуществляется при его проектировании и изготовлении. Современный АИ, зачастую, имеет сложный зерновой состав и изготавливается с использованием различных структурных (например, корундовые и стеклянные микросферы, косточка фруктовая и другие) и технологических (декстрин, жидкое стекло, пирит и другие) наполнителей, что требует определения оптимальных размеров частиц и объемных соотношения компонентов. Обычно на практике рассчитываются двух- или трехкомпонентные дисперсные системы (ДС), состоящие из абразивных зерен (АЗ) одной или нескольких зернистостей, дисперсных структурных наполнителей, неразрушающихся в процессе прессования и обжига, и обеспечивающих формирование устойчивого каркаса структуры АИ. Показатели строения структуры АИ во многом определяют технологичность его изготовления на стадиях прессования и спекания сформированной заготовки инструмента [1]. Связка, другие мелкодисперсные и/или легко разрушающиеся при прессовании абразивной массы наполнители, как правило, не принимают участия в формировании каркаса структуры АИ и не поглощают энергию прессования, ввиду значительно меньшего размера частиц по сравнению с АЗ и структурными наполнителями, невысоких прочностных свойств их материала и особенностей его фазового состояния (газ, жидкость, гель и т.д.). Поэтому, объем таких наполнителей назначается (ограничивается) исходя из рецептурных соображений, с учетом оставшегося объема, не занятого структурообразующими частицами.

Решение задач проектирования абразивного инструмента сводится, в основном, к достиже-

нию требуемой (или максимальной возможной) плотности укладки АЗ и структурных наполнителей, образующих каркас АИ, которая обеспечивается прессованием без разрушения составляющих его структурных элементов. При этом в производственных условиях обычно не используются теоретические и экспериментальные зависимости, по причине их не универсальности, а опытным путем, методом проб, определяются оптимальное соотношение объемов компонентов с тем или иным соотношением средних размеров частиц. В качестве критериев оптимизации обычно используют показатели структуры АИ: коэффициент заполнения объема инструмента материалом АЗ и структурных наполнителей ( $K_{см}$ ), плотность смеси, объем пор и другие.

По результатам изучения и анализа известных методов расчета и управления параметрами ДС, было решено провести собственные исследования, с целью определения показателей строения и интегральных характеристик структуры инструмента с различным зерновым составом. При выборе метода и средств исследования, учитывалось, что подобные системы имеют микронеоднородную организацию, обусловленную случайным распределением показателей дисперсных частиц (форма, размеры, рассев, зерновой состав, другие показатели) и их положением в пространстве [2]. Учитывая стохастическую природу и характер структуры ДС и большое число составляющих ее элементов (АЗ), было решено исследования проводить на основе использования закона больших чисел с применением специально разработанных программных средств моделирования и исследования полученных структур.

Моделирование осуществлялась с использованием написанной на языке C++ компьютерной программы, позволяющей создавать 3-х мерные вероятностные модели ДС АИ, имеющие непрерывный и разорванный зерновые составы смеси из частиц условно неупругого материала (далее зерна) с абсолютно гладкой поверхностью, имеющих сферическую и/или эллипсоидную формы. В качестве дополнительного элемента в модели ДС учитывался и связка, которая в процессе термообработки реального инструмента постепенно размягчась, растекается по поверхности зерен, увеличивая их диаметры. При этом, образуются и, в результате явления массопереноса при вязком течении [3], окончательно формируются, мос-

тики связки в местах контакта зерен и дополнительные мостики связки между наиболее близко расположенными, но не находящимися в непосредственном контакте, зернами. Толщина слоя связки рассчитывалась с учетом общей поверхности зерен в ДС и вытесненного ее объема из контактов между ними.

Основная идея алгоритма работы моделирующей программы заключалась в наполнении определенного виртуального объема путем последовательного размещения в нем структурных элементов (зерен), составляющих ДС. С использованием генератора случайных чисел, определялась принадлежность очередного зерна к совокупности зерен той или иной зернистости, его диаметр, в пределах выбранной зернистости с учетом принятого нормального закона распределения размеров зерен, показатели их изометричности. Пространственное расположение очередного зерна в объеме модели задавалось по критерию наличия, как минимум, 3-х начальных точек контакта (начальное коор-

динационное число  $N_n$ ) с другими зернами и плоскостями – границами объема. При этом, из всех возможных вариантов размещения зерна, выбирался вариант с минимальной координатой по высоте объема, что обеспечивало равномерное его наполнение. Эти условия обеспечивали устойчивое положение очередного зерна в укладке и максимально возможную плотность их упаковки. Далее цикл генерации и размещения очередной модели зерна в объеме повторялся до полного его заполнения заданным числом зерен. Результатом работы программы являлась построенная трехмерная модель упаковки зерен ДС и рассчитанные параметры ее структуры.

Ниже приведены примеры моделирования ДС с различными зерновыми составами. На рис. 1 изображена объемная укладка ДС, состоящая из 3-х зернистостей. Укладка генерируется в пространстве ограниченном условными плоскостями, которые образуют дно и стенки объема.

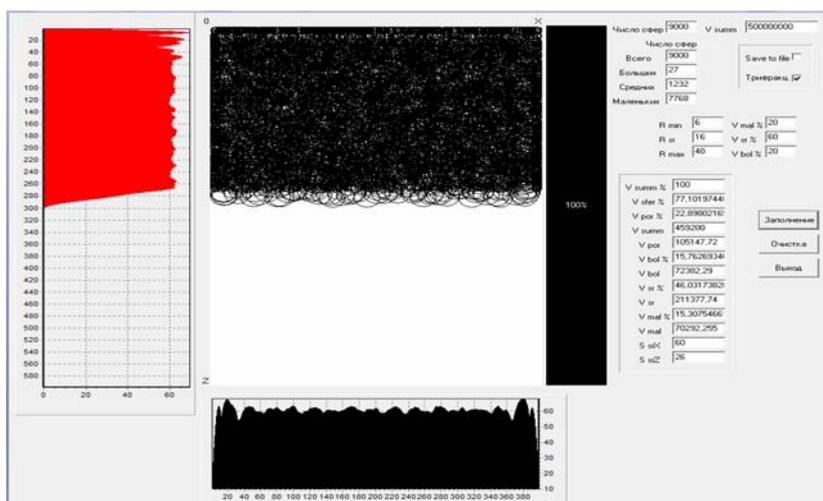


Рис. 1. Интерфейс программы для моделирования ДС с исходными данными и результатами моделирования (общее число зерен в модели - 9000, число зернистостей – 3, соотношение диаметров зерен - 6 / 16 / 40 и соответствующее объемное соотношение зернистостей - 20 / 60 / 20; объем ДС занятый сферами ( $K_{см}$ ) - 77%, объем ДС занятых порами ( $K_{пор}$ ) - 23%)

Зерна начинают размещаться в заданном объеме в направлении от дна (сверху в низ). Высота объема не ограничена. Граничный слой, формирующийся вблизи стенок обладает признаками регулярного строения и отличается от строения структуры основного объема смеси зерен. Для определения толщины граничного слоя осуществлялись последовательные сечения смеси зерен плоскостями с определенным шагом, параллельно выбранной границе объема

ДС. В каждом сечении определялись соотношения площадей сечений зерен и пор, значения которых использовались для анализа показателей неоднородности полученной ДС и определения величины граничного слоя. Объем слоя с признаками регулярного строения исключался из объема анализируемых статистических данных. На рис. 1 содержатся графики изменения плотности ДС по высоте (вертикальный график слева) и по ширине (горизонтальный

график снизу) смеси. Неоднородность ДС хорошо видна по краям кривых графиков.

Результаты компьютерного моделирования позволяют получить значения координационного числа ( $K_n$ ) для каждого зерна, среднего  $K_n$  для зерен определенной зернистости и всех зерен ДС в целом (рис. 2 и 3).

Степень адекватности компьютерных моделей ДС была проверена путем сравнения полученных моделированием результатов с результатами проведенных физических экспериментов с использованием 3-х компонентной смеси состоящей из гранул не вспененного полистирола для 6 различных объемных соотношений зернистостей. Разница полученных значений  $K_{см}$  не превышала 3% для электрокорундовых и 4% для карбидокремниевых шлифматериалов. Программа так же позволяет создавать модели высоких структур АИ (например, арочные), с объемным содержанием материала АЗ менее 50%, путем использования различных на-

чальных значений  $N_n$  ( $N_n = 1, 2, 3$ ) и определенного соотношения вероятности их реализации в модели.

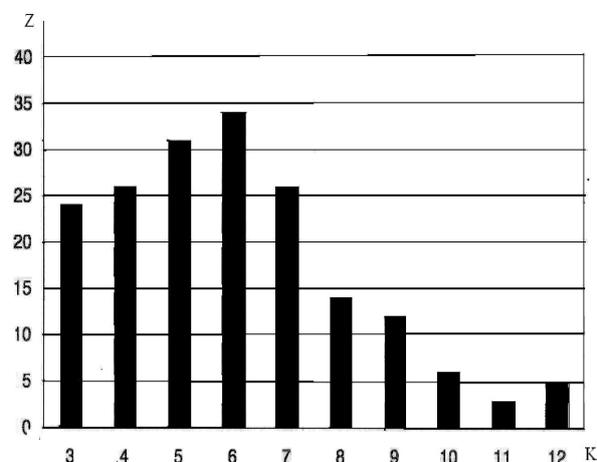


Рис. 2. Гистограмма частоты ( $Z_k$ ) определенных значений  $K_n$  для ДС, состоящей из зерен одной зернистости с содержанием связки 12,5% от объема смеси ( $K_{см} = 0,48$ ):  $Z$  – число зерен ДС (193 шт); зерна – неплоский эллипсоид с отношением полуосей 1,1

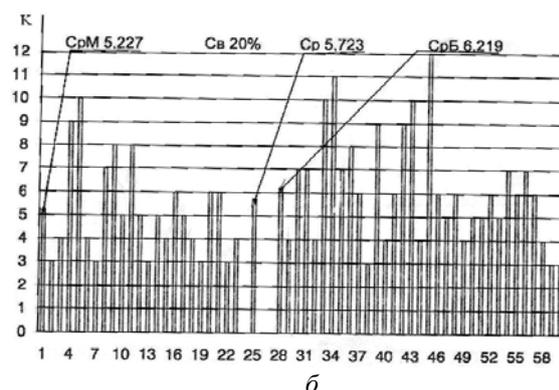
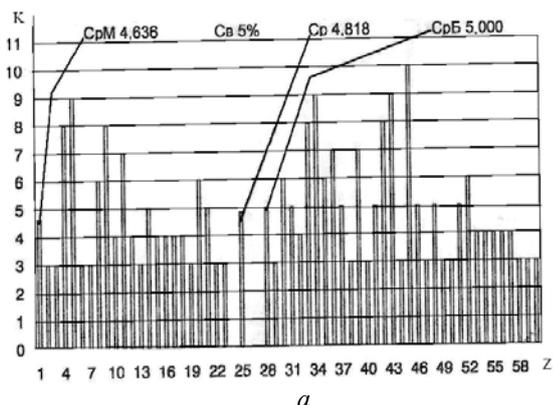


Рис. 3. Гистограмма  $K_n$  для ДС, состоящей из зерен двух зернистостей (соотношение диаметров зерен 1:1,5): Соотношение числа зерен (сферы) меньшего и большего диаметров в полезном объеме ДС: 25 / 61. Средние значения показателя  $K_n$  для зерен меньшего, большего диаметров и всех зерен ДС, соответственно: а - с содержанием связки 5% по объему: 4,64 / 5,00 / 4,82; б - с содержанием связки 20% по объему: 5,22 / 6,22 / 5,72.

Таким образом, разработанный алгоритм моделирования и написанная на его основе программа, позволяют моделировать структуры ДС, имеющие вероятностную природу строения, что на практике позволяет определять оптимальный зерновой состав абразивных масс, используемых для изготовления АИ с заданным объемным содержанием материала абразивных зерен и структурных наполнителей. Использование моделирующей программы позволяет проектировать устойчивые структуры АИ, не подверженные усадке при обжиге и термообработке, и не допускать избыточного прессования заготовки инструмента, приводящего к разрушению его структурных инструментов.

Использование моделирующей программы позволяет определять число и площади сечений мостиков связки, скрепляющих АЗ, что делает возможным проектирование АИ с требуемой твердостью.

Результаты исследований использовались на ОАО «Челябинский абразивный завод» при проектировании шлифовальных кругов большого диаметра, состоящих из двух зернистостей, и имеющих закрытые структуры (объемное содержание шлифматериала 52-58%) и отработке технологии их изготовления.

Моделирующая программа является универсальной и может быть применена при решении основного уравнения прессования порош-

ковых материалов и проектировании дисперсных систем полимербетонов, керамических фильтров, порохов, твердых сплавов и других ДС со сложными зерновыми составами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Любомудров В.Н. и др. Абразивные инструменты и их изготовление. М. - Л.: Машгиз, 1953. - 376 с.

2. Шаталова И.Г. Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов. М.: Наука, 1965. – 163 с.

3. Скороход В.В., Солонин С.М. Физико-металлургические основы спекания порошков. – М.: Metallurgy, 1984. – 159 с.

УДК 621.9.025.728.82

*М. Ю. Полянчикова, Ю. Н. Полянчиков*

### РАБОТОСПОСОБНОСТЬ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАСТИН, ПОЛУЧЕННЫХ УДАРНЫМ ПРЕССОВАНИЕМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: polyanka86@mail.ru

В статье приведен анализ влияния объемного содержания карбидных и кобальтовых фаз в твердосплавном инструменте на производительность и качество обработки деталей из труднообрабатываемых материалов. Показано, что получение твердосплавного инструмента методом ударного прессования, последующего высокотемпературного спекания и его пропиткой в жидком кобальте значительно улучшает качество обработки, повышает производительность и снижает износ инструмента.

*Ключевые слова:* твердый сплав, металлокерамика, ударное прессование, режущие свойства.

The article provides an analysis of the impact of the volumetric maintenance of carbide and cobalt phases in hard-alloy performance and treatment quality. It is shown that the obtaining of hard-alloy tool method of the shock pressing, the subsequent high-temperature sintering and its impregnation liquid cobalt improves the quality of treatment, increases productivity and reduces tool wear.

*Keywords:* hard-alloy, cermet, shock pressing, cutting properties.

В Советском Союзе впервые был создан и внедрен в 1926 г. однокарбидный металлокерамический твердый сплав на основе карбида вольфрама и кобальта в качестве связки [5], а в 1931 г. были созданы двухкарбидные металлокерамические твердые сплавы на основе карбидов вольфрама и титана, а также – трехкарбидные, включающие в свой состав и карбид тантала, использующие в качестве связки кобальт.

Современными способами получения вышеуказанных твердых сплавов являются методы порошковой металлургии [3], которые включают статическое прессование и спекание при температуре  $T_{\text{спек}} = 0,8 \cdot T_{\text{плав}}$ , где  $T_{\text{плав}}$  – температура плавления входящего в сплав легкоплавящегося компонента.

Значительным количеством исследований доказана высокая режущая способность твердого сплава по сравнению с быстрорежущей сталью при различных видах обработки большой номенклатуры материалов, в том числе и труднообрабатываемых. В статье [1] приводится научно обоснованное подтверждение влияния объемного содержания фаз – Co, WC, (Ti, W)C, (Ti, Ta, W)C – в спеченном твердом сплаве на его режущие свойства, т.к. от объемного

содержания фаз зависит удельная площадь контакта обрабатываемого материала с той или иной фазой твердого сплава, а следовательно, и интенсивность диффузионного износа инструмента. От объемного содержания фаз, по мнению авторов [1], зависит площадь межфазных контактов в самом твердом сплаве, то есть сила, удерживающая карбидные зерна в инструментальном материале. Кроме того, от объемного содержания фаз зависит прочность и твердость [4] твердого сплава как способность сопротивляться хрупким сколам и разрушениям, так и сопротивление пластической деформации при наличии возникающих в процессе резания высоких давлений и температур.

Повышенное содержание карбидов и, естественно, пониженное содержание кобальта в составе твердого сплава увеличивает твердость, повышает его хрупкость и температурную устойчивость, что особенно важно при чистовом точении на высоких скоростях резания.

Однако существующая рецептура и способы изготовления современного твердосплавного инструмента не позволяют изменять его твердость в широких пределах. Данные справочника [4] по твердости твердого сплава дают

следующие значения: у сплава ВК3 твердость 89,5 HRA, у сплава Т30К4 твердость 92 HRA, у сплава ТТ7К12 твердость 87 HRA.

По этим данным можно сделать следующий вывод: уменьшение количества кобальта на 9 % лишь на 5 единиц HRA увеличивает твердость твердого сплава. При этом скорость резания при черновом и чистовом и, тем более, тонком точении не может значительно изменяться. Это приводит к тому, что чистовое и тонкое точение невозможно проводить на более значительных скоростях резания, что приводило бы к повышению производительности и снижению высоты микронеровностей обработанной поверхности.

Значительное увеличение производительности и качества поверхности при точении на чистовых режимах возможно при значительном повышении твердости металлокерамического инструмента.

Это может быть достигнуто при использовании нового способа изготовления твердосплавного инструмента [2], при котором осуществляют не статическое, а ударное прессование зерен карбидов металлов (вольфрама, титана), последующее высокотемпературное спекание и пропитку кобальтом. Если в стандартном твердосплавном инструменте кобальтовая связка служит лишь для удерживания зерен карбидов вольфрама и титана, которые, осуществляя процесс резания, затупляются, скалываются, разрушаются и удаляются стружкой из тела инструмента, то в новом инструменте при ударном нагружении зерна карбидов металлов дробятся, сближаются по только что обнажившимся особо чистым, «ювенильным», поверхностям, по которым формируются адгезионные связи, приводящие к созданию твердосплавной прессовки, имеющей первоначальную прочность. Прочность ее и твердость значительно увеличиваются при высокотемпературном спекании. Экспериментальные данные позволили установить, что прочность и твердость твердосплавного инструмента зависит лишь от энергии ударной волны, температуры и длительности спекания. Прочность на изгиб при различных режимах получения лежала в пределах 1600÷1900 МПа, а твердость – 95÷101 единиц HRA.

Экспериментальные исследования при чистой токарной обработке стали 40Х показали, что при скорости резания 170 м/мин, подаче 0,1 мм/об и глубине резания 0,1 мм износ твердого сплава, полученного новым способом изготовления, уменьшился по сравнению со стандартной пластиной на 47%, высота микронеровностей уменьшилась на 28%.

Новый способ изготовления твердосплавного инструмента предполагает его пропитку в жидком кобальте. Однако его назначение в новом инструменте уже совсем иное, чем в стандартном инструменте. При ударном прессовании и спекании сформировавшиеся адгезионные связи значительно увеличивают прочностные свойства, по сравнению с кобальтовой связью между зёрнами карбидов. Пропитка кобальтом в новом инструменте лишь удерживает карбидные зёрна, не совсем разрушенные в процессе резания, от полного выпадения из инструмента и позволяет им продолжить участвовать в съеме металла.

Таким образом, новый твердосплавный инструмент не зависит от объемного содержания карбидной и кобальтовой фаз, т.к. прочность и твердость инструмента зависит лишь от режимов ударного прессования и спекания, что легко регулируется на стадии получения и не зависит от объемного соотношения составляющих требуемого твердого сплава.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липатов, А. А. Оценка режущих свойств твердосплавного инструмента по объемному содержанию фаз / А. А. Липатов, Ю. Л. Чигиринский // Известия ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 13 (100). – С. 34 – 37.
2. Пат. 2043870 Российская Федерация, МПК В 22 F 3/26, 3/08. Способ изготовления твердосплавного инструмента / В. М. Оробинский, Ю. Н. Поляничков. – Опубл. 20.09.1995, Бюлл. № 26.
3. Политехнический словарь / гл. ред. И. И. Артоболевский. – М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1977. – 608 с.
4. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко [и др.]; под общ. ред. И. А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-е, 1987. – 846 с.
5. Технологи России (машиностроение). Т. 1. Технология машиностроения, станки и инструменты: энциклопедия / А. Г. Суслов, В. В. Бушуев, В. А. Гречишников, В. П. Смоленцев. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 412 с.

УДК 621.774.353

*А. С. Сенякина, О. А. Макарова***АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ  
НА СТОЙКОСТЬ ОПРАВОК ПРОШИВНОГО СТАНА****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@mail.ru

Возникновение напряжений от неметаллических включений в оправке прошивного стана является одним из доминирующих факторов, который влияет на ее работоспособность.

*Ключевые слова:* оправка прошивного стана, износостойкость, дефект, неметаллические включения

Emergence of a pressures from no metal inclusions in the mandrel of piercing mill is the one of important facts to influence on efficiency.

*Keywords:* mandrel of piercing mill, wear resistance, defect, no metal inclusions.

В процессе эксплуатации оправка прошивного стана подвергается воздействию ряда условий деформации, основными из которых является силовые и температурные, а также силы трения, которые возникают в области контакта рабочей поверхности оправки с деформируемым металлом. Значительные силовые нагрузки и усилия трения приводят к образованию на поверхности оправки различных дефектов. Основными видами дефектов оправок являются: трещины напряжения, сетка разгарных трещин, налипание деформируемого металла на рабочую часть оправки, абразивный износ, образование волнистости на конической части оправки («гофр»), оплавление носка оправки [1].

При прошивке оправки упруго деформируются и за счет знакопеременных напряжений происходит развитие наружной сетки трещин, которая называется сеткой разгара и может распространяться вглубь оправки. В тоже время от недеформируемых неметаллических включений развиваются внутренние трещины, которые могут выйти на поверхность и привести к разрушению оправки. Причинами образования трещин могут быть термические и структурные напряжения в инструменте, а так же неметаллические включения, расположенные в устье трещины, которые могут являться концентраторами напряжений и вследствие разницы коэффициентов линейного расширения включений и матрицы вокруг неметаллических включений возникают внутренние напряжения, вследствие чего зарождаются трещины [2].

Объем стали, испытывающей пластическую деформацию, зависит от количества включений, их формы и величины теплового расширения [4]. Сульфидные включения имеют высокий температурный коэффициент, что приводит к образованию пор на поверхности раздела.

Легкость образования этих пор играет важную роль в вязком разрушении сталей с сульфидными включениями.

Неметаллические включения на основе их деформируемости характеризуют способность передавать напряжение. Включения с низким показателем деформируемости, могут инициировать усталостные трещины двумя способами:

1) вызывать непосредственное зарождение трещины в процесс эксплуатации из-за способности передавать напряжение матрице;

2) низкий показатель деформируемости включений может быть причиной появления микротрещин на поверхности раздела включение – матрица в процессе горячей пластической деформации стали. Предварительно возникшие микротрещины могут быть причиной усталостного разрушения материала из-за распространения трещин в процессе эксплуатации [2].

Сульфидные включения имеют высокий показатель деформируемости, не обнаруживают тенденции к образованию полостей, так как в данном случае не происходит нарушения связи между матрицей и включениями. Поэтому включения сульфидов не оказывают отрицательного влияния на усталостные характеристики стали [8].

Включения силикатов, показатель деформируемости которых занимает среднее положение между пластичными сульфидами и недеформируемыми оксидами, оказывают "промежуточное" влияние на усталостные характеристики [2].

На исследование поступили образцы, вырезанные из раскатной части оправок после 12, 57 и 1290 циклов использования. Эксплуатация анализируемых оправок была закончена после образования на их поверхности трещин и частичной потери слоя окалина.

В работе была исследована общая загрязненность неметаллическими включениями исследуемых образцов и проведена идентификация включений [3] с целью определения их вида и формы.

В исследуемых оправках, изготовленных из стали 20X2H4MФ после 12, 57 и 1290 циклов были обнаружены следующие виды включений [5]: оксиды FeO (рис. 1), FeO – MnO, сульфиды FeS, MnS (рис. 2) и силикаты SiO<sub>2</sub>, MnO·SiO<sub>2</sub> (рис. 3).



Рис. 1. Оксид FeO в стали 20X2H4MФ, ×1000



Рис. 2. Сульфид MnS в стали 20X2H4MФ, ×1000



Рис. 3. Силикат SiO<sub>2</sub> в стали 20X2H4MФ, ×1000

На всех анализируемых образцах включения идентичны по составу и расположению, но принципиально отличаются по количеству. Была подсчитана загрязненность металла по отдельным включениям [3] и общая, результаты представлены в таблице.

**Загрязненность неметаллическими включениями оправок после различных циклов**

Количество циклов	Индекс загрязненности			
	Оксиды	Силикаты	Сульфиды	Общий
12	12,92·10 <sup>-3</sup>	6,79·10 <sup>-3</sup>	14,72·10 <sup>-3</sup>	34,43·10 <sup>-3</sup>
57	10,15·10 <sup>-3</sup>	19,83·10 <sup>-3</sup>	25,61·10 <sup>-3</sup>	55,60·10 <sup>-3</sup>
1290	7,82·10 <sup>-3</sup>	8,00·10 <sup>-3</sup>	11,42·10 <sup>-3</sup>	27,24·10 <sup>-3</sup>

Роль неметаллических включений в формировании структуры и свойств металлоизделий достаточно велика, однако особенности образования оксидных, сульфидных и оксисульфидных включений находятся между собой в тесной взаимосвязи, и в зависимости от их количественного соотношения уровень пластических характеристик может существенно изменяться.

Вывод: как видно из таблицы, общая загрязненность неметаллическими включениями образцов из оправки после 57 циклов больше примерно в 1,5 раза, чем у оправок после 12 и 1290 прошивок. Самый высокий индекс загрязненности по деформируемым сульфидным включениям в образцах после 57 циклов. Однако самая высокая величина по загрязненности оксидными включениями оказалась у образцов после 12 циклов прошивки. Эти виды неметаллических включений являются концентратами внутренних напряжений, поэтому в оправках после 12 и 57 циклов неметаллические включения могли стать одной из основных причин выхода их из строя.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Чикалов, С. Г. Исследование работы технологического инструмента непрерывного стана ТПА 159-426 / С. Г. Чикалов, А. П. Фадеев, А. П. Коликов // *Сталь*. – 1999. – №3. – С. 38-44.
2. Нархов, А. В. Влияние неметаллических включений на механические свойства сталей / А.В.Нархов, Б.А.Клыпин, А.Рей // *Металловедение и термическая обработка*. – 2002. – №1. – С. 22-36.
3. Червяков, А. Н. Металлографическое определение включений в стали / А. Н. Червяков, С. А. Кисилева, А. Г. Рьльникова. – М.: *Металлургия*, 1972. – 195 с.
4. Романцев, Б. А. Повышение износостойкости оправок прошивного стана / Б. А. Романцев, О. К. Матыко //

Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – №8. – С. 16-19.

5. Металлографические методы определения неметаллических включений : ГОСТ 1778-70. – Взамен ГОСТ 1778-62 ; введ 01.04.1990. – М.: Стандартиформ, 2006. – 31 с. – (Межгосударственный стандарт).

6. Зюбан, Н. А. Исследование влияния окисленности металла на формирование оксидных, сульфидных и окисульфидных включений и свойств готовых изделий / Н. А. Зюбан, С. А. Пегешева, О. А. Шевцова, Н. В. Клячина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(109)

ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении» ; вып. 7). – С. 125–127.

7. Шевцова О. А. Исследования типа образующихся включений на качество слитков низколегированной конструкционной стали / О. А. Шевцова, Н. А. Зюбан, Д. В. Руцкий // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(64) ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении» ; вып. 4). – С. 174–178.

УДК 621.774.353

*А. С. Сенякина, О. А. Макарова*

### ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ ОПРАВКИ ПРОШИВНОГО СТАНА И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@mail.ru

Влияние микротвердости образцов от поверхности оправки к середине на работоспособность оправки прошивного стана.

*Ключевые слова:* оправка прошивного стана, износостойкость, микротвердость.

The impact of sample's microhardness on efficiency of the mandrel of piercing mil from it's surface to center.

*Keywords:* mandrel of piercing mil, wear resistance, microhardness.

В настоящее время на ОАО «ВТЗ» освоили производство бесшовных труб на прошивных станах. При прошивке на стане заготовке одновременно сообщается вращательное и поступательное движение. Она укладывается в канале по оси прокатки и проталкивается толкателем вплоть до валков, которые расположены друг над другом, имеют одинаковое направление вращения между собой. Заготовка увлекается указанными валками благодаря их наклону ( $5-17^\circ$  к оси прокатки) и прокатывается между валками. Для удержания металла в очаге деформации есть две направляющие линейки, расположенные в вертикальной плоскости. Действие валков и линеек дает нам внешний диаметр трубы. Для получения внутреннего отверстия нужного диаметра с ровной поверхностью прокатку проводят на оправке - конусообразном инструменте, установленном на конце стержня между валками на пути движения заготовки. При движении вперед заготовка надвигается на оправку - прошивается, при этом происходит расширение и выравнивание прошитого отверстия. Температурный режим при работе около  $1200^\circ\text{C}$ , а температура оправки  $380-410^\circ\text{C}$  [1].

В таких тяжелых условиях работы появляются множество дефектов, которые уменьшают

износостойкость оправки. Поэтому было проведено исследование микроструктуры образцов, вырезанных из раскатной части оправок после 12, 57 и 1290 циклов использования, эксплуатация которых была закончена после образования на их поверхности трещин и частичной потери слоя окалины.

В работе были произведены измерения микротвердости образцов от поверхности оправки к середине для определения структурных составляющих по сечению [2]. Результаты измерений и распределение микротвердости [3] по сечению образцов представлены в таблице и на рис. 1.

Как видно из таблицы, микротвердость у поверхности образца после 12 циклов прошивки составляет  $520 - 586 \text{ HV}_{100}$ , что соответствует структурам нижнего бейнита и мартенсита [6].

Оправки эксплуатируются в тяжелых условиях, а именно нагрев при прошивке поверхности оправки нагревается до температуры  $920^\circ\text{C}$ , что выше критической точки  $A_{c3}$ , т. е. процесс деформации заготовки происходит в аустенитном состоянии и затем оправку охлаждают по выходу из трубы водой спрейерно, то есть в процессе работы могла происходить частичная поверхностная закалка оправки. Вследствие цикличности работы оправки (быстрый

нагрев и охлаждение рабочей поверхности) происходит многократная перезакалка рабочей поверхности с кратковременной выдержкой при температуре нагрева под закалку, и как следствие увеличение микротвердости [4]. Вы-

сокая микротвердость объясняется наследственной передачей развитой дислокационной структуры горячедеформированного аустенита, образующегося при последующем охлаждении оправки, мартенситу.

Микротвердость исследуемых образцов

Количество циклов	Значение микротвердости от поверхности к центру, HV <sub>100</sub>							
	5	10	15	20	25	30	35	40
12	586	520	396	385	303	275	337	262
57	322	295	288	300	263	322	290	303
1290	296	290	286	262	245	289	296	262

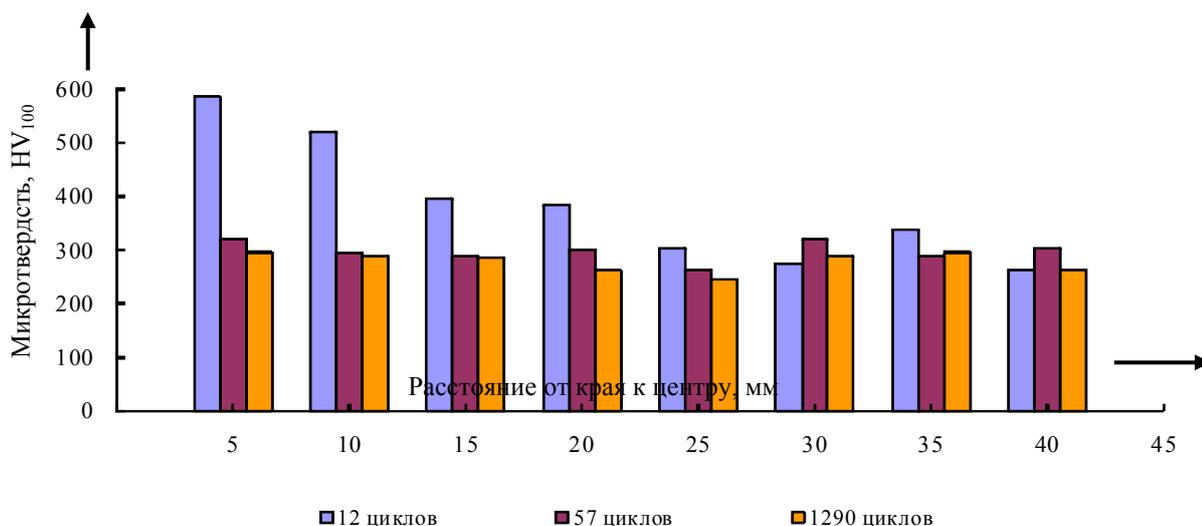


Рис. 1. Распределение микротвердости по сечению образцов

В центре образца после 12 циклов твердость составила 262 – 385 HV<sub>100</sub> и характеризуется структурой верхнего бейнита и сорбита, которые сформировались после термической обработки оправки – окислительного отжига. Неравномерная микротвердость у образцов после 12 циклов полученная в результате термоциклирования привела к упрочнению поверхности при малом количестве циклов, что привело при циклических нагрузках к образованию трещины на поверхности. В остальных образцах микротвердость более низкая, т. е. произошло разупрочнение и напряжения в процессе горячей обработки давлением релаксировали.

На образцах после 57 и 1290 циклов прошивок микротвердость, как у поверхности, так и в середине образца примерно одинаковая и составляет 262 – 320 HV<sub>100</sub>. Это связано с динамической полигонизацией, которая заключается в чередовании процессов упрочнения (повышения плотности дислокаций) в результате наклепа в процессе горячей деформации и разупрочнения (уменьшения плотности дислока-

ций) [5]. Микроструктуры образца после 57 и 1290 циклов прошивок представляют собой механическую смесь сорбита и верхнего бейнита.

Так же можно отметить, что у оправки, которая прослужила наибольшее количество циклов, наблюдается повышенное содержание ванадия по отношению к химическому составу остальных оправок, который способствует повышенной устойчивости стали к отпуску, при высоких эксплуатационных температурах.

В процессе работы в подоксидном слое происходит увеличение скорости диффузии углерода, что является причиной увеличения обезуглероженного слоя. Одновременно с этим, в процессе термоциклирования происходит увеличение толщины оксидного слоя примерно на 150 – 200 мкм (рис. 2). Это связано с присутствием никеля в количестве 4 %. Влияние никеля на интенсивное внутреннее окисление объясняется тем, что оксид никеля, образующийся на поверхности, остается на границе оксид – основной металл и препятствует дальнейшему переходу железа из внутренней части

металла в окалину. В тоже время окисление идет вглубь металла по границам зерен. Это придает оксидному слою пластичность и прочность сцепления с окисляемым металлом, и он менее подвержен отслаиванию.

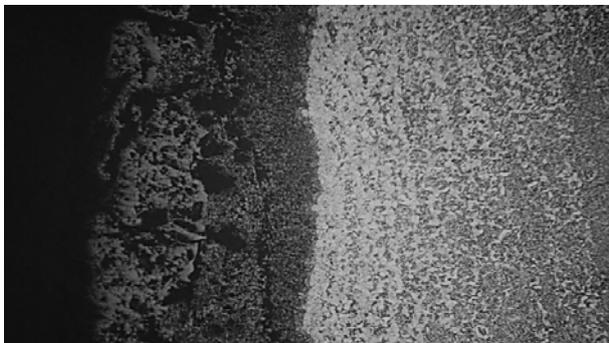


Рис. 2. Микроструктура на границе окалина – металл образцов после 57 циклов,  $\times 100$

У образцов от отправки после 12 прошивок, работавших в условиях термоциклирования, размер зерна у поверхности 5 – 6 балл, в центре составляет 4 – 5 балл. Более мелкое зерно у поверхности оправки объясняется упрочнением ее в процессе термоциклирования, за счет образования мелкозернистого слоя феррита прочно сцепленного со слоем оксида на поверхности оправки.

