



**ВЕСТНИК  
НАЦИОНАЛЬНОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
«ХПІ»**

**40'2011**

**Харьков**



**ВЕСТНИК  
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
"ХПИ"**

**Сборник научных трудов  
Тематический выпуск**

**40'2011**

**"Технологии в машиностроении"**

**Издание основано Национальным техническим университетом "Харьковский политехнический институт" в 2001 году**

**Государственное издание**

**Свидетельство Госкомитета по информационной политике Украины КВ № 5256 от 2 июля 2001 года**

**КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

**Председатель**

Л.Л. Товажнянский, д-р техн. наук, проф.

**Секретарь координационного совета**

К.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц.

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.

Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.;

М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.;

А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;

В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.;

М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;

Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.;

Б.Т. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.;

Л.М. Бесов, д-р ист. наук, проф.;

Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;

И.Ф. Доминин, д-р техн. наук, проф.;

Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.;

П.Г. Перерва, д-р экон. наук, проф.;

В.И. Николаенко, канд. ист. наук, проф.;

В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.;

П.А. Качанов, д-р техн. наук, проф.;

С.И. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;

В.М. Кошелевник, д-р техн. наук, проф.;

В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;

Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.;

В.В. Епифанов, д-р техн. наук, проф.;

Ю.И. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

И.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Ответственный редактор:**

Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.

**Ответственный секретарь:**

В.В. Фролов, канд. техн. наук, доц.

С.С. Добротворский, д-р техн. наук, проф.;

В.Е. Карпусь, д-р техн. наук, проф.;

А.Я. Мовшович, д-р техн. наук, проф.;

Ю.А. Сизый, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. Хицан, д-р техн. наук, проф.;

А.А. Пермяков, д-р техн. наук, проф.;

А.Н. Шелковой, д-р техн. наук, проф.

---

Адрес редакколлегии: 61002, Харьков,  
ул. Фрунзе, 21. НТУ "ХПИ".  
Каф. ТМС, Тел. (057) 7076-625.

Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №40 . – 180с.

В збірнику представлені теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий. В области технологии машиностроения, металорежущего оборудования, оснастки, средств автоматизации.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"  
Протокол № 10 від «1» листопада 2011 р.**

**Д.В. СТАЛИНСКИЙ**, д-р. техн. наук, ген. д-р,

УкрДНТЦ «Енергосталь», Харьков;

**П.В. РОМАНЧЕНКО**, инж., УкрДНТЦ «Енергосталь», Харьков;

**Ю.А. СИЗЫЙ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков.

## ВИБРАЦИИ РУЧНОЙ ШЛИФОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОЧЕМ И ХОЛОСТОМ ХОДЕ

У статті розглядається модель вібрації ручної шліфувальної машини при холостому ході, тобто при навантаженні її лише дисбалансом круга, і при робочому ході з навантаженням машини ще і силою різання.

The article deals with the vibration model of a manual grinding machine during idle running, i.e. when it is only loaded with circular unbalance, as well as under operating conditions, when the machine is also loaded with the cutting force.

В статье рассматривается модель вибрации ручной шлифовальной машины при холостом ходе, т.е. при нагружении ее только дисбалансом круга, и при рабочем ходе с нагружением машины еще и силой резания.

Ключевые слова: Ручная шлифовальная машина, абразивный круг, среднеквадратическая виброскорость, динамическая модель

В статьях [1, 2] описана динамическая модель ручной шлифовальной машины (РШМ) модели ИП 2001, предназначенной для работы с кругами ПП 150х25х32 и ПП 125х25х32.

Графическая модель динамической системы «абразивный круг – РШМ – оператор» показана рис.1. В отличие от статьи [1] графическая модель на рис.1 дополнена видом по стрелке А с силами  $F_c$ ,  $F_{cp}$ ,  $F_{pr}$  и  $F_p$  силы  $F_c$ ,  $F_{cp}$  это центробежные силы эксцентричности оси вращения относительно оси круга и от смещения центра тяжести круга за счет непараллельности его торцов. Векторы этих осей показаны произвольно. Векторы же силы прижима  $F_{pr}$  и резания  $F_p$  показаны в направлениях к и от шлифуемой поверхности.

На этом рисунке шлифовальная машина представлена единичной массой  $m_1$ , которая сосредоточена в центре ее тяжести в точке О. Машина, удерживаемая двумя руками оператора, которые моделируются массами  $m_2$  и  $m_3$ , соответственно для левой и правой рук оператора. Руки присоединены к машине прижимами жесткостью  $C_1$  и  $C_2$ , а к телу оператора – пружинами жесткостью  $C_3$  и  $C_4$ . Рассеивание колебаний учтено демпферами с коэффициентами демпфирования  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ .

В модели принимается движение рук, т.е. масс  $m_2$  и  $m_3$  только в направлении оси X и координатами движения рук будут соответственно перемещения  $X_2$  и  $X_3$ . Шлифовальная машинка под действием центробежных сил  $F_c$ ,  $F_{cp}$ , а также под действием силы резания  $F_p$  и силы

прижима круга к зачищаемой поверхности  $F_{pr}$ , может перемещаться поступательно вдоль оси X и координата такого перемещения  $X_1$ . Кроме этого, машина может совершать поворот вокруг оси O на угол  $\phi$ . Таким образом, у модели четыре координаты перемещения  $\phi$ ,  $X_1$ ,  $X_2$  и  $X_3$ .

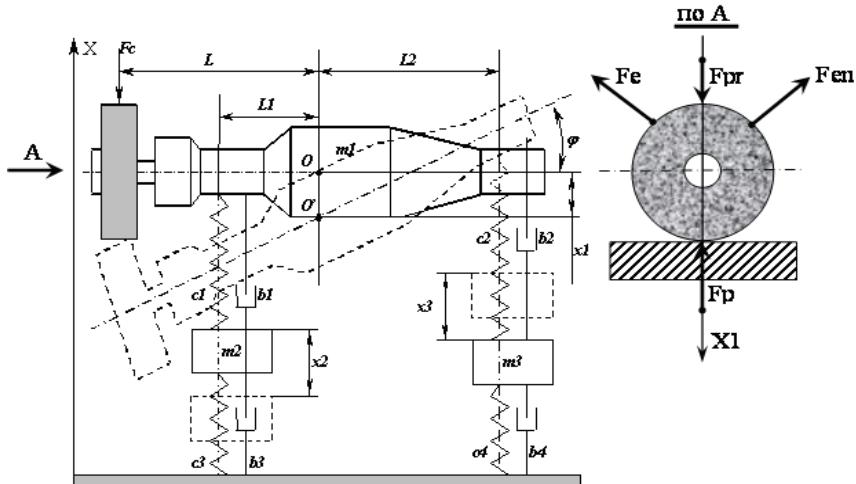


Рис. 1 – Графическая модель динамической системы  
«Абразивный круг – РШМ – оператор»

В [1] описана математическая модель динамической системы «круг – РШМ – оператор» которая, с учетом только воздействия на круг центробежной силой, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \frac{1}{I}(F_u L - b_1 L_1 \dot{q}_1 + b_2 L_2 \dot{q}_2 - c_1 L_1 q_1 + c_2 L_2 q_2); \\ \ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1}(F_u - b_1 \dot{q}_1 - b_2 \dot{q}_2 - c_1 q_1 - c_2 q_2); \\ \ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2}(b_1 \dot{q}_1 - b_3 \dot{x}_2 + c_1 q_1 - c_3 x_2); \\ \ddot{x}_3 = \frac{1}{m_3}(-b_2 \dot{q}_2 - b_4 \dot{x}_3 - c_2 q_2 - c_4 x_3). \end{array} \right\}, \quad (1)$$

$q_1 = (x_1 + \phi L_1 - x_2)$  – деформация упругой связи левой руки оператора с РШМ;  
 $q_2 = (x_1 - \phi L_2 + x_3)$  – деформация упругой связи правой руки оператора с РШМ.

Система уравнений (1) позволяет моделировать вибрации РШМ, в частности, перемещения левой и правой рукояток машины только при холостом ходе.

При рабочем ходе, т.е. при шлифовании на шлифовальный круг, как показано на рис.1, действует сила, которая является векторной суммой сил  $F_c$ ,  $F_{pr}$ ,  $F_{cp}$  и  $F_p$ :

$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_{pr} + \vec{F}_{cn} + \vec{F}_p, \quad (2)$$

Рассматривая движения РШМ только вдоль оси X необходимо векторы  $\vec{F}_c$ ,  $\vec{F}_{pr}$ ,  $\vec{F}_{cn}$ ,  $\vec{F}_p$  проектировать на ось X.

Сила прижима  $F_{pr}$  направлена к шлифуемой поверхности, т.е. в положительном направлении оси X1, а сила резания, ее нормальная составляющая  $F_p$  – в отрицательном направлении оси X1.

Центробежная сила является в свою очередь векторной суммой центробежных сил  $\vec{F}_c$ ,  $\vec{F}_{cn}$ .

Таким образом, математическая модель динамической системы «круг – РШМ – оператор» при рабочем ходе будет отличаться от модели (1) при холостом ходе только тем, что вместо  $F_C$  будет сила F.

Необходимо отметить то, что эксцентричность оси вращения круга является опять же векторной суммой смещения:

- оси керна пресс-формы относительно оси отверстия в ее кольце [2];
- оси втулки, устанавливаемой перед прессованием на керн от оси керна;
- оси круга со втулкой относительно оси вращения шпинделя РШМ при установке круга на него.

В настоящей статье не рассматривается методика расчета всех этих смещений и вычислений смещения центра тяжести от эксцентричности  $X_C$  и от непараллельности торцов  $X_H$ .

Рассмотрим расчет и моделирование всех составляющих силы F, т.е.  $F_{pr}$ ,  $F_C$ ,  $F_{cp}$ ,  $F_p$ .

Нормальная составляющая силы резания  $F_p$  принимается прямо-пропорциональной глубине шлифования  $h$  при неизменных прочих условиях (скорости шлифования, скорости подачи материала детали и т.п.) и направленной в отрицательном направлении координаты X1:

$$F_p = -h \cdot C_p, \quad (3)$$

где  $C_p$  – жесткость процесса шлифования, определяется экспериментально.

Глубина шлифования  $h$  формируется значениями координат  $X_1$ ,  $\phi$  и радиальным биением круга, которое описывается косинусоидой

$$X_{rad} = X_C \cdot \cos \omega t, \quad (4)$$

где:

$X_C$  – эксцентричность оси наружной поверхности круга относительно оси его вращения;

$\omega$  – частота вращения, рад/с;

$t$  – время, с.

Суммарное значение глубины шлифования  $h$  получим суммированием  $X_1$ ,  $\phi \cdot L$  и  $X_{rad}$ :

$$h = X_1 + \phi \cdot L + X_{rad}, \quad (5)$$

где  $L$  – расстояние до круга вдоль оси шпинделя РШМ от центра тяжести РШМ.

При этом должно выполняться условие  $h > 0$ , т.е. круг должен быть внедрен в обрабатываемую поверхность.

В (5) перемещение круга вдоль  $X$  за счет поворота РШМ на угол  $\phi$  принимается равным  $L \cdot \phi$ , т.е. принимаем дугу  $L \cdot \phi$  равной ее проекции на ось  $X$ . Такое допущение приемлемо при малых значениях  $\phi$ , что имеет место при вибрации РШМ.

Таким образом, подставляя (5) и (4) в (3), получим силу резания  $F_p$ :

$$F_p = -(X_1 + \phi \cdot L + X_c \cos \omega t) \cdot C_p, \quad (6)$$

Сила прижима  $F_{rg}$  принимается постоянной и равной, например 50Н.

Проекция центробежной силы на ось  $X$  является векторной суммой центробежных сил от непараллельности торцов круга  $F_{cp}$  и от эксцентричности его  $F_c$ .

В [2] получена формула расчета  $F_c$  от эксцентричности оси вращения круга  $X_c$  и показано, что смещение центра тяжести круга практически равно эксцентричности  $X_c$ . Поэтому:

$$F_q = X_c \cdot \cos \omega t \cdot m \cdot \omega^2, \quad (7)$$

где  $m$  – масса круга.

Составляющую центробежной силы от непараллельности торцов круга рассчитываем следующим образом:

$$F_{cn} = X_n \cos(\omega t + \phi) \cdot m \omega^2, \quad (8)$$

где  $X_n$  – смещение центра тяжести круга за счет непараллельности торцов;  $\alpha$  – угол между векторами  $F_{cn}$  и  $F_q$

На рис. 2 приведена распечатка блок-схемы моделирующей внешние воздействия в пакете «VisSim», т.е. силу  $F$ , приложенную к шлифовальному кругу при рабочем ходе, а также исходные данные по параметрам РШМ с руками оператора. Эти данные приведены вверху рис.2 применительно к РШМ ИП 2001 на этом же рисунке приведены графики:

верхний – изменение глубины шлифования  $h$ ;

средний – графики сил  $F$ ,  $F_p$ ,  $F_c$ ,  $F_{cp}$ ;

нижний – результаты моделирования, т.е. среднеквадратическая скорость левой рукоятки РШМ-Vckl.

Значения величин  $X_n=0,000279\text{м}$ ,  $X_c=0,0001\text{м}$  полученные для следующих условий прессования круга (размеров деталей пресс-формы [2]) и установки на шпиндель РШМ: - круг ПП 150x25x32;

- посадка верхняя плита – керн 32h9/f9;

- посадка верхняя плита – кольцо 150h9/f9;

- размер отверстия во втулке, с которой прессуется круг  $32^{+0,05}$ ;

- толщина верхней плиты 25мм;

- размер посадочной поверхности под круг на шпинделе РШМ 32h6

Из верхнего графика рис.2 видно, что круг за счет вибрации РШМ и радиального его биения внедряется в обрабатываемую поверхность периодически с максимальной глубиной 0,25мкм.

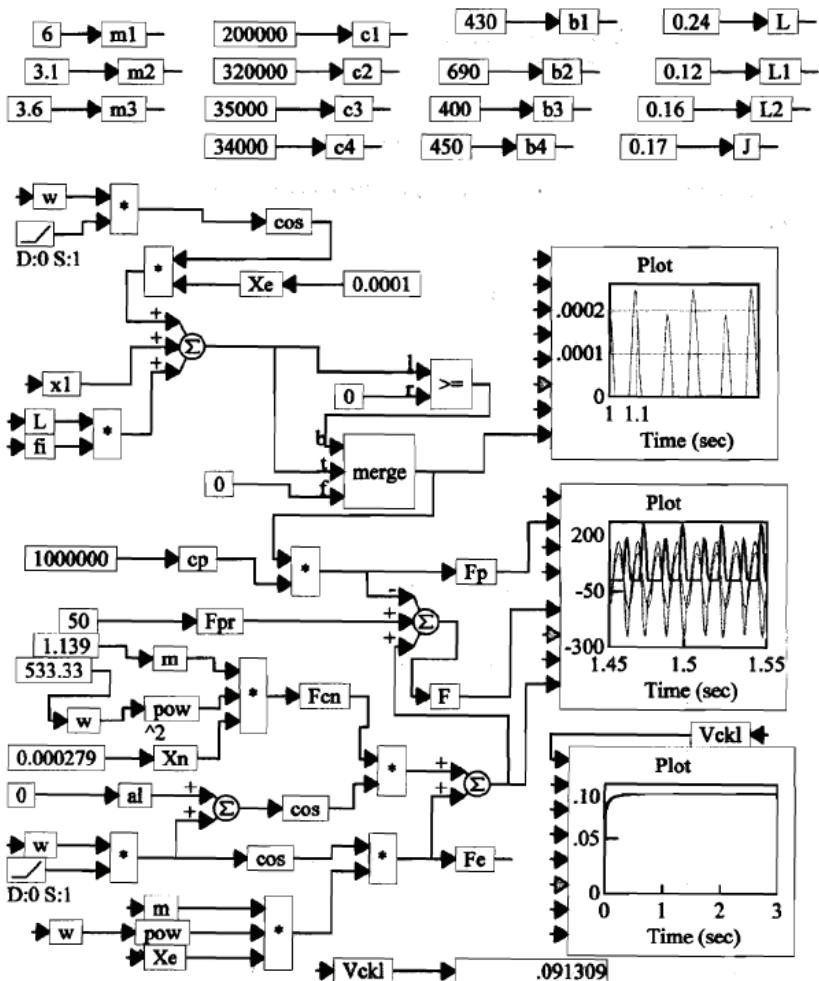


Рис.2 – Программа введения исходных данных моделирования и расчета внешних сил воздействия на шлифовальный круг

Суммарная сила  $F$ , воздействия на шлифовальный круг колеблется в пределах от  $-250\text{Н}$  до  $+170\text{Н}$ . Установившееся значение среднеквадратической выброскорости левой рукоятки РШМ при  $\alpha=0$  достигает значения  $9,1 \text{ см/с}$ , что значительно выше предельно допустимого значения  $2,5\text{см/с}$  выброскорости из условия санитарных норм.