Вывод: структура оправки, на поверхности которой образуется мартенсит, имеет повышенную твердость, что в процессе эксплуата-

ции приводит к сколу окалины на рабочей поверхности и выходу ее из строя. Наилучшей структурой для обеспечения работоспособности оправок является смесь сорбита и верхнего бейнита.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чикалов, С. Г. Исследование работы технологического инструмента непрерывного стана ТПА 159-426 / С. Г. Чикалов, А. П. Фадеев, А. П. Коликов // Сталь. – 1999. – №3. – С. 38-44.
2. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников : ГОСТ 9450 – 76 ; введ. 01.01.1977. – М.: Стандартиформ, 2005. – 35с. – (Межгосударственный стандарт).
3. ГОСТ Р 50779.22-2005. Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего ; введ. 01.07.05. – М.: Стандартиформ, 2008. – 7 с. – (Межгосударственный стандарт).
4. Романцев, Б. А. Повышение износостойкости оправок прошивного стана / Б. А. Романцев, О. К. Матько // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – №8. – С. 16-19.
5. Касьян, В. Х. Влияние температурно-силовых условий деформации на стойкость прошивных оправок / В. Х. Касьян, С. В. Мазур // Металлургическая и горно-рудная промышленность. – 2003. – №2. – С. 57-61.
6. Ильинский В. А. Улучшение механической обрабатываемости отливок/ В. А. Ильинский, Ю. В. Гребнев, Л. В. Костылева, Н. И. Габельченко, Т. Т. Гребнева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(64) ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»; вып. 4). – С. 147–151.

УДК 621.91

*В. А. Солодков*

### ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕРЫВИСТОГО РЕЗАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vsti.ru

Проведенные исследования прерывистого резания подтверждают данные о влиянии процессов пластического деформирования в зоне стружкообразования и контактной зоне на характер и интенсивность износа передней и задней поверхности.

*Ключевые слова:* пластическое деформирование, прерывистое резание, прижимной элемент, микротвердость.

The researches, conducted of discontinuous cutting confirm influence of processes of plastic deformation in a zone shavingdeformation and contact zone to a character and intensity of wear on a back surface and on a forward surface.

*Keywords:* plastic deformation, faltering cutting, clamping element, microhardness.

Анализ температурно-деформационных особенностей прерывистого резания позволяет определенно говорить о решающем вкладе повышенной скорости деформаций в рост интенсивности тепловыделений при прерывистом резании [1]. Анализ же явлений, вызывающих повышенную скорость деформации приводит к

следующим выводам. Непосредственной причиной повышенной скорости деформаций является меньшая усадка стружки (больший угол сдвига) и, как следствие, более высокая скорость ее движения. Другими словами, при одной и той же скорости резания среднеинтегральная скорость деформации по длине реза

при прерывистом резании существенно выше, чем при установившемся резании [2].

Также, увеличению скорости деформаций способствует меньшая толщина контактной зоны на передней поверхности при прерывистом резании.

В свою очередь меньшая усадка стружки связана с меньшей величиной касательных сил на передней поверхности из-за меньшей длины полного и пластического контакта. Наконец меньшая длина контакта является следствием интенсивного завивания стружки в вертикальной плоскости.

Можно предположить, что если устранить или уменьшить завивание стружки, то возможно увеличение длины контакта и как следствие сил на передней поверхности и усадки стружки. В результате должна уменьшиться скорость движения стружки, скорость пластических де-

формаций, интенсивность тепловыделений и соответственно температура прерывистого резания.

Для проверки этого предположения в конструкцию фрезерного инструмента с механическим креплением твердосплавной режущей пластины был введен новый элемент (рис. 1). На переднюю поверхность режущей пластины 1 накладывался упругий прижимной элемент 2 на расстоянии от режущей кромки равном приблизительно двум толщинам срезаемого слоя  $a$ . При резании заготовки 3 образующаяся стружка 4 попадала под прижимной элемент 2, который устанавливался относительно передней поверхности режущей пластины с некоторым зазором  $\Delta$ . Прижимая проходящую под ним стружку к передней поверхности, этот элемент препятствовал ее завиванию и вынужденному отрыву от передней поверхности.

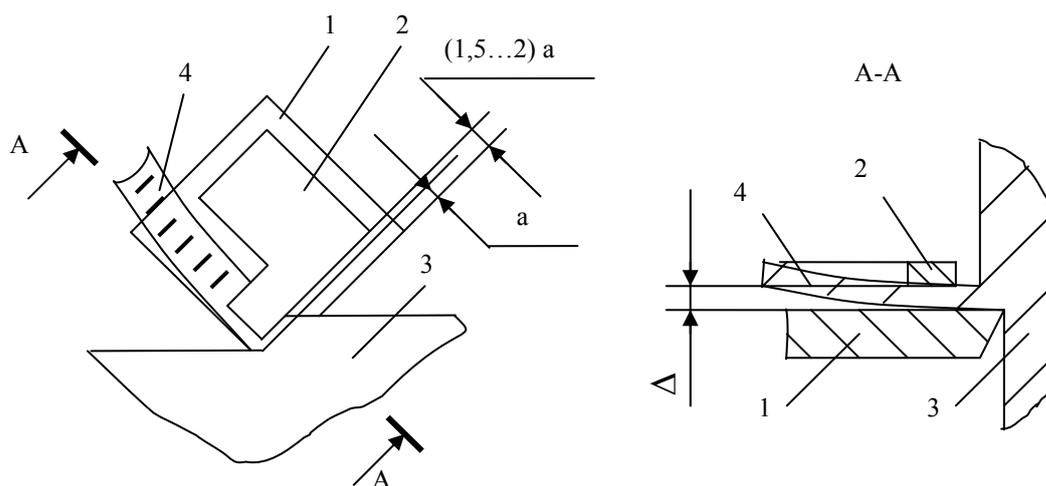


Рис. 1. Схема расположения прижимного элемента на передней поверхности твердосплавной режущей пластины

Как показали экспериментальные исследования, выполненные при следующих условиях: сталь 45 – ВК8, уровень измерения микротвердости от передней поверхности  $Z = 135$  мкм,  $V = 60$  м/мин,  $S = 0,34$  мм/зуб, длина единичного реза  $L \approx 150$  мм, прижимной элемент практически устраняет явление завивания стружки [1]. Как следствие, существенно меняются основные температурно-деформационные характеристики процесса резания.

Прежде всего, увеличивается ширина зоны стружкообразования  $S_2$  (совпадает с величиной участка упрочнения [3]) и возрастает степень упрочнения, достигаемая на ее конечной границе (рис. 2).

Также заметно возрастает усадка стружки и сила резания. Прежде всего те ее составляющие силы резания, которые действуют на передней поверхности.

Как уже было отмечено в работе [1] увеличение усадки стружки снижает скорость ее движения по передней поверхности. Если учесть, что при этом увеличивается высота зоны контактных пластических деформаций на передней поверхности, то можно сделать вывод о снижении скорости пластических деформаций в контактной зоне и в зоне стружкообразования. Известно, что скорость пластических деформаций непосредственно влияет на интенсивность тепловыделений [3].

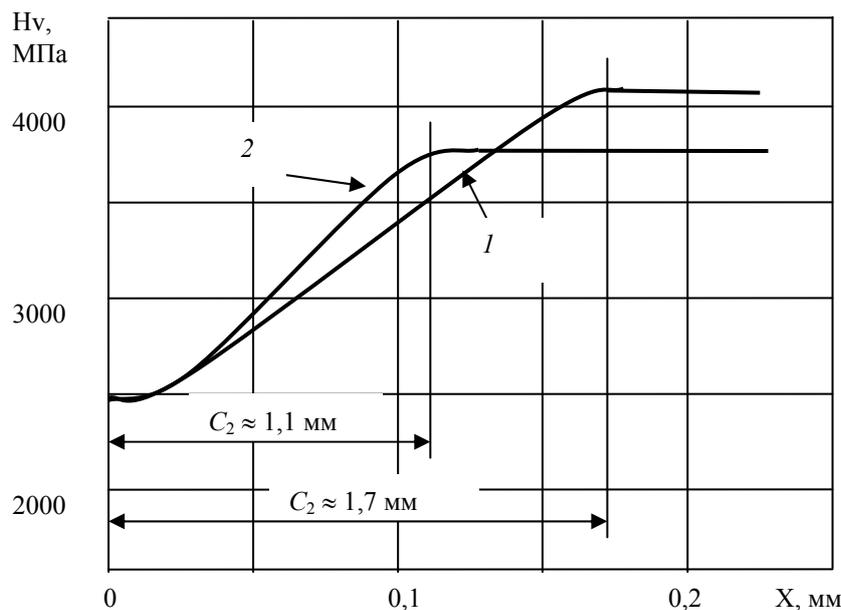


Рис. 2. Микротвердость в зоне стружкообразования с прижимным элементом (1) и без него (2)

Качественно интенсивность тепловыделений может быть определена по следующей формуле [3]:

$$q = \tau \cdot \dot{\epsilon}_k \cdot \Delta_b = \tau \cdot v_p / (K \cdot \Delta_b) = \tau \cdot v_c,$$

где  $\tau$  – контактные касательные напряжения;  $\dot{\epsilon}_k$  – скорость деформаций в контактной зоне;  $\Delta_b$  – средняя толщина вязкого слоя, мм;  $v_p$  – скорость резания, м/мин;  $v_c$  – скорость стружки, м/мин;  $K$  – усадка стружки.

Из представленной зависимости видно, что интенсивность тепловыделений будет возрастать с увеличением контактных касательных напряжений  $\tau$  и скорости резания  $v_p$  и с уменьшением усадки стружки  $K$  и высоты контактной зоны  $\Delta_b$ . Соответственно она будет снижаться при обратном изменении указанных параметров. Результаты расчета показывают снижение температуры резания и износа инструмента при использовании прижимного элемента. Результаты расчета подтверждаются экспериментально. При использовании прижимного элемента снижение термо-ЭДС составляет 1,0...1,5 мВ, что в соответствии с тарифовочными зависимостями для этой пары материал-инструмент эквивалентно 50...100°C температуры резания. Такое значительное снижение температуры резания не может не сказаться на износе инструмента. Проведенные стойкостные испытания (сталь 45–Т5К10,  $V = 190$  м/мин,  $S = 0,2$  мм/зуб) подтвердили предположение о снижении износа при введении в конструкцию фрезерного инструмента прижимного элемента, предотвращающего завивание стружки (рис. 3).

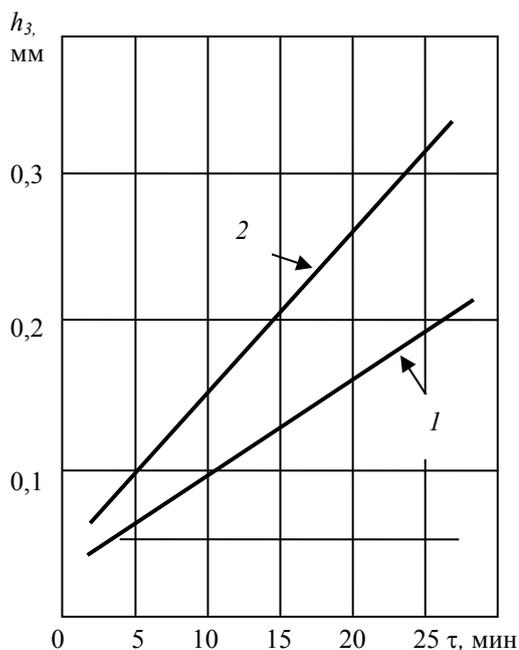


Рис. 3. Зависимость износа по задней поверхности от времени фрезерования с прижимным элементом (1) и без него (2)

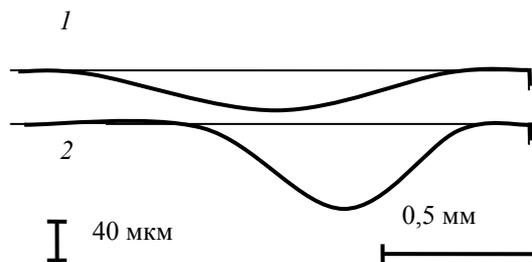


Рис. 4. Вид передних поверхностей при фрезеровании с прижимным элементом (1) и без него (2)

Кроме того, получены данные о влиянии прижимного элемента и на износ по передней поверхности (сталь 45–ТТ7К0,  $\tau = 12$  мин,  $V = 190$  м/мин,  $S = 0,2$  мм/зуб). Из представленных профилограмм (рисунок 4) хорошо видна различная топография изношенной передней поверхности: с прижимным элементом лунка износа имеет большую длину (больше длина контакта); без прижимного элемента лунка износа ближе к режущей кромке и имеет большую глубину.

Таким образом, влияя на движение стружки в момент врезания можно изменять условия пластического деформирования, определяющие основные характеристики процесса прерывисто-

го резания и тем самым снижать интенсивность износа твердосплавного инструмента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Солодков В. А., Жуков В. В. Особенности стружкообразования и пластического деформирования при прерывистом резании / В.А. Солодков // Сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОСТРОЕНИЯ», г. Самара, 2010.

2. Особенности стружкообразования и контактного взаимодействия при прерывистом резании / В.А. Солодков // Повышение эффективности обработки резанием. Коллективная монография / М.: Издат. дом «Спектр», 2012. – раздел 3. - с. 95-133.

3. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

УДК 621.91

*В. А. Солодков*

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ЗОНЕ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВРЕЗАНИИ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: techmash@vsti.ru

Проведенные исследования прерывистого резания подтверждают полученные при установившемся резании данные о взаимосвязи процессов пластического деформирования в зоне стружкообразования и контактной зоне.

*Ключевые слова:* пластическое деформирование, зона стружкообразования, врезание.

The researches, conducted of discontinuous cutting confirm dates, obtained for want of placed(installed) cutting, on correlation of processes of plastic deformation in a zone shavingdeformation and contact zone.

*Keywords:* plastic deformation, struzhkoobrazovaniye zone, incision.

Взаимовлиянию процессов в зоне стружкообразования и в контактной зоне на передней поверхности посвящено значительное количество исследований. В частности, в работе [1] доказано, что не только контактные процессы на передней поверхности влияют на зону стружкообразования, но и характер пластического деформирования в зоне стружкообразования определенным образом воздействует на процессы, происходящие на передней поверхности. В развитие предшествующих исследований в работе [2] установлен факт равенства ширины зоны стружкообразования и длины участка упрочнения (рис. 1).

Исследования микрошлифов корней стружек, полученных прерывистом резании, еще более убедительно подтверждает, установленную в этих работах взаимосвязь процессов пластического реформирования в зоне стружкообразования и контактной зоне. На рис. 2 для сравнения показаны кривые изменения микро-

твердости по ширине зоны стружкообразования на одинаковом расстоянии от передней поверхности ( $Z \approx 135$  мкм) для различных точек от начала врезания. Как видно (рис. 2), зона стружкообразования проходит в своем развитии несколько стадий. В начальный момент ( $L = 1...2$  мм), когда контактное течение только зарождается, сдвиговая деформация в зоне стружкообразования локализована в узкой полосе.

Затем, когда контактное течение на второй части контакта уже достаточно развито, ( $L = 2...3$  мм) ширина зоны стружкообразования резко возрастает, что хорошо согласуется с выводами работы [2], связывающей конечную границу зоны стружкообразования с концом участка упрочнения. В данном случае контактное пластическое деформирование, а следовательно, и участок упрочнения, удалены от режущей кромки. Поэтому процесс стружкообразования продолжается в зоне, конечная граница которой также удалена, от режущей кромки.

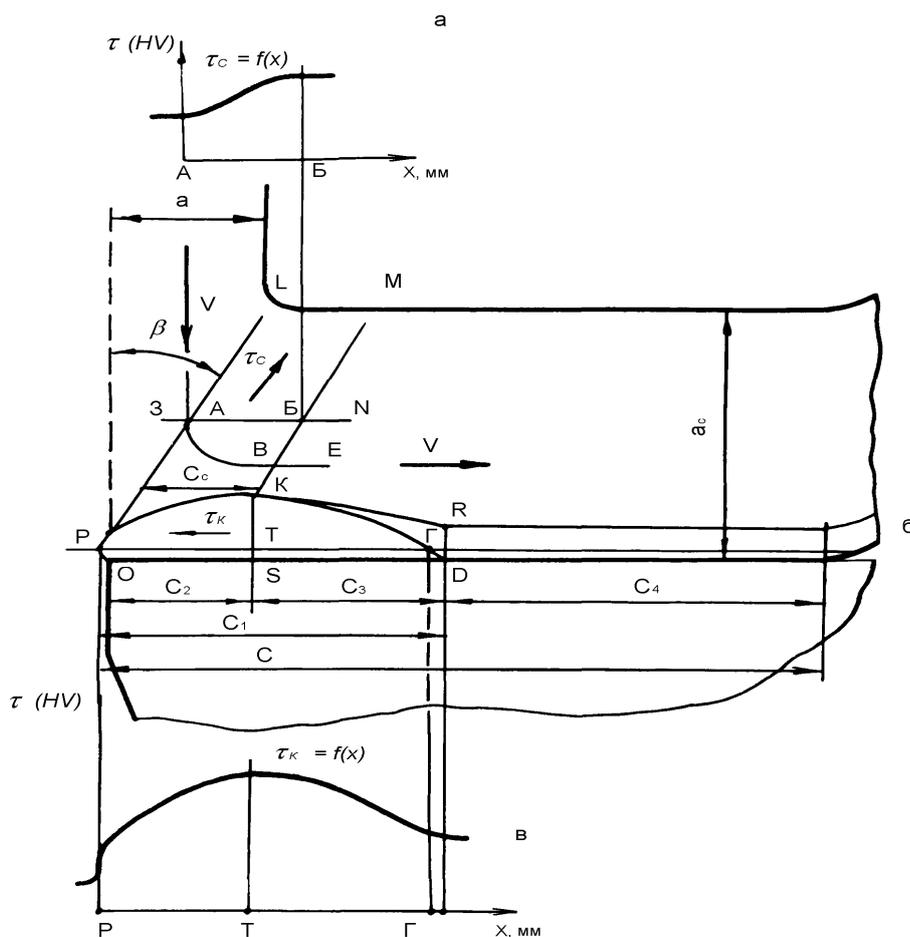


Рис. 1. Реальная схема процесса резания

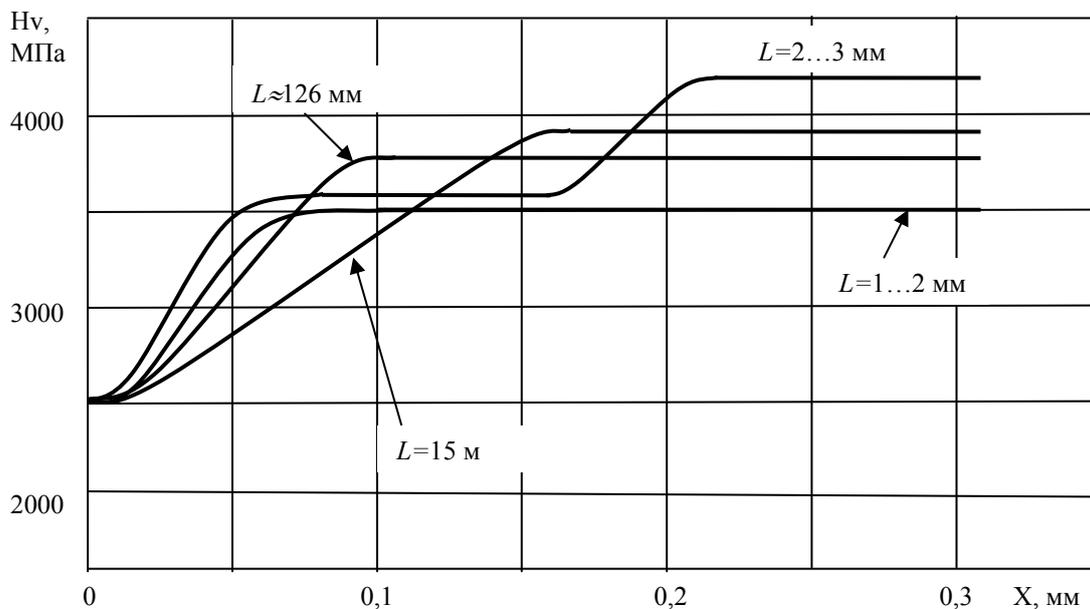


Рис. 2. Изменение микротвердости по ширине зоны стружкообразования.  
Сталь 45 – ВК8,  $Z = 135$  мкм,  $V = 60$  м/мин,  $S = 0,34$  мм/зуб

При этом зона стружкообразования как бы распадается на две зоны и ее ширина в этот мо-

мент больше, чем при установившемся резании ( $L \approx 15$  м). Аналогичная картина сохраняется

и после зарождения контактного течения вблизи режущей кромки ( $L = 9 \dots 10$  мм). Ширина зоны стружкообразования по прежнему значительна. Важной особенностью является достижение в этот момент максимума упрочненного состояния, который при этом превосходит соответствующие значения при установившемся резании. Очевидно, это связано с фактом двукратного деформирования обрабатываемого материала при его движении через зону стружкообразования. Однако, после образования единой контактной зоны ширина зоны стружкообразования резко уменьшается. При этом ее величина продолжает соответствовать величине участка упрочнения и при последующем резании растет вместе с ростом участка упрочнения ( $L \approx 126$  мм).

В работе [3], посвященной исследованию переходных процессов в зоне стружкообразования при врезании инструмента в заготовку, получена количественная оценка деформации в зоне стружкообразования. Установлено, что при врезании происходит постепенное нарастание силы резания, напряжений, степени деформации, упрочненного состояния (микротвердости) и длины контакта стружки с резцом, причем для достижения каждой из этих характеристик своего установившегося значения требуется разное время. Несмотря отличия в условиях проведения эксперимента в работе [3] и в настоящих исследованиях, некоторые полученные результаты близки. Так, по мнению авторов [3], наиболее характерной чертой переходного процесса стружкообразования является наличие в начальных стадиях врезания максимальных сдвиговых деформаций, значения которых для соответствующих точек больше, чем

при установившемся процессе. Иначе говоря, в период врезания существует глобальный максимум деформации в зоне стружкообразования. В настоящих исследованиях также зафиксирована стадия, когда упрочнение, определенное по уровню микротвердости, максимально и превосходит установившееся резание.

Другим сходным результатом является установленный факт постепенного расширения зоны деформации при врезании. Однако, по мнению автора в работе [3] сделан ошибочный вывод о том, что ориентация условной плоскости сдвига при этом практически не меняется. Этот вывод можно объяснить только специальными условиями проведения эксперимента, в частности, незначительной скоростью резания. Очевидно, на микроскоростях характер взаимодействия на передней поверхности при врезании стабилен и не влияет на положение условной плоскости сдвига. В работе [4] показано, что при врезании с образованием сливной стружки положение условной плоскости сдвига и величина угла сдвига непрерывно меняются.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зорев Н. Н. О взаимодействии процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента. – Вестник машиностроения, 1963, №12, 42 – 50 с.
2. Талантов Н. В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.
3. Chandrasekaran H., Nagarajan R. Transient strains and chip formation during tool entry." Proc. Int. Cont. Prod. Eng. New Delhi, 1977, Vol.1." Calcutto., s. a., v/45- v/54.
4. Особенности стружкообразования и контактного взаимодействия при прерывистом резании / В.А. Солодков // Повышение эффективности обработки резанием. Коллективная монография / М.: Издат. дом «Спектр», 2012. – раздел 3. - с. 95-133.

УДК 621.787.4

*А. В. Трунин, Ю. И. Сидякин, С. Ю. Абакумова, В. Л. Маклецов*

### ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВАЛАХ ПРИ ППД

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: stanki@vstu.ru

Предложена методика оценки уровня интенсивности остаточных напряжений в валах при упрочняющей и отделочно-упрочняющей обработках поверхностным пластическим деформированием.

*Ключевые слова:* вал, упрочняющая обработка, остаточные напряжения, упругопластическая деформация.

The article describes method of assessing the level of residual stress intensity in shafts after strengthening treatment by surface plastic deformation method.

*Keywords:* shaft, strengthening treatment, residual stress, elastic-plastic deformation.

Всевозрастающие требования по обеспечению высоких качественных показателей дета-

лей машин неразрывно связаны не только с их надежностью и долговечностью, но и эконо-

мичностью. В совокупности эти требования в полной мере могут быть реализованы только при наиболее полном использовании прочностных свойств материалов. В последнее время эта проблема успешно решается с помощью упрочняющих технологий. В частности, применительно к валам, работающим в условиях знакопеременных нагрузок, наиболее эффективными являются методы, основанные на деформационном упрочнении их поверхностей, к числу которых принадлежит поверхностное пластическое деформирование (ППД).

Общеизвестно, что ППД обеспечивает высокое качество поверхности и существенно повышает циклическую прочность валов за счет формирования в упрочненном поверхностном слое благоприятной системы остаточных сжимающих напряжений. При этом напряжения нагрузки, которые обеспечиваются в валах режимами обработки, например, обкаткой их тороидальными роликами или шариками, определяются, как правило, по известным зависимостям теории упругости, что не совсем правомерно, поскольку при ППД реализуется контактное нагружение, сопровождающееся возникновением в очаге упругопластических контактных деформаций [1-5]. Контактная задача в такой постановке, как было отмечено в работе [5], в полном объеме пока не решена. Имеются лишь некоторые частные решения подобных задач, которые не решают проблему в целом. Одно из них дано в работе [6] и относится к осесимметричному контактному нагружению упругопластического полупространства сферическим индентором. Поэтому в рассматриваемых условиях оценку напряженного состояния материала вала удобнее проводить с использованием обобщенной диаграммы деформирования, которая справедлива не только при одноосном, но и при объемном напряженном состоянии, имеющем место, в частности, в процессах ППД валов. Данную диаграмму, связывающую интенсивность рабочих напряжений  $\sigma_{i(z)}$  (т.е. напряжений нагрузки) с интенсивностью деформаций  $\varepsilon_{i(z)}$  в произвольных точках оси  $z$ , совпадающей с линией действия усилия обкатки, удобнее представлять для практического применения в форме степенной зависимости [7]

$$\sigma_{i(z)} = K \left( \frac{\varepsilon_{i(z)}}{\Delta\varepsilon} - 1 \right)^m, \quad (1)$$

в которой коэффициенты  $K$  и  $m$  рассчитываются по формулам

$$m = \frac{\ln(\sigma_e / \sigma_{0,2})}{\ln \left( \frac{E}{\sigma_{0,2}} (\varepsilon_p - \Delta\varepsilon) + \frac{\sigma_e}{\sigma_{0,2}} \right)}$$

$$\text{и} \quad K = (E\Delta\varepsilon)^m \sigma_{0,2}^{1-m} \quad (2)$$

по известным значениям временного сопротивления  $\sigma_e$ , условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$  (при стандартном допуске на остаточную деформацию  $\Delta\varepsilon = 0,002$ ), модуля нормальной упругости  $E$  и предельной равномерной деформации  $\varepsilon_p$  материала вала. При этом следует иметь в виду, что указанные физические характеристики материала  $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_e$  должны быть адаптированы к реальным размерам вала, т.е. назначаться с учетом масштабного фактора. Один из вариантов такого учета рассмотрен в работе [8]. Расчет интенсивности упругопластической контактной деформации  $\varepsilon_{i(z)}$  на линии действия контактной нагрузки рассмотрен в работах [5, 9].

Что касается остаточных сжимающих напряжений при ППД, то в настоящее время известно много работ по их определению, однако, большей частью они носят экспериментальный характер, отличаются значительной трудоемкостью и строгостью математического аппарата и требуют высокой квалификации исследователей. Среди аналитических методов расчета остаточных напряжений особое место занимает известное решение М. С. Дрозда [10]. Несмотря на его приближенный характер, вследствие принятых ограничений и допущений (деформация считалась симметричной относительно линии действия контактной нагрузки и линейно изменяющейся по толщине упрочненного слоя и пр.), решение получилось относительно простым и содержало весьма важный для практики вывод: максимальных значений, равных повышенному вследствие наклепа пределу текучести  $\sigma'_{0,2}$  материала вала, тангенциальные  $\sigma'_i$  и осевые  $\sigma'_x$  остаточные напряжения достигают в близлежащем к поверхности вала упрочненном слое. Учитывая это обстоятельство можно полагать, что резервы упрочнения материала полностью исчерпываются на уровне, когда значения  $\sigma'_{0,2}$  достигают  $\sigma_e$ . Поскольку этому напряжению соответствует интенсивность остаточной деформации  $\varepsilon_{i(z)} \approx \varepsilon_p$ , полагаем, что

добиться от ППД наибольшей эффективности можно при условии, когда интенсивность деформации на поверхности вала (при  $z = 0$ )  $\epsilon_{i,0}$  будет близка по значению к  $\epsilon_p$ . При этом в первом приближении можно считать, что и интенсивность остаточных напряжений  $\sigma_{i,0}^o$  в этом слое у поверхности вала по значению будет близка к  $\sigma_e$ .

Применительно к окончанию этапа разгрузки, когда в упрочненном поверхностном слое сформирована система остаточных сжимающих напряжений, для описания взаимосвязи интенсивности этих напряжений  $\sigma_{i(z)}^o$  с интенсивностью итоговой контактной упругопластической

деформации  $\epsilon_{i(z)}$  можно предложить аналогичную уравнению (1) зависимость

$$\sigma_{i(z)}^o = \sigma_{i(z)} \left( \frac{\epsilon_{i,0}^*}{\epsilon_p} \right)^n, \quad (3)$$

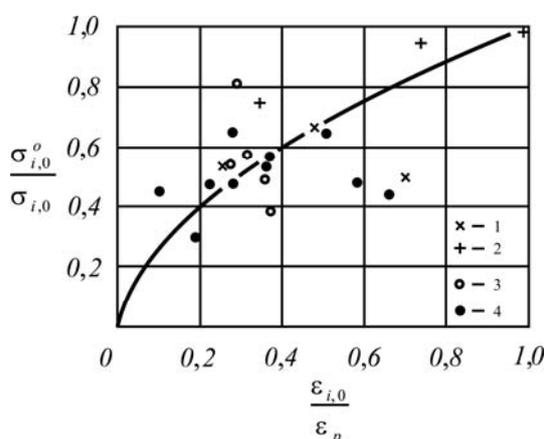
в которой дополнительно  $\epsilon_{i,0}^*$  – расчетное значение реализуемой в процессе ППД интенсивности контактной упругопластической деформации на поверхности вала. Данная зависимость удовлетворяет следующим начальным условиям: на границе упругой и пластически деформированной областей ( $z = z_s$ )  $\epsilon_{i(z_s)} = \Delta \epsilon$

**Соотношение между интенсивностями деформаций и остаточных напряжений при различных режимах обработки валов ППД**

Материал			Режим обкатки				Остаточные напряжения				
Марка стали (терм. обработка)	$\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_e}$	Твердость $\frac{HB}{HД}$	$D_e$	$\frac{D_p}{r}$	$F$	$\frac{\epsilon_{i,0}}{\epsilon_p}$	$\sigma_{x,0}^o$	$\sigma_{t,0}^o$	$\sigma_{r,0}^o$	$\sigma_{\theta,0}^o$	$\frac{\sigma_{i,0}^o}{\sigma_{i,0}}$
	МПа		мм		кН	–	МПа				–
50 [1] (отжиг)	$\frac{290^*}{600}$	$\frac{185}{2150}$	230	$\frac{105}{12}$	14,7	0,23	-255	-170	225	425	0,53
					33,3	0,46	-360	-240	320	480	0,66
			235	12	58,8	0,70	-300	-200	265	515	0,51
45 [2] нормал.)	$\frac{400}{670}$	$\frac{200}{2350}$	32	$\frac{80}{2,1}$	3,5	0,98	-730	-410	635	640	0,99
45 [2] (улучш.)	$\frac{630}{890}$	$\frac{270^*}{3300}$			1,0	0,34	-650	-380	565	750	0,76
					2,0	0,74	-880	-480	765	820	0,93
50 [4] (отжиг)	$\frac{315}{650}$	$\frac{150^*}{1700}$	160**	$\frac{110}{15}$	13,7	0,26	-300	-195	265	480	0,55
					15,7	0,29	-460	-245	400	490	0,81
					17,7	0,32	-325	-230	290	500	0,58
					19,6	0,35	-280	-180	245	505	0,49
					21,6	0,37	-230	-140	200	510	0,39
45 [3] (нормал.)	$\frac{360}{610}$	$\frac{190^*}{2200}$	160	$\frac{100}{5}$	12,7	0,64	-260	-170	230	525	0,44
					8,8	0,19	-145	-115	135	450	0,30
					12,7	0,27	-260	-145	225	475	0,47
				$\frac{100}{12}$	17,7	0,37	-330	-185	285	495	0,58
					25,5	0,50	-380	-180	330	515	0,64
					31,4	0,58	-290	-145	250	525	0,48
				$\frac{100}{24}$	12,7	0,11	-220	-105	190	420	0,45
					21,6	0,22	-255	-110	220	465	0,47
					25,5	0,27	-350	-165	300	475	0,64
				34,3	0,35	-305	-130	265	495	0,54	

Примечания. 1. Знаком (\*) отмечены данные литературных источников [1-4]. 2. (\*\*) – обработка полого вала внутренним диаметром 80 мм. 3.  $F$  – рабочая нагрузка (усилие обкатки),  $D_e$  – диаметр вала,  $D_p$  и  $r$  – диаметр в плоскости обкатки и профильный радиус тороидального ролика.

и  $\sigma_{i(z_s)}^o = 0$ , на поверхности вала ( $z = 0$ ), как отмечалось выше,  $\varepsilon_{i(0)} = \varepsilon_{i,0} = \varepsilon_p$  и  $\sigma_{i(0)}^o \approx \sigma_v$ . При этом заметим, что если в процессе обработки валов ППД реализуется условие  $\varepsilon_{i,0}^* \approx \varepsilon_p$ , режимы упрочнения можно считать оптимальными [5, 8]. К сожалению, анализ многочисленных литературных данных (например, [1-4]), касающихся экспериментального определения остаточных напряжений в валах, свидетельствует о том, что применяемые большинством исследователей режимы обработки не удовлетворяют данному (оптимальному) варианту. Некоторые результаты этого анализа, выполненного нами с позиций предлагаемого критерия оптимизации режимов ППД, представлены в таблице.



Зависимость относительной интенсивности остаточных напряжений от относительной интенсивности контактной деформации при упрочняющей обработке валов ППД:

1-4 – данные работ [1], [2], [3], [4] соответственно

Вместе с тем отметим, что реализуемые в экспериментах различные значения  $\varepsilon_{i,0}^*$  явились хорошей базой для установления зависимости интенсивности максимальных значений остаточных напряжений  $\sigma_{i(0)}^o$  от интенсивности контактной упругопластической деформации

$\varepsilon_{i(0)}$ , рассчитанных для точек поверхности вала. Интенсивность остаточных напряжений определяли по известной зависимости теории упругости по значениям ее компонент  $\sigma_{x,0}^o$  и  $\sigma_{t,0}^o$  [1-4], а интенсивность напряжений нагрузки – по формуле (1) при  $\varepsilon_{i(0)} = \varepsilon_{i,0}^*$ . Данная зависимость в относительных координатах представлена на рисунке.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Браславский В.М.* Технология обкатки крупных деталей роликами. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
2. *Чена П.А.* Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием. – Минск: Наука и техника, 1981. – 128 с.
3. *Школьник Л.М.* Технология и приспособления для упрочнения и отделки деталей накатыванием / Л.М. Школьник, В.И. Шахов – М.: Машиностроение, 1964. – 184 с.
4. *Школьник Л.М.* Полые валы и оси / Л.М. Школьник – М.: Машиностроение, 1968. – 183 с.
5. *Дрозд М.С.* Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
6. *Дрозд М.С., Осипенко А.П.* Аналитическое исследование напряженного состояния при внедрении упругой сферы в упругопластическое полупространство. В сб.: Металловедение и прочность материалов. Труды ВПИ, вып. VIII. – Волгоград, 1977. С. 58 – 68.
7. *Сидякин Ю.И.* Обобщенная диаграмма упругопластического контактного деформирования материалов. / Ю.И. Сидякин, А.В. Трунин // Известия ВолгГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 7»: межвуз. сб. науч. ст. № 13 (86). / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – С. 44 – 46.
8. *Сидякин Ю.И.* Повышение эффективности упрочняющей механической обработки валов обкаткой их роликами или шариками // Вестник машиностроения, 2001, №2. С. 43–49.
9. *Сидякин Ю.И.* Расчет интенсивности деформации под остаточной вмятиной с эллиптическим контуром / Ю.И. Сидякин, А.В. Трунин // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. DFMN–2009: матер. 3-ей межд. конф. ИМет, – М.: 2009. – С. 384 – 385.
10. *Дрозд М.С.* Аналитическое исследование остаточных напряжений, вызванных поверхностным наклепом. // Изв. вузов МВО СССР. Машиностроение, № 5, 1958. С. 42–50.

УДК 658.512.011.56

Г. В. Ханов, А. Н. Тодорев, М. Н. Дятлов

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ  
СПЕЦИАЛЬНЫХ МАШИН НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

**Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: ngig@vstu.ru

Проведен анализ машиностроительных систем автоматизированного проектирования различного уровня функциональных возможностей. Перечислены основные требования, предъявляемые к машиностроительным системам проектирования. Рассмотрен и предложен подход к созданию многовариантных параметрических и динамических моделей с помощью макроса.

*Ключевые слова:* автоматизация проектирования, уникальные изделия, нестандартные элементы, специализированные программы, макросы, системы проектирования среднего класса, листовая элемент рамы, многовариантные параметрические модели, начальный этап проектирования.

The analysis of machine-building systems of the automated designing of various level of functionality is carried out. The basic requirements shown to machine-building systems of designing are listed. The approach to creation of multiple parametrical and dynamic models with the help macro command is considered and offered.

*Keywords:* designing automation, unique products, non-standard elements, specialised programs, macro commands, systems of designing of middle class, a sheet element of a frame, multiple parametrical models, the designing initial stage.

В настоящее время на российских промышленных предприятиях довольно интенсивно идет процесс внедрения систем автоматизированного проектирования конструкций и технологий [1].

На начальном, поисковом этапе проектирования конструкций (особенно нестандартных, не имеющих аналогов, допускающих широкую вариацию, как параметров, так и топологии), конструктор вынужден рассматривать значительное число вариантов. Количество вариантов может быть разумно сокращено при наличии у конструктора большого опыта проектирования аналогичных изделий. Причем не рассмотренный по тем или иным причинам на данном этапе удачный вариант конструкции может привести к провалу проекта в целом.

Для ускорения подготовки и анализа конструкций рационально использовать интегрированные системы CAD/CAE, весьма желательны – дополненные специализированными про-

граммами, макросами, библиотеками, алгоритмами, руководящими материалами, типовыми планами и правилами.

Перечислим основные требования, предъявляемые к машиностроительным системам проектирования:

- система должна быть максимально простой в освоении и эксплуатации;
- обладать достаточно низкой стоимостью;
- иметь русскоязычный интерфейс;
- система должна обеспечивать полную поддержку ЕСКД;
- система должна иметь собственные средства для создания пользовательских приложений.
- система должна быть открытой для связи с другим программным обеспечением.

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении можно классифицировать по уровню возможностей, предоставляемых системой (см. таблицу).

**Типичные системы CAD/CAM/CAE**

Область применения	Программы	Интегрированные системы
CAD: двумерные чертежи	AutoCAD LT, AutoCAD, Mechanical, КОМПАС-ГРАФИК, nanoCAD Механика, T-FLEX CAD 2D	CATIA, NX, Pro/ENGINEER
CAD: твердотельное моделирование	SolidWorks, SolidEdge, Inventor, КОМПАС-3D, T-FLEX CAD 3D	
CAM	ADEM, T-FLEX ЧПУ, Mastercam, SolidCAM, EdgeCAM	
CAE	Ansys, Nastran, APM WinMachine	

К интегрированным системам можно отнести программы комплексного трехмерного твердотельного и поверхностного параметрического моделирования с широким набором специализированных модулей, библиотеками, средствами анализа, управления проектом, разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ, возможностью оформления чертежей, обмен данными, и т.д. – CAD/CAM/CAE/PDM [3].

Существует целый ряд систем, обладающих развитыми функциональными возможностями при доступной (для небольших предприятий), стоимостью. Такого рода системы являются системами твердотельного моделирования [2].

Задача автоматизации проектирования уникальных изделий усложняется значительной долей нестандартных элементов. Поэтому пред-

ставляется рациональным разбить все элементы на группы, отличающиеся по степени возможной автоматизации.

Возможные группы:

- стандартные и типовые изделия, отличающиеся только размерами. Возможно и рационально использование макросов, полностью формирующих элемент;
- частично стандартные изделия. Рационально использование макросов и «заготовок», дорабатываемых далее вручную в той или иной системе САПР;
- уникальные изделия. Формируются конструктором в ручном режиме в системе САПР на основе своего опыта, с привлечением экспертных систем и баз знаний.

Рис. 1. Экранная форма

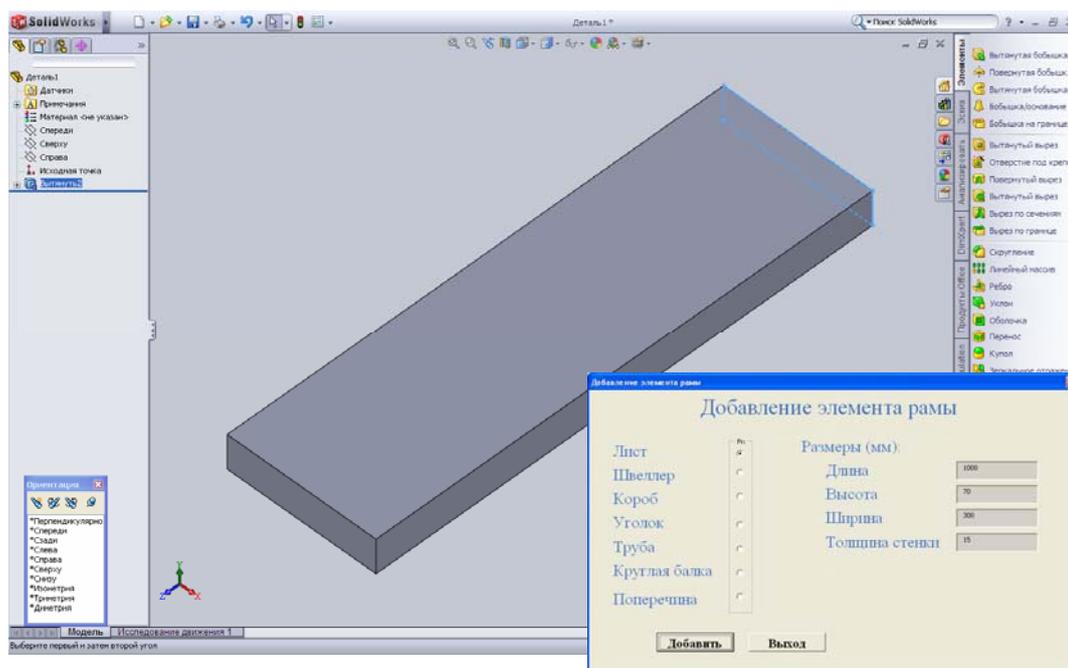


Рис. 2. Добавление листового элемента рамы с помощью макроса

Предложенная концепция реализуется при проектировании несущих конструкций специальных машин.

За основу приняты системы SolidWorks и AutoCAD, позволяющие

создавать, обрабатывать, анализировать 3D модели. Обе системы имеют развитые языки программирования и написания макросов: SolidWorks и AutoCAD – Visual Basic for Applications (VBA), а AutoCAD – еще и AutoLISP. К тому же SolidWorks имеет встроенные сред-

ства инженерного анализа (CAE) – CosmosWorks, CosmosMotion и другие.

Для элементов группы 1 написан макрос на VBA (рис. 1). На рис. 2 и 3 показаны этапы построения листового элемента рамы коробчатого сечения с помощью макроса.

Автоматизация начальных этапов проектирования носит комплексный характер с сегментацией элементов по группам и использованием соответствующих средств.

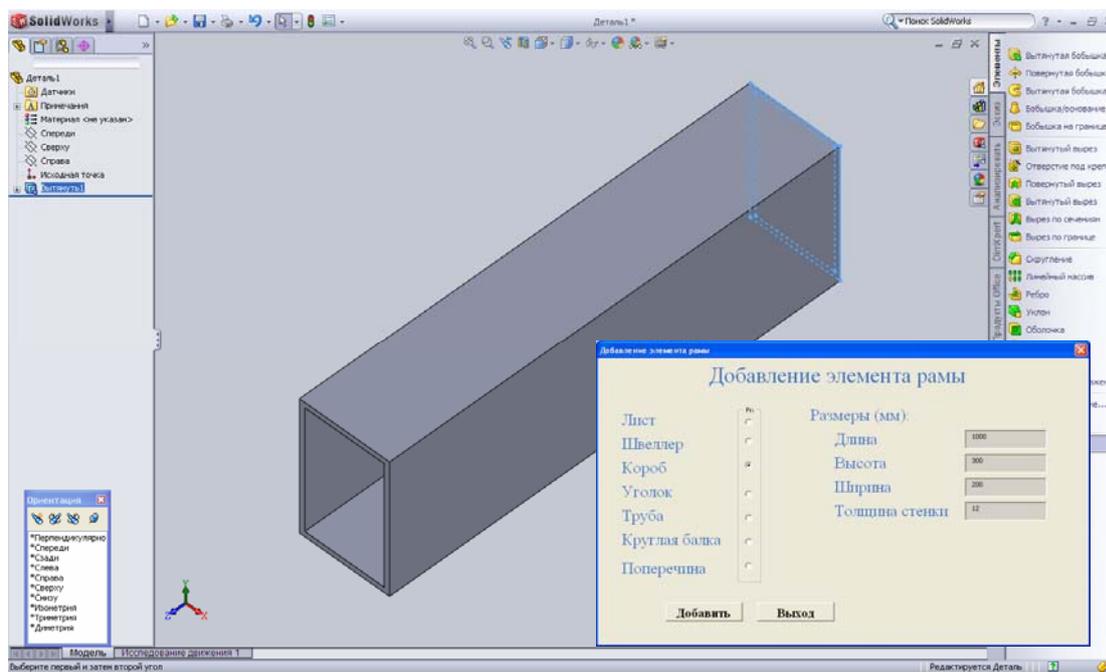


Рис. 3. Добавление рамы коробчатого сечения с помощью макроса

Таким образом, с помощью современных систем проектирования можно создавать многовариантные параметрические и динамические модели, проверять их свойства и поведение на компьютере до запуска в опытную партию и производство, что позволяет существенно сократить количество ошибок проектирования и ускорить реализацию проекта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Использование твердотельного моделирования при графической подготовке студентов ВолгГТУ / Г.В. Ханов, Н.В. Федотова, А.Н. Тодорев, М.Н. Дятлов // Изв. ВолгГТУ.

Серия «Новые образовательные системы и технологии обучения в вузе». Вып. 9: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – №11(98). – с.160-162.

2. Ханов Г.В. Основные возможности машиностроительных САПР среднего уровня в процессе проектирования / Г.В. Ханов, М.Н. Дятлов // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. ст. II Междунар. научно-техн. конф., июнь 2006 г./ Приволжский Дом знаний и др. – Пенза, 2006. – С. 106-108.

3. Ханов Г.В. Твердотельное геометрическое моделирование в ходе подготовки магистров/ Г.В. Ханов, Е.Н. Асеева, М.Н. Дятлов // Изв. ВолгГТУ. Серия «Новые образовательные системы и технологии обучения в вузе». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст./ ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – №8. – С.199-203.

УДК 662.818.05

Г. В. Ханов, М. Н. Дятлов, С. В. Сазонова, М. Ю. Федотов

**ПОВЫШЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПОРТАТИВНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ  
ИЗ ОРГАНИЧЕСКОГО МУСОРА**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: ngig@vstu.ru

Рассмотрены конструктивные пути повышения функциональных возможностей портативного устройства для производства топливных брикетов из органического мусора. Обосновывается с точки зрения энергоэффективности и компактности габаритных размеров портативного устройства необходимость использования асинхронного электродвигателя с фазным ротором.

*Ключевые слова:* портативное устройство, измельчение сырья, производство топливных брикетов, ножевой диск, комплект фасонных фрез, снижение мощности двигателя, ограниченный габарит, асинхронный электродвигатель с фазным ротором, момент инерции.

Constructive ways of increase of functionality of the portable device for manufacture of fuel briquettes from organic dust are considered. Necessity of use of the asynchronous electric motor with a phase rotor is proved from the point of view power efficiency and compactness of overall dimensions of the portable device.

*Keywords:* the portable device, raw materials crushing, manufacture of fuel briquettes, knife drive, the complete set of shaped mills, decrease in power of the engine, the limited dimension, the asynchronous electric motor with a phase rotor, the inertia moment.

В настоящее время брикетное топливо стало обширным и непрерывно растущим сегментом рынка в мире. Производство этого энергоносителя может быть развернуто в любом населенном пункте, что является существенным преимуществом перед невозобновляемыми источниками энергии, требующими высоких транспортных расходов.

В работе [1] представлено портативное устройство для производства топливных брикетов, включающее в себя все стадии переработки материала в одном агрегате. Конструкция предусматривала зубовалковую дробилку, устройство для просушки сырья и шнековый пресс [2]. Однако указанное устройство позволяет пере-

рабатывать древесные отходы только определенных размеров. Поэтому с целью получения стружки необходимых размеров предлагается заменить зубовалковую дробилку на механизм, включающий в себя ножевой диск (рис. 1), для первичного, и комплект фасонных фрез, для вторичного измельчения сырья (рис. 2).

На первой стадии древесину по питающему патрону подают под вращающиеся ножи диска. Каждый нож отрубает шайбу толщиной, равной выпуску режущих ножей над плоскостью диска. Отрубаемая древесина распадается на отдельные элементы, которые проходят через подножевые щели на вторую стадию измельчения.

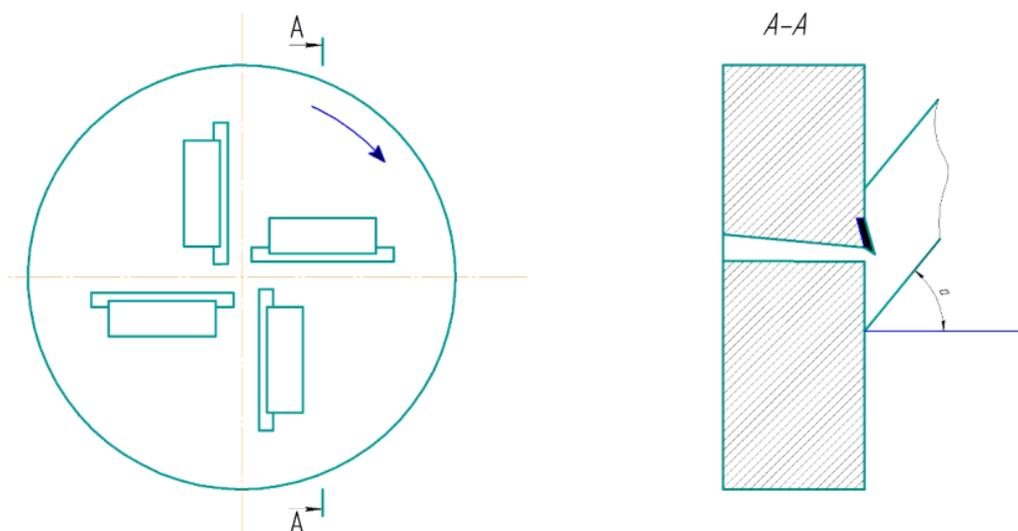


Рис. 1. Схема первичного измельчения

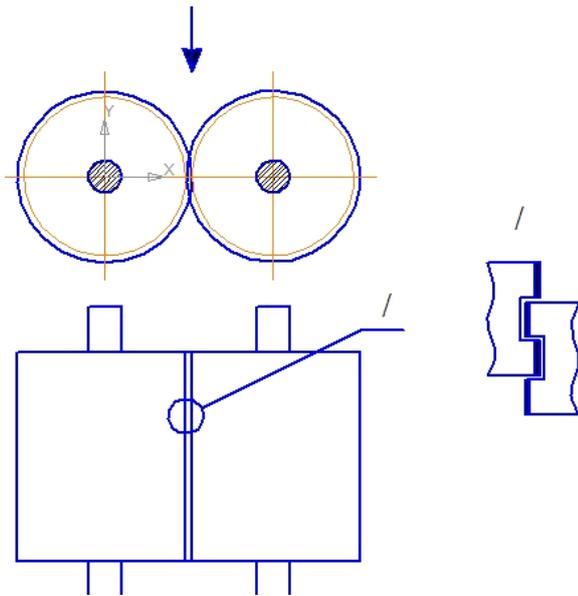


Рис. 2. Схема вторичного измельчения

На второй стадии измельчения применяется механизм, состоящий из набора фасонных фрез. Степень измельчения стружки зависит от окружной скорости и зазора между режущим инструментом. Размер полученных частиц, попадаемых на шнек, также зависит от размера и формы сита, установленного под наклоном для сортировки повторно измельченного сырья.

Поскольку портативное устройство должно иметь минимальные габариты, то немаловажной задачей становится снижение мощности двигателя рассматриваемого устройства. Для ее решения целесообразно применение асинхронного электродвигателя с фазным ротором, при использовании которого, важную роль играют моменты инерции механизма измельчения. Их значение состоит в том, что в период рубки древесины в результате снижения частоты вращения вала используется часть кинетической энергии, накопленной маховыми массами. В период пауз происходит восстановление частоты вращения и повторное накопление кинетической энергии. Это позволяет применить двигатель меньшей мощности.

Для снижения мощности двигателя необходимо уменьшение величины момента инерции. Последнее достигается за счет увеличения скорости вращения ножевого диска, что следует из формулы [3]:

$$I = \frac{(P_{рм} + P_{цм} - P_{дв} \cdot \eta \cdot \lambda) \cdot L \cdot 10^3}{\pi^2 \cdot n_n^3 \cdot S(2-S)^2 \cdot k_l \cdot z \cdot l_{ц}}$$

где  $P_{рм}$  и  $P_{цм}$  – мощности резания и ускорения щепы при рубке древесины максимального диаметра длиной  $L$ , а  $P_{дв}$  – мощность двигателя;  $\eta$  – коэффициент учета механических и вентиляционных потерь ( $\eta = 0,93-0,95$ );  $n_n$  – начальная частота вращения;  $\lambda$  – допускаемый коэффициент кратковременной перегрузки двигателя ( $\lambda = 2,3 - 2,5$ );  $k_l$  – коэффициент неравномерности длины щепы ( $k_l = 0,8-1,0$ );  $z$  – число ножей на диске;  $l_{ц}$  – длина щепы;  $S$  – коэффициент скольжения ( $S = 0,5$ ).

Таким образом, использование двух стадий измельчения древесных отходов позволяет значительно расширить функциональные возможности портативного устройства для получения топливных брикетов из органического мусора. При этом показано, что увеличение скорости вращения ножевого диска уменьшает затраты энергии на переработку сырья.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ханов, Г.В. Портативное устройство для производства топливных брикетов из органического мусора / Ханов Г.В., Сельдемирова Е.В. // Экономика природопользования и природоохраны : сб. ст. XIV междунар. науч.-практ. конф. (май 2011 г.) / Приволжский Дом знаний [и др.]. - Пенза, 2011. - С. 79-82.
2. Сельдемирова, Е.В. Системный анализ процесса проектирования портативного устройства для формирования топливных брикетов / Сельдемирова Е.В., Ханов Г.В., Асеева Е.Н. // Молодой ученый. - 2012. - № 5, ч. 1. - С. 9-13.
3. Гончаров В.Н., Гаузе А.А., Аввакумов М.В. Основы теории и расчета оборудования для подготовки бумажной массы. Часть 2. Рубительные машины: учеб. пособие / СПб., 2012. – 50 с.: ил.15.

УДК 621.9.015

*Ю. Л. Чигиринский, Ю. Н. Полянчиков***ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЛАНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Выполнен анализ применяемых подходов к маршрутному технологическому проектированию. Показано, что в условиях отсутствия или несовершенства типовых технологий единственным инструментом проектирования является индивидуальный подход к построению планов механической обработки.

*Ключевые слова:* технологическое проектирование, план механической обработки, структурная оптимизация, граф обработки, вероятностные таблицы точности, элементарная поверхность.

Analysis of approaches to route technological designing. It is shown that in the conditions of lack or imperfection typical technologies of the only instrument for designing is the individual approach to the construction plans machining.

*Keywords:* technological design, plan machining, structural optimization, graph processing, probabilistic table accuracy, elementary surface.

Методика и формальные процедуры проектирования индивидуальных технологических процессов корпусных деталей методом синтеза включает ряд слабоформализованных проектных процедур [0]:

– выбор основных технологических операций обработки элементарных поверхностей и построение маршрута обработки изделия;

– назначение схем базирования и схем установки для каждой операции технологического процесса;

– выбор условий обеспечения заданной точности обработки и др.

Следует отметить, что формализованные методы решения перечисленных проектных задач разработаны не полностью, вследствие чего проектные решения, как правило, основываются на опыте и интуиции проектировщика.

Данное исследование посвящено вопросам формализации построения планов механической обработки элементарных поверхностей. В решении поставленной проблемы мы исходим из общепринятого [0, 0] положения о необходимости обеспечения требуемых величин параметров точности и качества изделия в целом. Величины погрешностей формы и расположения поверхностей в основном зависят от используемых схем базирования, установки и закрепления деталей, а точность размеров, микрогеометрические и физико-механические свойства поверхности определяются собственно методами формообразования и условиями их осуществления (режимы обработки, марка инструментального материала, геометрия инструмента и т. д.). Качество и точность обработанной поверхности оценивается комплексом показателей, которые можно рассматривать как параметры технологического метода, с помо-

щью которого получено определенное состояние поверхности изделия. В большинстве случаев в справочной литературе рассматриваются только два критерия: высота микронеровностей, как показатель качества обработанной поверхности и допуск размера или номер качества – показатель точности обработки. Каждый метод обработки определяется диапазоном достижимых показателей качества и точности. Сводные массивы величин показателей качества, достижимых в результате обработки, называемые таблицами точности [0, 0], являются информационной основой технологического проектирования.

В настоящее время можно выделить несколько равнозначных подходов к маршрутному технологическому проектированию:

– типовое технологическое проектирование [0] основано на классификации элементов детали по конструктивным признакам. Типовые технологические процессы разрабатываются на основе анализа множества действующих и возможных технологических процессов на типовые изделия;

– групповое технологическое проектирование [0] основано на классификации поверхностей изделия по технологическим признакам и предполагает построение комплексной детали-представителя группы. Технологии изготовления отдельных деталей группы образуются как подмножества технологического процесса изготовления детали-представителя;

– модульный подход [1] к технологическому проектированию предусматривает условное разбиение предмета производства на модули поверхностей, которые являются основой для построения иерархии объектов, используемых при построении технологии: каждый модуль

поверхности логически связан с соответствующим модулем технологического процесса, включающим в себя модули установки, обработки и контроля для каждого этапа технологии. В определенной мере аналогом модулей поверхности можно считать конструкторско-технологические элементы изделий – понятие, используемое в ряде современных технологических САПР для установления взаимосвязей между рабочим чертежом и технологией изготовления детали.

– концепция гибких технологических процессов [0] для многономенклатурных производств, предложенная Саратовской школой технологов предполагает классификацию оборудования по признаку максимального использования однотипных проектных процедур. За счет этого обеспечивается гибкость информационной модели технологического процесса, обеспечивающая возможность адаптации рабочих технологических процессов изготовления деталей к изменяющимся производственным условиям непосредственно в процессе оперативного календарного планирования производства;

– индивидуальное [0, 0, 0] технологическое проектирование предполагает разработку рабочего технологического процесса изготовления детали на базе типового или группового технологического процесса. В качестве типового изделия или детали-представителя группы, в этом случае, рассматривается элементарная поверхность. Следует отметить, что индивидуальное технологическое проектирование является единственно возможным инструментом подготовки производства в условиях отсутствия базы типовых технологических решений.

В качестве вывода можно заключить:

1. Концепции модульных и гибких технологических процессов реализуют проектный подход, который условно можно назвать ресурсным, поскольку в технологиях, разработанных на базе этих концепций, устанавливаются жесткие взаимосвязи с применяемым для реализации основным и вспомогательным оборудованием. Схематично процесс проектирования можно представить в виде логической цепи «оборудование (ресурсы) → методы обработки → изделие заданного качества (цель производства)»;

2. Типовое, групповое и индивидуальное проектирование реализуют «целевой» проектный подход, при котором технология проектируется по следующей схеме: «изделие (цель) →

методы обработки → оборудование (ресурсы)»;

3. Индивидуальное проектирование представляет собой обобщение типового и группового подходов, поскольку типовой или групповой технологический процесс синтезируется из планов обработки отдельных элементарных поверхностей, получаемых в результате именно индивидуального проектирования.

Учитывая определенную неоднозначность [0, 0] и несовершенство [0, 3] нормативно-справочных данных, применяемых в качестве информационной основы технологического проектирования, следует признать, что эффективная технологическая подготовка, с учетом технологических возможностей реального производства, возможна при использовании концепции индивидуального технологического проектирования.

Рассмотрим индивидуальное проектирование плана механической обработки элементарной поверхности изделия. Точность обработки оцениваем по номеру качества точности ( $IT$ ), качество обработанной поверхности – по величине среднего арифметического отклонения профиля  $Ra$ .

Схема процесса формирования качества и точности обработанной поверхности может быть представлена в виде взвешенного орграфа (рис. 1), построенного в условной системе координат  $Ra-IT$ . Стрелками показаны технологические переходы, вершинами – состояния поверхности в моменты времени, соответствующие окончанию очередных этапов обработки.

Заметим, что структура таблиц точности обработки [0, 0] не позволяет решать задачу построения плана обработки математически [0]. Проблема заключается в том, что в таблицах точности приводятся граничные значения технологических допусков, достижимые различными методами механической обработки, но отсутствуют величины изменения параметров точности и качества по ходу технологического маршрута. Для строгой математической постановки задачи требуется задать не только общую структуру графа обработки (рис. 1), но и указать весовые характеристики дуг транспортной сети, т. е. расстояния между вершинами. В качестве решения этой проблемы можно рассматривать «многослойные» вероятностные таблицы [79] точности (рис. 2), представляющие собой «совмещение» собственно таблиц точности обработки и матриц смежности, используемых для описания взаимосвязей между элементами графа.

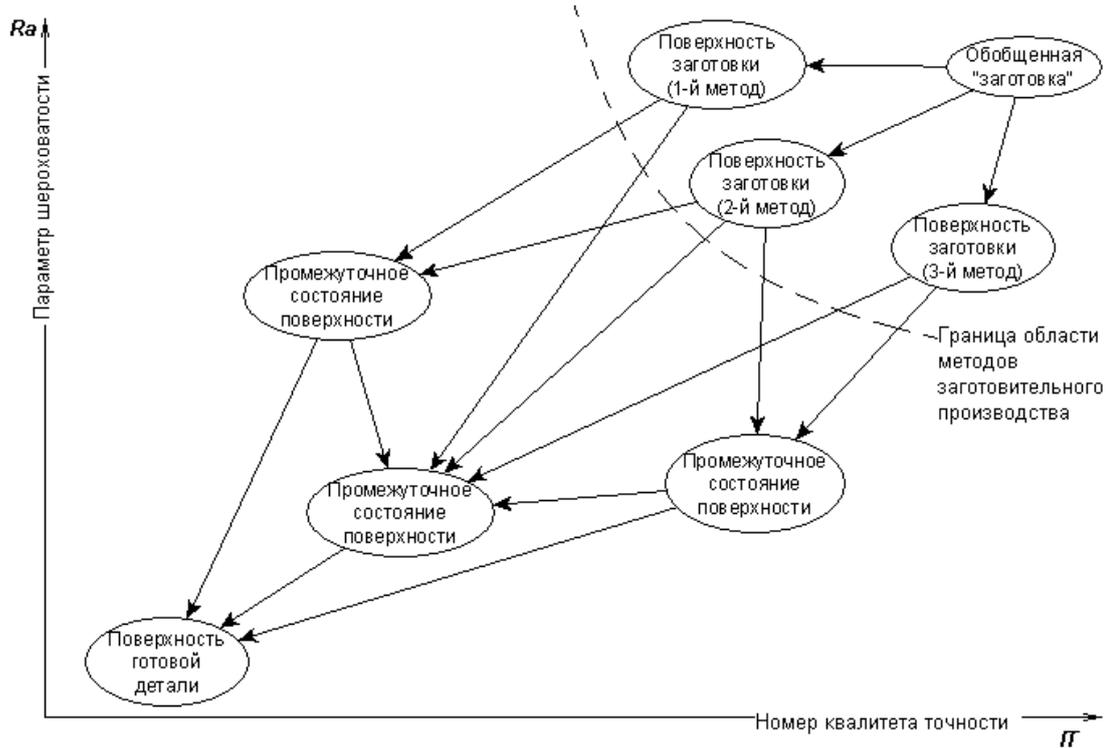


Рис. 1 Схема графа обработки

Предыдущий переход	Допуск		Повышение качества (отношение)						номер следующего перехода
	min	max	Следующий переход						
			1	2	3	4	5	6	
1 зенкер. черновое	10	20			1,15	1,29	2,22	4,43	
2 сверление	10	20			1,15	1,29	2,22		
3 зенкер. получист.	4	16	0,91	0,81		1,12			изменение показателя качества (в 1,12 раза) с вероятностью 0,68
4 зенкер. чистовое	4	10	1	1	0,68				
5 разверт. получист.	1,25	6,30	1	1	1				
6 шлиф. получист.	1,25	3,20	1	1					
7 разверт. чистовое	1,00	3,20	1	1					
8 шлиф. чистовое	0,40	1,25							
9 разверт. тонкое	0,32	1,25							
10 шлиф. тонкое	0,16	0							

▲ ▲ ▲ границы технологического допуска

номер и название предыдущего перехода в технологической цепочке

Рис. 2. Элементы слоя вероятностной таблицы точности

Таблица 1

Изменение показателя качества поверхности Ra и матрица смежности технологических методов

Предыдущий этап обработки		Изменение (отношение)					Матрица смежности				
		Следующий этап обработки									
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Сверление		1,00	1,15	1,29	2,22		0	0	1	1
2	Зенкерование черновое	0,10		1,15	1,29	2,22			0	1	1
3	Зенкерование получистовое	0,91	0,81		1,12	1,93				0	1
4	Зенкерование чистовое	1,00	1,00	0,68		1,72					1
5	Развертывание получистовое	1,00	1,00	1,00	1,00						

Вероятностная таблица включает границы технологических допусков рассматриваемых методов обработки, величины изменения параметра качества и оценки достоверности этих изменений для каждого сочетания технологических переходов в плане обработки.

Выделяя в соответствующих слоях вероятностной таблицы (табл. 1) только достоверные величины приращений, можно построить логи-

ческие матрицы смежности для каждого нормируемого показателя качества / точности.

В результате логического умножения матриц смежности, построенных для каждого рассматриваемого показателя точности \ качества, получаем формальное описание (табл. 2) орграфа, определяющего только статистически достоверные (надежные) планы обработки поверхности заданного качества.

Таблица 2

Матрица смежности графа обработки

Предыдущий технологический переход		Технологический допуск				Матрица смежности				
		Ra, мкм		IT		Следующий переход				
		min	max	min	max	1	2	3	4	5
1	Сверление	10	20	12	13	0	0	1	1	
2	Зенкерование черновое	10	20	12	13			0	1	1
3	Зенкерование получистовое	4	16	11	12				0	1
4	Зенкерование чистовое	4	10	9	11					1
5	Развертывание получистовое	1,25	6,3	9	10					

Использование алгоритмов дискретной математики позволяет найти кратчайший путь во взвешенном графе, т. е., решить задачу оптимизации плана обработки по одному из возможных критериев, например по трудоемкости обработки, количеству технологических переходов или надежности технологического маршрута.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2001. – 368 с.
2. Бочкарев, П. Ю. Основные принципы разработки операций в системе планирования технологических процессов механической обработки / П. Ю. Бочкарев, В. А. Назарьева // СТИН. – 2006, № 10. – С. 2-6.
3. Кован, В. М. Основы технологии машиностроения / В. М. Кован, В. С. Корсаков, А. Г. Косилова. – М. : Машиностроение, 1965. – 549 с.
4. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, 1985. – 511 с.
5. Махаринский, Е. И. Методика синтеза индивидуальных технологических процессов изготовления корпус-

ных деталей машин / Е. И. Махаринский, Н. В. Беляков // Вестник машиностроения. – 2005, № 2. – С. 57-65.

6. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства; В 2-х т. – Л. : Машиностроение, 1983. – 407+376 с.

7. Прогрессивные машиностроительные технологии : монография / А. Н. Афонин, ..., В. А. Санинский, ..., Ю. Л. Чигиринский ; Под. ред. А. В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», Том 1. – 2012. – 334 с.

8. Соколовский, А. П. Научные основы технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – М. ; Л. : Машгиз, 1955. – 516 с.

9. Чигиринский, Ю. Л. Методы дискретной математики в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский, Н. Д. Гожева, Е. Г. Радченко // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»: межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – Вып. 3, № 4. – С. 112-114.

10. Чигиринский, Ю. Л. Надежность справочных данных, применяемых в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский / Известия ОрелГТУ. Сер. «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2-2/274(560). – с. 103-108.

11. Чигиринский, Ю. Л. Статистическая оценка надежности справочных данных в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский // СТИН. – 2010, № 5 – С. 28-30.

УДК 658.588.8-52

*А. Г. Схиртладзе\*, Ю. Н. Полянчиков\*\****ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА****Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»\*****Волгоградский государственный технический университет\*\***

E-mail: ags@stankin.ru, techmash@vstu.ru

В статье рассмотрены вопросы, определяющие надежность автоматизированной системы управления технологическими процессами ремонтного производства (АСУ ТП РП) как наиболее важного свойства, а также методика определения технико-экономического уровня надежности этой системы.

*Ключевые слова:* автоматизированная система, управление, технологический процесс, ремонтное производство, надежность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, эффективность, отказ, устранение, функционирование, элемент, эксплуатация, поток, наработка, коэффициент, готовность, техническое использование, длительность, цикл, вероятность, качество, время, ресурс, экономия, вариант, стоимость, расходы, период, оптимизация, интенсивность, значение.

In article the questions defining reliability of an automated process control system of repair production (industrial control system of RP) as most important property, and also a technique of definition of technical and economic level of reliability of this system are considered.

*Keywords:* The automated system, management, technological process, repair production, reliability, non-failure operation, durability, maintainability, efficiency, refusal, elimination, functioning, element, operation, stream, operating time, coefficient, readiness, technical use, duration, cycle, probability, quality, time, resource, economy, option, cost, expenses, the period, optimization, intensity, value.

Наиболее важным свойством автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) ремонтного производства, которая обеспечивает высокую технико-экономическую эффективность функционирования системы, является ее надежность. [1,2]

Надежность АСУ ТП ремонтного производства - это способность системы осуществлять заданные функции, сохраняя при этом во времени значения требуемых эксплуатационных показателей, определенных в заданных пределах при заданных условиях эксплуатации. Надежность АСУ ТП ремонтного производства является интегрированным свойством, которая включает безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

Безотказность АСУ ТП ремонтного производства это свойство данной системы сохранять работоспособность в течение некоторого времени (наработки) без внутренних перерывов. Ремонтпригодность - приспособляемость АСУ ТП ремонтного производства (АСУ ТП РП) к предупреждению и устранению отказов, возникающих во время эксплуатации системы. Для безотказности характерными являются закономерности возникновения различных отказов системы, а для ремонтпригодности закономерности их устранения. Долговечность – свойство данной системы сохранять работоспособное состояние до какого-либо предельного

состояния (с перерывами на техническое обслуживание и ремонты). Показателями долговечности служат ресурс и срок службы системы, т.е. суммарная наработка и ее календарная продолжительность эксплуатации до предельного состояния. [3]

АСУ ТП ремонтного производства является ремонтируемой системой, которая имеет определенный срок службы (ресурс), который определяется не физическим износом и старением ее элементов (они могут быть заменены новыми), а уменьшением эффективности ее функционирования и рациональностью дальнейшей эксплуатации. Поэтому надежность указанной системы достаточно полно характеризуется комплексом свойств ремонтпригодности и безотказности. [2]

При увеличении количества и качества выполняемых АСУ ТП РП функций приводит к усложнению системы и росту убытка при ее отказе в работе. При этом в системе происходит увеличение количества ее элементов. Это приводит к резкому уменьшению надежности системы, в случае если элементы соединены последовательно. Применение резервных элементов в системе увеличивает ее стойкость. Вследствие этого проблема надежности при создании АСУ ТП РП, ее внедрении и эксплуатации является одной из главенствующих.