Изменяя угол  $\alpha$  между векторами непараллельности торцов и эксцентричности видно, как он влияет на выброскорость. Так при  $\alpha=1,57\text{рад}$  ( $90^\circ$ )  $V_{ckl}$  уменьшается до  $7,1\text{см/с}$  и наименьшее ее значение будет при  $\alpha=2,355\text{рад}$  ( $135^\circ$ ) равное  $7,04\text{см/с}$ .

Известно, что абразивные круги для РШМ формуются методом холодного и горячего прессования. При холодном прессовании непараллельность торцов не ведет к смещению центра тяжести круга, что имеет место при горячем прессовании.

Для моделирования вибраций при рабочем ходе для круга холодного прессования надо в блок-схеме рис.2 задать  $X_p=0$ . Для описанных условий получаем  $V_{ckl}=3,3\text{см/с}$ . Таким образом, уменьшение  $V_{ckl}$  более чем в два раза указывает на большую роль непараллельности торцов на вибрацию РШМ с кругами горячего прессования.

Определенный интерес представляет сравнение уровня вибрации при холостом и рабочем ходах. Условия вибраций при холостом ходе моделируются блок-схемой рис.2 при разрыве связей  $F_p$ ,  $F_{pr}$  с сумматором на котором они суммируются с силами  $F_{cp}$  и  $F_c$ . Так, для условий холостого хода с кругом горячего прессования получается  $V_{ckl}=5,9\text{см/с}$ , а с кругом для холодного прессования  $V_{ckl}=1,54\text{см/с}$ .

Таким образом, разработана динамическая модель системы «круг – РШМ – оператор» для условий рабочего и холостого хода. Установлено, что для условий рабочего хода вибрации РШМ выше чем, при условиях холостого хода.

Установлено также большое влияние на уровень вибрации РШМ с кругами горячего прессования непараллельности торцов. Показано, что уровень вибраций РШМ с кругами холодного прессования значительно меньше, чем с кругами горячего прессования. Установлено заметное влияние на уровень вибраций РШМ сдвига по фазе  $\alpha$  между центробежными силами от непараллельности торцов круга и эксцентричности круга относительно оси его вращения.

**Список литературы:** 1. Стalinский Д.В., Сизый Ю.А., Яровая Л.Г., Романченко П.В. Влияние неуравновешенности масс абразивных кругов на вибрационную характеристику работы ручных шлифовальных машин. / Екологія та виробництво. – 2002. - №2-3. – с. 53 – 56.  
2. Д.В. Stalinский, Л.Г. Яровая, П.В. Романченко УкрГНТЦ «Энергосталь», г. Харьков, Украина Влияние точности изготовления и эксплуатационных свойств абразивного инструмента на условия работы операторов ручных шлифовальных машин. / сб. научн. статей к XI Международной научно-технической конференции «Экология и здоровье человека. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов». – Харьков. – УкрГНТЦ «Энергосталь», 2003. – Т1. – с. 89 – 97.

Поступила в редакцию 09.06.11

**Г.И. КОСТЮК**, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**К.П. ИСЯК**, ген. д-р, з-д «Машгидропривод», Харьков;  
**И.С. ТАТАРКИНА**, инж., ХНАДУ, Харьков;  
**А.А. БРЕУС**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 40Х РИ С ПОКРЫТИЕМ**

Наведено експериментальні результати дослідження динамічного зношування різальних пластин «Сандвік Коромант» H13A з покриттям 0,18HfN+0,82ZrN при точенні загартованої сталі 40X і показано можливість прогнозування їх стійкості та об'єму матеріалу, що зникається за термін стійкості.

Ключові слова: різальні пластиини, зношування, покриття, стійкість, об'єм матеріалу, що зникається за період стійкості.

Experimental results of research of dynamic deterioration of cutting plates of "Sandvik Koromant" H13A with a covering 0,18HfN+0,82ZrN are resulted at точении the tempered steel 40X and possibility of forecasting of their firmness and the removed volume of a material during firmness is shown.

Keywords: cutting plates, deterioration, a covering, the firmness, the removed volume of a material during firmness.

Приведены экспериментальные результаты исследования динамического износа режущих пластин «Сандвик Коромант» H13A с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN при точении закаленной стали 40Х и показана возможность прогнозирования их стойкости и снимаемого объема материала за период стойкости.

Ключевые слова: режущие пластины, износ, покрытие, стойкость, снимаемый объем материала за период стойкости.

**1. Введение.** Наплавка твердых сплавов на детали, закалка, цементация и другие виды упрочнений приводят к существенному изменению геометрии детали в результате ее коробления из-за чего она требует последующей обработки, чаще всего шлифования, но многие дефекты не могут быть устранены шлифованием. И тогда на первый план выступает точение, которое обеспечивает достаточную точность и требуемую шероховатость.

В то же время наплавка твердых сплавов и детонационное напыление не позволяют использовать детали без последующей формообразующей обработки, т.е. требуют использования точения, строгания, фрезерования или другой механической обработки. Все это говорит об актуальности и важности проводимых исследований.

**2. Приборы, материалы и методы исследования.** Исследовался износ режущего инструмента (РИ) – пластины H13A производства фирмы «Сандвик Коромант» с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN при точении стали 40Х, закаленной в масле при температуре 850° С (выдержка 20 минут) и высокий отпуск при температуре 650° С (выдержка 50 минут). Структура стали – сорбит отпуска, твердость 40 HRC.

Покрытие  $0,18\text{HfN}+0,82\text{ZrN}$  наносилось при потенциале на подложке 350 В, давлении азота  $P = 3 \cdot 10^{-3}$  мм.рт.ст, время нанесения покрытия – 30 мин, микротвердость –  $H_\mu = 36$  ГПа.

Износ измерялся на инструментальном и оптическом микроскопах, где определялись также размеры лунки на передней поверхности.

Точение производилось на модернизированном станке 1А62 при режимах резания: число оборотов  $n = 630$  об/мин, глубина резания – 0,5 мм, подача – 0,15 мм/об.

**3. Результаты эксперимента и их обсуждение.** Исследовалась динамика износа по передней и задней поверхностям, а также размеры лунки. Проводилось контрольное фотографирование поверхностей пластины «Сандвик Коромант» H13A.

Так, износ по передней  $h_{\text{пп}}$  и задней  $h_{\text{зп}}$  поверхностям во времени показан на рис. 1. Видно, что скорость износа по передней поверхности существенно снижается во времени, тогда как скорость износа по задней поверхности после приработки сохраняется постоянной.

Анализ зависимости глубины лунки от времени (рис. 2) свидетельствует о том, что во время приработки РИ и обрабатываемого материала скорость износа высокая, далее во времени она снижается и к 480 с работы стабилизируется и глубина лунки не растет.

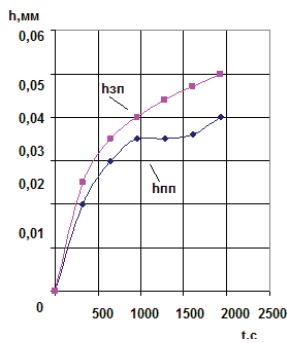


Рис. 1. Зависимость износа по задней ( $h_{\text{зп}}$ ) и передней ( $h_{\text{пп}}$ ) поверхностям пластины с покрытием от времени точения закаленной стали 40Х

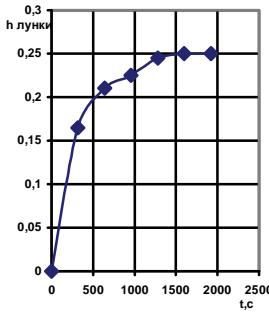


Рис. 2. Зависимость глубины лунки на передней поверхности пластины с покрытием  $0,18\text{ HfN}+0,8\text{ ZrN}$  от времени работы РИ

Для полноты исследования было проведено фотографирование передней и задней поверхностей режущей пластины после ее работы в течение 320 с (а), 640 с (б), 960 с (г), 1280 с (е), 1600 с (з), 1920 с (к) (рис. 3). Видно, что характер износа существенно отличается от случая обработки незакаленных сталей:

1. На передней поверхности появляется две лунки вблизи режущей кромки, а не одна, как при обработке незакаленных сталей ( $t = 320$  с, рис. 3, а).