Для ремонтируемой АСУ ТП РП критериями безотказности функционирования являются:

вероятности  $P(\tau)$  наработки между отказами более заданного значения времени  $\tau$ ; параметр потока отказов системы  $\lambda(\tau)$ ; наработка на отказ  $\tau_n$  – средняя продолжительность работы системы между двумя последовательными отказами. Величина  $P(\tau)$  служит основным показателем надежности ремонтируемой системы, который определяет вероятность того, что наработка  $\tau_n$  между отказами превышает заданную величину времени  $\tau$ :  $P(\tau) = P(\tau_n \geq \tau)$ .

Показателем ремонтпригодности являются также вероятность  $P(\tau_2)$  восстановления системы за заданное время  $\tau_2$ , определяющие средние затраты времени на выявление и ликвидацию отказа при заданных определенных условиях технического обслуживания системы.

Кроме указанных показателей ремонтпригодности и безотказности применяются интегрированные показатели [2]: коэффициенты готовности  $k_r$  и технического использования  $k_{т.и.}$ . Коэффициент  $k_r$  для установившегося режима функционирования системы характеризует вероятность того, что система работоспособна в любой произвольно выбранный момент времени в интервалах между плановым профилактическим обслуживанием и определяется отношением времени наработки на отказ ( $\tau_n$ ) к средней длительности цикла функционирования – восстановление ( $\tau_2$ ) работоспособности:

$$k_r = \tau_n / (\tau_n + \tau_2)$$

Вероятностный характер коэффициента  $k_{т.и.}$  тот же, что и  $k_r$ , но он учитывает время планового профилактического обслуживания  $\tau_{п.о.}$ . Коэффициент  $k_{т.и.}$  определяется отношением времени наработки на отказ к средней длительности цикла функционирования – восстановление – профилактика:

$$k_{т.и.} = \tau_n / (\tau_n + \tau_2 + \tau_{п.о.})$$

Для эффективного функционирования АСУ ТП РП необходима правильная работа всех составляющих ее элементов. Вероятность безотказного функционирования системы  $P(\tau)$  зависит от вероятностей безотказной работы составляющих элементов  $P_i(\tau)$  и (при независимости отказов) определяется выражением:

$$P(\tau) = \prod_{i=1}^n P_i(\tau)$$

где  $n$  – количество элементов системы.

Для обеспечения надежного функционирования АСУ ТП РП, которая имеет в своем составе значительное количество элементов, может быть введена структурная и информационная избыточность системы. Структурная избыточность характеризуется наличием дополнительных путей передачи сигналов. Это позволяет при отказе одного из элементов системы передать его функции другому, который не является нужным при правильной работе основного элемента. Структурная избыточность позволяет компоновать надежную систему, состоящую из элементов, имеющих недостаточную надежность. Информационная избыточность характеризуется наличием в сигнале дополнительной информации, необходимость которой появляется при отказе ряда элементов системы. Дополнительная информация не используется, если все элементы системы функционируют правильно. Введение избыточности приводит к росту надежности системы за счет повышения ее безотказности. Повышение ремонтпригодности системы обеспечивается путем применения унифицированных блочных конструкций, устройств диагностики и индикаций отказов.

Оценку качества функционирования АСУ ТП РП необходимо выполнять с учетом экономического критерия. Поэтому состояние системы в процессе эксплуатации следует характеризовать посредством функции, связанной с экономическим эффектом от применения системы в течение заданного срока службы (ресурса)  $\tau_p$ . Такой случайной могут быть экономические потери (убытки), зависящие от числа и последствий отказов в системе.

Уровень надежность АСУ ТП РП в значительной мере характеризует степень экономической эффективности системы. При уменьшении ее надежности увеличиваются потери от отказов, а увеличение приводит к возрастанию стоимости системы и затрат на ее эксплуатацию. При определении экономически целесообразного уровня надежности системы следует рассмотреть ряд структурно и функционально сложных вариантов, которые имеют разные уровни надежности при различной величине капитальных и эксплуатационных затрат [2]. Определение лучшего варианта необходимо выполнять по максимуму эффективности, определяемой годовым дополнительным экономическим эффектом:

$$Э_{д.з.} = (\Delta Э_n - E_n \Delta k) \rightarrow \max$$

где  $\Delta \mathcal{E}_\Pi$  – годовая экономия от снижения себестоимости ремонтируемой продукции при использовании АСУ ТП РП;  $E_\Pi$  – нормативный коэффициент капитальных вложений;  $E_\Pi \Delta k$  – нормативная экономия от использования дополнительных капитальных вложений;  $\Delta k$  – дополнительные капитальные вложения.

Дополнительный экономический эффект от повышения надежности системы за счет понижения среднего числа отказов суммируется из соответствующих эффектов за счет уменьшения среднего числа отказов элементов системы. Поэтому надежность системы будет оптимальной при условии, если каждый из ее элементов будет иметь оптимальную интенсивность отказов  $\lambda_{io}$ . При оптимальных показателях системы  $\lambda_{io}$  и ее  $i$ -го составляющего элемента экономический эффект в течение срока службы системы будет наибольшим. В данном случае:

$$\lambda_o = \sum_{i=1}^n \lambda_{io}$$

Увеличение надежности АСУ ТП РП служит средством уменьшения себестоимости ремонтируемой продукции, которое обеспечивается за счет уменьшения условно-постоянных расходов, приходящихся на единицу ремонтируемой продукции.

Стоимость  $C_r$  годовой эксплуатации системы можно представить двумя составляющими. Одна из них  $C'$  не зависит от надежности, а другая  $C''(\lambda)$  является ее функцией. Вторая составляющая определяется как произведение планируемого количества отказов за год и средней стоимости  $C_{\Sigma}$  восстановления работоспособности системы:  $C_r = C' + C''(\lambda)$ .

Если имеются, например, два варианта системы: первая с параметром надежности  $\lambda_1$  и вторая - с  $\lambda_2$ , причем  $\lambda_1 > \lambda_2$ , то стоимость их эксплуатации за единицу времени можно представить выражением:

$$C_1 = C'_1 + C''_1(\lambda_1)$$

$$C_2 = C'_2 + C''_2(\lambda_2)$$

При использовании второго варианта системы экономия на расходах на эксплуатацию равна:

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma 2} = C_1 - C_2 = C_{\Sigma 1} \lambda_1 - C_{\Sigma 2} \lambda_2$$

В случае если отказы системы происходят только из-за отказов  $i$ -го элемента, то годовая

экономия расходов на эксплуатацию системы за счет повышения надежности элемента от значения  $\lambda_{1i}$  до значения  $\lambda_{2i}$  будет равна:

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma 2} = C_{\Sigma i} (\lambda_{1i} - \lambda_{2i})$$

где  $C_{\Sigma i}$  - средняя стоимость восстановления  $i$ -го элемента, равная примерно для обоих вариантов системы.

При определении годовой экономии от сокращения потерь, обусловленных простоями системы необходимо выявить убытки. Убытками являются условно-постоянные затраты, которые не зависят от объема ремонтируемой продукции за период простоя. Потери можно подразделить на ущерб и убытки. Ущерб характеризуется стоимостью испорченной ремонтируемой продукции, сырья и используемого оборудования из-за нарушения нормального технического процесса, обусловленного отказом. В случае, если в течение года эксплуатации системы может возникнуть  $\lambda$  ее отказов и на ликвидацию каждого отказа расходуется среднее время  $\tau_{\Sigma}$ , то потери  $\Pi$  от простоев определяются выражением:

$$\Pi = (U_p \tau_{\Sigma} + Y) \lambda,$$

где  $U_p$  - условно – постоянные расходы в единицу времени;  $Y$  - средняя величина ущерба вследствие одного отказа системы.

Экономия  $\Delta \mathcal{E}_{\Sigma 2}$  в год от использования АСУ ТП РП, имеющей повышенную надежность определяется выражением:

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma 2} = \Pi_1 - \Pi_2 = U_p (\tau_{\Sigma 1} \lambda_1 - \tau_{\Sigma 2} \lambda_2) + Y (\lambda_1 - \lambda_2)$$

В случае, если отказы системы происходят только из-за отказов  $i$ -го ее составляющего элемента, имеющего среднее время восстановления  $\tau_{\Sigma i}$  то:

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma 2} = \Delta \mathcal{E}_{\Sigma 2i} = (U_p \tau_{\Sigma i} + Y_i) (\lambda_{1i} - \lambda_{2i})$$

Путем суммирования экономии от уменьшения эксплуатационных расходов и экономии за счет снижения потерь при простоях определяется годовая экономия при увеличении надежности  $i$ -го элемента от значений  $\lambda_{1i}$  до  $\lambda_{2i}$ :

$$\Delta \mathcal{E}_{\Sigma 2} = (U_p \tau_{\Sigma i} + Y_i + C_{\Sigma i}) (\lambda_{1i} - \lambda_{2i}) = \eta_i (\lambda_{1i} - \lambda_{2i})$$

где  $\eta_i = (U_p \tau_{\Sigma i} + Y_i + C_{\Sigma i})$

Затем следует определить связь между дополнительными капитальными вложениями и соответствующими им изменения степени надежности системы, которая обеспечивается за счет увеличения надежности ее элементов. [2].

Увеличение стоимости  $\Delta C_{3i}$  элемента системы определяется логарифмической функцией отношения показателей надежности  $\lambda_{1i}$  и  $\lambda_{2i}$ . [2]:

$$\Delta C_{3i} = z_i \ln(\lambda_{1i}/\lambda_{2i}),$$

где  $z_i$  - постоянная затрат на повышение надежности элемента, равная приращению его стоимости при уменьшении интенсивности отказов.

Приведенный дополнительный  $\mathcal{E}_{\tau i}$  экономический эффект за период  $\tau_3$  службы системы, обусловленный увеличением надежности  $i$ -го ее элемента от значения  $\lambda_1$  до значения  $\lambda_2$  определяется из выражения:

$$\mathcal{E}_{\tau i} = (\lambda_{1i} - \lambda_{2i})\eta_i\tau_3 - z_i \ln(\lambda_{1i}/\lambda_{2i}) \quad (1)$$

В случае, если эквивалентные сроки службы  $i$ -го элемента  $\tau_{3i}$  системы в целом отличаются, то приведенный эффект от применения  $i$ -го элемента системы в течение периода ее службы определяется выражением:

$$\mathcal{E}_{\tau i} = (\lambda_{1i} - \lambda_{2i})\eta_i\tau_3 - z'_i \ln((\lambda_{1i}/\lambda_{2i})),$$

где  $z'_i = z_i(\tau_3/\tau_{3i})$  (2)

При увеличении надежности элемента (уменьшении  $\lambda_{2i}$ ) эффект в начале растет и далее снижается (см. выражение 1). Поэтому имеется максимум  $\mathcal{E}_{\tau i \max}$ . Это обусловлено тем, что при высокой надежности элемента системы затраты на последующее ее увеличение больше чем получаемая при этом экономия на потерях, которая при высокой надежности будет незначительна.

При выявлении оптимальной интенсивности отказов  $\lambda_{i0}$  следует продифференцировать по  $\lambda_{2i}$  выражение (2) и приравнять производную к нулю.

$$\frac{d\mathcal{E}_{\tau i}}{d\lambda_{2i}} = -\eta_i\tau_3 + \left(\frac{z'_i}{\lambda_{2i}}\right) = 0$$

из этого выражения

$$\lambda_{2i0} = z_i/\eta_i\tau_3$$

Значение  $\lambda_{2i0}$  дает возможность найти оптимальные значения  $\mathcal{E}_{\tau i \max}$  и  $\Delta C_{3i0}$ :

$$\mathcal{E}_{\tau i \max} = (\lambda_{1i} - \lambda_{2i0})\eta_i\tau_3 - z_i \ln((\lambda_{1i}/\lambda_{2i0}))$$

$$\Delta C_{3i0} = z'_i(\lambda_{1i}/\lambda_{2i0})$$

Используя оптимальные значения отказов  $\lambda_{2i0}$  для каждого функционального элемента АСУ ТП РП можно определить  $\lambda_0$ , а также экономический эффект от увеличения надежности всей системы  $\mathcal{E}_{\tau \max}$  и нужные для этого затраты  $\Delta C_{30}$ :

$$\mathcal{E}_{\tau \max} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_{\tau i \max}; \Delta C_{30} = \sum_{i=1}^n \Delta C_{3i0}$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев С.Н., Кутин А.А. Инновационное развитие высокотехнологических машиностроительных производств на основе интегрированных АСУ ТПП. ж. «Автоматизация и современные технологии». №11. 2011. С.41-47.
2. Корятин А.М., Петров Н.К., Радимов С.Н. и др. «Автоматизация типовых технологических процессов и установок». – М.: Энерго – атомиздат. 1988. 432 с.
3. Схиртладзе А.Г., Григорьев С.Н., Скрабин В.А. и др. «Технологические основы ремонта и восстановления производственных машин и оборудования» - Йошкар-Ола.: Поволжский ГТУ. 2012. 492с.

УДК 657.471.14:621

А. Г. Схиртладзе\*, Ю. Н. Полянчиков\*\*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАТРАТ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МАШИН**

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»\*  
Волгоградский государственный технический университет\*\*

E-mail: ags@stankin.ru, techmash@vstu.ru

В статье рассмотрены вопросы определения затрат при изготовлении изделий машиностроения в различные годы их нахождения в производстве. Приведены факторы, влияющие на затраты, а также модели их изменения.

*Ключевые слова:* изделие, машиностроение, изготовление, производство, предприятие, затраты, доработка, конструкция, технологический процесс, нарушение, оснастка, сокращение, увеличение, модель, статика, время, темп, год, коэффициент.

In article questions of definition of expenses are considered at production of products of mechanical engineering in various years of their stay in production. The factors influencing expenses, and also models of their change are given.

*Keywords:* product, mechanical engineering, production, production, enterprise, expenses, completion, design, technological process, violation, equipment, reduction, increase, model, statics, time, speed, year, coefficient.

При изготовлении изделий машиностроения различного технологического назначения обшей закономерностью этого процесса является

изменение трудоемкости и себестоимости изделий в различные годы их нахождения в производстве. Формирование затрат осуществляет

ся при учете значительного количества факторов, которые по степени влияния на затраты можно подразделить на три основные группы [1]. К первой группе следует отнести факторы, которые вызывают увеличение затрат. Рост значений технических характеристик вновь создаваемых изделий машиностроения, уровня их надежности и долговечности, требует, как правило, увеличения необходимых затрат на их изготовление. В процессе отработки конструктивных и технологических решений для вновь создаваемых изделий значительное влияние на увеличение затрат на их изготовление оказывают изменения конструкторско-технологической документации, которые приводят к необходимости доработки конструкции и отклонениям от правильного хода технологических процессов изготовления.

Наибольшее количество изменений конструкторской документации, как показывает практика машиностроительного производства, приходится на второй год нахождения изделия в производстве [1]. Наибольший объем доработок конструкции изделия, обусловленный изменениями конструкторской документации, приходится на второй – третий годы производства. На данный период приходится максимальное количество отклонений от заданного правильного хода технологических процессов (ТП). Эти нарушения вызваны не только реализацией в производстве конструктивных изменений, но и ошибками конструктора или технолога, изменениями маршрута изготовления изделия, а также доработками технологической оснастки в процессе ее отладки. Помимо этого причинами нарушений могут быть мероприятия по совершенствованию технологических процессов и внедрению новых стандартов. При невысоком уровне отработки конструктивных и технологических решений объем необходимых доработок конструкции и отклонений в технологии ее производства будет слишком завышенным. Это напрямую влияет на трудоемкость и себестоимость изготовления изделий [1, 2]. Также увеличивается количество изделий, требующих выполнения технических испытаний, при возрастании требований к уровню качественных характеристик изделий, особенно к надежности конструкции изделий. Как правило, чем сложнее конструкция изделий, тем значительнее затраты, требуемые на выполнение испытаний, необходимых для подтверждения уровня качества производимых изделий [3].

Сокращение затрат на изготовление изделий обеспечивается под влиянием действия факторов второй группы. Основными из них являются: расширение серийности производства с увеличением программы производства изделий определенного служебного назначения; постоянное повышение уровня отработки изделий на технологичность по мере нахождения их в действующем производстве; постоянное повышение уровня технологического оснащения производства с течением времени от начального производства изделий; внедрение мероприятий по совершенствованию организационно-технического уровня производства; внедрение рациональных мероприятий по унификации и стандартизации конструкций изделий, типизации технологической оснастки и технологических процессов; рост производственных навыков инженерно-технических работников и рабочих по мере освоения технологических операций изготовления изделий.

Третью группу образуют случайные факторы, которые оказывают двойственное влияние на изменение себестоимости и трудоемкости изделий. К этим факторам можно, например, отнести следующие: изменение кооперативных связей предприятий в процессе стабильного изготовления продукции; непрогнозируемое изменение цен на материал, полуфабрикаты и комплектующие элементы, необходимые для производства изделий; реализация в процессе производства различных мероприятий, связанных с изменением себестоимости и трудоемкости изделий.

В ряде случаев при запуске изделий в производство затраты на материалы, полуфабрикаты и комплектующие могут составлять в общем объеме себестоимости продукции от 50 до 75%. Поэтому изменение величины указанных затрат за счет корректировки цен или из-за отклонений установившихся или ранее запланированных связей между предприятиями оказывает существенное влияние на себестоимость изделий. Изменение величины затрат при отклонениях в сложившихся кооперационных связях между предприятиями, занятыми в производстве продукции, обусловлены рядом факторов: отклонениями в себестоимости однотипной продукции, производимой на предприятиях, которые расположены в различных климатических зонах или отличающихся по организационно-технологическому уровню производства; различием в транспортных расходах из-за из-

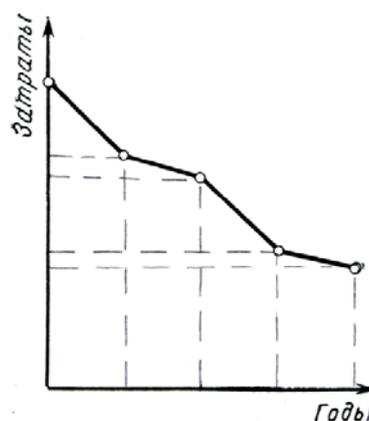
менения длительности расстояний при поставках материалов, полуфабрикатов или комплектов изделий с других предприятий [4].

Использование высокоэффективного технологического оборудования для изготовления деталей, обеспечивающих высокую точность обработки, конструкция и технические характеристики которых не предназначены такой точности, а также использование металлообрабатывающего оборудования при изготовлении малогабаритных деталей, служащего для изготовления крупногабаритных тяжелых деталей, вызывает неоправданное увеличение себестоимости продукции [5, 6]. Нерациональное применение технологического оборудования увеличивает себестоимость изделий вследствие повышения амортизационных отчислений.

Случайными факторами могут также быть: отличия в уровне квалификации кадров; организационные; технологическая и конструктивная преемственность выпускаемой на данном предприятии продукции; традиционность выпуска предприятием отдельных видов изделий. Совместное воздействие факторов трех групп предопределяет характер изменения значений трудоемкости и себестоимости изделий в разные годы их производства на данном предприятии. В различные периоды времени, начиная с начала производства изделий, степень воздействия каждой группы указанных факторов неодинакова. В начальные второй и третий годы производства значительное влияние оказывают факторы, входящие во вторую группу. Результатом этого является существенное уменьшение в этот период значений себестоимости и трудоемкости изделий по сравнению с их значениями в момент запуска изделий в производство, а также в первый год их изготовления. В данный период времени нахождения изделий в производстве по сравнению с другими годами значительно возрастает среднегодовой выпуск продукции, техническая оснащенность производства и совершенствуется его организационно-технический уровень, а также осуществляются мероприятия по завершающей отработке конструкции изделий на технологичность [7]. Как правило, интенсивность снижения трудоемкости и себестоимости стабилизируются, начиная с четвертого года нахождения изделий в производстве [1]. Последующее незначительное снижение трудоемкости и себестоимости производства изделий в основном происходит за счет роста производственных навыков рабо-

чих и организационно-технического уровня производства, мероприятия по совершенствованию которого в данный период в основном нацелены на повышение производительности труда.

Как показывает статистика машиностроительного производства, несмотря на общий характер уменьшения трудоемкости и себестоимости изготовления изделий с ростом времени их нахождения в процессе производства под влиянием факторов, входящих в первую группу и ряда факторов третьей группы, может происходить некоторое повышение затрат, имеющих частный характер. Вследствие этого изменение затрат при изготовлении изделий можно охарактеризовать ломаной линией, которая имеет общую тенденцию к снижению изображена на рисунке.



Изменение затрат в процессе изготовления изделий

На динамику изменения себестоимости изготовления изделий доминирующее влияние имеет изменение тех статей калькуляционных расходов, которые являются преобладающими. Преобладание тех или иных видов затрат в калькуляции себестоимости единицы продукции в значительной степени определяется служебным назначением и особенностями конструкции конкретного вида изделия. [1, 8]. В производстве машиностроительных изделий основную долю составляют затраты на сырье и материалы, полуфабрикаты и комплектующие изделия. Аналогично формируется динамика трудоемкости производства изделий. Доминирующее влияние на последнюю имеет характер изменения затрат труда в механосборочном производстве [9,10,11].

Конструктивно-технологические характеристики машиностроительных изделий в основном определяют характер изменения затрат при их изготовлении. Менее технологичные конст-

рукции изделий имеют более плавный характер изменения трудоемкости и себестоимости по годам производства по отношению с более технологичными конструкциями однотипных изделий, производимых в идентичных производственных условиях [7]. Более значительное уменьшение трудоемкости и себестоимости имеет место при производстве изделий, имеющих более высокую конструктивную преемственность с однотипными изделиями – предшественниками ранее изготавливаемых на предприятии. Это объясняется повышением уровня производственных навыков рабочих при производстве изделий, а также возможностью заимствования значительного объема технологической оснастки, что обеспечивает увеличение темпов снижения затрат на изготовление продукции.

При изготовлении изделий, имеющих большое количество новых инновационных конструктивно – технологических решений, изменение значений их трудоемкости и себестоимости по годам производства происходит более плавно. В зависимости от степени преемственности изделий с однотипными конструкциями определяется не только характер трудоемкости, но также и значения этих параметров. Совершенствование конструкции, как правило, требует соответствующего повышения затрат на ее изготовление.

Для определения трудоемкости и себестоимости изделия в производственный момент времени с начала запуска его в производство, а также для прогнозирования изменений данных показателей нужно найти модель, которая отражает изменение затрат во времени. Вид модели выбирается в соответствии с динамическим рядом значений трудоемкости или себестоимости изделий в дискретные моменты времени.

В качестве модели изменения затрат во времени можно применять различные функции и многочлены [12], так, например, показательная функция типа:

$$U = U_0 k^{\tau} \text{ при } \tau = 0, 1, 2 \dots \tau_n \quad (1)$$

где  $U_0$  – начальное значение параметра;  $k$  – коэффициент среднегодового темпа изменения параметра;  $\tau$  – период времени между текущим значением параметров  $U_0$  и  $U$ .

При незначительном времени нахождения изделия в производстве (до трех лет) в некоторых случаях целесообразно применять линей-

ную зависимость, так как она обеспечивает приемлемую точность расчетов и простоту использования. Это объясняется значительными изменениями затрат на изготовление изделий в первые два-три года нахождения их в производстве. При более продолжительном нахождении изделий в производстве (более трех и далее лет) темпы сокращения затрат на изготовление уменьшаются. Это не дает возможности достичь точности расчетов при применении линейной зависимости. Поэтому предпочтительнее являются степенная и показательная зависимости [1]. Последняя применяется для характеристики процессов, выходные параметры которых изменяются по геометрической прогрессии.

Использование степенной или показательной зависимости дает возможность получить универсальные модели изменения затрат при изготовлении изделий. Предпочтение следует отдать показательной зависимости. Коэффициент среднегодового изменения параметра, используемый в модели (см. рисунок) определяет характер изменения динамического ряда рассматриваемого параметра  $U_0$ . В случае, если начальные значения параметра  $U_0 > 0$  и коэффициент среднегодового темпа его изменения лежит в интервале  $0 < k < 1$ , то при  $\tau \rightarrow \infty$  функция  $U$  асимптотически приближается к нулю, а при  $k > 1$  с ростом значений  $\tau$  функция  $U$  постоянно увеличивается. Вследствие этого модель (см. рисунок) может быть применима для процессов, которая характеризуется как снижением, так и ростом параметра  $U$ . При моделировании изменения затрат при производстве изделий и нахождения коэффициента  $k$  в интервале  $0 < k < 1$  его значение можно определить по формуле:

$$k = \sqrt[n]{U_n/U_0} \text{ при } n=0, 1, 2, \dots, \tau_n \quad (2)$$

где  $U_0$  и  $U_n$  – соответственно начальная и конечная величина затрат;  $n$  – число точек динамического ряда изменения затрат во времени.

В случае, если дискретные значения параметра, которые составляют динамический ряд, изменяются неравномерно, то значение коэффициента « $k$ », которое определяется по формуле (2) будет зависеть от протяженности динамического ряда. Для расчетов можно применять среднее значение всех коэффициентов  $k$ , которые определяются в соответствие с зави-

симостью (2) по известным значениям динамического ряда. Поэтому можно использовать коэффициент динамики значений параметра  $k_o$ , который определяется по формуле:

$$k_o = \sum_{i=1}^m (k_i/m) \quad (3)$$

где  $k_i$  – i-ое значение коэффициента среднегодового темпа изменения параметра; m – количество коэффициентов  $k_i$ , определяемых по формуле (2) для данного динамического ряда.

Наличие некоторых факторов, которые вызывают непредвиденный рост затрат в отдельные годы производства изделий, приводит к изменению начальных значений затрат на их изготовление, соответствующих начальному моменту запуска в производство, а также к отклонению в характере их динамики. Для исключения этого влияния в модель (1) изменения затрат при изготовлении изделий следует ввести корректирующие коэффициенты. Изменение величины затрат в начальный момент времени учитывается за счет введения в модель (1) коэффициента  $S_o$ , который определяется из соотношения:

$$S_o = 1 - (Z_{\tau_o}/U_o), \quad (4)$$

где  $Z_{\tau_o}$  – отклонение затрат на изготовление изделий в период их запуска в производстве из-за действия непредвиденных (случайных) факторов.

Возрастание затрат может происходить не только в период запуска изделий в производство, но и в каждый из моментов времени в процессе изготовления. Обработка статических данных по величине затрат в различные годы производства однотипных изделий без учета факторов, вызывающих непредвиденный рост затрат позволяет определить значения коэффициента динамики затрат  $k_1$ , которые наиболее вероятны для данных производственных условий

$$k_1 = \beta_o k_o$$

где  $\beta_o$  – статический коэффициент.

Значения  $S_o$  и  $\beta_o$  определяются по результатам обработки статических данных по динамике затрат на изготовление изделий в конкретных производственных условиях. С учетом уточняющих коэффициентов  $S_o$  и  $\beta_o$  модель (1) примет вид:

$$U = S_o U_o k_1^{\tau} \text{ при } \tau = 0, 1, 2, 3 \dots \tau_n \quad (5)$$

Значения  $S_o$ ,  $\beta_o$  зависят от вида изготавливаемых изделий, производственных условий конкретного предприятия, а также исследуемого показателя – трудоемкость или себестоимость. Поэтому значения  $S_o$ ,  $\beta_o$  нужно оценивать по результатам обработки статических данных отдельно для трудоемкости и себестоимости для однотипных изделий при их изготовлении в определенных производственных условиях. Такими условиями может обладать одно из ведущих предприятий отрасли, которое имеет высокий организационно-технический уровень производства, а также отличается наименьшей трудоемкостью и себестоимостью выпускаемой продукции по сравнению с другими предприятиями. Такое предприятие следует считать базовым в данной отрасли или подотрасли. При наличии отличий производственных условий данного предприятия от базового коэффициенты  $S_o$  и  $\beta_o$  необходимо уточнять.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кононенко В.Г., Кушнарченко С.Г., Прялин М.А. Оценка технологичности и унификации машин. М.: Машиностроение. 1986 – 160 с.
2. Сворцов А.В., Схиртладзе А.Г. Основы технологии автоматизированных машиностроительных производств. – М.: Высш. Шк. 2010. – 589 с.
3. Никифоров А.Д., Схиртладзе А.Г. Управление качеством. – М.: Студент. 2011. – 717 с.
4. Схиртладзе А.Г., Федотов А.В., Хомченко В.Г. Автоматизация технологических процессов и производств. – М.: Абрис. Высш. Шк. 2012. – 565 с.
5. Иванов А.В. Экономика рядов машин. М.: Изд. Стандартов – 1975. – 107 с.
6. Схиртладзе А.Г., Ярушин С.Г. Технологические процессы в машиностроении. – Старый Оскол.: ООО ТНТ. 2007. – 524 с.
7. Схиртладзе А.Г. Технологичность конструкций технических изделий. Волгоград.: Волг. ГТУ. ж. «Известия Волг. ГТУ» №13 (100) 2012. С.83-92
8. Тимирязев В.А., Вороненко В.П., Схиртладзе А.Г. Основы технологии машиностроительного производства. – СПб.: Изд. «Лань». 2012 – 448 с.
9. Вороненко В.П., Соломенцев Ю. М., Схиртладзе А.Г. Проектирование машиностроительного производства. – М.: Дрофа. 2006. – 380 с.
10. Ревенко Н.Ф., Схиртладзе А.Г., Аристова В.Л. и др. – М.: Высш. шк. 2005. 383 с.
11. Схиртладзе А.Г., Григорьев С.Н., Скрябин В.А. и др. Технологические основы ремонта и восстановления производственных машин и оборудования. Йошкар – Ола.: Поволжский ГТУ. 2012. – 492 с.
12. Саркисян С.А., Минаев Э.С. Экономическая оценка летательных аппаратов. М.: Машиностроение. 1972. 179 с.

УДК 621.923.1:621-35

А. Г. Схиртладзе, В. А. Скрыбин\*, А. П. Жук

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ  
ЕЛОЧНОГО ПРОФИЛЯ ХВОСТОВИКА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА ДИЗЕЛЯ  
НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

Пензенский государственный университет\*

E-mail: ags@stankin.ru

Рассмотрены вопросы влияния процесса глубинного шлифования елочного профиля хвостовика лопаток турбокомпрессора на качественные показатели поверхностного слоя. Установлен сложный характер распределения напряжений в поверхностном слое детали, с переходом их от растягивающих в сжимающие и последующий постоянной величины напряжений, что обеспечивает стабильные качественные характеристики поверхностного слоя и заданный ресурс работы детали.

*Ключевые слова:* процесс глубинного шлифования, характер распределения напряжений, стабильные качественные характеристики поверхностного слоя, заданный ресурс работы детали.

Questions are considered influence of process of the deep polishing of fir-tree profile of tailpress of shoulder-blades of turbo-compressor on the quality indexes of superficial layer. Difficult character of distribution of tensions is set in the superficial layer of detail, with the transition of them from stretchings in squeezing and subsequent permanent size of tensions that provides stable quality descriptions of superficial layer and set resource of work of detail.

*Keywords:* process of the deep polishing, character of distribution of tensions, stable quality descriptions of superficial layer, set resource of work.

В процессе финишной абразивной обработки основными качественными показателями шлифуемой поверхности детали являются: шероховатость поверхности, внутренние остаточные напряжения 1 рода, микротвердость поверхностного слоя, глубина, степень наклепа и градиент. Эти показатели особенно важны при глубинном шлифовании сложно-профильных деталей из литейных труднообрабатываемых сплавов АНВ 300, ЖСКД, Juronel.

По данным работы [1] эмпирическая зависимость показателя шероховатости  $R_a$  от режимных параметров процесса обработки следующая:

$$R_a = 2 * 10^4 (t^{0.17} * v_d^{-0.6} * S^{0.6} / v_k^{0.85}) \quad (1)$$

где  $t$  - глубина шлифования выбирается, исходя из величины припуска, мм;  $v_d$  - скорость пере-

мещения детали, м/мин;  $v_k$  - скорость вращения круга, м/с;  $S$  - поперечная подача шлифования, мм/дв.ход.

Параметрами, влияющими на заданную шероховатость и производительность процесса обработки являются  $v_d$ ,  $v_k$  и  $S$ . [2]

Важное значение имеют графические зависимости, которые характеризуют влияние режимных параметров, полученных экспериментальным путем, на шероховатость поверхности.

При определении зависимости шероховатости от глубины шлифования, варьируемые факторы при заданных скоростях шлифовального круга находятся в определенном диапазоне ( $t_1=0,05 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_2=0,1 \cdot 10^{-3}$  м;  $t_3=0,15 \cdot 10^{-3}$  м).

В зависимости от изменения глубины шлифования, расчет показателя шероховатости  $R_a$  дает следующие значения:

$$R_a = 2 * 10^4 \left[ (0,05 * 10^{-3})^{0.17} * \frac{(4,16 * 10^{-3})^{-0.6} * (0,0025)^{0.6}}{30^{0.85}} \right] = 0,75 \text{ МКМ}$$

$$R_a = 2 * 10^4 \left[ (0,1 * 10^{-3})^{0.17} * \frac{(4,16 * 10^{-3})^{-0.6} * (0,0025)^{0.6}}{30^{0.85}} \right] = 0,84 \text{ МКМ}$$

$$R_a = 2 * 10^4 \left[ (0,15 * 10^{-3})^{0.17} * \frac{(4,16 * 10^{-3})^{-0.6} * (0,0025)^{0.6}}{30^{0.85}} \right] = 0,91 \text{ МКМ}$$

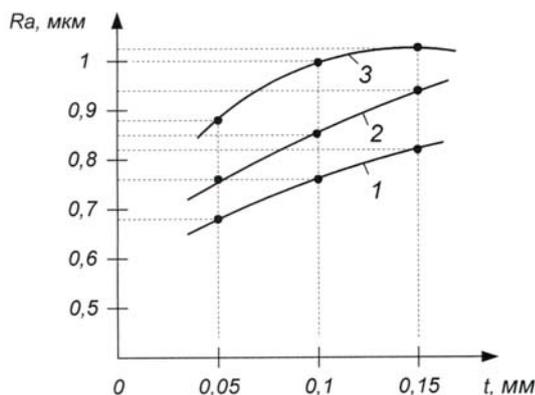


Рис. 1. Зависимость шероховатости от глубины шлифования при разных скоростях круга:  
1-  $v_x = 35$  м/с; 2-  $v_x = 30$  м/с; 3-  $v_x = 25$  м/с

Анализ графика зависимости (рис. 1) показал, что интенсивное изнашивание круга наступает при  $t_3 = 0,15$  мм, со скоростью круга  $v_{xp} = 25$  м/с.

При определении изменения шероховатости поверхности от продольной скорости перемещения детали  $v_d$  ( $v_{d1} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $v_{d2} = 4,16 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $v_{d3} = 5,8 \cdot 10^{-3}$  м/с) получены следующие величины критерии Ra:

$$R_{a1} = 2 \cdot 10^4 \left[ (0,05 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot \frac{(2,5 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,91 \text{ МКМ}$$

$$R_{a2} = 2 \cdot 10^4 \left[ (0,1 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot \frac{(4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,67 \text{ МКМ}$$

$$R_{a3} = 2 \cdot 10^4 \left[ (0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot \frac{(5,8 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,54 \text{ МКМ}$$

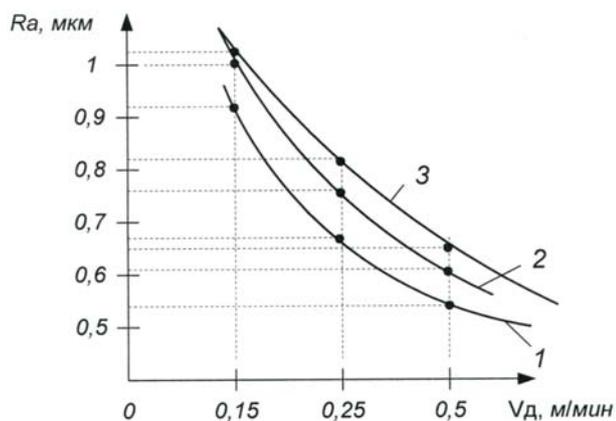


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности от скорости продольной подачи детали при различных глубинах шлифования:  
1-  $t = 0,05$  мм; 2-  $t = 0,1$  мм; 3-  $t = 0,15$  мм

Весьма важным моментом является исследование зависимости показателей шероховатости Ra от скорости продольной подачи детали при различных глубинах шлифования.