2. В дальнейшем происходит объединение этих лунок в одну узкую по длине и большую по ширине (рис. 3, б,  $t = 640$  с).

3. При последующей обработке реализуется развитие размеров лунки по длине (рис. 3, г,  $t = 960$  с).

4. По задней поверхности после приработки ( $t = 640$  с) в дальнейшем износ растет линейно (рис. 3, в, 3, д, 3, ж и 3, л).

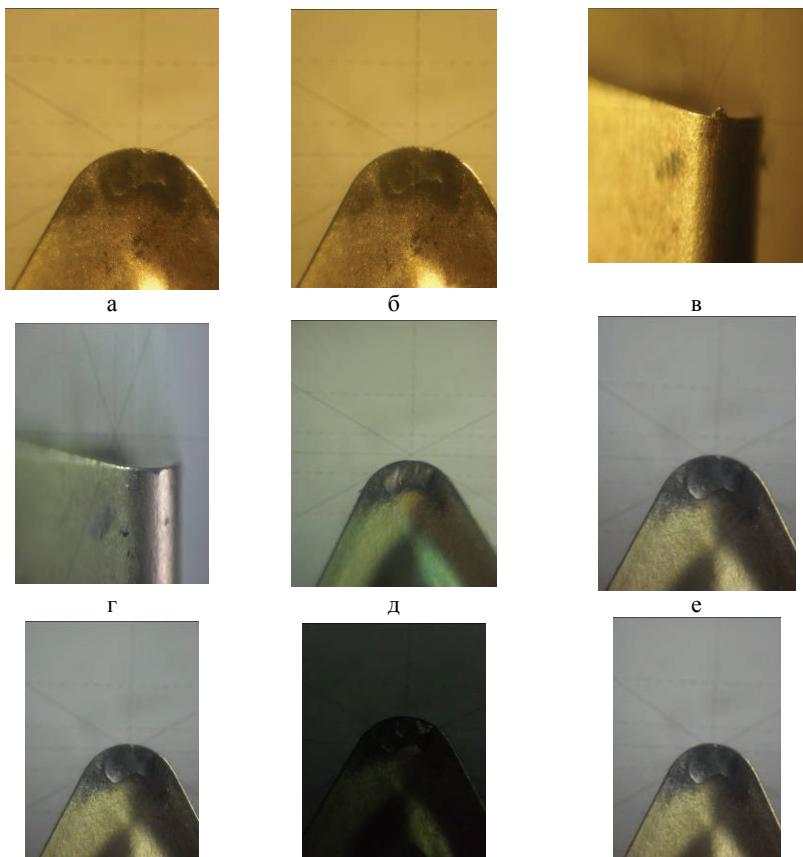


Рис. 3. Фотографии износа передней и задней поверхностей режущей пластины после ее работы в течение 320 с (а), 640 с (б), 960 с (г), 1280 с (е), 1600 с (з), 1920 с (ж)

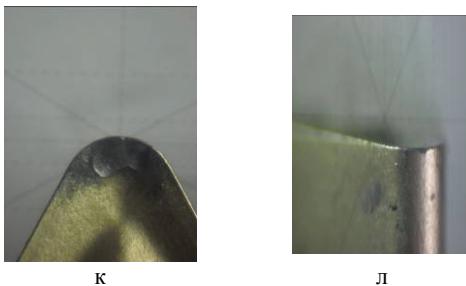


Рис. 3. Окончание

Для выявления эффективности обработки была построена зависимость снимаемого объема материала за время работы от износа по задней поверхности, которая показана на рис. 4. Видно, что износ сначала растет до 320 с, а затем скорость роста стабилизируется. Снимаемый объем обработки линейно растет, что дает возможность его прогнозировать до критического износа.

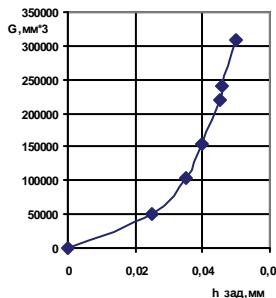


Рис. 4. Зависимость снимаемого объема материала за период стойкости от износа по задней поверхности пластины с покрытием

Во все исследованные промежутки времени необходимо определить эффективность обработки, которую оценим по величине снимаемого объема за период стойкости и динамике износа по задней поверхности (примем критерием износа достижение износа по задней поверхности  $h_{зп} = 0,4$  мм). Мы сможем определить снимаемый объем за период стойкости по величине прогнозируемой величины стойкости:

$$T_{np} = \frac{h_{зп, kp}}{V_{изн.зп}} = \frac{h_{зп, kp} \times (t_3 - t_2)}{h_{зп3} - h_{зп2}}. \quad (1)$$

Получив период стойкости, можем получить величину прогнозируемого снимаемого объема за период стойкости как

$$G_{np} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times T_{np} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times \frac{h_{зп, kp} \Delta t_{32}}{h_{зп3} - h_{зп2}}, \quad (2)$$

где  $h_{зп kp}$  – допускаемый износ по задней поверхности;  $h_{зп 3}$  – износ по задней поверхности к концу третьего периода работы; а  $h_{зп 2}$  – износ по задней

поверхности к концу второго периода работы;  $t_3$  и  $t_2$  – время работы в третьем и во втором периодах, а  $G_3$  и  $G_2$  – снимаемый объем материала за время  $t_3$  и  $t_2$ .

Такой подход позволяет прогнозировать снимаемый объем за период стойкости без проведения полномасштабного эксперимента.

#### **Выводы.**

1. Показана возможность прогноза снимаемого объема за период стойкости и стойкости пластины с покрытием при заданных режимах резания без полномасштабного эксперимента.

2. Показано, что характер динамики износа на передней поверхности при обработке закаленной стали 40Х отличается от известных ранее: сначала вблизи режущей кромки появляются две лунки на передней поверхности, которые со временем соединяются (находясь вблизи режущей кромки), а после соединения увеличивается длина лунки, причем глубина лунки сохраняется и у самой режущей кромки покрытие продолжает успешно работать.

3. Принципиально доказана возможность замены шлифования точением при обработке закаленных сталей.

**Список литературы:** 1. Kostyuk G.I. The effective cutting tools having the coating and hardened layers. / Monograph-reference book // G.I. Kostyuk // National aerospace university named by N.E. Gukovsky «Kharkov aviation institute». 2007. – 633 p. 2. Костюк Г.И. Физико-технические основы робототизированного производства: учеб. пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. – 612 с.

*Поступила в редколлегию 08.06.11*

УДК 621.9.06

**А.Я. МОВШОВИЧ**, д-р техн. наук, проф., ХГНІІТМ, Харків;

**М.Е. ФЕДОСЕЕВА**, інж., ХГНІІТМ, Харків;

**В.В. АГОРКОВ**, інж., ХГНІІТМ, Харків.

## **УНИФІКАЦІЯ І СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧЕСКОЇ ОСНАСТКИ – ВАЖНЕЙШЕ УСЛОВІЕ УСКОРЕННОЇ ТЕХНОЛОГІЧЕСКОЇ ПОДГОТОВКИ ПРОІЗВОДСТВА**

Розглянуто питання стандартизації технологічної оснастки та її вплив на якість і прискорення технологічної підготовки виробництва.

Ключові слова: стандартизація, уніфікація, агрегатування, технологічне оснащення, взаємозамінність, гнучкість, переналагодження.

The questions of standardization of the technological rigging and its influence are considered on quality and acceleration of technological preparation of production.

Keywords: standardization, unification, industrial equipment, interchangeability, flexibility, readjustment.

Рассмотрены вопросы стандартизации технологической оснастки и ее влияние на качество и ускорение технологической подготовки производства.

Ключевые слова: стандартизация, унификация, агрегатирование, технологическая оснастка, взаимозаменяемость, гибкость, переналадка.