Анализ графической зависимости (рис. 2) показал, что с уменьшением продольной скорости перемещения детали происходит резкое увеличение шероховатости поверхности, при этом происходит процесс интенсивного изнашивания и объемного разрушения абразивных зерен круга. Определение применения параметра шероховатости Ra поверхности от скорости вращения шлифовального круга ( $v_{xp} = 25$  м/с;  $v_{xp} = 30$  м/с;  $v_{xp} = 35$  м/с;) при различных скоростях продольной подачи детали дают следующие значения:

$$R_{a1} = 2 \cdot 10^4 \left[ (0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot \frac{(2,5 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{25^{0,85}} \right] = 1,46 \text{ МКМ}$$

$$R_{a2} = 2 \cdot 10^4 \left[ (0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot \frac{(4,16 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{30^{0,85}} \right] = 0,92 \text{ МКМ}$$

$$R_{a3} = 2 \cdot 10^4 \left[ (0,15 \cdot 10^{-3})^{0,17} \cdot \frac{(5,8 \cdot 10^{-3})^{-0,6} \cdot (0,0025)^{0,6}}{35^{0,85}} \right] = 0,66 \text{ МКМ}$$

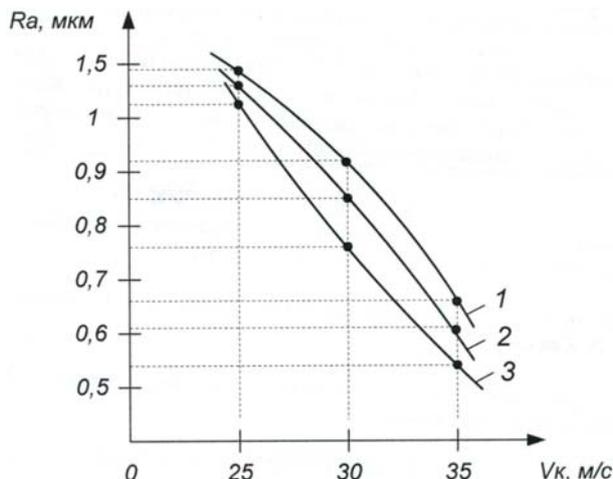


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности от скорости абразивного круга:

1-  $v_z = 0,15$  м/мин; 2-  $v_z = 0,25$  м/мин; 3-  $v_z = 0,35$  м/мин

Анализ графической зависимости (рис. 3) показал, что с увеличением скорости круга происходит резкое уменьшение шероховатости поверхности и уменьшается изнашивание абразивного круга. Технологические параметры влияющие на изменение шероховатости поверхности при глубинном шлифовании елочного профиля хвостовика лопатки, показывают определенную закономерность формирования микрорельефа поверхностного слоя. С увеличением скорости круга, величины скорости продольной подачи и с уменьшением глубины шлифования при различных параметрах варьирования режимов шлифования по эмпирической зависимости (1) можно преобразовать величину шероховатости поверхности слоя елочного профиля хвостовика лопатки, в соответствии с заданными на ее изготовление значениями. [3]

Весьма важным фактором для процесса исследования глубинного шлифования является величина и распределение по глубине остаточных напряжений, поэтому при изготовлении елочного профиля хвостовика лопатки турбины следует применять процессы, повышающие качество поверхностного слоя, к которому и относится процесс глубинного шлифования на станках с ЧПУ. [4]

При формировании остаточных напряжений 1 рода выделяется три фактора, оказывающих влияние на форму эпюры остаточных напряжений:

1) Неравномерная пластическая деформация поверхностного слоя под действием сил резания абразивного зерна. При перемещении

шлифовального круга в процессе обработки, вследствие упругого последствие металла возникает трение между зерном абразивного круга и обработанной поверхностью. Под действием сил трения, верхние слои поверхности растягиваются пластически, внутренние слои растягиваются упруго. После обработки упругие растягивающие напряжения, действующие во внутренних слоях, будут стремиться к нулю, но этому противодействуют пластически растянутые верхние слои. В результате чего в верхних слоях действует напряжение сжатия.

2) Упруго-пластические деформации, обусловленные тепловым расширением металла в поверхностном слое при его нагреве во время шлифования.

При резком нагреве во время шлифования, горячие поверхностные слои стремятся удлиняться, но этому препятствуют холодные внутренние слои, что вызывает в поверхностном слое временные напряжения сжатия. При превышении этими напряжениями предела текучести металла, поверхностный слой будет пластически сжатыми, а внутренние холодные слои растянутыми. При охлаждении пластически сжатые поверхностные слои, сократятся на величину их пластического сжатия.

Сокращению глубины поверхностных слоев, препятствуют внутренние слои вследствие чего в верхних пластически деформируемых слоях возникают напряжения растяжения, а во внутренних слоях - напряжения сжатия.

3) Структурно-фазовые превращения металла при нагреве и охлаждении поверхностного слоя. Так как лопатки турбокомпрессоров изготавливают из жаропрочных сплавов, то структурно-фазовыми изменениями можно пренебречь.

При работе в турбокомпрессоре лопатка устанавливается в диск с помощью елочного замкового соединения и главные напряжения как статические так и динамические действуют вдоль ее оси, перпендикулярно к длине хвостовика. Т.е. необходимо определять поперечные составляющие остаточных напряжений возникающих при глубинном шлифовании елочного профиля хвостовика лопаток. Форма и размеры елочного профиля хвостовика лопаток не позволяют определить поперечную составляющую остаточных напряжений механическим методом, поэтому для качественной оценки глубинного шлифования допустимо использовать определение остаточных напряжений по

продольной составляющей. Механический метод основан на удалении части внутренне напряженного тела с изменением деформаций происходящих в результате такого удаления и вычислениям по этим деформациям величины и знака остаточных напряжений. Измерение остаточных напряжений 1 рода производились механическим способом по методу академика Давыденкова Н.П. на приборе "Пион". Образцы размерами (150x8,5x14xR) определялись по профилю хвостовика лопатки из сплава АНВ 300 кругом ЗП 500x25x203, 25А 10П ВМ2 12 К5 ПГ класса А 1кл. 35м/с, на режимах  $v_x=30$  м/с;  $v_d=200$  мм/мин;  $Q_{сж} = 100$  л/мин с СОЖ Аквол 10.

Остаточное напряжение определялось по формуле:

$$\sigma = \frac{E(h-a)^2}{3b^2} * \frac{df}{da}$$

где  $df$ - изменение длины прогиба после удаления слоя;  $da$  - толщина снимаемого слоя;  $E$  -

статический модуль упругости материала, кг/мм<sup>2</sup>;  $a$  - расстояние от последующей поверхности до рассматриваемого слоя, мм;  $b$  - половина расстояния между опорами при изменении прогиба образца, мм;  $h$  - начальная толщина образца, мм.

Остаточные напряжения в поверхностном слое детали в зависимости от глубины шлифования приведены на графике (рис. 4).

В поверхностном слое наблюдается напряжения сжатия до 380МПа переходящие на глубине 30-50мкм в растягивающие напряжения величиной 180МПа.

При двухпроходном глубинном шлифовании елочного профиля хвостовика лопатки на различных режимах резания величина и эпюра распределения остаточных напряжений определяется последним проходом.

Остаточные напряжения в поверхностном слое детали при двухпроходном глубинном шлифовании на разных режимах резания и глубине шлифования приведены на графике (рис. 5).

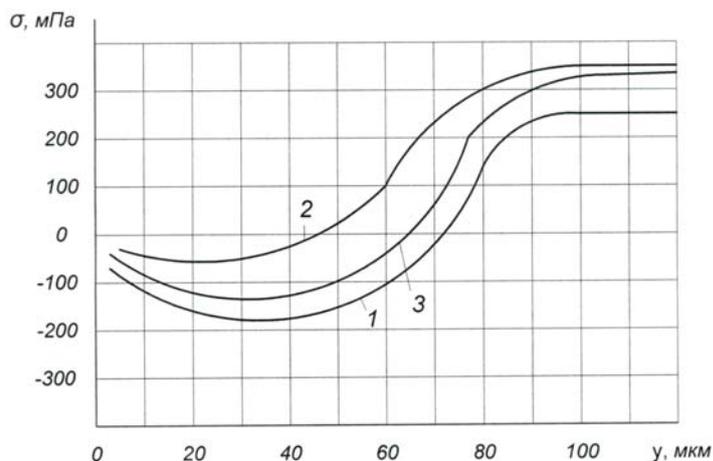


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое:  
1- $t = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м; 2- $t = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м; 3- $t = 2 \cdot 10^{-3}$  м

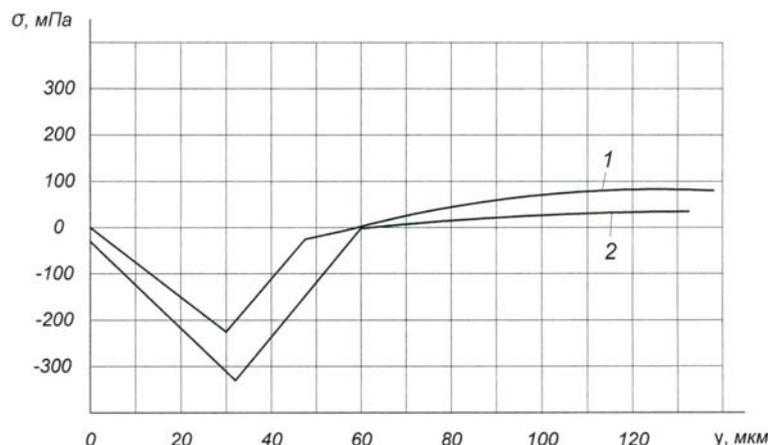


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое при разной глубине шлифования на режимах:  
1-  $v_x = 25$  м/с;  $v_d = 1,6 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $t = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м; 2-  $v_x = 30$  м/с;  $v_d = 4,16 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $t = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м

## Вывод

На основании исследования графической зависимости распределения остаточных напряжений в поверхностном слое, в зависимости от глубины шлифования скорости круга, скорости детали, устанавливается сложный характер распределения напряжений в поверхностном слое детали, с переходом их от растягивающих в сжимающие и последующий постоянной величины напряжений, что обеспечивает стабильные качественные характеристики поверхностного слоя и заданный ресурс работы детали.

Одним из факторов, влияющих на качество поверхностного слоя сложного профиля хвостовика лопатки, является наклеп, т.е. упрочнение металла под действием пластической деформации в процессе глубинного шлифования. Наклеп приводит к уменьшению плотности металла, пропорционально степени пластической деформации и к изменению его свойств повышается сопротивление деформации, понижается пластичность, повышается твердость, что приводит в итоге к снижению работоспособности детали в изделии. Поэтому одними из показателей качественной обработки поверхностного слоя детали является глубина и степень наклепа, зависящие от свойств обрабатываемого материала и условий обработки.

Основным методом определения характеристик наклепа на дне паза елочного профиля хвостовика лопатки и образцов является метод измерения микротвердости на косых шлифах. Микротвердость замерялась на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 100 грамм.

Глубина наклепа определяется весовым методом, по толщине удаляемого слоя.

$$h_H = \frac{P_o - P_n}{S\rho}$$

где  $P_o$  - исходная масса образца, г;  $P_n$  - масса образца после удаления травлением, г;  $S$  - площадь исследуемой поверхности, см;  $\rho$  - плотность материала образца, г/см<sup>3</sup>.

Степень наклепа определяется по формуле:

$$U_H = \frac{H_m}{H_m^I} * 100\%$$

где  $H_m$  - микротвердость обработанной поверхности;  $H_m^I$  - микротвердость сердцевины.

Градиент наклепа определяется по формуле:

$$U_H = \frac{H_{m(max)} - H_{m(исх)}}{H_{m(max)}}$$

где  $H_{m(max)}$  и  $H_{m(исх)}$  - где максимальная и исходная микротвердость поверхностного слоя детали.

Результаты исследования наклепа при двухпроходном глубинным шлифованием черновой и чистовой проход представлены в таблице.

Черновой и чистовой проходы

№ прох.	Наклеп	
	Степень в %	Глубина, мкм
1	25	32
2	20	18

Расчетные характеристики наклепа зависят от технологии и режимов упрочнения и свойственны для умеренного упрочнения обработанной поверхности. Они дают возможность получать заданные физико-механические характеристики поверхностного слоя. Нанесение на детали износостойких покрытий значительно увеличивает их эксплуатационный ресурс [2,3].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахмарова М.С, Мирер Я.Г. Влияние технологических факторов на надежность лопаток газовых турбин. М.: Машиностроение. 1966.-223с.
2. Силин С.С., Хрульков В.А., Лобанов А.В., Рыкуков Н.С. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение. 1984 - 64с. (Библиотека "Новости технологии").
3. Коломеец В.В., Полутан Б.И. Алмазные правящие ролики при врезном шлифовании деталей машин. - Киев : Наук, думка, 1983-144с.
4. Силин С.С., Леонов Б.Н., Хрульков В.А. и др. Оптимизация технологии глубинного шлифования. Редкол.: Орлов П.Н. (пред.) - М.: Машиностроение, 1989.-120с.
5. Григорьев С.Н., Маслов А.Р., Схиртладзе А.Г., Могилевский А.М. Производство высококачественных деталей в машиностроении. М.: Изд. центр. МГТУ «СТАНКИН». 2011
6. Григорьев С.Н. Современное вакуумно-плазменное оборудование и технологии комбинированного упрочнения инструмента и деталей машин. М.: Машиностроение. Ж. «Технология машиностроения». №3. 2004
7. Андреев А.А., Григорьев С.Н., Шулаев В.М. Технологические особенности получения композиционных наноструктурных покрытий вакуумно-плазменными методами. М.: Машиностроение. Ж. «Технология машиностроения». №7. 2005.

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 620.165.29

*Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов, А. К. Иванюк*

### АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПО МАНОМЕТРИЧЕСКОМУ МЕТОДУ СПОСОБОМ СРАВНЕНИЯ С НЕПРЕРЫВНОЙ ПОДАЧЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрен вопрос автоматизации контроля герметичности запорной арматуры манометрическим методом. Приведены принципиальная, функциональная и схема автоматизации для устройства с двумя клапанами.

*Ключевые слова:* контроль герметичности, запорная арматура, манометрический метод.

Automation of manometric method hermeticity control of shifting fittings are considered. Principal, functional and automation schemes for device with two valves are given.

*Keywords:* hermeticity control, shifting fittings, manometric method.

Контроль герметичности запорной арматуры актуален в настоящее время, так как такие устройства используются практически во всех отраслях промышленности [3, 5]. При выборе метода контроля герметичности, следует учитывать, что они различаются по чувствительности [2], времени контроля, возможности автоматизации процесса, стоимости оборудования. Поэтому, необходимо определиться какой из этих параметров является основным. Для контроля герметичности запорной аппаратуры наиболее подходящим является манометрический метод по способу сравнения с непрерывной подачей давления [1, 4]. При этом одной из производственных задач является проверка устройств с несколькими клапанами. Существуют схемы контроля, при работе которых необходимо приостанавливать подачу газа, или даже сбрасывать его, что порой бывает недопустимо. Избежать этого можно, воспользовавшись манометрическим методом контроля по способу сравнения с непрерывной подачей давления. На рис. 1 приведена схема контроля герметичности устройства с двумя клапанами, расположенными последовательно и проверяющимися по очереди. При этом испытательное давление на входе схемы не перекрывается.

Контроль герметичности в данной схеме проводится следующим образом. Воздух от источника давления через фильтр 1 и стабилизатор 2, посредством которого по манометру 3

устанавливается требуемое входное давление подается на вход к проверяемой схеме. Проверяемые запорные клапаны представлены в виде емкостей  $V_1$ ,  $V_2$  (позиции 13 и 16 соответственно) с входными и выходными регулирующими дросселями 12, 13, 14, 15 соответственно. Данная линия является измерительной. Верхняя и нижняя линии – эталонные, которые содержат емкости с регулируемым объемом  $V_{31}$  и  $V_{32}$  (позиции 19 и 22) с входными дросселями 18 и 21 и выходными дросселями с регулируемой проводимостью 20 и 23, которые предназначены для настройки схемы. Параметры эталонных линий могут варьироваться в зависимости от величины утечки. На входе и выходе эталонных линий расположены пневмораспределители 4, 5, 6, 7, обеспечивающие при нажатии кнопки подключение эталонной линии к источнику питания и к измерительной линии. Пневмораспределители 4, 5 и 6, 7 связаны жесткой связью (на схеме обозначено пунктирной линией), т. е. нажатие одной кнопки обеспечивает включение одной из пар распределителей одновременно. Элементом сравнения в схеме являются трехмембранные пневмореле 8, 9, сигнал с которых поступает на индикаторы 10 и 11. Чтобы проверить устройство 13, необходимо закрыть оба клапана с помощью дросселей 14 и 17, переключить пневмораспределитель 6, который в свою очередь переключит пневмораспределитель 7.

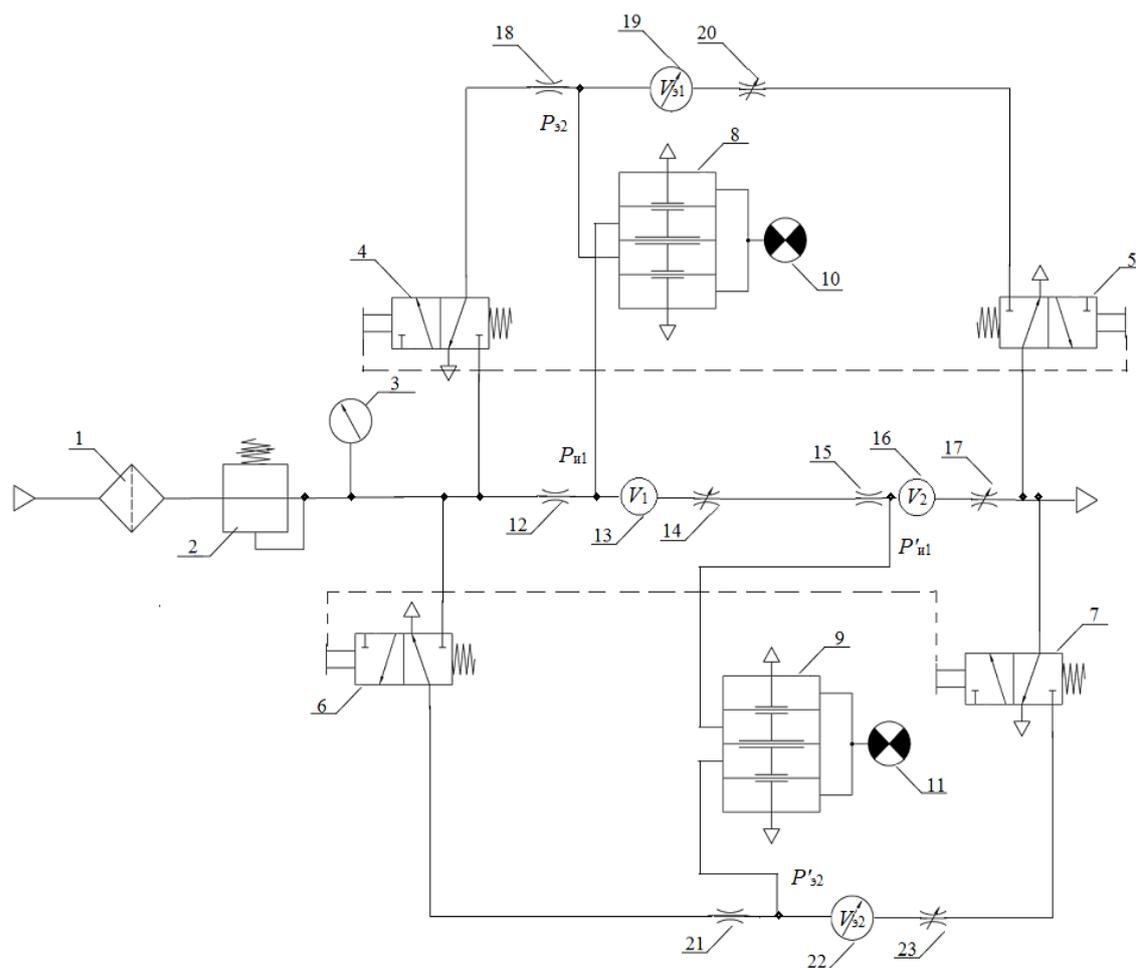


Рис. 1. Пневматическая схема контроля герметичности

Таким образом, при подаче давления воздух пойдет по эталонной нижней линии. Если первый клапан не герметичен, то давление в емкости  $V_1$  изменится, и сработает элемент сравнения. Так как в верхней эталонной линии давление не изменяется, то при сравнении с давлением в емкости  $V_1$  сработает пневматический сигнализатор 10. Сравнение осуществляется путем подачи давления из эталонной линии  $P_{с2}$  и из измерительной –  $P_{и1}$  на схему из трехмембранного реле 8. Если  $P_{и1} < P_{с2}$ , то на выходе элемента сравнения будет логическая единица и сигнализатор давления 10 сработает. Это означает, что в исследуемой емкости 13 есть утечка, превышающая норму и, соответственно, устройство не герметично. Если давления  $P_{и1} \geq P_{с2}$ , то на выходе элемента сравнения будет логический ноль, сигнализатор 10 не работает, т.е. устройство герметично.

Для проверки клапана 16 необходимо переключить распределители 6, 7, приведя их в исходное состояние, и распределители 4 и 5. При этом подключается верхняя эталонная линия, а

сравнение будет производиться по нижней эталонной линии. Далее следует полностью открыть первый клапан (открыть дроссель 14), оставив закрытым второй клапан. Теперь воздух будет подаваться как по измерительной линии до второго проверяемого закрытого клапана, так и по верхней эталонной линии. Измерение герметичности проводится аналогично приведенному выше, но уже в сравнении с нижней эталонной линией, посредством элемента сравнения 9 и индикатора 11. Таким образом, если два сигнализатора показывают “ноль”, то устройство с двумя клапанами герметично, если срабатывает хотя бы один сигнализатор и показывает единицу – устройство не герметично. Достоинством данной схемы является возможность ее легкой автоматизации и приближенность условий испытания на герметичность к реальным условиям работы устройства.

На рис. 2 представлена функциональная схема контроля герметичности. Так же добавлена кнопка пуска, обеспечивающая включение

и переключение эталонных линий. Добавлены два реле времени – обеспечивающие задержку времени для измерения и подачи сигнала для переключения эталонной линии. Так же схема-

тически добавлены зажимы для закрепления исследуемой детали и ее последующей проверки. После нажатия на кнопку пуска, измерение происходит автоматически.

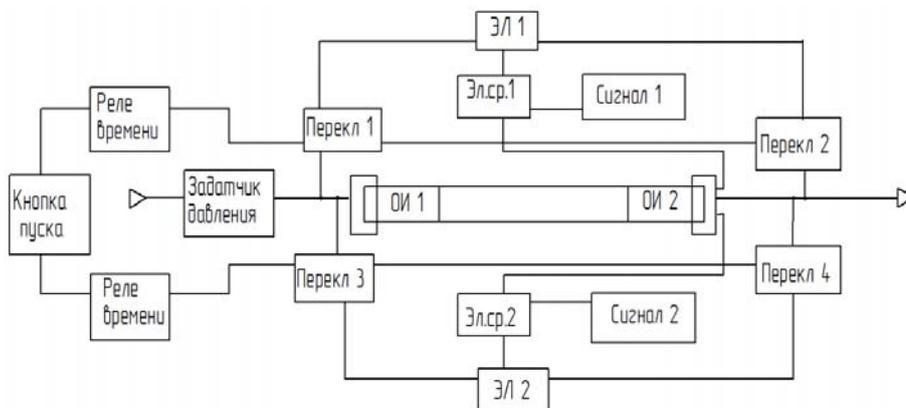


Рис. 2. Функциональная схема контроля герметичности манометрическим методом

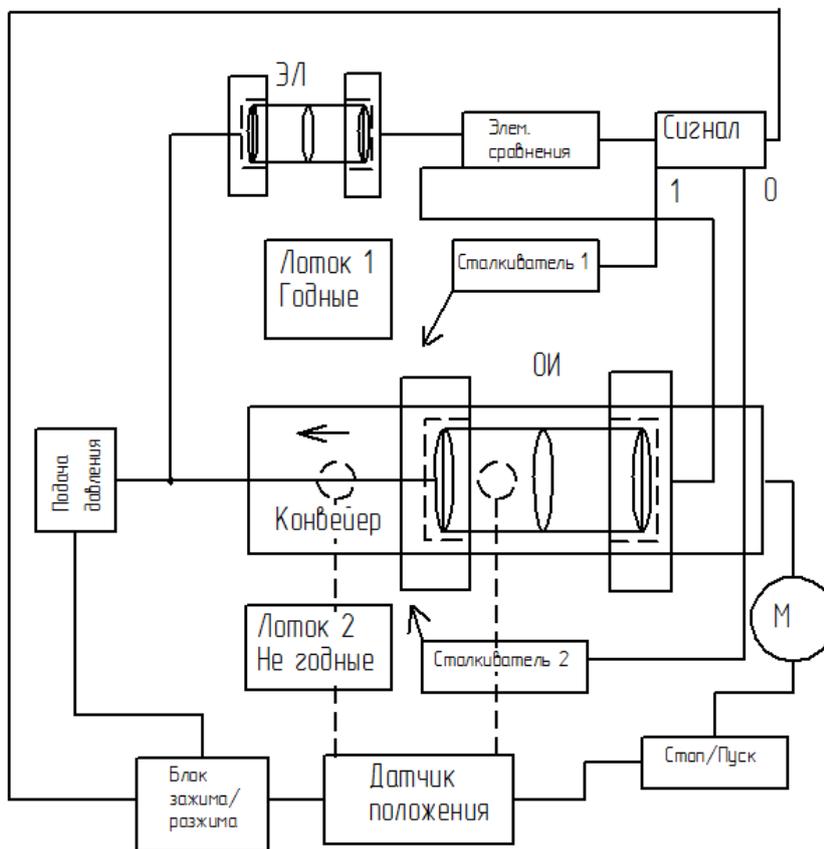


Рис. 3. Автоматическая линия контроля герметичности запорной арматуры

На рис. 3 представлена автоматическая линия для контроля герметичности запорной арматуры. Принцип действия данной линии следующий. При нажатии кнопки «Пуск» запускается мотор (обозначенный на схеме М), который включает конвейерную линию с установленной на ней запорной арматурой – объек-

том контроля герметичности (на схеме ОИ). На конвейерной линии находятся два индикатора положения, которые подключены к блоку «Датчик положения». Как только ОИ заслоняет индикаторы положения, срабатывает датчик, который в свою очередь посылает сигнал на блок «Пуск/Стоп» и останавливает движение

конвейера. Так же он подает сигнал на блок «Зажима/разжима» ОИ. Происходит зажим ОИ с двух сторон герметичными клапанами, первый подсоединен к линии подачи давления, второй к линии элемента сравнения. Как только ОИ зажат, происходит подача давления в объект контроля и эталонную линию. В эталонной линии находится эталонная деталь, настроенная на определенный размер утечки. Эталонная деталь так же зажата с двух сторон: к одной осуществляется подвод давления, вторая соединена с элементом сравнения.

Далее происходит сравнение давлений в ОИ и ЭЛ, с помощью элемента сравнения, с которого подается сигнал на блок Сигнал. В зависимости от результата сравнения сигнал будет либо «0», тогда деталь ОИ герметична, либо «1» – деталь ОИ не герметична. После появления сигнала срабатывает блок разжима, и в зависимости от результата сталкиватель сбрасывает деталь ОИ в лоток годных или не годных деталей. Таким образом, осуществляется автоматическая сортировка ОИ. Как только деталь сбросила в лоток, срабатывают индикаторы положения, посылая сигнал на блок положения. Этот блок в свою очередь запускает мотор, конвейерная линия начинает движение и цикл повторяется.

УДК 62–503.55

*Н. И. Гданский, А. В. Карнов*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ ПРИВЕДЕННОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ С ДВУМЯ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

ФГБОУ ВПО Российский государственный социальный университет

E-mail: al-kp@mail.ru

В статье приведены математические зависимости, которые могут быть использованы при управлении объектами, имеющими две степени свободы, на основе прогнозирования внешней нагрузки.

*Ключевые слова:* прогнозирующие модели, транспортное средство.

In the article the mathematical formulas that can be used in the management of objects having two degrees of freedom on the basis of the forecasting of the external load.

*Keywords:* predictive models, wheeled vehicle.

Адаптивное управление с использованием прогнозирования недетерминированной внешней нагрузки для простейшей одноступенной системы рассмотрено в статье [1]. Управление строится на основании данных обратной связи, полученных на пройденных участках траектории перемещения управляемого объекта. В оборудовании, выполняющем транспортные и погрузочно-разгрузочные операции, используют-

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Барабанов, В.Г.* Производительность автоматизированных стендов для контроля герметичности дискретно-непрерывного действия / В.Г. Барабанов // Автоматизация технологических процессов в машиностроении: Межвуз. сборник науч. трудов / ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – С. 47–51.
2. *Барабанов, В.Г.* Исследование чувствительности контроля герметичности по способу сравнения с непрерывной подачей испытательного давления / В.Г. Барабанов // Известия ВолгГТУ. Сер. Автоматизация технологических процессов в машиностроении: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – Вып.3, №5. – С. 51–53.
3. *Барабанов, Г. П.* Автоматизация приемосдаточных испытаний на герметичность в производстве газовой аппаратуры / Г. П. Барабанов, В. Г. Барабанов // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – № 8. – С. 62–65.
4. *Барабанов, Г.П.* Моделирование метода и средств автоматического контроля герметичности газовой запорной арматуры / Г.П. Барабанов, В.Г. Барабанов // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 6 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 12. – С. 71–73.
5. *Барабанов, Г.П.* Автоматизация контроля герметичности газовой трубопроводной арматуры / Г.П. Барабанов, В.Г. Барабанов, И.И. Лупушор // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 7 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 13. – С. 65–68.

ся механические системы, у которых число степеней свободы превышает 1. Сложность управления при двух степенях подвижности заключается в том, что в общем случае возможно как кинематическое, так и силовое взаимное влияние перемещений по обеим координатам.

Рассмотрим применение адаптивного управления с прогнозированием нагрузки к объекту с двумя степенями свободы 1 и 2. Пере-

мещения по ним обозначим через  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . В системе обратной связи по степеням свободы 1 и 2 имеются датчики перемещений, регистрирующие дискретные значения перемещений  $\varphi_{1i}$  и  $\varphi_{2j}$ , для которых управляющая система определяет соответствующие им дискретные моменты времени  $t_i$  и  $t_j$ . Также система обратной связи вычисляет значения работ  $A_{1(i)}$  и  $A_{2(j)}$ , выполняемых приводами первой и второй степеней на соответствующих отдельных отрезках изменения времени  $[t_{1(i)}; t_{1(i+1)}]$  и  $[t_{2(j)}; t_{2(j+1)}]$ .

По степеням 1 и 2 необходимо реализовать такие перемещения управляемого объекта, при которых совместно выполнялись бы следующие условия:

$$\begin{cases} |\varphi_1(t_i) - \varphi_{1i}| \leq \Delta_1; & t_i \in [t_n; t_k]; \\ |\varphi_2(t_j) - \varphi_{2j}| \leq \Delta_2; & t_j \in [t_n; t_k]. \end{cases}$$

Обозначим мгновенные значения приведенных к первой и второй степеням свободы силовых факторов через  $M_1(t)$  и  $M_2(t)$ . В общем случае они зависят не только от времени, но и от законов перемещения  $\varphi_1(t)$  и  $\varphi_2(t)$ , реализуемых по обеим координатам:

$$\begin{cases} M_1 = M_1(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t)); \\ M_2 = M_2(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t)). \end{cases}$$

Обобщая [1], в качестве модели внешней нагрузки по степени свободы  $s$  ( $s = 1, 2$ ) примем вектор  $\bar{M}_s^k$  из постоянных величин, имеющих физический смысл усредненных значений частных производных порядка от 0 до  $k$  ( $k$  – порядок модели) от функции  $M_s(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t))$  по параметрам  $t, \varphi_1$  и  $\varphi_2$ , называемый *вектором силовых характеристик* по координате  $s$ . При фиксированных коэффициентах  $\bar{M}_s^k$  и переменных параметрах движения по координате  $s$  мгновенную величину  $M_s(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t))$  представим в виде скалярного произведения:

$$M_s(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t)) = (\bar{M}_s^k, \bar{\varphi}_s^k(t)),$$

где вектор  $\bar{\varphi}_s^k(t)$  – вектор кинематических характеристик по координате  $s$ .

При таком представлении  $M_s(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t))$  для расчета управляющего воздействия по каждой координате  $s$  на заданном отрезке времени  $[t_p; t_{p+1}]$  в качестве промежуточной характеристики используется работа  $A_{s(p)}$ , которую должен совершать привод данной степени свободы:

$$A_{s(p)} = \int_{t_p}^{t_{p+1}} (\bar{M}_s^k, \bar{\varphi}_s^k(t)) \varphi_s'(t) dt.$$

В [1] рассмотрено однонаправленное перемещение по одной координате. С целью обобщения на знакопеременный случай перемещения наряду с массивами моментов времени  $\{t_{1(i)}\}, \{t_{2(j)}\}$  и значений работ  $\{A_{1(i)}\}, \{A_{2(j)}\}$  предложено использовать дополнительные массивы  $\{\Delta\psi_{1(i)}\}$  и  $\{\Delta\psi_{2(j)}\}$  перемещений по координатам, которые формируются по следующему правилу: если перемещение на участке  $[t_{s(i)}; t_{s(i+1)}]$  составляет  $k \cdot h_s$ , то  $\Delta\psi_{s(i)} = \pm k$ , где плюс принимается при перемещении в положительном направлении, минус – при отрицательном.

### 1. Модель нагрузки нулевого порядка.

Данная модель содержит по каждой степени свободы только постоянную составляющую:

$$\bar{M}^0 = \begin{pmatrix} \bar{M}_1 \\ \bar{M}_2 \end{pmatrix},$$

где  $\bar{M}_1, \bar{M}_2$  – усредненные постоянные составляющие моментов внешних сил по первой и второй координатам.

Данные обратной связи содержат: 1) для первой степени свободы – массивы моментов времени  $\{t_{1(i)}\}$  и значений работ на них  $\{A_{1(i)}\}$ , массив инкрементных перемещений по первой координате  $\{\Delta\psi_{1(i)}\}$ , 2) для второй степени свободы – аналогичные массивы  $\{t_{2(j)}\}, \{A_{2(j)}\}, \{\Delta\psi_{2(j)}\}$ . Формулы для коэффициентов первой модели по обеим координатам и вектор кинематических характеристик имеют вид:

$$\begin{aligned} M_{1(i)} &= A_{1(i)} / \Delta\varphi_{1i}, & M_{2(j)} &= A_{2(j)} / \Delta\varphi_{2j}, \\ \bar{\varphi}^0(t) &= \{1\}. \end{aligned} \quad (1)$$

По найденным коэффициентам  $M_1$  и  $M_2$  модели  $\bar{M}^0$  значения приведенных работ, необходимых для заданных перемещений  $[\psi_{1(k)}; \psi_{1(k+1)}]$  и  $[\psi_{2(k)}; \psi_{2(k+1)}]$  по координатам 1, 2 на отрезке времени  $[\tau_k; \tau_{k+1}]$  равны:

$$\begin{aligned} \hat{A}_{1(k)} &= \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} M_1 \psi_1'(\tau) d\tau = M_1 (\psi_{1(k+1)} - \psi_{1(k)}); \\ \hat{A}_{2(k)} &= \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} M_2 \psi_2'(\tau) d\tau = M_2 (\psi_{2(k+1)} - \psi_{2(k)}). \end{aligned} \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что построение коэффициентов и расчет работ по каждой координате в модели нулевого порядка могут быть выполнены независимо, т.е. при нулевом порядке  $k = 0$  для силовых векторов  $\bar{M}^0$  еще не сказывается взаимное влияние перемещений по разным координатам.