**Введение.** Характерной особенностью современного научно-технического прогресса является переход к рыночной экономике и связанное с этим ускоренное обновление и модернизация выпускаемых изделий, перевооружение и строительство новых предприятий, создание и внедрение новых, более эффективных технологий и средств механизации и автоматизации процессов производства. При этом неизбежно снижается серийность выпуска продукции, усложняются вопросы использования оборудования, имеющегося на предприятии, ставятся новые задачи в части гибкости технологической оснастки при замене или модернизации объектов производства, что теперь характерно для подавляющего большинства действующих предприятий.

Важнейшее значение приобретают вопросы обеспечения высокого стабильного качества продукции и его конкурентоспособности на отечественных и мировых рынках.

Решение всей этой комплексной задачи возможно осуществить только методами стандартизации и унификации, с помощью которых можно найти оптимальные решения, отвечающие поставленной задаче.

Сложность ее решения в части технологической оснастки, занимающей до 40...60 % в себестоимости выпускаемых изделий, заключается в разобщенности и разнохарактерности нормативно-технической документации, действующей в различных отраслях машиностроения Украины, которая дублирует друг друга и включает в себя противоречивые требования, что объясняется как техническими, так и организационными причинами [2, 3]

**Результаты исследования.** Стандартизация технологической оснастки в первую очередь предусматривает создание единых систем конструкторской, технологической и производственно-технической документации в целях устранения имеющегося многообразия и дублирования, а также создание условий для компьютерных технологий и автоматизации производственно-управленческих процессов труда.

Наиболее эффективным видом оснастки в условиях многономенклатурного производства при частой смене выпускаемых машин является стандартная переналаживаемая оснастка многократного применения, характерным представителем которой являются универсально-сборные приспособления (УСП). Система универсально-сборных приспособлений нашла применение на машиностроительных предприятиях различных отраслей промышленности как способ повышения оснащенности технологических процессов, сокращения сроков подготовки производства,

материальных и трудовых затрат на изготовление оснастки в условиях многономенклатурного производства.

Сущность системы УСП заключается в том, что предприятие, располагая комплектом стандартных деталей и сборочных единиц, путем их различного сочетания собирает из них приспособление.

Приспособления, собранные из элементов УСП, обладают всеми качествами специальных приспособлений, имея важное преимущество – после обработки деталей они разбираются на составные части и используются для сборки других приспособлений.

Элементы УСП постоянно находятся в обращении: сборка приспособления – эксплуатация на станках – разборка – хранение – сборка приспособлений новой конструкции.

Этот процесс повторяется непрерывно в течение всего срока службы комплекта УСП, который составляет 12–15 лет.

Наряду с долговечностью элементы УСП отличаются универсальностью, взаимозаменяемостью и взаимособираемостью комплектов с различными пазами.

Применение системы УСП позволяет ликвидировать наиболее трудоемкие этапы подготовки производства – разборку чертежей и изготовление оснастки в металле. Несмотря на высокую стоимость комплектов УСП, первоначальные затраты на их приобретение окупаются в течение одного года их эксплуатации, так как расходы, связанные с эксплуатацией УСП, составляют около 5% трудоемкости изготовления заменяемой ими специальной оснастки [3].

Одним из важнейших элементов стандартизированной универсально-сборочных приспособлений является обеспечение взаимозаменяемости элементов УСП. Актуальность стандартизации объясняется созданием условий серийного производства технологической оснастки для всех отраслей машиностроения.

На рис. 1 показана конструкция приспособлений, собранных из элементов УСП для механической обработки и сборки [2].

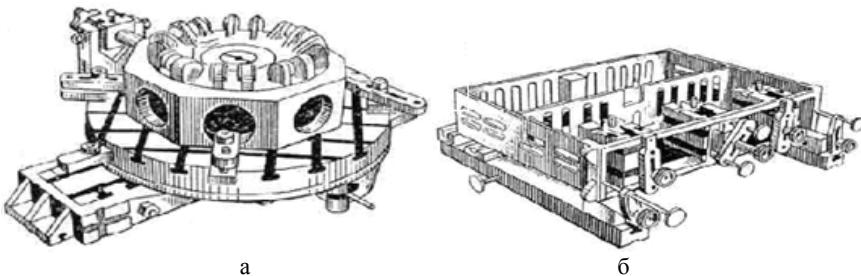


Рис. 1. Приспособления, собранные из элементов УСП:  
а – для фрезерования; б – для сборки каркаса прибора

В процессе стандартизации в качестве ее методов, используются унификация и агрегатирование.

При разработке различных видов переналаживаемой технологической оснастки наибольшее развитие получила унификация.

Унификация в широком смысле слова представляет собой сведение неоправданного многообразия изделий, сборочных единиц, деталей, технологических процессов, оснастки и других вещественных факторов производства к технически и экономически оправданному минимуму, позволяющему наилучшим образом выполнить работы по изготовлению выпускаемой продукции.

Основные цели и задачи унификации технологической оснастки:

- сокращение количества типов и типоразмеров, совершенствование конструкций оснастки и ее элементов, создание предпосылок для развития специализации и кооперирования инструментального производства, централизованного обеспечения предприятий прогрессивной оснасткой и ее элементами;
- сокращение сроков подготовки производства новых изделий и повышение уровня оснащенности производства;
- повышение уровня технологии и организации инструментального производства;
- повышение качества конструкторской и технологической документации, расширение возможностей использования средств ускоренного проектирования оснастки и технологии ее изготовления;
- установление единых норм, требований и правил выбора, проектирования и применения технологической оснастки, процессов ее изготовления, методов и средств организации инструментального производства.

Исходя из целей и задач, к основным объектам унификации технологической оснастки следует отнести: конкретные конструкции, методы и средства их проектирования, технические требования к изготовлению, типовые технологические процессы и средства инструментального производства, нормы, методы и требования в области технологической оснастки.

В основе унификации лежит классификация конструкций технологической оснастки. На основании подробной классификации устанавливаются доминирующие признаки, обуславливающие принципиальную конструкцию, структурный состав и другие конструктивно-технологические признаки, общие для данной группы или типа.

Особое место в унификации технологической оснастки занимает принцип агрегатирования — метод проектирования, сборки и эксплуатации, основанный на рациональном разделении конструкций оснастки на агрегаты, каждый из которых выполняет определенную функцию и представляет собой законченное изделие. Оно может многократно использоваться при создании различных модификаций оснастки одного или нескольких типов. Примером

такого унифицированного агрегата служат тиски, на базе которых могут быть созданы сверлильные, фрезерные и расточные приспособления для обработки различных групп деталей.

Конструктивную унификацию технологической оснастки можно разделить на такие основные направления: размерная, типовая, размерно-типовая и модификационная унификация.

Размерно-типовая унификация – это унификация конструкций аналогичного функционального назначения, не имеющих конструктивного подобия и отличающихся размерами основных параметров [1].

На рис. 2 показаны унифицированные детали и узлы сборно-разборных приспособлений, которые разделяются на четыре группы:

- 1 – плиты;
- 2 – угольники, швеллеры, тавры, корпусные детали;
- 3 – зажимные узлы,
- 4 – элементы, обеспечивающие жесткость [2].

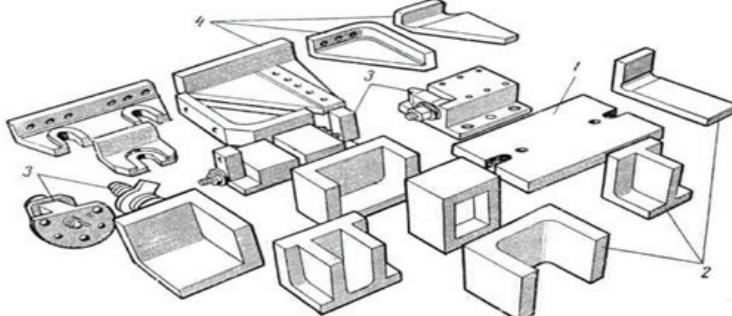


Рис. 2. Унифицированные детали и узлы сборно-разборных приспособлений

Использование унифицированных конструкций, размерных и других параметров обеспечило основной принцип обратимости технологической оснастки – взаимозаменяемость ее элементов и сборки необходимых компоновок без дополнительной механической обработки.

Это позволило создать различные, но сочетающиеся между собой системы технологической оснастки, состоящие из унифицируемых агрегатируемых элементов или базисных агрегатов и сменных наладочных элементов.

На рис. 3 показаны агрегатированный базовый групповой кондуктор для сверления отверстий в деталях типа валиков и вилок, а также элементы, из которых компонуется этот кондуктор [2].