**2. Модель нагрузки первого порядка.** В модели первого порядка  $\bar{M}^1$  наряду с постоянными

составляющими нагрузки по координатам учитываются частные производные от  $M_1(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t))$  и  $M_2(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t))$  первого порядка по времени и координатам.

Разлагая функции  $M_1(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t))$  и  $M_2(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t))$  в момент времени  $(t + \Delta t)$  в окрестности начального момента  $t$  в ряд Тейлора [2] с точно-

стью до слагаемых первого порядка по приращению  $\Delta t$  и выражая полные производные  $\frac{dM_s}{dt}$  ( $s = 1, 2$ ) через частные, после обозначе-

ния угловых скоростей  $\frac{\partial \varphi_s}{\partial t} = \varphi'_s$  получим следующие выражения для  $M_1$  и  $M_2$ :

$$\begin{cases} M_1(t + \Delta t, \varphi_1(t + \Delta t), \varphi_2(t + \Delta t)) \\ M_2(t + \Delta t, \varphi_1(t + \Delta t), \varphi_2(t + \Delta t)) \end{cases} \approx \begin{cases} M_1(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t)) + \left[ \frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial M_1}{\partial \varphi_1} \cdot \varphi'_1 + \frac{\partial M_1}{\partial \varphi_2} \cdot \varphi'_2 \right] \Delta t; \\ M_2(t, \varphi_1(t), \varphi_2(t)) + \left[ \frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi_1} \cdot \varphi'_1 + \frac{\partial M_2}{\partial \varphi_2} \cdot \varphi'_2 \right] \Delta t. \end{cases}$$

Из (8) следует вектор силовых характеристик по координатам 1 и 2:

$$\bar{M}^1 = \begin{cases} \bar{M}_1^1 \\ \bar{M}_2^1 \end{cases} = \begin{cases} (M_1, \frac{\partial M_1}{\partial t}, \frac{\partial M_1}{\partial \varphi_1}, \frac{\partial M_1}{\partial \varphi_2}); \\ (M_2, \frac{\partial M_2}{\partial t}, \frac{\partial M_2}{\partial \varphi_1}, \frac{\partial M_2}{\partial \varphi_2}); \end{cases}$$

и кинематический вектор модели нагрузки первого порядка:

$$\bar{\varphi}^1(t) = \{1; \Delta t; \varphi'_1 \Delta t; \varphi'_2 \Delta t\}.$$

После определения силовых векторов  $\bar{M}_1^1$  и  $\bar{M}_2^1$  значения приведенных работ, необходимых для заданных угловых перемещений  $[\psi_{1(k)}; \psi_{1(k+1)}]$  и  $[\psi_{2(k)}; \psi_{2(k+1)}]$ , выполняющихся по законам  $\psi_1(t)$ ,  $\psi_2(t)$  по координатам 1, 2, на последующем отрезке изменения времени  $[\tau_k; \tau_{k+1}]$  равны:

$$\begin{aligned} \hat{A}_{1(k)} &= \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} (\bar{I}_1^{-1}, \bar{\psi}_1^1(t)) \cdot \psi'_1(\tau) d\tau = M_1(\psi_{1(k+1)} - \psi_{1(k)}) + \frac{\partial \hat{I}_1}{\partial t} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} \tau \cdot \psi'_1(\tau) d\tau + \\ &+ \frac{\partial \hat{I}_1}{\partial \psi_1} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} \tau \cdot (\psi'_1(\tau))^2 d\tau + \frac{\partial \hat{I}_1}{\partial \psi_2} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} \tau \cdot \psi'_1(\tau) \cdot \psi'_2(\tau) d\tau; \\ \hat{A}_{2(k)} &= \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} (\bar{M}_2^1, \bar{\psi}_2^1(t)) \cdot \psi'_2(\tau) d\tau = M_2(\psi_{1(k+1)} - \psi_{1(k)}) + \frac{\partial M_2}{\partial t} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} \tau \cdot \psi'_2(\tau) d\tau + \\ &+ \frac{\partial M_2}{\partial \psi_2} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} \tau \cdot (\psi'_2(\tau))^2 d\tau + \frac{\partial M_2}{\partial \psi_1} \int_{\tau_k}^{\tau_{k+1}} \tau \cdot \psi'_2(\tau) \cdot \psi'_1(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

**3. Совместный расчет значений коэффициентов силовых векторов первой модели нагрузки для обеих координат.** Обозначим общее число используемых сглаженных отрезков изменения времени по координатам 1 и 2 через  $n_1$  и  $n_2$ . Для расчета четырех коэффициентов каждого из векторов  $\bar{M}_s^1$  ( $s = 1, 2$ ) предложено по аналогии с [1] использовать исходные данные обратной связи на четырех подряд стоящих отрезках времени. Для фильтрации погрешностей, вносимых расчетным методом, необходимо выполнить по координате  $s$  не менее заданного числа  $N$  таких расчетов на скользящих совокупностях из 4 участков времени. При требуется рассмотреть не

менее, чем  $N + 3$  таких участков  $[t_{s(0)}; t_{s(1)}]$ ,  $[t_{s(1)}; t_{s(2)}]$ , ...,  $[t_{s(ns-1)}; t_{s(ns)}]$  по каждой координате  $s$ .

Для адекватности получаемых значений коэффициентов силовых векторов  $\bar{M}_1^1$  и  $\bar{M}_2^1$  должны быть выполнены 3 основных условия:

1) данные обратной связи должны быть рассмотрены на общем участке изменения времени  $[T_0; T_1]$ ;

2) необходимо обеспечить близость положения на оси  $t$  для обеих координат 1 и 2 как начальных участков  $[t_{1(0)}; t_{1(1)}]$ ,  $[t_{2(0)}; t_{2(1)}]$ , так и конечных  $[t_{1(n_1-1)}; t_{1(n_1)}]$  и  $[t_{2(n_2-1)}; t_{2(n_2)}]$ ;

3) для обеспечения достаточного числа  $N$  расчетов коэффициентов  $\bar{M}_1^1$  и  $\bar{M}_2^1$  на скользя-

щих совокупностях участков времени необходимо выполнение условия:  $\min(n_1, n_2) = N + 3$ .

**Алгоритм совместного расчета значений коэффициентов силовых векторов первой модели** включает следующие основные пункты:

1) сглаживание входных данных обратной связи,

2) устранение избыточной информации во входных данных,

3) интерполирование кусочной траектории по обеим координатам,

4) формирование для каждой координаты  $s$  ( $s = 1, 2$ ) множества из  $n_s$  линейных уравнений относительно коэффициентов ее силового вектора  $\bar{M}_s^1$ ,

5) расчет наборов значений коэффициентов  $\bar{M}_s^1$  на  $(n_s - 3)$  скользящих системах степени 4,

6) определение коэффициентов  $\bar{M}_s^1$  путем усреднения полученных в п. 5 наборов их значений.

Разработанный метод прогнозирования внешней нагрузки позволяет управлять объектами, имеющими 2 степени свободы в недетерминированных условиях. Применение таких систем управления актуально для автоматизации производственных процессов, а также для адаптивного управления транспортными и манипуляционными системами, функционирующими преимущественно в недетерминированных средах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марченко, Ю. А. Адаптивный цифровой алгоритм программного управления в условиях переменной внешней нагрузки / Ю. А. Марченко // Химическое и нефтегазовое машиностроение. №13(100), 2012. – с. 34-36.

2. Бахвалов, Н. С. Численные методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002 г. – 632 с.

УДК 62–503.55

*Н. И. Гданский, А. В. Карпов*

#### РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТДЕЛЬНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА С НЕЗАВИСИМЫМ ПРИВОДОМ КОЛЕС

ФГБОУ ВПО Российский государственный социальный университет

E-mail: al-kp@mail.ru

Рассмотрен расчет траекторий перемещения отдельных колес транспортного средства с независимым приводом двигателей.

*Ключевые слова:* транспортное средство, независимый привод, кинематические характеристики.

In article was explained the calculation of the trajectory of individual wheels of the vehicle with an separate wheel's drivers.

*Keywords:* the wheeled vehicle, the separate drive, the kinematic characteristics.

В статье [1] описана конструкция 4-колесного транспортного средства (ТС) с независимым приводом колес и рассмотрены общий и частные случаи задания траектории перемещения, а также дифференциальные уравнения движения.

Рассмотрим расчет законов движения для каждого колесного модуля ТС с номером  $k$  ( $1 \leq k \leq 4$ ). Введем обозначения обобщенных координат, полностью задающих положение звеньев модуля ТС с номером  $k$  в рассматриваемый момент времени  $t$ : рулевая координата –  $\eta_k(t)$ , текущий угол поворота мотор-колеса –  $\varphi_k(t)$  (рис. 1).

Поскольку ТС с независимым приводом двигателей может практически реализовать перемещение каждого из них по идеальным траекториям, то при отсутствии скольжения идеальные законы изменения координат  $\{\eta_k(t), \varphi_k(t)\}$

для каждого колесного модуля  $k$  ( $1 \leq k \leq 4$ ) полностью определяются заданным законом перемещения ТС  $\{\bar{S}(t), \xi(t)\}$  и относительным положением двигателя  $k$  на шасси ТС [2].

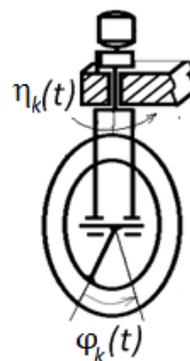


Рис. 1. Обобщенные координаты колесного модуля с номером  $k$  ( $1 \leq k \leq 4$ )

Введем длину радиус вектора осей движителей  $\rho = 0,5(a^2 + b^2)^{0,5}$  и вспомогательный угол  $\lambda$  ( $0 < \lambda < \pi/2$ ), который составляет радиус-вектор точки  $C_1$  с осью  $x_c$  ( $\cos \lambda = 0,5b/\rho$ ;  $\sin \lambda = 0,5a/\rho$ ). Обозначим через  $M(\alpha)$  матрицу, задающую поворот вектора на угол  $\alpha$  против часовой стрелки, а через  $\bar{\rho}$  – вектор вида  $(\rho; 0)$ . В системе координат  $Cx_cy_c$ , связанной с ТС, радиус-векторы, задающие положение рулевых осей движителей  $C_k$  можно задать в единой форме, используя вспомогательные углы  $\lambda_1 = \lambda$ ;  $\lambda_2 = \pi - \lambda$ ;  $\lambda_3 = \lambda + \pi$ ;  $\lambda_4 = 2\pi - \lambda$ :  $\bar{\rho}_{C_k} = M(\lambda_k) \bar{\rho}$ .

Так как в абсолютной системе координат  $Oxy$  радиус-векторы  $\bar{\rho}_{C_k}$  повернуты относительно центра шасси  $C$  на угол  $\xi(t)$ , то угол поворота точки  $C_k$  относительно оси  $Ox$ , представим в виде суммы  $(\chi(t) + \xi(t) + \lambda_k)$ . При этом идеальную траекторию  $\bar{S}_k(t) = (x_k(t); y_k(t))$  перемещения рулевой оси каждого движителя  $C_k$ , соответствующая общему перемещению ТС  $\{\bar{S}(t), \xi(t)\}$ , в абсолютной системе координат  $Oxy$  представим в векторном виде как:

$$\bar{S}_k(t) = \bar{S}(t) + M(\chi(t) + \xi(t) + \lambda_k) \bar{\rho}.$$

В скалярной форме траектория  $\bar{S}_k(t)$  имеет вид:

$$\begin{aligned} x_k(t) &= x(t) + \rho \cos(\chi(t) + \xi(t) + \lambda_k); \\ y_k(t) &= y(t) + \rho \sin(\chi(t) + \xi(t) + \lambda_k). \end{aligned} \quad (1)$$

При этом выражение путевой скорости  $v_k(t)$  перемещения точки  $C_k$  при заданных  $\bar{S}(t)$  и  $\xi(t)$  через принятые обозначения следующее:

$$v_k(t) = (x'(t)^2 + y'(t)^2 + \rho^2 (\chi'(t) + \xi'(t))^2 - 2\rho (\chi'(t) + \xi'(t)) F(t))^{0,5},$$

где  $F(t) = v(t) \sin(\xi(t) + \lambda_k)$ .

Выражение путевой скорости  $v_k(t)$  точки  $C_k$  через скорость  $v(t)$  центра шасси  $C$  следующее:

$$v_k(t) = (v^2(t) + \rho^2 \cdot (\chi'(t) + \xi'(t))^2 - 2\rho \cdot (\chi'(t) + \xi'(t)) \cdot v(t) \cdot \sin(\xi(t) + \lambda_k))^{0,5}. \quad (2)$$

Так как рулевой угол поворота колесного модуля  $k$  в абсолютной системе  $Oxy$  совпадает с углом поворота касательной к траектории  $\bar{S}_k(t)$ , то выразим его вначале относительно оси  $Ox$  через функции  $\cos(\eta_{ka}(t) = x'_k / v_k(t)$ ,  $\sin(\eta_{ka}(t) = y'_k / v_k(t)$ .

Поскольку для реализации управления искомым значением рулевого угла должно быть за-

дано относительно оси  $Cx_c$ , которая повернута относительно оси  $Ox$  на угол  $(\chi(t) + \xi(t))$ , то:

$$\eta_{ka}(t) = \eta_{ka}(t) - (\chi(t) + \xi(t)). \quad (3)$$

Так как формула для параметрических кривых длина дуги  $L_k$  траектории точки  $C_k$  при  $t \in [t_1; t_2]$  задается интегралом от путевой скорости  $v_k(t)$ , а проскальзывание в контакте отсутствует, то идеальная величина угла поворота  $\varphi_k(t)$  колеса  $k$  при  $t \in [t_1; t_2]$  может быть рассчитана по длине проходимой дуги:

$$L_k = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{x'_k(t)^2 + y'_k(t)^2} dt = \int_{t_1}^{t_2} v_k(t) dt;$$

$$\varphi_k = \frac{L_k}{r_{0k}} \quad (4)$$

Формулы (1) – (4) выведены для общего случая однозначного задания траектории ТС с независимым приводом движителей  $\{\bar{S}(t) \neq 0; \xi(t) \neq 0; t \in [t_{нач}; t_{кон}]\}$ . Траектория  $\bar{S}(t) = (x(t); y(t))$  центра  $C$  задана параметрически.

Если траектория перемещения центра  $C$  и угол поворота оси шасси относительно нее заданы в явном виде

$$y(t) = y(x(t)); \quad \xi = \xi(x(t)); \quad x_n \leq x(t) \leq x_k,$$

то с учетом  $y'(t) = (dy/dx) x'(t)$  путевая скорость  $v(t)$  перемещения по траектории  $\bar{S}(t)$  центральной точки шасси  $C$  и функции  $\cos$ ,  $\sin$  угла  $\chi(t)$  имеют вид:

$$\begin{aligned} v(t) &= |x'(t)| \cdot (1 + (dy/dx)^2)^{0,5}; \quad \cos \chi(t) = x'(t) / v(t); \\ \sin(\chi(t)) &= (dy/dx) \cdot \cos(\chi(t)). \end{aligned}$$

Рассмотрим пример расчета. В качестве исходной траектории возьмем кривую на рис. 2. Примем, что по технологическим требованиям (например, выполнение погрузочно-разгрузочных работ, подход к месту выполнения специализированных технологических операций) в начальной  $P_1(1; 1)$  и конечной  $P_4(10; 5)$  точках траектории шасси ТС должно быть ориентировано левым бортом относительно внешней среды (рис. 2). На всех остальных участках ТС движется с ориентацией по траектории. Для сокращения общего времени выполнения транспортной операции поворот шасси должен быть совмещен с перемещением по соответствующим линейным участкам траектории. Геометрические параметры шасси ТС примем равными (в метрах):  $a = 0,4$ ;  $b = 0,7$ .

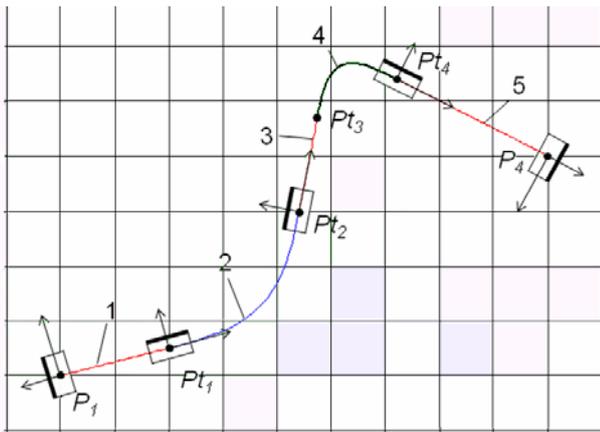


Рис. 2. Ориентация ТС при прохождении траектории

При этом длина вектора  $\bar{\rho}$  равна 0,4, а угол  $\lambda \approx 0,52$  и соответственно:  $\lambda_1 \approx 0,52$ ;  $\lambda_2 \approx 2,62$ ;  $\lambda_3 \approx 3,66$ ;  $\lambda_4 \approx 5,76$ .

Исходя из общей поставленной задачи, получаем, что общая траектория перемещения ТС разбивается на 5 участков:

1) на участке  $P_1Pt_1$  должно осуществляться прямолинейное перемещение с совмещенным поворотом шасси из начального углового положения  $\xi_1 = \pi/2$  в конечное положение  $\xi_2 = 0$ , при котором ось ТС совмещается с направлением его траектории;

2) на участке  $Pt_1Pt_2$  ТС перемещается по степенной переходной кривой с ориентацией по траектории;

3) на участке  $Pt_2Pt_3$  ТС перемещается по отрезку прямой с ориентацией по траектории;

4) на участке  $Pt_3Pt_4$  ТС перемещается по степенной переходной кривой с ориентацией по траектории;

5) на участке  $Pt_4P_4$  ТС перемещается по отрезку прямой с совмещенным поворотом шасси из начального углового положения  $\xi_1 = 0$  в конечное положение  $\xi_2 = -\pi/2$ .

Рассматривая поочередно все участки, найдем формульные зависимости в параметрическом виде, задающие траектории центра движения ТС и центров его колес на всех 5 участках полной траектории перемещения. Для наглядности изобразим траекторию движения каждого колеса ТС на двух графиках. На рис.

3-4 штриховой линией показана траектория перемещения центра шасси  $C$ . На рис. 3 дополнительно показаны траектории перемещения центров 1-го и 3-го колеса, а на рис. 4 – траектории центров 2-го и 4-го колес.

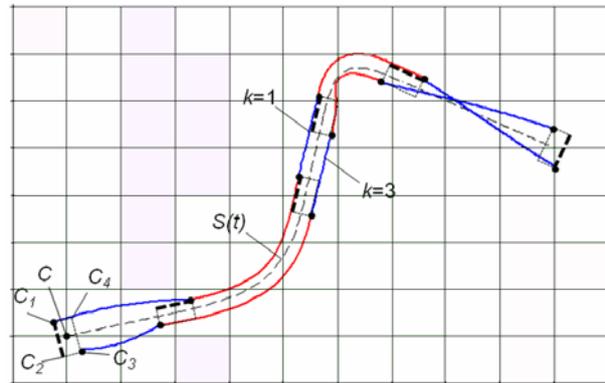


Рис. 3. Траектория движения колес ТС ( $k = 1, 3$ )

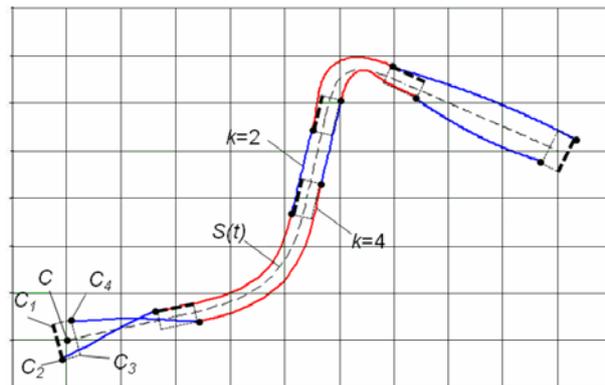


Рис. 4. Траектория движения колес ТС ( $k = 2, 4$ )

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гданский, Н. И. Математическая модель транспортного средства с независимым приводом всех движителей / Н. И. Гданский, А. В. Карпов, А. С. Волков // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»; вып. 8). – С. 107–108.

2. Гданский, Н. И. Управление системами с двумя степенями свободы на основе прогнозирования приведенной нагрузки / Н. И. Гданский, А. В. Карпов, В. Г. Самойлов // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2011, №7, С. 12–15.

УДК 535.232.14

Б. И. Деулин

### ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА НА ЕГО ИНТЕНСИВНОСТЬ

ФГБОУ ВПО Орловский государственный аграрный университет

E-mail: teploteh@orelsau.ru, boris1967or@qip.ru

Площадь поперечного сечения лазерного луча может изменяться из-за его расходимости и при прохождении им различных объектов. В статье рассмотрено определение интенсивности лазерного излучения в зависимости от изменения площади поперечного сечения луча.

*Ключевые слова:* лазер, интенсивность, лазерный луч, поперечное сечение, спектроскопия.

When passing different objects and because of divergence the cross-section area of a laser beam can change. This article is about detecting intensity of a laser radiation in case of cross-section area change.

*Keywords:* laser, intensity, the laser beam, cross-section, spectroscopy.

В современном машиностроении широко применяются водные растворы различных веществ. При этом часто возникает необходимость определения их химического состава. Наиболее экспрессными методами с наилучшими аналитическими характеристиками для определения химического состава водных растворов являются спектральные методы анализа с лазерными источниками света, так как техника обработки их сигналов хорошо развита и поддается автоматизации.

Водные растворы могут находиться в сосудах различной формы. При прохождении лазерного луча через такие сосуды с растворами может иметь место изменение площади его поперечного сечения из-за преломления на грани-

цах раздела различных сред, смотрите рис. При расчетах мощности сигнала, поступающего из раствора в приемник необходимо учитывать интенсивность лазерного луча. Поэтому возникает необходимость определения зависимости изменения интенсивности лазерного луча от изменения площади его поперечного сечения.

Как известно, интенсивность лазерного излучения в поперечном сечении светового пучка имеет вид [2]:

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2}\right) \quad (1)$$

где  $I_0$  – интенсивность лазерного луча в центре его симметрии;  $w$  – радиус лазерного луча;  $\rho$  – радиус-вектор.

Найдем изменение интенсивности излучения при изменении площади его поперечного сечения.

Пусть за время  $\Delta t$  через поперечное сечение  $S$  проходит энергия  $E$ , тогда будет иметь место следующее равенство:

$$E = I_{\text{cp}} S \Delta t$$

где  $I_{\text{cp}}$  – средняя интенсивность излучения в поперечном сечении площадью  $S$ .

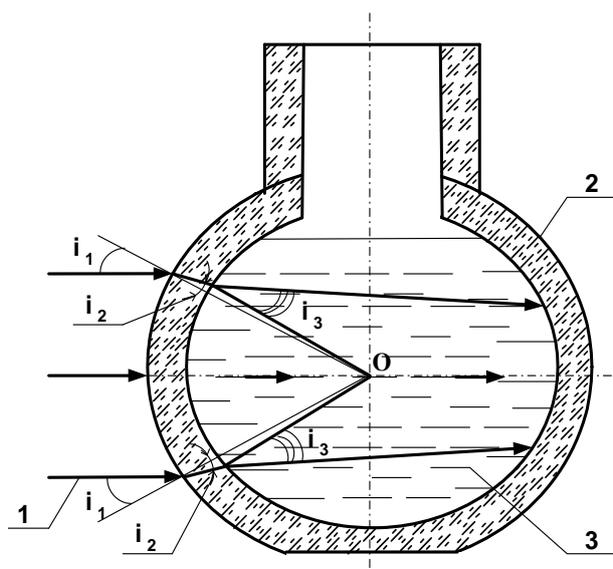
Пусть площадь поперечного сечения изменится от значения  $S_1$  до значения  $S_2$ , тогда считая, что потерь энергии нет, по закону сохранения энергии для первого и второго сечения получим:

$$\begin{aligned} E_1 &= E_2, \\ I_{\text{cp}1} S_1 \Delta t &= I_{\text{cp}2} S_2 \Delta t, \\ I_{\text{cp}1} S_1 &= I_{\text{cp}2} S_2. \end{aligned} \quad (2)$$

В тоже время

$$I_{\text{cp}} = \frac{P}{S}, \quad (3)$$

где  $P$  – мощность излучения проходящего через поперечное сечение площадью  $S$ .



Схематическое изображение хода лучей лазерного излучения при прохождении кюветы сферической формы с раствором:

1 – лазерный луч; 2 – стеклянная кювета; 3 – исследуемая проба;  $i_1, i_2, i_3$  – углы падения и преломления

С учетом (1), мощность излучения проходящего через поперечное сечение площадью  $S$  определится выражением:

$$P = \iint_S I_0 \exp\left(-\frac{\rho^2}{w^2}\right) ds.$$

Перепишав данное выражение с учетом (3) получим:

$$I_{cp} = \frac{I_0}{S} \int_0^{2\pi} d\Theta \int_0^w \rho e^{-\frac{\rho^2}{w^2}} d\rho. \quad (4)$$

Подставим выражение (4) в (2) считая, что поперечное сечение лазерного излучения имеет форму круга диаметром  $2w$ , получим:

$$I_{02} = I_{01} \frac{\int_0^{w_1} \rho e^{-\frac{\rho^2}{w_1^2}} d\rho}{\int_0^{w_2} \rho e^{-\frac{\rho^2}{w_2^2}} d\rho} \quad (5)$$

где  $w_1$  – радиус лазерного пучка в его сечении площадью  $S_1$ ;  $w_2$  – радиус лазерного пучка в его сечении площадью  $S_2$ ;  $I_{01}$  – интенсивность в центре пучка с площадью сечения  $S_1$ ;  $I_{02}$  – интенсивность в центре пучка с площадью сечения  $S_2$ .

Формула (5) не учитывает потери энергии при прохождении лазерного излучения через среду и отражает лишь изменение интенсивности из-за расходимости луча.

Если изменение площади поперечного сечения вызвано прохождением лазерного излучения через границу раздела двух сред, то выра-

жение (5) с учетом потерь энергии запишется в виде:

$$I_{02} = I_{01} \xi e^{-(\mu_1 L_1 + \mu_2 L_2)} \frac{\int_0^{w_1} \rho e^{-\frac{\rho^2}{w_1^2}} d\rho}{\int_0^{w_2} \rho e^{-\frac{\rho^2}{w_2^2}} d\rho} \quad (6)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент затухания лазерного излучения в первой среде;  $\mu_2$  – коэффициент затухания лазерного излучения во второй среде;  $L_1$  – расстояние от сечения с диаметром  $2w_1$  до границы раздела двух сред;  $L_2$  – расстояние от границы раздела двух сред до сечения с диаметром  $2w_2$ ;  $\xi$  – коэффициент учитывающий потери на френелевское отражение при прохождении границы раздела двух сред.

Выражения (5) и (6) могут быть полезны, например, для определения мощности сигнала поступающего в приемник при исследовании химического состава растворов методами флюоресценции и комбинационного рассеяния света, а также при проектировании различных оптоэлектронных устройств автоматических систем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Деулин Б. И. Современные методы анализа вод // Известия ОрелГТУ. Машиностроение и приборостроение №4(19). – Орел: ОрелГТУ, 2000, с. 172 – 177.
2. Розеншер Э., Винтер Б. Оптоэлектроника. – М.: Техносфера, 2004. – 592 с.

УДК 621.375.8

**Б. И. Деулин, Э. В. Карпович**

### ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ЛАЗЕР НА ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЯХ С ЭПОКСИПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ-РАДИАТОРОМ

**ФГБОУ ВПО Орловский государственный аграрный университет**

E-mail: boris1967 or@qip.ru, karpowich.ed@yandex.ru, teploteh@orelsau.ru

Жидкостные лазеры на красителях обладают рядом недостатков, связанных с необходимостью прокачки растворов красителей, возможностью их испарения и взрывоопасностью. В статье предлагается использовать в качестве активного элемента твердотельную эпоксиполимерную матрицу-радиатор с внедренным в нее органическим красителем.

*Ключевые слова:* органические красители, эпоксиполимер, твердотельный лазер, теплопроводность, накачка.

Liquid dye lasers have a number of disadvantages associated with the necessity of pumping dye solutions, the possibility of evaporation and explosion. The article proposes to use as an active element solid epoxypolymer matrix radiator incorporated in organic dye.

*Keywords:* organic dyes, epoxypolymer, solid-state laser, thermal conductivity, pumping.

С целью устранения недостатков присущих жидкостным лазерам отечественной промышленностью был освоен выпуск твердотельного лазера (рис. 1) на красителях с когерентной накач-

кой типа ЛКИ-301 с матрицей на основе полиметилметакрилата (ПММА). Лазерный материал на основе ПММА обладает рядом недостатков: низкой теплопроводностью ( $\lambda=0,18 \text{ Вт}\cdot\text{К}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$ ); невысо-

ким значением твердости (по Бринелю 130 Мпа), что затрудняет механическую обработку; низкой фотостойкостью, что вызвало необходимость сканирования пучком света при накачке по поверхности лазерного элемента; невысокой теплостойкостью матрицы из ПММА (температура размягчения порядка  $70^{\circ}\text{C}$ ).

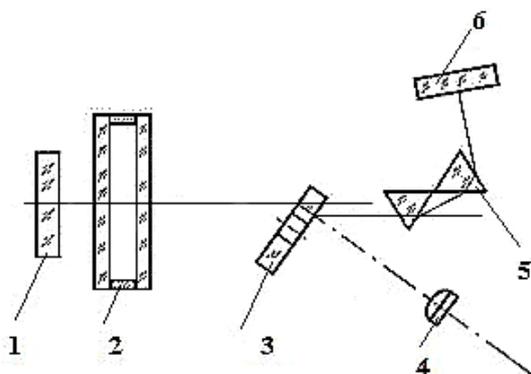


Рис. 1. Оптическая схема твердотельного лазера на красителях ЛКИ-301:

1 – зеркало оптического резонатора; 2 – интерферометр; 3 – активный лазерный элемент; 4 – линза; 5 – призма; 6 – выходное зеркало оптического резонатора

Кроме ПММА были разработаны матрицы на основе целого ряда других материалов, например, на основе эпоксиполимеров, которые обладают большей теплопроводностью ( $\lambda=0,23 \text{ Вт}\cdot\text{K}^{-1}\text{м}^{-1}$ ), большей твердостью по (Бринелю 140-500 Мпа), фотостойкостью и теплостойкостью [1].

Лазерные элементы на эпоксиполимерах, активированные красителями с концентрацией порядка  $10^{-4}$  г/г, выполненные в форме параллелепипеда размерами  $3 \times 10 \times 25$  мм вводились в лазер с недисперсионным резонатором перпендикулярно его оптической оси. Длина резонатора составляла 75 мм. Накачка производилась второй гармоникой лазера  $\text{YAG: Nd}^{+3}$ . Матрица с родамином Ж показала следующие результаты: КПД достигал 15-20%, пороговая мощность накачки оставляла  $0,15 \text{ мВт}/\text{см}^2$ , спектр широкополосной генерации лежал в области 580–596 нм с максимумом в районе 587 нм. Расходимость излучения генерации в режиме одиночных импульсов при небольшом превышении над порогом составляла 1,5 мрад. При частоте повторения импульсов накачки 12,5 Гц расходимость выросла вдвое. При такой же концентрации и условиях этанольный раствор родиамина Ж показал следующие результаты: КПД – 45%, пороговая плотность мощности –  $0,1 \text{ мВт}/\text{см}^2$ , диапазон генерации 572–588 нм, с максимумом 580 нм. При частоте повторения импульсов накачки 12,5 Гц расходимость вы-

росла почти на порядок. Матрица с внедренным в нее красителем родиамином С показала следующие результаты: КПД – 25%, пороговая плотность мощности –  $0,13 \text{ мВт}/\text{см}^2$ , спектр широкополосной генерации лежал в диапазоне 612–640 нм с максимумом в районе 626 нм. Этанольный раствор родиамина С при тех же условиях показал: КПД – 32%, пороговая плотность мощности накачки –  $0,11 \text{ мВт}/\text{см}^2$ , спектр широкополосной генерации 610–630 нм с максимумом 620 нм.

Исследования по ресурсу работы эпоксиполимерных матриц, активированных красителями дали следующие результаты: активный элемент с родиамином Ж выдерживал  $10^4$  вспышек при плотности мощности накачки  $500 \text{ кВт}/\text{см}^2$ , элемент на основе родиамина С –  $3 \cdot 10^4$ . Вышеприведенные данные о результатах испытаний взяты из работы [1].

Применение матрицы на основе эпоксиполимеров позволило производить накачку «в одну точку» и отказаться от сканирования лазерного элемента. Для увеличения теплопроводности и твердости в эпоксиполимер были внедрены мелкодисперсные стекла коэффициент преломления, которых соответствовал коэффициенту преломления эпоксиполимера ( $n=1,501$ ). Это достигалось путем подбора концентрации ингридиентов стекла. Коэффициент теплопроводности этих стекол составляет  $\lambda=0,923 \text{ Вт}\cdot\text{K}^{-1}\text{м}^{-1}$  [1].

Интенсивность люминесценции красителей внедренных в эпоксиполимер уменьшается с ростом температуры (рис. 2). Поэтому, увеличение коэффициента теплопроводности и уменьшение рабочей температуры матриц повысит их ресурс и положительно скажется на эффективности работы лазера.

Для увеличения теплопроводности матриц красители были введены в ряд других материалов, например, в пористые стекла. В работе [2] приведен пример внедрения полимерного красителя в микропористое кварцевое стекло. Однако, ресурс работы такого активного элемента не превышает  $10-10^3$  вспышек, что на 1-2 порядка ниже, чем у полимерных с оптимальным сочетанием полимер-краситель, но по своим механическим и термооптическим характеристикам превосходят полимерные. В работе [2] приведено использование эпоксиполимера на основе диглицидового эфира камфорной кислоты и метилгексагидрофталевого ангидрида. Данный эпоксиполимер активировался красителем родиамином С и внедрялся в микропористое стекло. Диапазон генерации данного активного

элемента лежал в диапазоне 607–655 нм, КПД составлял 20%. Ресурс работы достигал  $10^4$

вспышек. Данные по плотности мощности накачки в работе [2] отсутствуют.

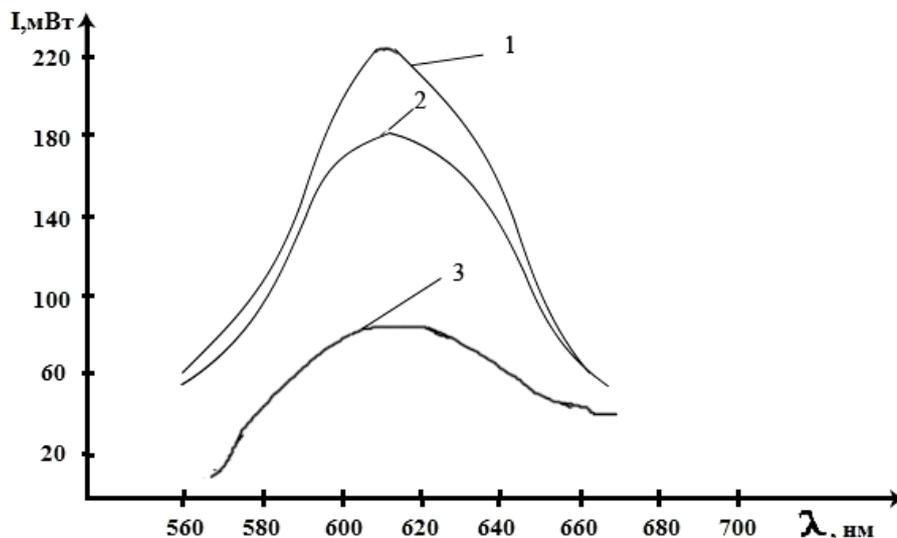


Рис. 2. Спектры люминесценции красителя родамина С в эпоксиолигомере ЭД-24 при разных температурах: 1 – при 39°C; 2 – при 57°C; 3 – при 115°C

Однако, стекла имеют теплопроводность намного меньшую, чем металлы. Например, теплопроводность меди при температуре 300<sup>0</sup>К составляет 401 Вт·К<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, алюминия – 237 Вт·К<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>, железа – 80 Вт·К<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup> [3].