Развитие агрегатирования и унификации в машиностроении позволило коренным образом изменить сложившуюся практику создания новых видов технологической оснастки, отвечающих высокой производительности, качеству, надежности, долговечности и обеспечивающих возможность их быстрой переналадки в эксплуатации при смене объектов производства.

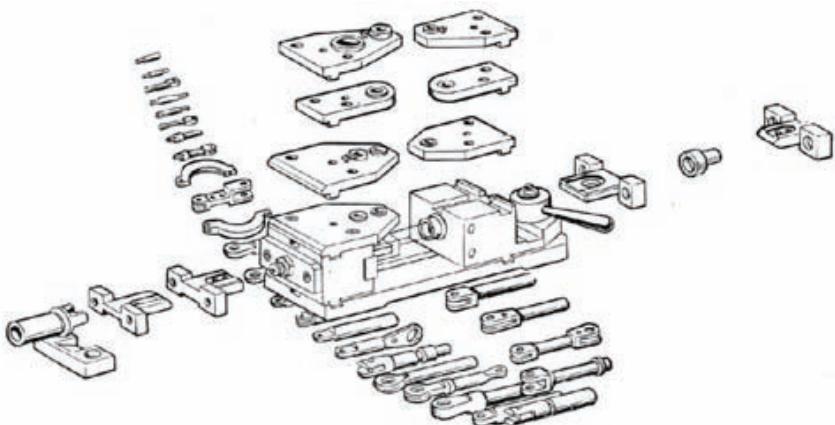


Рис. 3. Групповой кондуктор для сверления отверстий в деталях типа валиков и вилок

#### **Выводы:**

1. К числу главных задач, стоящих перед машиностроительными предприятиями Украины, относится обеспечение выпуска конкурентоспособных изделий.

2. Одним из путей решения этой сложной задачи есть стандартизация, унификация и агрегатирование переналаживаемых средств технологического оснащения, составляющих до 40...60% в общем объеме технологической подготовки производства изделий машиностроения.

3. Стандартизация технологической подготовки производства основывается на создании единой системы конструкторско-технологической документации, устраниющей ее многообразие и дублирование в различных отраслях промышленности и обеспечивающей взаимозаменяемость элементов и узлов технологической оснастки, возможность их многократного использования в конструкциях приспособлений различного технологического назначения.

4. При этом решаются задачи повышения качества и конкурентоспособности изделий, сокращения сроков и затрат на технологическую подготовку производства.

**Список литературы:** 1. Мовшович А.Я., Кобзев А.С., Горбулин В.П. Обратимая технологическая оснастка для ГПС. – К.: Техника, 1992. – 215 с. 2. Кохтев А.А. Основы стандартизации. – М.: Выш. Шк., 1971. – 295 с. 3. Шац А.С., Бирюков В.Д., Титов Б.К. Технологическая оснастка многократного применения. – М.: Машиностроение, 1981. – 403 с.

Поступила в редакцию 7.07.11

**B. E. КАРПУСЬ**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Харків;  
**O. В. КОТЛЯР**, канд. техн. наук, асис., НТУ «ХПІ», Харків.

## ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНОГО МЕТОДУ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

У статті обґрунтованій вибір найбільш ефективного методу багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів механічної обробки деталей. Проведений порівняльний аналіз результатів вибору оптимального типу токарного верстата, отриманих різними методами багатокритеріальної оптимізації. Розроблені рекомендації щодо вибору найбільш ефективного методу багатокритеріальної оптимізації з урахуванням виробничих умов.

Ключові слова: технологічний процес, багатокритеріальна оптимізація, критерії оптимальності,, методи оптимізації.

The article substantiated choice of the most favourable method for multiobjective optimization of machine working details technological process. The result choice lathe optimal type of sundry method multiobjective optimization are proposed. The recommendation choice of the most favourable method for multiobjective optimization are developed.

The key words: technological process, multicriterion optimization, criterions optimization, methods optimization.

В статье обоснован выбор наиболее эффективного метода многокритериальной оптимизации технологических процессов механической обработки деталей. Проведен сравнительный анализ результатов выбора оптимального типа токарного станка, полученных различными методами многокритериальной оптимизации. Разработаны рекомендации, которые касаются выбора наиболее эффективного метода многокритериальной оптимизации с учетом производственных условий.

Ключевые слова: технологический процесс, многокритериальная оптимизация, критерии оптимальности, методы оптимизации.

Важливою проблемою машинобудівних підприємств є забезпечення конкурентоздатності продукції з урахуванням постійно зростаючих вимог до якості виробів та обмеження витрат трудових, матеріальних, фінансових і енергетичних ресурсів. В умовах ринкової економіки оцінку виробничої діяльності підприємства, пов'язану з процесом виготовлення деталі та визначення найвигіднішого технологічного процесу (ТП) слід проводити на підставі багатокритеріальної оптимізації з урахуванням системи критеріїв, яка характеризує організаційно-технологічну структуру машинобудівного виробництва і дозволяє найбільш точно визначити область ефективного застосування технологічного обладнання. Багатокритеріальний вибір оптимальних варіантів ТП механічної обробки деталей дозволить підвищити конкурентоздатність продукції машинобудівних підприємств [1-4]. Метою даної роботи є розробка рекомендацій стосовно вибору найбільш раціонального методу багатокритеріальної оптимізації в залежності від кількості критеріїв оптимальності та виробничих умов.

Багатокритеріальна оптимізація технологічних рішень здійснюється різними методами, а саме: вагових коефіцієнтів, близькості до ідеальної точки; послідовних поступок; нечітких множин; аналізу ієрархій. Вони відрізняються за трудомісткістю та складністю оптимізаційних розрахунків, а також кількістю суб'єктивної інформації, що необхідно отримати від особи або групи осіб, які приймають рішення. Суб'єктивною інформацією є визначення вагомості окремих критеріїв, ранжування критеріїв за значимістю, призначення поступок та ін.

Неоднорідність та неоднакова кількість вихідної інформації, а також різна ступінь складності розрахунків призводять до суперечливості результатів, отриманих різними методами. Тому при виборі методу багатокритеріальної оптимізації ТП слід враховувати його принципові особливості і їх вплив на результат розрахунку.

З метою вибору раціонального методу оптимізації був проведений порівняльний аналіз результатів оптимізації токарних операцій, отриманих різними методами оптимізації. Токарна обробка є найбільш трудомісткою при обробці тіл обертання і відзначається багатоваріантністю, а тому в найбільшій мірі впливає на вибір найвигіднішого варіанту ТП. Дослідження проводилися на прикладі вибору оптимального типу токарного верстата для обробки фланця. Розрахунки здійснювалися з урахуванням різної кількості типів верстатів, на яких можливе проведення обробки.

В якості критеріїв оптимальності використовувалися показники, які характеризують інтенсифікацію та прибутковість виробництва, ефективність використання енергетичних і фінансових ресурсів та надійність процесу функціонування обладнання і дозволяють об'єктивно уточнити та розширити область ефективного застосування ТП, а саме: інтенсивність формоутворення; інтенсивність маржинального прибутку; постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей; електромісткість прибутку та імовірність виконання виробничого завдання [5].

Інтенсивність формоутворення  $W_H$ , мм/хв являє собою фіктивну швидкість розосередженого впливу кінематично або структурно пов'язаних різальних інструментів на заготовку з урахуванням технологічних, конструктивних і експлуатаційних факторів. Цей критерій має ієрархічну структуру, що відповідає структурі технологічної системи та показника «щучна продуктивність».

Інтенсивність маржинального прибутку  $I_H$ , грн/хв відображає величину одержуваного маржинального прибутку від реалізації продукції, що припадає на одиницю часу, витраченого на її виробництво. Маржинальний прибуток згідно з методом часткового розподілення витрат - система "дірект-костінг" (direct costing), який в останні десятиріччя набув розвитку, визначається різницею між доходом та перемінними витратами, що залежать від обсягу виробництва.

Постійні витрати, що припадають на виробничу партію деталей  $S_P$ , грн у поєднанні з інтенсивністю маржинального прибутку дозволяють об'ективно оцінити економічну діяльність підприємства у продовж виконання виробничого завдання.

Електромісткість прибутку  $E_P$ , кВт/грн визначає відношення витрат електроенергії, спожитої в процесі виготовлення деталі до прибутку, отриманого в результаті її використання.