Поэтому в данной работе предлагается при изготовлении эпоксио-лимерной матрицы заключить ее в оболочку из металла с высоким коэффициентом теплопроводности. В оболочке выполнены кольцевые пазы (рис. 3, сечение А–А), значительно увеличивающие площадь ее контакта с генерирующей средой. Таким образом, получается легко заменяемая матрица, которая вставляется в корпус (рис. 3) из того же высокотеплопроводного металла, что и оболочка. Данную конструкцию предлагается использовать в качестве активного элемента 3 в лазере ЛТИ-301 (рис. 1).

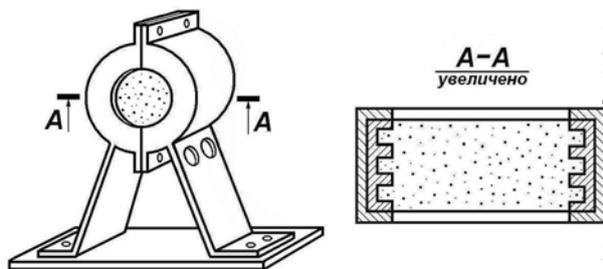


Рис. 3. Эпоксиполимерная матрица-радиатор

Корпус, боковые наклонные стойки, зажимные фланцы и металлическое днище лазера, на которую монтируется вся конструкция, прово-

дят теплоту, полученную от генерирующей матрицы. Согласно закону Фурье они будут служить радиатором, рассеивающим это тепло в окружающую среду конвективной теплоотдачей по закону Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha(t_c - t_b)S,$$

где:  $Q$  – конвективный тепловой поток от всех поверхностей стенок к окружающему воздуху, Вт;  $\alpha$  – средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $t_c$  – температура поверхности стенок, °С;  $t_b$  – температура окружающего воздуха, °С;  $S$  – площадь всех поверхностей теплообмена, м<sup>2</sup>.

Высокая теплопроводности металла, тонкостенность конструкции корпуса и наклонных стоек, обширная площадь их контакта с окружающей средой обеспечат достаточный теплоотвод от генерирующей среды, что повысит ресурс матрицы и КПД лазера. Вместе с тем, упростится его конструкция и повысится надежность из-за исчезновения механизмов скапливания матрицы лучом накачки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Поляков В. Е. Лазеры на красителях.– СПб: СЗТУ, 2003. – 130 с.
2. Земский В. И. Физика и техника импульсных лазеров на красителях/ В. И. Земский, Ю. Л. Колесников, И. К. Мешковский. – СПб.:СПбГУ ИТМО, 2005.– 176 с.
3. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: Карманный справочник. / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2004. - 320 с.

УДК 629.7.023.001.2

Э. В. Карнович

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ПОРИСТЫХ СТРУКТУРАХ

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет»

E-mail: karpowich.ed@yandex.ru, teploteh@orelsau.ru

В работе представлено общее описание и результаты подробного тестирования программного комплекса для решения системы нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих сопряженный тепло-массообмен в пористых телах в двумерной расчетной области произвольной формы. Рассмотрены составленные автором тестовые задачи.

*Ключевые слова:* теплообмен, пористая структура, автоматизированный расчет, изотермическая фильтрация, активное охлаждение.

This paper presents general description and results of detailed testing of program complex for solution of the whole system of nonstandard differential equations, describing conjugate heat and mass transfer in porous bodies in double-measured calculating area of free form. The author offers test problems worked out by him.

*Keywords:* heat-mass-exchange, the porous structure, the automated calculation, isothermal filtration, active cooling.

Анализ научных публикаций свидетельствует о тенденции все более широкого применения пористых материалов в теплообменных аппаратах. Большая вариативность конструкций теплообменников с пористым наполнителем [1] и номенклатуры пористых материалов [2] не позволяет создать единую методику их расчета или выбрать единый критерий сравнения. В то же время разнообразие математических моделей гидродинамики и теплообмена в пористой структуре [1] позволяет получить надежные расчетные данные. В связи с этим возникает необходимость в автоматизации подобных расчетов и сведении разнообразных математических моделей в единый программный комплекс. Данная проблема была решена созданием такого комплекса в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Комплекс предназначен для решения системы нестационарных дифференциальных уравнений, описывающих сопряженный теплообмен в пористых телах в двумерной расчетной области произвольной формы в декартовой или цилиндрической системах координат. Для его тестирования был успешно решен ряд задач, имеющих аналитическое решение. В настоящей статье рассматриваются несколько основных тестовых задач, составленных автором.

**Задача 1.** *Изотермическая проницаемость через плоскую пористую стенку.* Плоская пористая стенка толщиной  $\delta$  имеет вязкостный  $\alpha$  и инерционный  $\beta$  коэффициенты сопротивления. На левой границе стенки поддерживается давление воздуха

$P_1$ , на правой –  $P_2$ . Температура воздуха  $T$ , протекающего через стенку, поддерживается постоянной. Требуется определить распределение давления по толщине стенки и расход газа.

Для этого случая точное решение для значения давления  $P$  при значении координаты  $x$  записывается следующим образом:

$$P = \sqrt{P_1^2 \left(1 - \frac{x}{\delta}\right) + P_2^2 \frac{x}{\delta}},$$

а расход газа  $G$  определяется следующим соотношением:

$$G = \frac{-\alpha\mu + \sqrt{(\alpha\mu)^2 + 2\beta \frac{(P_1^2 - P_2^2)}{\delta RT}}}{2\beta},$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

**Задача 2.** *Изотермическая проницаемость через цилиндрическую пористую стенку.* Цилиндрическая пористая стенка с внутренним радиусом  $r_1$  и внешним радиусом  $r_2$  имеет вязкостный  $\alpha$  и инерционный  $\beta$  коэффициенты сопротивления. На внутренней и внешней поверхностях цилиндра поддерживается давление воздуха  $P_1$  и  $P_2$  соответственно. Температура воздуха  $T$ , перетекающего через цилиндрическую стенку, поддерживается постоянной. Требуется определить распределение давления по радиусу цилиндра и расход воздуха.

При аналитическом решении расход газа  $G$  определяется следующим соотношением:

$$G = -\frac{\alpha\mu r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\beta(r_2 - r_1)} + \sqrt{\left(\frac{\alpha\mu r_1 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\beta(r_2 - r_1)}\right)^2 + \frac{r_2 r_1 (P_1^2 - P_2^2)}{2\beta RT (r_2 - r_1)}},$$

а распределение значений давления  $P$  в зависимости от значения радиуса  $r$  описывается выражением:

$$P^2 = P_1^2 - 2\alpha\mu GRT \ln\left(\frac{r}{r_1}\right) - 2\beta G^2 RT \frac{r-r_1}{rr_1}.$$

Причем в математической модели для численного решения этой задачи учтено уравнение

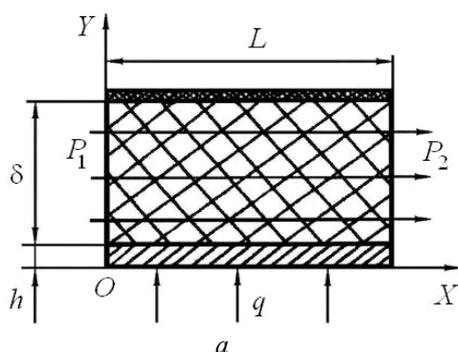


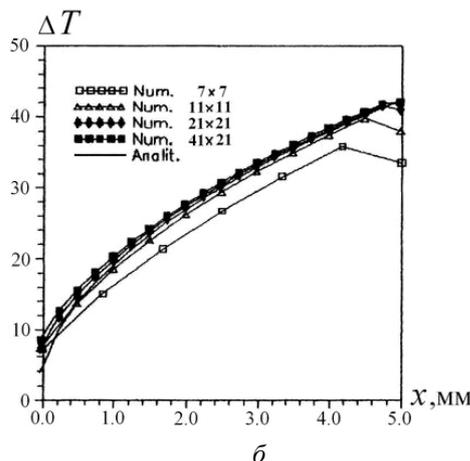
Рис. 1. Расчетная область и результаты решения для задачи 3

Стенка нагревается продуктами сгорания с плотностью теплового потока  $q$  со стороны непроницаемой поверхности. Охладитель поступает в пористый каркас равномерно распределенным по поверхности, перпендикулярной направлению его движения. Расход охладителя  $G$ , плотность –  $\rho$ , теплопроводность –  $\lambda_G$  и теплоемкость –  $c_p$ . Теплопроводность каркаса  $\lambda_1$  вдоль оси  $Ox$  и  $\lambda_2$  вдоль оси  $Oy$ . Гидравлическое сопротивление пористого каркаса определяется вязкостным  $\alpha$  и инерционным  $\beta$  коэффициентами сопротивления. Давление и температура охладителя на входе в пористый каркас  $P_1$  и  $T_1$ , давление охладителя на выходе из пористого каркаса равно  $P_2$ . Объемный коэффициент теплоотдачи от охладителя к каркасу пористой стенки  $\alpha_w$ . Требуется определить распределение температуры  $T_w$  на поверхности непроницаемой стенки, покрытой пористым каркасом.

В этой задаче режим теплообмена принимается форсированным [3], поэтому влиянием продольного переноса теплоты теплопроводностью в каркасе и охладителе можно пренебречь. В этом случае распределение температуры на поверхности непроницаемой стенки, соприкасающейся с пористым каркасом, рассчитывается с помощью известной зависимости [3]. Результаты численного решения задачи показали хорошее соответствие с аналитическим ре-

неразрывности (сплошности).

**Задача 3.** Температурное состояние обогреваемой непроницаемой стенки с пористым охлаждением. Непроницаемая плоская стенка толщиной  $h$  и длиной  $L$  покрыта с одной стороны пористым каркасом длиной  $L$  и высотой  $\delta$ . Схема расчетной области представлена на рис. 1, а.



шением, что отражено на рис. 1, б, где приведены итоги аналитического и численных решений с различным числом узлов в расчетных сетках.

Завершающим этапом проверки работоспособности программного обеспечения явилось сравнение расчетных данных с результатами экспериментов. Для этого проводилось численное моделирование натуральных испытаний с пористыми секциями длиной 5, 10 и 15 мм, изображенными на рис. 2, а.

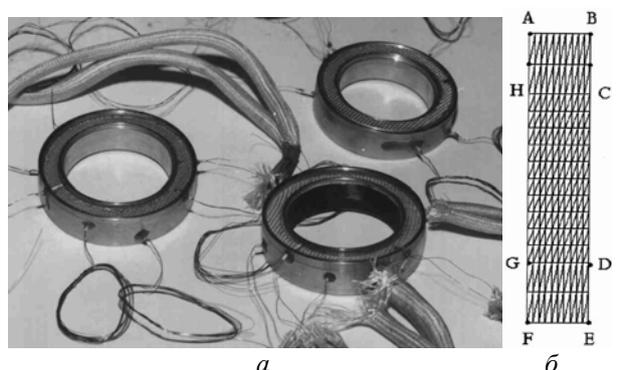


Рис. 2. Экспериментальные пористые образцы и их расчетная область

Расчетная область для задачи математического моделирования натуральных экспериментов приведена на рис. 2, б. По границе FE подво-

дится тепловой поток  $q$ , в области GHCD движется теплоноситель, на границе АВ учитывается теплообмен с окружающей средой, происходящий по закону Ньютона-Рихмана.

Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений подтвердило корректную работу программного обеспечения, что позволяет перейти от проведения дорогостоящих огневых испытаний с использованием трудоемких в изготовлении экспериментальных образцов к численному моделированию процессов гидродинамики и теплообмена. Более того, с помощью созданного программного комплекса можно автоматизировать как расчет различных параметров в разрабатываемой конструкции, так и выбор самой конструкции теплообменного аппарата еще на этапе ее проектирования. Автоматизация расчетов всех параметров в теплообменниках любого вида позво-

ляет значительно сократить временные и материальные затраты при их разработке, что дает возможность прогнозировать большой экономический эффект.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карпович, Э. В. Особенности организации теплообмена в пористых структурах / Э. В. Карпович // Известия ОрелГТУ. Математика. Механика. Информатика. – Орел: ОрелГТУ, 2000. – № 3. – С. 109-115.
2. Карпович, Э. В. Метод определения коэффициентов сопротивления пористых элементов при фильтрации сжимаемой среды / Э. В. Карпович // Энергосберегающие технологии и техника в сфере АПК. Материалы к Межрегиональной выставке-конференции. – Орел: ОрелГАУ, 2011. – С. 58–61.
3. Карпович, Э. В. Исследование пористых сред с помощью ЭВМ / Э. В. Карпович // Энергосберегающие технологии и техника в сфере АПК. Материалы к Межрегиональной выставке-конференции. – Орел: ОрелГАУ, 2011. – С. 54-58.

УДК 621.757:519

*А. Г. Кесоян, Н. Г. Кремлева*

### ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА СОБИРАЕМОСТЬ ПРЕЦИЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Рассмотрено влияние асимметрии и эксцесса в партиях сопрягаемых деталей на собираемость соединений. Представлены зависимости объема незавершенного производства от величины производственных погрешностей при прецизионной сборке методом межгрупповой взаимозаменяемости. Предложено использование результатов исследований для прогнозирования достижимых результатов.

*Ключевые слова:* прецизионные соединения, негауссовыe распределения, асимметрия, эксцесс, незавершенное производство, задел.

Influence of skewness and kurtosis in batches of mating parts on assemblability of joins has been considered. The dependencies of work-in-process output on the size of manufacturing errors at precision assembly by method of among-group interchangeability have been represented. Use of research results for prediction of attainable outcomes has been suggested.

*Keywords:* precision joints, non-Gaussian distributions, skewness, kurtosis, work-in-process, back-log.

Процесс производства прецизионных соединений характерен присутствием погрешностей изготовления сопрягаемых деталей, которые оказывают существенное влияние на его эффективность, и в первую очередь на собираемость прецизионных соединений. Если влияние погрешностей измерений на количественные характеристики сборки прецизионных соединений рассмотрены ранее [1], то действие отклонений в распределениях размеров сопрягаемых деталей требует специальной оценки.

При изготовлении прецизионных деталей погрешность настройки оборудования приводит к смещению центров группирования разме-

ров ( $\Delta M$ ), изменение режущих свойств инструмента (например, износ) – к увеличению рассеяния размеров ( $\sigma$ ), а также к асимметрии ( $A_S$ ) и эксцессу ( $E_k$ ) их распределений. Наиболее характерные причины изменения формы кривой распределения размеров деталей: изготовление части партий деталей затупленным инструментом, что ведет к увеличению усилий резания; изменение режимов обработки; износ режущего инструмента за время обработки партии; неустановившийся температурный режим, выражающийся в изменениях температуры инструмента и заготовки за время изготовления партии и т. д.

Оценку собираемости прецизионных соединений целесообразно производить для наиболее неблагоприятных условий, когда смещение центров группирования размеров происходит по технологическим причинам в разные стороны, а асимметрия и эксцесс в партиях сопрягаемых деталей разнонаправлены. Анализ способов задания производственных погрешностей (асимметрии и эксцесса) в партиях деталей, поступивших на сборку, показал, что наиболее целесообразно их задавать, используя негауссовы (композиционные) распределения [2].

Достижимые результаты прецизионной сборки для этих факторов рассмотрены при условии расширения взаимозаменяемости размерных групп за счет уменьшения группового допуска и использования метода межгрупповой взаимозаменяемости (МГВ), допускающего комплектование соединений не только из одноименных, но и соседних групп [3].

В качестве примера на рис. 1 приведена схема образования незавершенного производства (заштрихованная площадь) при негауссовых распределениях размеров в партиях сопрягаемых отверстий (кривая  $\varphi_1(x)$ ) и валов (кривая  $\varphi_2(x)$ ) с асимметрией при сборке с МГВ.

На рис. 1 величина  $h$  выражает расширение возможностей прецизионной сборки, т. е.

$$h = \frac{TA_{\Delta}}{2} \left( 1 - \frac{1}{n} \right),$$

где  $TA_{\Delta}$  – допуск на размер замыкающего звена,  $n$  – величина, показывающая во сколько раз, уменьшается групповой допуск.

Расчет величины незавершенного производства  $Q$  при различных соотношениях параметров сборки производился в соответствии с выражениями, приведенными в работах [2, 3].

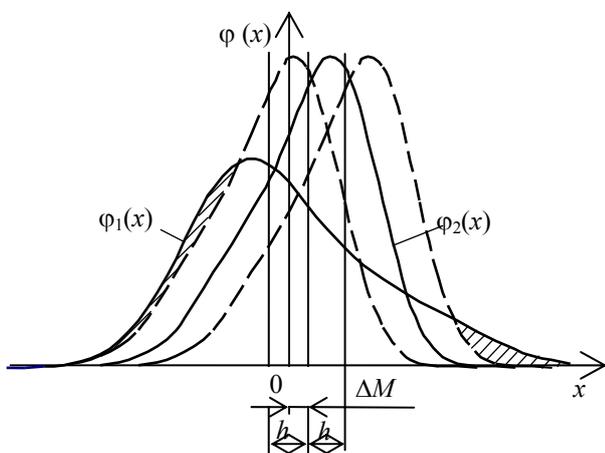


Рис. 1. Незавершенное производство при асимметричном распределении размеров в партиях сопрягаемых деталей

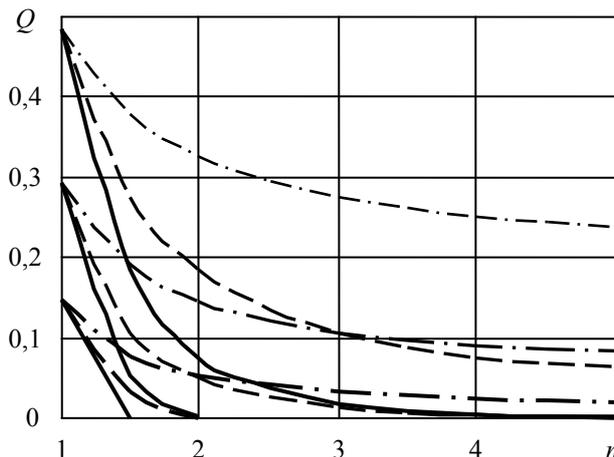


Рис. 2. Зависимость объема незавершенного производства  $Q$  от  $n$  при  $A_S \neq 0$  и  $E_k = 0$  для различных значений  $k_T$  и  $TA_{\Delta}$

На рис. 2 – 4 приведены зависимости  $Q$  от величины  $n$  при рекомендуемых ГОСТ 25347–82 посадках с относительной точностью  $k_T$  изготовления партий сопрягаемых деталей, где  $k_T = \sigma_1 / \sigma_2 = 1; 1,5; 2,4$  – соответственно, одинаковые квалитеты и разность в один и два квалитета,  $\sigma_1, \sigma_2$  – среднеквадратические отклонения распределений размеров отверстий и валов. В расчетах принимался относительный допуск на размер замыкающего звена  $TA_{\Delta_{от}}$ , выраженный в единицах  $\sigma_1$  ( $TA_{\Delta_{от}} = TA_{\Delta} / \sigma_1$ ), где  $TA_{\Delta_{от}} = 1; 2; 3$  (соответственно штрихпунктирная, штриховая и сплошная линии на графиках).

Расчеты произведены для объема партии 300 штук, которому соответствуют возможные отклонения  $\Delta M = 0,2; A_S = \pm 0,42, E_k = \pm 1,2$ , при этом рассматривалось как наличие только одного из отклонений формы кривой распределения (рис. 2, рис. 3), так и их совместное присутствие (рис. 4).

Положительная асимметрия рассматривалась в партиях отверстий во втулках, отрицательная – в партиях валов. Положительный эксцесс принимался в партиях валов, отрицательный – в партиях отверстий.

На графиках на рис. 2 – 4 верхнему семейству кривых соответствует  $k_T = 2,4$ , среднему –  $k_T = 1,5$ , нижнему –  $k_T = 1,0$ .

Представленные графики показывают, что наличие асимметрии и эксцесса приводит к повышению незавершенного производства на 15–20%, по сравнению с нормальным распределением размеров сопрягаемых поверхностей [3].

При этом асимметрия оказывает большее влияние на величину НП, чем эксцесс. В то же время уменьшение группового допуска не более чем в три раза ( $n=3$ ) приводит к резкому до 70% снижению  $Q$ .

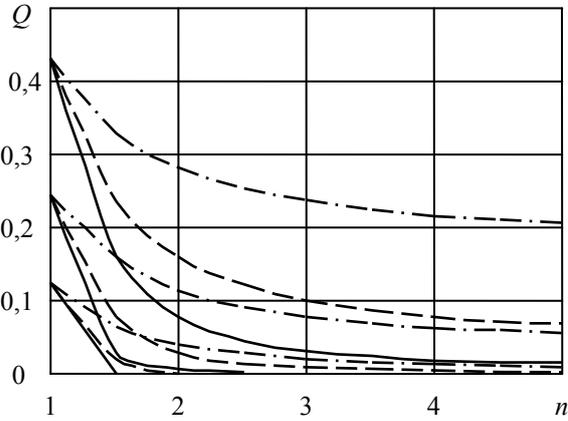


Рис. 3. Зависимость объема незавершенного производства  $Q$  от  $n$  при  $A_S = 0$  и  $E_k \neq 0$  для различных значений  $k_T$  и  $TA_\Delta$

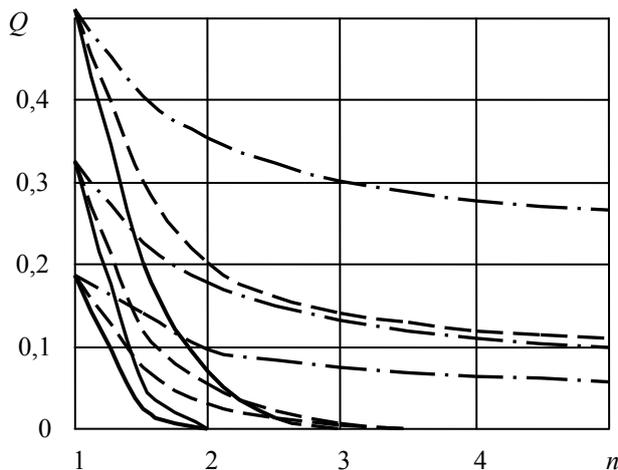


Рис. 4. Зависимость объема незавершенного производства  $Q$  от  $n$  при  $A_S \neq 0$  и  $E_k \neq 0$  для различных значений  $k_T$  и  $TA_\Delta$

Подобный вывод сделан при анализе собираемости соединений из партий деталей размеры которых распределены по нормальному закону [3]. Следовательно, для сокращения незавершенного производства при разработке технологических процессов сборки прецизионных соединений методом МГВ, можно рекомендовать уменьшение группового допуска не более чем в три раза, по сравнению с принятым для метода групповой взаимозаменяемости.

Невозможность обеспечения полной собираемости прецизионных деталей и, соответственно, появление незавершенного производства, приводит к тому, что комплектующих дета-

лей приходится заготавливать больше, чем требуется сборочных узлов, т. е. необходим сборочный задел. Такой сборочный задел, минимальный объем которого обеспечит требуемое количество соединений при самых неблагоприятных условиях производства сопрягаемых деталей, можно считать гарантированным. Его величина может в 1,5 и более раза превышать необходимое число прецизионных пар. Правильное назначение объема гарантированного задела позволит обеспечить устойчивый ритм сборочного процесса и избежать производства лишней незавершенной продукции.

Сборочный задел  $Z$  определяется отношением требуемого количества прецизионных пар  $N$  (программы выпуска) к собираемости  $S$  деталей в партиях, которая пропорциональна площади фигуры, образованной на рис. 1. пересечением кривых распределений размеров сопрягаемых поверхностей. Величину этой площади при известном незавершенном производстве  $Q$  можно найти из выражения  $S = 1 - Q$ . Следовательно, объем сборочного задела определится из выражения:

$$Z = \frac{N}{S} = \frac{N}{1 - Q}.$$

Величина обратная  $S$ , то есть  $1/S$  характеризует относительный задел деталей при прецизионной сборке.

На рис. 5 приведены графики зависимости относительного задела  $1/S$  от величины  $h$ , выраженной в единицах  $\sigma_1$  при одинаковых допусках на составляющие звенья (сплошная линия), отличающихся на один квалитет (штриховая линия) и на два квалитета (штрихпунктирная линия) при гарантированном комплектowaniu не менее 500 соединений. При этом рассмат-

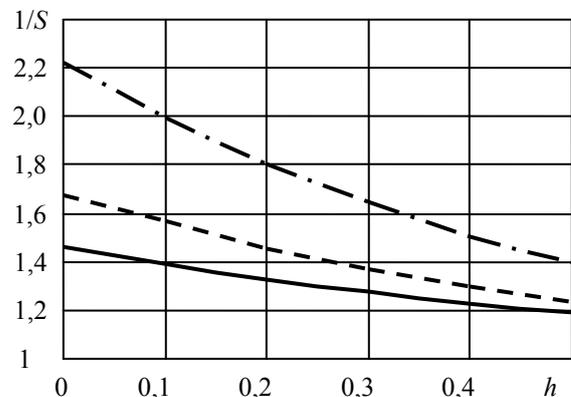


Рис. 5. Зависимость относительного задела деталей  $1/S$  от величины  $h$  для различных соотношений допусков  $k_T$  составляющих звеньев

рассматривались самые неблагоприятные условия, то есть наличие в подготавливаемых под сборку партиях сопрягаемых деталей производственных погрешностей: смещение центров группирования  $\Delta M = 0,15$  (в единицах  $\sigma_1$ ), асимметрия  $A_s = \pm 0,327$  и эксцесс  $E_k = \pm 1,08$ .

Для примера рассчитаем величину гарантированного задела при заданных допусках на составляющие звенья: отверстие во втулке  $TA_1 = 18$  мкм ( $\sigma_1 = 3$  мкм), вал  $TA_2 = 12$  мкм (соответственно, разность допусков составляет один квалитет и  $k_T = 1,5$ ) и замыкающее звено (например, зазор)  $TA_\Delta = 4$  мкм. При уменьшении группового допуска в два раза ( $n=2$ ) величина  $h$  будет равна:

$$h = \frac{4}{2} \left( 1 - \frac{1}{2} \right) = 1 \text{ мкм.}$$

В единицах  $\sigma_1$  величина  $h$  примет значение 0,33. По штриховой кривой на рис. 5 этому значению  $h$  соответствует относительный задел  $1/S = 1,35$ . Следовательно, для гарантированного получения 500 соединений при данных технологических условиях, необходим сборочный задел объемом 675 (1,35·500) деталей каждого вида.

УДК 681.523.2

**В. В. Корзин, А. С. Гольцов, В. А. Горюнов\*, Л. Г. Казакова**  
**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
**СТРУЙНО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ**  
**ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ**  
**Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ**  
 E-mail: korzinv@mail.ru  
**Волгоградский государственный технический университет\***

Рассмотрена струйно-электронная система измерения температуры газовых потоков, приведены результаты ее экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* измерение температуры, струйный измеритель температуры.

The jet-electronic measurement system of temperature of gas streams is considered. Results of its pilot studies are given.

*Keywords:* temperature measurement, jet measuring instrument of temperature.

Для измерения температуры газовых потоков в автоматизированных взрыво- и пожароопасных производствах разработана струйно-электронная система измерения. При экспериментальном исследовании характеристик струйной системы измерения температуры использовались методы аэрогидродинамических испытаний. Струйно-электронная система измерения включает в себя газодинамический преобразователь температуры [1 – 6], струйный гене-

Проведенные исследования позволили установить, что для заданных технологических параметров можно определить величину производственного задела сопрягаемых деталей, обеспечивающего требуемое количество прецизионных пар при минимальном объеме незавершенного производства. Полученные результаты делают возможной оценку эффективности прецизионной сборки на стадии проектирования процесса и могут использоваться для прогнозирования собираемости соединений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кесоян А. Г., Коцюба С. А. Влияние точности сортировки деталей на эффективность прецизионной сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2012. №11. – С. 26-27.
2. Кесоян А. Г., Рабинович Л. А. Моделирование распределений размеров в производственных партиях деталей, поступающих на прецизионную сборку // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. №9(47)/ ВолгГТУ, – Волгоград, 2008. – С. 78–82. – (Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 4).
3. Рабинович Л. А., Кесоян А. Г. Определение параметров групповой взаимозаменяемости для условий безотходной прецизионной сборки // Вестник машиностроения, 2005. – № 1. – С. 51–56.

ратор [7], измерители давления, перепада и частоты, а также электронный вычислительный блок и устройство отображения информации.

Математическая модель данной системы измерения построена с учетом математических моделей струйного преобразователя температуры [8] и струйного генератора колебаний [9, 10].

Для проверки адекватности данной математической модели исследовалась система, включающая в себя газодинамический преобразова-

тель и струйный генератор. Экспериментальные исследования системы измерения проводились при температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$  и барометрическом давлении 760 мм рт. ст.

На вход газодинамического преобразователя подавался воздух, величина давления питания, которого поддерживалась постоянной  $p = 100$  кПа. Температура воздуха, с помощью электрического нагревателя, изменялась от  $20$  до  $160^{\circ}\text{C}$ , и замерялись значения частоты на выходе струйного генератора.

Для струйно-электронной системы измерения получена экспериментальная зависимость значений температуры от частоты, которая в диапазоне температуры от  $20$  до  $160^{\circ}\text{C}$  имеет линейный характер и соответствует значениям, вычисленным по математической модели. Результаты измерений и вычислений показывают, что расчетная прямая хорошо согласуется с результатами эксперимента.

По результатам эксперимента проведен статистический анализ полной погрешности. Принято, что отклонение случайной величины от математического ожидания происходит по закону нормального распределения.

Выявлено, что наибольшее влияние на значение величины температуры оказывают погрешности измерения избыточного давления  $p$  и перепада давления  $\Delta p$ . Погрешности измерения геометрических размеров и частоты оказывают намного меньшее влияние, поэтому ими можно пренебречь. Была проведена статистическая обработка инструментальной погрешности.

При сравнении статистических данных полной погрешности, присутствующей при проведении экспериментов в диапазоне измерения температуры от  $20$  до  $160^{\circ}\text{C}$ , со статистическими данными, полученными при вычислении инструментальной погрешности, наблюдается следующее:

- абсолютная полная погрешность составляет от  $0,52$  до  $4,1^{\circ}\text{C}$ ;
- абсолютная инструментальная погрешность составляет от  $0,4$  до  $3,14^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальное среднеквадратическое отклонение полной погрешности составляет  $4,32^{\circ}\text{C}$ , а инструментальной погрешности составляет  $3,3^{\circ}\text{C}$ ;
- максимальный доверительный интервал полной погрешности составляет  $12,96^{\circ}\text{C}$ , а инструментальной погрешности –  $9,9^{\circ}\text{C}$ ;
- относительная полная погрешность составляет  $2,6\%$ ;
- относительная инструментальная погрешность составляет  $2,0\%$ .

На основании полученных результатов статистической обработки методической погреш-

ности можно сделать вывод о том, что абсолютная методическая погрешность в диапазоне от  $20$  до  $160^{\circ}\text{C}$  составляет от  $0,12$  до  $0,96^{\circ}\text{C}$ , при этом среднеквадратическое отклонение методической погрешности в этом же диапазоне составляет от  $0,13$  до  $1,01^{\circ}\text{C}$ , доверительный интервал методической погрешности составляет от  $0,39$  до  $3,3^{\circ}\text{C}$ , а относительная методическая погрешность составляет  $0,6\%$ .

Проведенные исследования струйно-электронной системы измерения температуры газовых потоков подтверждают возможность ее применения в автоматизированных пожаро- и взрывоопасных производствах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чаплыгин, Э. И. Повышение стабильности работы струйных термопневмопреобразователей / Э. И. Чаплыгин, Е. А. Дьячков, В. А. Горюнов, В. В. Корзин // Датчики и системы. – 2003. – № 10. – С. 31-33.
2. Горюнов В. А. / Разработка преобразователей физических величин. / В. А. Горюнов, Е. А. Дьячков, В. В. Корзин, С. Г. Телица, Э. И. Чаплыгин. // Материалы международной конференции «Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства», Волгоград, 16-19 сентября 2003, РПК «Политехник». – Волгоград, 2003. – С. 214-215.
3. Чаплыгин, Э. И. Импульсный струйный термопреобразователь повышенной стабильности. / Э. И. Чаплыгин, Е. А. Дьячков, В. А. Горюнов, В. В. Корзин // Известия ВолГГУ. Сер. «Автоматизация технологических процессов в машиностроении». – Волгоград, 2004. – Вып. 1., № 1. – С. 19-22.
4. Корзин, В. В. Аэродинамический измеритель температуры. / Корзин В. В., Чаплыгин Э. И., Горюнов В. А. // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование: сб. трудов III Международной науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», С-Пб, 14-17.03.2007 / Изд. Политехнического университета. – С-Пб., 2007. – Т. 8, С. – 66-67.
5. Корзин, В. В. Экспериментальные исследования струйного импульсного преобразователя температуры. / В. В. Корзин // Известия ВолГГУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2007. – Вып. 3., № 4. – С. 47-49.
6. Корзин, В. В. Струйные преобразователи температуры повышенной стабильности. / В. В. Корзин, Э. И. Чаплыгин, В. А. Горюнов // Известия ВолГГУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2009. – Вып. 5., № 8. – С. 98-100.
7. Корзин, В. В. Измерение расхода и температуры струйным измерителем. / В. В. Корзин, В. А. Горюнов, Ю. Г. Бурков // Известия ВолГГУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2011. – Вып. 7., № 13. – С. 77-79.
8. Корзин, В. В. Теоретический анализ рабочего процесса струйного импульсного преобразователя температуры. / В. В. Корзин // Известия ВолГГУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2007. – Вып. 3., № 4. – С. 46-47.
9. Чаплыгин, Э. И. Математическая модель струйного расходомера / Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков, В. В. Корзин // Журнал технической физики. – 2004. – том 74, вып. 6. – С. 16-19.
10. Chaplygin, E. I. / Mathematical model of a fluid flowmeter. / Chaplygin, E. I., Yu.V. Zemskov, V. V. Korzin // Technical Physics. – 2004. – Volume 49, Number 6.

УДК 681.523.2

*В. В. Корзин, А. С. Гольцов, В. А. Горюнов\*, А. Н. Рязанов\*\****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ЭЛЕМЕНТОВ СТРУЙНЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ****Волжский политехнический институт (филиал) ВолгГТУ**

E-mail: korzinv@mail.ru

**Волгоградский государственный технический университет\*****Воронежский государственный университет инженерных технологий\*\***

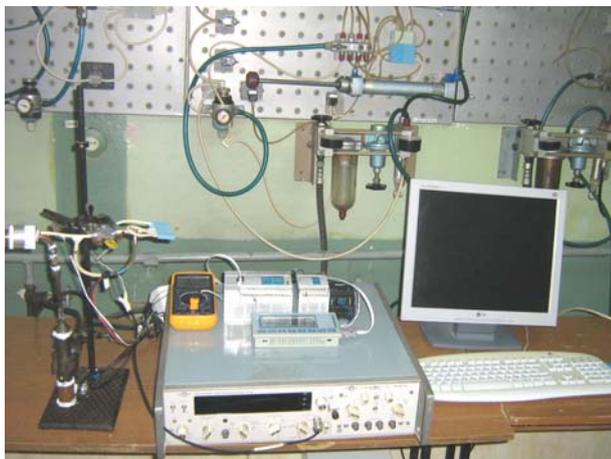
В статье рассматривается экспериментальная установка для исследования струйно-электронной системы измерения температуры, включающей в себя газодинамический преобразователь и струйный генератор колебаний. Приводится методика проведения экспериментальных исследований.

*Ключевые слова:* измерение температуры, струйный измеритель температуры.

In article experimental installation for research of jet-electronic system of measurement of temperature including the gasdynamic converter and the jet oscillator is considered.

*Keywords:* temperature measurement, jet measuring instrument of temperature.

Автоматизированный контроль параметров технологических процессов, протекающих в сложных условиях, в пожаро- и взрывоопасных производствах, при наличии высоких электромагнитных и радиационных полей может осуществляться струйными системами контроля. Для исследования элементов таких систем, с учетом известных аналогов испытательных установок для элементов пневмоавтоматики [1–3], была изготовлена экспериментальная установка (изображена на рисунке). На этой установке были получены статические и динамические характеристики газодинамического преобразователя температуры [4–6], струйного генератора [7–9], а также подтверждена адекватность математической модели струйно-электронной системы измерения температуры газовых потоков.