Імовірність виконання завдання  $P$  характеризує надійність процесу функціонування обладнання і дозволяє оцінити стохастичний зв'язок між необхідною та реально досягнутою продуктивністю, а також дозволяє визначити необхідний резерв часу, потрібний для виконання виробничого завдання із заданою імовірністю.

У табл. 1 наведені результати оптимізації, отримані різними методами оптимізації. У таблиці 1 використані такі позначення методів оптимізації: 1 - вагових коефіцієнтів; 2 - аналізу ієархій; 3 - близькості до ідеальної точки; 4 - послідовних поступок; 5 - нечітких множин.

Результати розрахунків дозволили виділити дві групи методів, які ґрунтуються на одинакових принципах оптимізації та забезпечують однакові результати. До першої групи входять метод вагових коефіцієнтів та аналізу ієархій, а до другої - методи близькості до ідеальної точки, послідовних поступок і нечітких множин.

Таблиця 1  
Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами  
багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт									
	1	5	10	20	50	100	200	500	1000	
Токарно-гвинторізний	○○△♦○○○○○○○○				3	4	5			
Токарний з ЧПК		○○○○○○○○○○○○○○								
Токарно-ре бо лъверний		▼○○	△○○		△○○	○○	○○			
Токарний багатошиндельний з ЧПК		○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○○○○○	
Токарний багатошиндельний		1			2					

Слід зазначити, що при величині партії деталей  $N_d \leq 5$  шт та  $N_d \geq 200$  шт всі методи оптимізації забезпечують однакові результати. Це викликано тим, що токарно-гвинторізний верстат при  $N_d \leq 5$  шт, а токарний багатошиндельний напівавтомат при  $N_d \geq 200$  шт по всіх критеріях оптимальності переважають інші верстати і їх вибір в якості оптимальних є однозначним. Для величини виробничої партії деталей  $5 \leq N_d < 200$ , яка характерна для умов багатономенклатурного виробництва метод оптимізації впливає на вибір найвигіднішого ТП обробки деталі.

Графічні залежності, наведені на рис. 1 – 4 дозволяють наочно проаналізувати особливості визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації. Позначення

типів верстатів на рисунках 1 - 4 наступне: 1- токарно-гвинторізний; 2 - токарний з ЧПК; 3 - токарно-револьверний; 4 - токарний двошпиндельний з ЧПК; 5 - токарний багатошпиндельний напівавтомат.

Оптимізація методами близькості до ідеальної точки, послідовних поступок і з використанням теорії нечітких множин базується на принципі гарантованого результату, згідно з яким у оптимального варіанту значення одночасно усіх критеріїв найбільш наближені до оптимальних величин. При оптимізації цими методами найвигіднішим є токарно-револьверний напівавтомат (рис. 3, 4, варіант 3), у якого всі критерії оптимальності приймають середні значення серед конкуруючих варіантів.

Оптимізація методом вагових коефіцієнтів і аналізу ієрархій базується на принципі сумарного впливу, при якому враховується сумарний внесок абсолютнох значень кожного критерію. Для даного випадку оптимальним є токарний багатошпиндельний напівавтомат (рис. 1, 2, варіант 5), у якого чотири критерії мають оптимальні значення, а один має одне з найгірших серед можливих варіантів, але тим самим цей варіант забезпечує найбільше сумарне значення критеріїв. Враховуючи ці особливості методи вагових коефіцієнтів і аналізу ієрархій забезпечують більш об'єктивну оцінку і є найбільш прийнятними для оптимізації ТП обробки деталей.

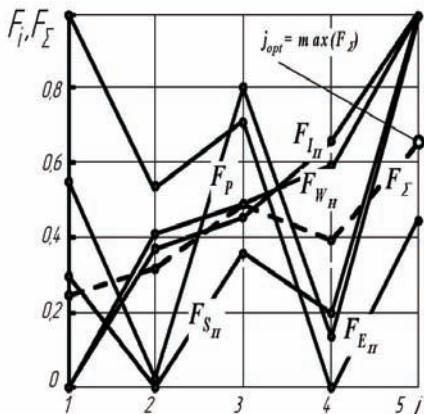


Рис. 1 - Залежність величини локальних ( $F_i$ ) та узагальнюючого ( $F_{\Sigma}$ ) критеріїв оптимальності для різних типів токарних верстатів при оптимізації методом вагових коефіцієнтів

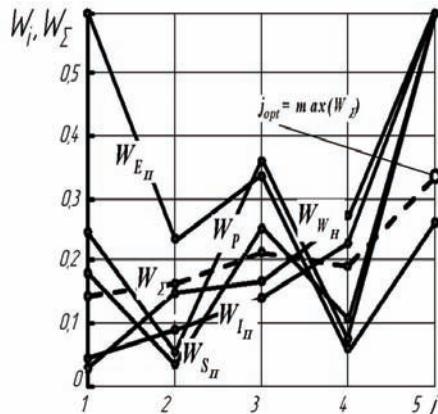


Рис. 2 - Залежність величини локальних ( $W_i$ ) та глобального ( $W_{\Sigma}$ ) пріоритетів різних типів токарних верстатів при оптимізації методом аналізу ієрархій

Встановлено також, що при наявності не більше трьох конкуруючих варіантів усі методи оптимізації забезпечують однакові результати і вибр

найбільш ефективного з них варто проводити з урахуванням мінімальної складності та трудомісткості розрахунків (табл. 2 - 4).

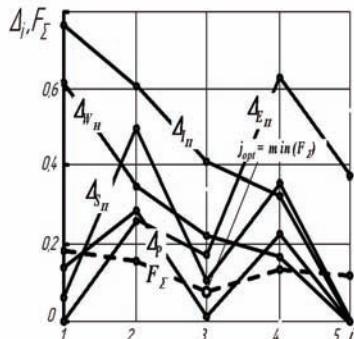


Рис.3 - Залежність величини нормованих різниць ( $\Delta_i$ ) та узагальнюючого критерію ( $F_{\Sigma}$ ) для різних типів токарних верстатів при оптимізації методом близькості до ідеальної точки

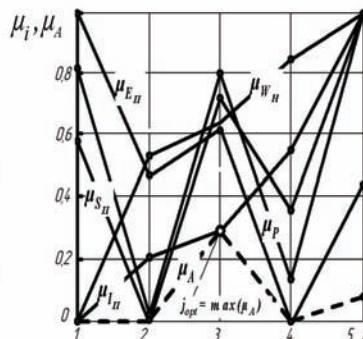


Рис. 4 - Залежність величини функцій принадлежності для різних типів токарних верстатів при оптимізації методом нечітких множин

У таблицях 2 – 4 використані такі позначення методів оптимізації: 1 - вагових коефіцієнтів; 2 – аналізу ієрархій; 3 – близькості до ідеальної точки; 4 – послідовних поступок; 5 – нечітких множин.

Таблиця 2  
Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт							
	1	5	10	20	50	100	200	500
Токарно-гвинторізний	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○
Токарний з ЧПК	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○
Токарно-револьверний	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○

Таблиця 3  
Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт							
	1	5	10	20	50	100	200	500
Токарно-гвинторізний	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○
Токарний з ЧПК	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○
Токарний єврошиндельний з ЧПК	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○	○○○○○○○○○○

Були також проведені дослідження результатів вибору найвигіднішого типу токарного верстата з використанням тільки деяких критеріїв оптимальності із запропонованої системи критеріїв, які дали змогу

встановити, що збільшення числа критеріїв об'єктивно розширює межі ефективного застосування ТП і дозволяє уточнити граничні значення величини виробничої партії деталей, які визначають найвигідніший варіант ТП обробки деталі.

Таблиця 4

Визначення оптимального типу токарного верстата різними методами  
багатокритеріальної оптимізації

Верстат	Величина виробничої партії деталей, шт								
	1	5	10	20	50	100	200	500	1000
Токарно-гвинторізний	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	3	4	5	
Токарно-рівильверний	1	2	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○	○○▼○○○○▼○○○○○

Таким чином, при багатокритеріальній оптимізації технологічних процесів механічної обробки деталей, у випадку, коли вихідні дані параметрів математичних моделей мають умовно детермінований характер, варто застосовувати метод вагових коефіцієнтів. При стохастичному характері вихідних даних і наявності не більше трьох конкуруючих варіантів технологічного процесу доцільно застосовувати метод з використанням теорії нечітких множин, а при наявності більше трьох конкуруючих варіантів - метод аналізу ієархій.