Экспериментальная установка

На установке можно воспроизвести различные схемы систем измерения температуры и уп-

равления, а также осуществить измерение параметров системы измерения температуры и ее элементов. К входу исследуемого датчика температуры может быть подключен расходомер, датчик давления, образцовый термометр, а к выходу – частотомер. Перепад давления измеряется дифференциальным датчиком давления.

Показания температуры регистрируются с помощью образцового термометра, значения перепада давления регистрируются с помощью датчика перепада, подключенного к вычислительному блоку. Сигналы струйного генератора преобразуются пьезоэлементом в электрический сигнал, регистрируются с помощью частотомера и заносятся в вычислительный блок. Также в вычислительный блок заносится измеренная величина давления и в нем вычисляется значение температуры по формулам математической модели системы измерения температуры.

Для проверки адекватности математической модели системы измерения температуры газовых потоков, разработанной с учетом моделей, рассмотренных в [8 – 10] исследовались струйный газодинамический преобразователь температуры со следующими геометрическими параметрами:  $l_d = 45$  мм;  $d_d = 1$  мм и струйный генератор с параметрами:  $d_{св} = 4$  мм;  $l_{св} = 80$  мм;  $l_2 = 5$  мм;  $h = 0,8$  мм;  $b = 0,7$  мм;  $b_y = 0,8$  мм.

С помощью данного экспериментального стенда можно исследовать зависимость изменения частоты и выходного давления:

- от расстояния между питающим и приемным каналом газодинамического преобразователя температуры;

- от диаметров питающего и приемного каналов газодинамического преобразователя температуры;

- от длин питающего и приемного каналов газодинамического преобразователя температуры;
- от геометрических размеров струйного генератора;
- от величины давления питания воздушно-го потока;
- от величины расхода воздушного потока.

На основании полученных на экспериментальной установке данных возможно проектирование элементов для струйных систем автоматизированного контроля, работающих в различных диапазонах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чаплыгин, Э. И. Повышение стабильности работы струйных термопневмопреобразователей / Э. И. Чаплыгин, Е. А. Дьячков, В. А. Горюнов, В. В. Корзин // Датчики и системы. – 2003. – № 10. – С. 31-33.
2. Горюнов В. А. /Разработка преобразователей физических величин. / В. А. Горюнов, Е. А. Дьячков, В. В. Корзин, С. Г. Телица, Э. И. Чаплыгин. // Материалы международной конференции «Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства», Волгоград, 16-19 сентября 2003, РГПК «Политехник». – Волгоград, 2003. – С. 214-215.
3. Чаплыгин, Э. И. Импульсный струйный термопреобразователь повышенной стабильности. / Э. И. Чаплыгин, Е. А. Дьячков, В. А. Горюнов, В. В. Корзин // Известия ВолГТУ. Сер. «Автоматизация технологических процессов в машиностроении». – Волгоград, 2004. – Вып. 1., № 1. – С. 19-22.
4. Корзин, В. В. Аэродинамический измеритель температуры. / Корзин В. В., Чаплыгин Э. И., Горюнов В. А. // Высокие технологии, фундаментальные и прикладные исследования, образование: сб. трудов III Международной науч.-практ. конф. «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», С-Пб, 14-17.03.2007 / Изд. политехнического университета. – С-Пб., 2007. – Т. 8, С. – 66-67.
5. Корзин, В. В. Экспериментальные исследования струйного импульсного преобразователя температуры. / В. В. Корзин // Известия ВолГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2007. – Вып. 3., № 4. – С. 47-49.
6. Корзин, В. В. Струйные преобразователи температуры повышенной стабильности. / В. В. Корзин, Э. И. Чаплыгин, В. А. Горюнов // Известия ВолГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2009. – Вып. 5., № 8. – С. 98-100.
7. Корзин, В. В. Измерение расхода и температуры струйным измерителем. / В. В. Корзин, В. А. Горюнов, Ю. Г. Бурков // Известия ВолГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2011. – Вып. 7., № 13. – С. 77-79.
8. Чаплыгин, Э. И. Математическая модель струйного расходомера / Э. И. Чаплыгин, Ю. В. Земсков, В. В. Корзин // Журнал технической физики. – 2004. – том 74, вып. 6. – С. 16-19.
9. Chaplygin, E. I. / Mathematical model of a fluid flowmeter. / E. I. Chaplygin, Yu. V. Zemskov, V. V. Korzin // Technical Physics. – 2004. – Volume 49, Number 6.
10. Корзин, В. В. Теоретический анализ рабочего процесса струйного импульсного преобразователя температуры. / В. В. Корзин // Известия ВолГТУ. Сер. «Прогрессивные технологии в машиностроении». – Волгоград, 2007. – Вып. 3., № 4. – С. 46-47.

УДК 621.798.34

*А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев, А. С. Сергеев*

### ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО НАПОЛНЕНИЯ ГИБКИХ КОНТЕЙНЕРОВ СЫПУЧИМ МАТЕРИАЛОМ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Для решения задачи полной автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов разработана конструкция устройства для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом. Изготовлен и собран экспериментальный образец этого устройства с пневматическим приводом. Управление устройством осуществляется от панели управления, реализованной на пневматических распределителях с механическим переключением. Лабораторные испытания подтвердили работоспособность подобных устройств, что создает условия для комплексной автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры.

*Ключевые слова:* автоматическое наполнение, экспериментальный образец, гибкий контейнер, сыпучий материал.

For solution of a problem of full automation of process of packaging of bulk materials the construction of device for automatic filling flexible containers by bulk material has been developed. The experimental sample of this device with a pneumatic drive has been manufactured and assembled. The device is controlled by control board implemented on pneumatic valves with mechanical switching. Laboratory tests have confirmed efficiency of such devices, what creates conditions for integrated automation of packaging process of bulk materials in flexible containers.

*Keywords:* automatic filling, experimental sample, flexible container, bulk material.

В настоящее время на предприятиях химической, пищевой промышленности, в строительстве и сельском хозяйстве при расфасовке сы-

пучих материалов в гибкие контейнеры (мешки) с открытой горловиной вместимостью до 50 кг. применяется труд человека-оператора. Чаше

всего это имеет место при захвате, раскрытии и подаче контейнера под загрузочный патрубок, а также на последующих операциях прошивки контейнера.

Обзор рынка отечественной и зарубежной фасовочной и упаковочной техники, патентных и литературных источников показывает, что не одно из предлагаемых устройств не позволяет полностью автоматизировать процесс наполнения открытых гибких контейнеров сыпучим материалом [1].

Для автоматического захвата, раскрытия и удержания гибких контейнеров при наполнении с возможностью последующего их закрытия для прошивки разработаны конструкции рычажно-шарнирных хватных устройств [1, 2, 3], состоящие из рычажно-шарнирного механизма с захватами в виде пальцев и привода их переме-

щения в виде одного или нескольких пневмоцилиндров. Теоретические расчеты подтвердили работоспособность и применимость семейства разработанных хватных устройств при комплексной автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры.

Для решения задачи полной автоматизации процесса расфасовки сыпучих материалов в мягкую тару разработана конструкция устройства [4] для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом.

Для проверки работоспособности устройства на основе разработанных чертежей и изготовленных сборочных элементов на кафедре автоматизации производственных процессов Волгоградского государственного технического университета был собран экспериментальный образец (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид экспериментального устройства для автоматического наполнения гибких контейнеров сыпучим материалом

Устройство состоит из рычажно-шарнирного хватного устройства 1, смонтированного на раме 2 и выполненного с возможностью вращения вокруг оси 3. Захваты 4 (могут быть различного исполнения, в данном случае использовались вакуумные) необходимы для предварительного открытия гибкого контейнера 5, который в исходном положении находится на столе 6, а при наполнении – под загрузочным патрубком 7. Подробное описание элементов конструкции устройства, принципа работы, и его трехмерное компьютерное моделирование

представлено в [1, 4, 5]. В качестве источника энергии выступает мобильный воздушный компрессор с ресивером и фильтром (рис. 2, а). Привод устройства полностью пневматический, что обусловлено требованиями взрыво- и пожаробезопасности при расфасовке различных сыпучих материалов. Привод состоит из 6 пневматических цилиндров. Управление осуществляется от панели управления (рис. 2, б) посредством пневмораспределителей с механическим управлением компании Camozzi. Это сделано намеренно, чтобы отработать все этапы цикла

расфасовки, произвести лабораторные испытания устройства, определить технические характеристики, рациональные настройки и режимы работы. После этого система управления устройством будет заменена на полностью автома-

тическую. При этом могут быть реализованы 2 варианта управления – пневматическое, построенное на пневмологике (для взрывоопасных сыпучих материалов, например муки и др.), и с электропневматическим управлением от ПЛК.



а



б

Рис. 2. Элементы привода и управления устройством:  
а – воздушный компрессор, б – панель управления

Основные функции манипулирования гибким контейнером при его наполнении выполняет рычажно-шарнирное захватное устройство. После поштучного отделения и предварительного открывания мешка он захватывается из-

нутри с помощью захватных элементов в виде пальцев (рис. 3 а) и надежно удерживается в таком положении посредством давления воздуха в миницилиндрах.



а



б

Рис. 3. Захват, раскрытие и удержание гибкого контейнера

Затем мешок транспортируется к загрузочному патрубку (рычажно-шарнирное захватное устройство поворачивается на 90 градусов с помощью поворотного пневмоцилиндра, рис. 1) и открывается (при втягивании штока пневмоцилиндра привода захватные пальцы занимают положение в вершинах выпуклого шестиугольника, рис. 3, б) для наполнения сыпучим материалом.

Предварительные испытания подтвердили работоспособность данных устройств. В результате экспериментальных исследований установлены некоторые технические характеристики данного устройства при наполнении гибких контейнеров различных размеров хорошо сыпучими материалами: гранулами из пенополистирола и керамзитом. Так, например, максимальная производительность промышленно-

го образца должна составить не менее 6 тонн в час. Диапазоны дозирования зависят от плотности сыпучих материалов и ограничены 50 килограммами.

Использование предложенного устройства позволяет полностью освободить человека от тяжелой, утомительной работы, вывести его из рабочей зоны и более не применять ручной труд в процессах расфасовки сыпучих материалов в гибкие контейнеры.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, А. М. Автоматическая расфасовка сыпучих материалов в мягкую тару. Повышение эффективности процесса / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев. – Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 128 с.
2. Пат. 2421383 РФ, МПК В 65 В 67/12. Устройство для автоматического захвата, раскрытия и удержания

мешков / Л. А. Рабинович, А. М. Макаров; заявитель и патентообладатель Волгоградский государственный технический университет. – № 2010122140/21; заявл. 31.05.2010; опубл. 20.06.2011.

3. Макаров, А. М. Синтез рычажно-шарнирных хватных устройств для манипулирования мягкой расфасовочной тарой / А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев // Изв. ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 13 (100). – С. 117–119.

4. 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. 12.20.2012.

5. Transfer Machine Line for Packaging Granular Materials in a Soft Open Container / А. М. Makarov, Y. P. Serdobintsev, M. P. Kuhtik // Journal of Applied Packaging Research (JAPR). Vol. 6 / DEStech Publication, Inc., 2012. – №4. – pp. 203–209.

УДК 621.757:519.87

*С. Г. Поступаева, И. Е. Грязнов*

### РАБОТА САУ, ОСНОВАННЫХ НА ТРАДИЦИОННЫХ И НЕТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДАХ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: app@vstu.ru

Статья посвящена сравнительному анализу методов настройки ПИ-регулятора применительно к одному объекту управления. Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность использования метода настройки при помощи нейро-нечеткой сети.

*Ключевые слова:* регулятор, нечеткое управление, нейро-нечеткая сеть.

This article is devoted to the comparative analysis of methods setup of the controller in relation to one object of management. The results of simulation have corroborated high performance of use a method of control by means of a neural network.

*Keywords:* controller, indistinct management, neural network.

В современном производстве широко применяются системы автоматизации и промышленные регуляторы. В настоящее время в автоматизированных системах управления технологическими процессами наиболее часто встречающимся регулятором является пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор). Использование ПИ-регулятора в системе управления позволяет повысить быстродействие и точность. Однако это может быть достигнуто только при оптимальных настройках регулятора. Поэтому при разработке систем автоматического регулирования (САУ) одной из основных задач является адекватная настройка параметров ПИ-регулятора. Существует большое количество методов настройки ПИ-регуляторов, однако многие из них либо чрезмерно трудоемки, либо не обладают необходимой точностью. Как правило, применение этих методов

позволяет обеспечить устойчивость системы управления, но не гарантирует ее качественную работу. Поэтому важно не только корректно настроить ПИ-регулятор, но и выбрать наиболее подходящий для данного объекта управления метод настройки.

Существование большого числа различных методов настройки ПИ-регуляторов технологических процессов [1, 2] приводит к необходимости проведения сравнительного анализа разработанных методов и определению наиболее эффективного метода для конкретного класса объектов. Для объективного анализа сравнение полученных показателей возможно при настройке ПИ-регуляторов применительно к одному объекту управления. В качестве объекта управления был выбран непрерывный динамический объект с транспортным запаздыванием – пароперегреватель котла ТП-87, описыва-

ваемый по каналу управления расход на впрыск – температура перегретого пара с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{0,2}{(1,53p + 1)(0,93p + 1)} e^{-0,2p}$$

Исходная система автоматического управления имеет вид, представленный на рис. 1.

Существует несколько традиционных мето-

дов настройки ПИ-регуляторов системы автоматического управления: Стогестада, Циглера-Никольса, Куна, Шеделя, метода, основанного на реакции на ступенчатое воздействие и метода амплитудного оптимума. Из перечисленных выше методов наиболее наилучшие показатели перерегулирования и времени регулирования дают метод амплитудного оптимума, Куна и Шеделя.

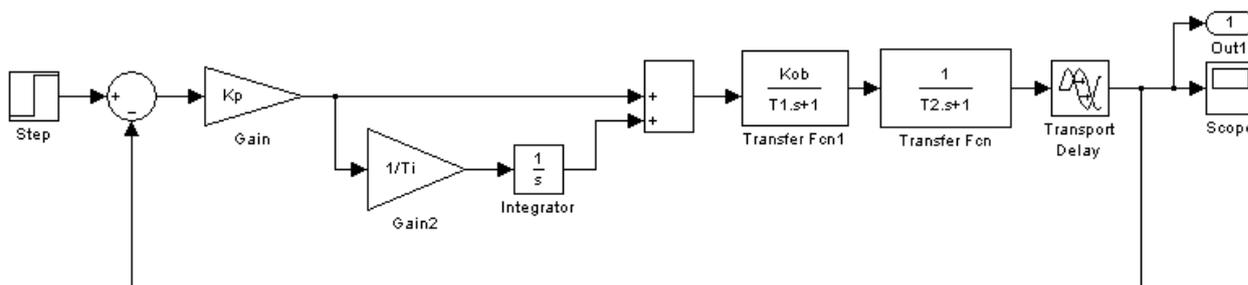


Рис. 1. САУ пароперегревателем котла

При настройке по методу Шеделя коэффициенты ПИ-регулятора принимают большие значения; метод амплитудного оптимума сло-

жен в программировании, поэтому в работе отдается предпочтение методу Куна.

Таблица 1

Вычисление оптимальных настроек ПИ-регулятора по методу Куна

$K_{об}$	$T_1$	$T_2$	$\tau$	$K_p$	$T_i$	$A$	$t_p$
0,28	1,17	0,72	0,16	3,571	0,683	1,185	5,885
0,28	1,17	0,72	0,25	3,571	0,713	1,223	5,993
0,28	1,17	1,15	0,16	3,571	0,826	1,282	6,860
0,28	1,17	1,15	0,25	3,571	0,856	1,318	6,952
0,28	1,87	0,72	0,16	3,571	0,916	1,278	11,063
0,28	1,87	0,72	0,25	3,571	0,946	1,312	11,431
0,28	1,87	1,15	0,16	3,571	1,060	1,415	16,670
0,28	1,87	1,15	0,25	3,571	1,090	1,452	17,329
0,45	1,17	0,72	0,16	2,222	0,683	1,425	6,650
0,45	1,17	0,72	0,25	2,222	0,713	1,478	9,298
0,45	1,17	1,15	0,16	2,222	0,826	1,526	13,423
0,45	1,17	1,15	0,25	2,222	0,856	1,556	14,323
0,45	1,87	0,72	0,16	2,222	0,916	1,491	11,482
0,45	1,87	0,72	0,25	2,222	0,946	1,539	14,600
0,45	1,87	1,15	0,16	2,222	1,060	1,594	20,774
0,45	1,87	1,15	0,25	2,222	1,090	1,663	25,096

Зафиксировав номинальные значения параметров объекта управления ( $K_{об} = 0,37$ ;  $T_1 = 1,53$ ;  $T_2 = 0,93$ ;  $\tau = 0,2$ ), где  $K_{об}$  – коэффициент передачи;  $T_1$ ,  $T_2$  – постоянные времени;  $\tau$  – запаздывание; получим настроечные коэффициенты ПИ-регулятора ( $A$  – первая амплитуда переходного процесса;  $K_p$  – коэффициент регули-

рования;  $T_i$  – постоянная интегрирования;  $t_p$  – время регулирования), вычисленные при помощи метода Куна (табл. 1).

Показатели качества переходного процесса при настройке ПИ-регулятора, выполненной для номинальных значений параметров объекта управления по методу Куна представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Настройка регулятора по методу Куна

№	$K_{об}$	$T_1$	$T_2$	$\tau$	$K_p$	$T_i$	$A$	$t_p$
1	0,33	1,35	0,82	0,18	2,9645	0,7718	1,4539	11,2451
2	0,33	1,35	0,82	0,23	3,2175	0,8244	1,4392	12,8281
3	0,33	1,35	1,04	0,18	2,8649	0,8378	1,4401	12,6706
4	0,33	1,35	1,04	0,23	2,6163	0,8902	1,3815	12,7818
5	0,33	1,70	0,82	0,18	3,1469	0,8271	1,4639	12,5284
6	0,33	1,70	0,82	0,23	3,0520	0,8891	1,4762	12,8304
7	0,33	1,70	1,04	0,18	2,8759	0,8464	1,5569	15,9348
8	0,33	1,70	1,04	0,23	2,5232	0,8276	1,4626	14,2183
9	0,41	1,35	0,82	0,18	2,8532	0,7941	1,5035	10,5772
10	0,41	1,35	0,82	0,23	2,6394	0,8638	1,4473	11,0785
11	0,41	1,35	1,04	0,18	2,3181	0,8892	1,4046	12,2798
12	0,41	1,35	1,04	0,23	2,2560	0,9085	1,4009	12,7586
13	0,41	1,70	0,82	0,18	2,5416	0,9367	1,4564	12,4548
14	0,41	1,70	0,82	0,23	2,5795	0,9413	1,4157	12,3905
15	0,41	1,70	1,04	0,18	2,5183	0,9820	1,4136	13,7108
16	0,41	1,70	1,04	0,23	2,8394	1,0264	1,4595	13,2019

В последнее время широкую популярность находят нечеткие модели и алгоритмы управления. Одним из научных направлений в данной области является нечеткая коррекция настроек ПИ-регулятора по анализу качества переходных процессов [3]. Известно, что нечеткое управление основано на практическом применении знаний квалифицированных специалистов, представленных в форме лингвистических баз правил. Нечеткое управление эффективно в случаях недетерминированности параметров объектов, когда существует определенный опыт экспертов по управлению и настройке автоматизированной системы регули-

рования (АСР).

В качестве алгоритма нечеткого управления используем алгоритм Мамдани-Сугено [4].

При разработке нечеткого адаптера для блока, реализующего алгоритм Мамдани, заданы два входа и один выход. Функции принадлежности используются вида «первая амплитуда переходного процесса», «время регулирования», «постоянная интегрирования ПИ-регулятора». Определены два нечетких множества – малое и большое и универсумы входных и выходных параметров. Нечеткие множества описаны с помощью лингвистических переменных и выражены аналитическим методом.

Таблица 3

## Настройка регулятора по алгоритму Мамдани-Сугено

№	$K_{об}$	$T_1$	$T_2$	$\tau$	$K_p$	$T_i$	$A$	$t_p$
1	0,33	1,35	0,82	0,18	3,5714	0,7917	1,5097	12,5862
2	0,33	1,35	0,82	0,23	3,4212	0,7951	1,5132	13,3127
3	0,33	1,35	1,04	0,18	3,1956	0,8014	1,5125	14,8304
4	0,33	1,35	1,04	0,23	2,9983	0,8974	1,4356	12,7269
5	0,33	1,70	0,82	0,18	3,2754	0,7991	1,5055	12,3231
6	0,33	1,70	0,82	0,23	3,0614	0,8864	1,4001	12,8366
7	0,33	1,70	1,04	0,18	2,9983	0,9342	1,4281	13,9638
8	0,33	1,70	1,04	0,23	2,9464	0,9997	1,4334	14,4341
9	0,41	1,35	0,82	0,18	3,0487	0,8061	1,5316	12,2442

Окончание табл. 3

№	$K_{об}$	$T_1$	$T_2$	$\tau$	$K_p$	$T_i$	$A$	$t_p$
10	0,41	1,35	0,82	0,23	2,8784	0,8107	1,5260	13,2415
11	0,41	1,35	1,04	0,18	2,7548	0,8403	1,5148	14,3576
12	0,41	1,35	1,04	0,23	2,6642	0,8561	1,5116	14,9591
13	0,41	1,70	0,82	0,18	3,0316	0,8363	1,5377	14,2358
14	0,41	1,70	0,82	0,23	2,9566	0,8873	1,5173	14,3443
15	0,41	1,70	1,04	0,18	3,0559	0,9591	1,5277	16,2410
16	0,41	1,70	1,04	0,23	2,9638	0,9512	1,5228	16,3617

База знания разработана на основе экспериментальных исследований и рекомендаций:

- $IF(A_1 \text{ is } A1\_low) \text{ and } (t_p \text{ is } A1\_low) \text{ then } (K_p \text{ is } Kp\_high)(T_i \text{ is } Ti\_low) ;$   
 $IF(A_1 \text{ is } A1\_low) \text{ and } (t_p \text{ is } tp\_high) \text{ then } (K_p \text{ is } Kp\_low)(T_i \text{ is } Ti\_high) ;$   
 $IF(A_1 \text{ is } A1\_high) \text{ and } (t_p \text{ is } tp\_low) \text{ then } (K_p \text{ is } Kp\_low)(T_i \text{ is } Ti\_low) ;$   
 $IF(A_1 \text{ is } A1\_high) \text{ and } (t_p \text{ is } tp\_high) \text{ then } (K_p \text{ is } Kp\_high)(T_i \text{ is } Ti\_high) .$

Показатели качества переходного процесса при настройке ПИ-регулятора по алгоритму Мамдани-Сугено представлены в табл. 3.

Спроектируем нейро-нечеткий регулятор для аппроксимации настроек ПИ-регулятора. Данную задачу можно осуществить в редакторе ANFIS, который позволяет автоматически син-

тезировать нечеткую нейронную сеть (ННС) из экспериментальных данных. ННС можно рассматривать как одну из разновидностей систем нечеткого логического вывода типа Сугено [4]. Показатели качества переходного процесса при настройке ПИ-регулятора при помощи нейро-нечеткой сети представлены в табл. 4.

Таблица 4

Настройка регулятора при помощи нейро-нечеткой сети ANFIS

№	$K_{об}$	$T_1$	$T_2$	$\tau$	$K_p$	$T_i$	$A$	$t_p$
1	0,33	1,35	0,82	0,18	3,5714	0,7917	1,5097	12,5862
2	0,33	1,35	0,82	0,23	3,4212	0,7917	1,5159	13,3394
3	0,33	1,35	1,04	0,18	3,1956	0,7917	1,5214	14,9265
4	0,33	1,35	1,04	0,23	2,9983	0,8991	1,4345	12,7231
5	0,33	1,70	0,82	0,18	3,2754	0,7917	1,5122	12,3189
6	0,33	1,70	0,82	0,23	3,0614	0,8870	1,3998	12,8348
7	0,33	1,70	1,04	0,18	2,9983	0,9417	1,4228	13,9438
8	0,33	1,70	1,04	0,23	2,9464	0,9653	1,4235	14,3949
9	0,41	1,35	0,82	0,18	3,0487	0,7917	1,5451	12,6328
10	0,41	1,35	0,82	0,23	2,8784	0,7917	1,5442	13,3274
11	0,41	1,35	1,04	0,18	2,7548	0,8362	1,5181	14,3910
12	0,41	1,35	1,04	0,23	2,6642	0,8536	1,5138	14,9784
13	0,41	1,70	0,82	0,18	3,0316	0,8312	1,5419	14,2635
14	0,41	1,70	0,82	0,23	2,9566	0,8880	1,5140	14,2719
15	0,41	1,70	1,04	0,18	3,0559	0,9735	1,4882	12,8341
16	0,41	1,70	1,04	0,23	2,9638	0,9666	1,5127	16,2916

Графики переходного процесса при следующих параметрах объекта управления:  $K_{об} = 0,33$ ;  $T_1 = 1,70$ ;  $T_2 = 0,82$ ;  $\tau = 0,23$  с примене-

нием каждого метода настройки ПИ-регулятора, из вышепредложенных, представлены на рис. 2.

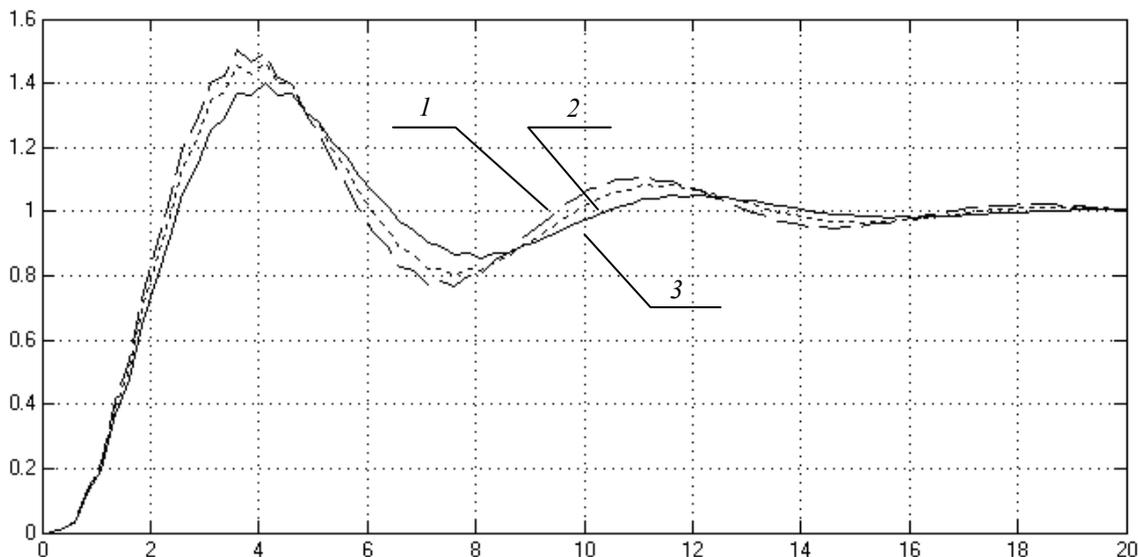


Рис. 2. Переходная характеристика САУ с применением метода настройки ПИ-регулятора: 1 – по методу Куна; 2 – по алгоритму Мамдани-Сугено; 3 – при помощи нейро-нечеткой сети ANFIS

Как видно из проведенного анализа, наилучшие показатели обеспечили нейро-нечеткие сети; нечеткая логика обеспечила адаптивность настройки ПИ-регулятора, но качество переходного процесса ниже по сравнению с фиксированной настройкой ПИ-регулятора. Также обнаружено ухудшение показателей качества САУ по сравнению с показателями, полученными при настройке ПИ-регулятора по методу Куна при номинальных значениях параметров объекта управления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Штейнберг Ш. Е., Серезин Л. П., Залуцкий И. Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем

регулирования / Ш. Е. Штейнберг, Л. П. Серезин, И. Е. Залуцкий // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №7. – С. 1-7.

2. Поступаева С. Г., Грязнов И. Е. Разработка нейросетевого регулятора для современных промышленных контроллеров / С. Г. Поступаева, И. Е. Грязнов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 7 (110) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – С. 108–110. – (Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 9).

3. Михайленко В. С. Анализ методов разработки нечетких САУ для управления сложными взаимосвязанными объектами / В. С. Михайленко, В. Ф. Ложечников // ААЭКС. – 2009. – №1.

4. Хаптахоева Н. Б. Введение в теорию нечетких множеств: учебное пособие. – Н. Б. Хаптахоева, С. В. Дамбаева, Н. Н. Аюшеева. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2004. – 68 с.

УДК 621.9.06

**В. В. Пушкарев, А. В. Дроботов**

### КОМПОНОВКА УСТРОЙСТВ ДЛЯ ОБЪЕМНОЙ ПЕЧАТИ ЭКСТРУДИРУЕМЫМ РАСПЛАВОМ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: <http://www.vstu.ru/>

Рассмотрены особенности трехмерной печати методом FDM, отмечен один из недостатков технологии FDM – невозможность печати деталей с увеличивающейся базой. Предложены и проанализированы различные компоновки станка для решения данного недостатка, выбран наилучший вариант.

**Ключевые слова:** станок для объемной печати, компоновка станка, объемное прототипирование, 3D-печать.

The features of 3D-printing by the FDM method considered, inability to print parts with increasing base marked as one of the weakness of this technology. Several configurations of the machine compositions suggested and analyzed in order to solve this weakness, best variant is selected.

**Keywords:** 3d-printing, arrangement of the 3d-printer, FDM, printing parts with increasing base.

В настоящее время в процесс проектирования активно внедряют технологии объемной печати, позволяющие изготавливать прототипы деталей и конструкций из специальных пластмасс или металлов. В разработке находятся 3D принтеры для производства продуктов питания, электронных компонентов, строительства зданий и т. п. Известно много технологий объемной печати, но наименьшую себестоимость готового изделия имеет технология «струйной» объемной печати – это так называемое Fused Deposition Modeling (FDM) [1].

FDM (Fused Deposition Modeling – моделирование методом плавления) – это технология, при которой построение объекта идет за счет расплавления пластика, который через экструдер подается на рабочую поверхность и там уже застывает. Напечатав первый слой, рабочая платформа опускается и процесс повторяется.

Из преимуществ данной технологии можно отметить высокую (относительно других технологий) производительность, безопасность, возможность использования различных материалов. Сопутствующие недостатки – невоз-

можность создания деталей с увеличивающейся базой (или необходимость использования специальных подставок для этого), низкая точность исполнения моделей, неровная поверхность моделей [2]. Если два последних недостатка можно решить увеличением точности механизмов и уменьшением толщины слоя, то первый недостаток известными методами не решается. Для этого необходимо изменение компоновки станка.

Нами предложено решение задачи формирования деталей с увеличивающейся базой путем поворота детали (и, соответственно, самого стола) на  $90^\circ$  относительно печатающей головки. Рассмотрим несколько возможных моделей компоновки станка для FDM печати с поворотными механизмами стола.

На рис. 1, *а* стол 4, закрепленный во вспомогательной рамке 3, поворачивается на валах 5 в двух плоскостях относительно головки 2, перемещающейся по направляющей 1, которая, в свою очередь движется в направлении оси Z на стойках 6, первый из валов приводится в движение с помощью двигателя 7.

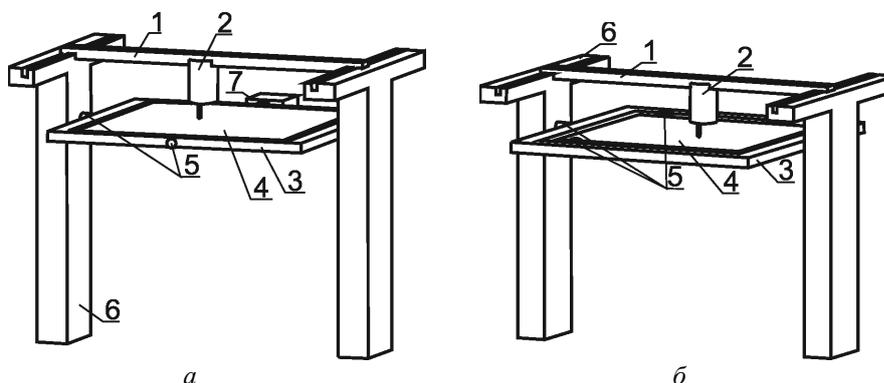


Рис. 1. Схемы компоновки:  
*а* – с образующей рамкой и двумя валами; *б* – с образующей рамкой с боковым наклоном

Во второй схеме (рис. 1, *б*) стол 4, закрепленный во вспомогательной рамке 3, поворачивается на валах 5 в двух плоскостях относительно печатающей головки 2, перемещающейся по осям X и Y по направляющей печатающей головки 2, 6 – стойки перемещения стола по оси Z. Данная схема отличается от предыдущей иным расположением одного из валов относительно рамки, что дает преимущество в виде увеличения максимальной высоты изготавливаемой модели. Третья схема (рис. 2) предусматривает размещение стола 2 на поворотном механизме 5 (поворотном столе), который, в свою очередь, закреплен на подвижной платформе 6.

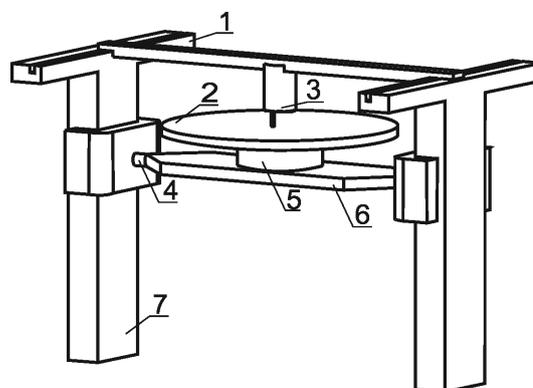


Рис. 2. Схема компоновки с поворотным столом и валом

Платформа поворачивается на  $90^\circ$  относительно печатающей головки 3 посредством вала 4, который, в свою очередь, закреплен в направляющих 7, по которым осуществляется перемещение стола по оси Z.

Данная схема обеспечивает наибольшее (и достаточное) число степеней свободы поворота детали относительно печатающей головки, что позволит печатать детали с увеличивающейся базой без использования каких либо поддерживающих материалов. Единственным ограничением является сближение печатающей головки и стола при его повороте на  $90^\circ$ . Это не позволит увеличивать основание детали до достижения определенной высоты. Тем не менее, данная схема лучше всего решает поставленную задачу печати деталей сложной формы (с увеличивающейся базой) без использования до-

полнительных поддерживающих материалов. Однако необходимы дальнейшие исследования быстродействия и точности станков с предложенной компоновкой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдеев, А.Р., Федченков, П.В., Швец, А.А. Использование объемной печати для производства заготовок из легкоплавких металлов / А.Р. Авдеев, П.В. Федченков, А.А. Швец, А.В. Дроботов // XVII региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 6-9 ноября 2012 г.: тез. докл. / ВолгГТУ [и др.]. – Волгоград, 2013. – С. 71-72.
2. Fused deposition modeling // rpworld.net: Rapid Prototyping & Manufacturing, 2013. URL: <http://rpworld.net/cms/index.php/additive-manufacturing/rp-rapid-prototyping/fdm-fused-deposition-modeling.html> (дата обращения: 09.07.2013).

---

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ**  
**Волгоградского государственного технического университета**  
**№ 20(123), 2013 г.**

Серия «ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ»  
(Выпуск 10)

*Межвузовский сборник научных статей*

Редактор *Н. Н. Кваша*  
Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2013 г. Поз. № 77н.

Подписано в печать 23.12.2013. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 14,42. Уч.-изд. л. 14,03.  
Тираж 150 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.  
400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.  
400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

В сборнике научных статей «Известия ВолгГТУ», серии «Прогрессивные технологии в машиностроении» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований и представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области прогрессивных технологий в машиностроении.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на дискетах или компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Дискета должна быть вложена в отдельный конверт, на этикетке дискеты указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной–двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.