**Список літератури:** 1. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем. – М.: Наука, 1989. – 88 с. 2. Хмеловский Г. Л. Основы автоматизации технологического проктиирования / Хмеловский Г. Л., Кроль О. С., Сурнин Ю. М. – К.: УМК ВО, 1989. – 188 с. 3. Перегудов Ф. И. Введение в системный анализ: учеб. пособие / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – М.: Высш. шк., 1989. – 367 с. 4. Коткин Г.Г. Системный анализ: оптимизация и принятие решений в механообработке / Г.Г. Коткин, В.С. Гузенко, А.Л. Еськов и др.; под ред. В.С. Гузенко. – Краматорск: ДГМА, 1998. - 234 с. 5. Карпушъ В.Є. Вибір найвигідніших варіантів технологічних систем обробки деталей типу фланцю / В. Є. Карпушъ, О. В. Котляр, Ф. Г. Богасенко // Резаніє и інструмент в технологіческих системах : междунар. научно-техн. сб. – Харьков : НТУ “ХПІ”, 2009. – Вип. 77. – С. 77–86.

Надійшла до редколегії 31.05. 2011

**О.Ф. ЄНІКЄЄВ**, канд. техн. наук, доц., УкрДАЗТ, Харків;

**Ф.М. ЄВСЮКОВА**, ст. преп., НТУ «ХПІ», Харків;

**Л.О. ШИШЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Харків.

## СИСТЕМА ПОКООРДИНАТНОГО УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Запропоновано нову концепцію та на її основі побудовано багаторівневу цифрову систему покоординатного управління подачами шліфувального круга та швидкістю обертання алмазного інструменту, яка забезпечує якість обробленої поверхні деталі на рівні 11 квалітету точності.

The new concept is offered and on its basis the multilevel digital control system of supplies of a grinding circle on co-ordinates and a rotational speed of the diamond tool which provides quality of the processed surface of a detail at level of 11 degree of accuracy of machining is built.

Предложена новая концепция и на ее основе построена многоуровневая цифровая система покоординатного управления подачами шлифовального круга и частотой вращения алмазного инструмента, которая обеспечивает качество обработанной поверхности детали на уровне 11 квалитета точности.

Ключевые слова: передаточная функция, математическая модель, принципы покоординатного и непосредственно цифрового управления.

**Вступ.** Впровадження до машинобудівного виробництва України сучасних інформаційних та енергозберігаючих технологій базується на розробці технічних засобів автоматизації технологічних процесів та, зокрема, алмазного шліфування. Програмні рухи відомих систем передбачають у якості мети управління процесами алмазного шліфування підвищення їхньої економічної ефективності за рахунок скорочення тривалості технологічного циклу обробки деталі. При цьому отримання заданої якості обробленої поверхні деталі, яка встановлюється виробничим завданням у вигляді відповідного квалітету чистоти та вноситься до банку даних системи, виключає можливість браку і дає підприємству економію електричної енергії.

### Нова концепція управління якістю обробленої поверхні деталі.

Побудова замкнених систем зі зворотнім зв'язком по стану поточної якості обробленої поверхні деталі неможлива у зв'язку з відсутністю відповідних первинних перетворювачів. Авторами пропонується ідея використання девіацій швидкості обертання шліфувального круга в якості вхідного сигналу для отримання системою кількісної оцінки поточної шорсткості обробленої поверхні деталі [1]. Цю інформацію система отримає шляхом прямих вимірювань миттєвої швидкості обертання шліфувального круга з подальшим виділенням з її часової реалізації сигналу девіацій. Еталонні рівні амплітуд девіацій встановлено на основі заданих квалітетів чистоти обробленої поверхні деталі та внесено до банку даних системи у вигляді

нормативів. При цьому девіації швидкості обертання шліфувального круга є джерелом непрямої інформації про фактичну амплітуду мікронерівностей поверхні деталі, що оброблюється, та сигналом зворотного зв'язку, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого квалітету чистоти від його встановленого значення програмою обробки партії деталей. Практичне втілення цієї ідеї дозволило побудувати замкнену систему управління якістю обробленої поверхні деталі без посередніх вимірювань поточних значень її мікронерівностей та зробило можливим застосування принципу управління зі зворотним зв'язком за станом. У якості програмних рухів системи по досягненню поставленої мети використовується поперечна та повздовжня подачі круга, а також швидкість обертання алмазного інструменту у вигляді управлюючих впливів на шліфувальний верстат. На основі принципів покоординатного та безпосереднього цифрового управління розроблено нову концепцію управління якістю обробленої поверхні деталі в умовах неповної інформації та з урахуванням дії на систему випадкових завад (рис. 1).



Рис. 1 – Структурна схема управління алмазним шліфуванням в умовах неповної інформації про поточну якість обробленої поверхні деталі

На цьому рисунку вказано наступні умовні позначки:  $\Delta\omega$  – девіації швидкості обертання шліфувального круга,  $\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_i)^T$  – вектор покоординатного управління верстатом,  $\bar{X} = (S_{non}, S_{np}, f_{kp})^T$  – вектор стану технологічного процесу алмазного шліфування,  $R_z$  – амплітуда поточних мікронерівностей,  $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)^T$  – вектор випадкових завад,  $\bar{Q} = (\Delta_{nm}, S_{non,om}, S_{np,om}, f_{kp,om})^T$  – вектор корегуючих установок.

Критерій вибору оптимального періоду дискретизації за часом управлюючого впливу отримано на базі заданого значення похибки. При цьому сам управлюючий вплив на шліфувальний верстат подано у такому вигляді

$$v(t) = \sum_{i=1}^n A_{2i-1} \sin[(2i-1)\omega t]. \quad (1)$$

Втрати інформації при дискретизації за часом гармонійного сигналу оцінюються величиною динамічної похибки, яка отримана у вигляді

$$\delta_{\text{дин}} = 1 - \frac{\pi}{m} \sum_{k=0}^{0.5m-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right). \quad (2)$$

де  $m$  – кількість інтервалів дискретизації.

Відносна похибка дискретизації сигналу (1) визначена з урахуванням внесків гармонійних складових

$$\delta_{\text{сум}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2} \delta_{(2i-1)\text{дин}}^2}. \quad (3)$$

За допомогою цього виразу побудовано графік (рис. 2), який використано авторами для визначення оптимального періоду дискретизації управлюючого впливу на шліфувальний верстат. Швидкодія замкнених каналів системи повинна перевищувати це значення періоду дискретизації.

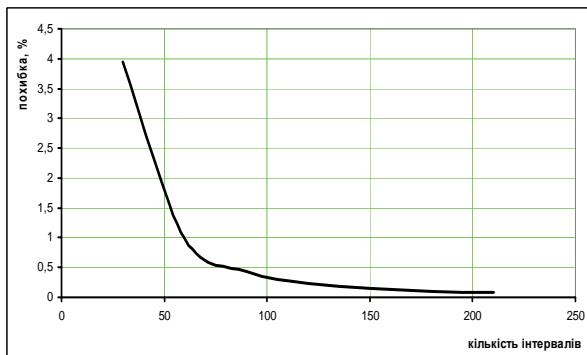


Рис. 2 – Визначення оптимального періоду дискретизації

В основу розробки системи покоординатного управління шліфувальними верстатаами також покладено принцип багаторівневого управління на базі мікроконтролерів (рис. 3). Перший рівень системи утворюють замкнені канали управління подачами та швидкістю обертання шліфувального круга. Вони реалізують принцип управління за відхиленням поточних значень вказаних технологічних параметрів від встановлених банком даних для заданого квалітету частоти. Управляючі впливи на верстат

формуються цими каналами під час прямого та зворотного ходу алмазного інструменту. Технічну реалізацію каналів проведено на основі встановлених вище вимог по швидкодії перетворення, а також з урахуванням особливостей шліфувальних верстатів як об'єктів управління:

- підтримка стабільної середньої швидкості обертання шліфувального круга. Встановлено, що сигнал девіацій є результатом дії сили різання матеріалу заготовлі і використовується системою для непрямого оцінювання поточної шорсткості обробленої поверхні деталі;
- управлюючі впливи на шліфувальні верстати формуються цифровими регуляторами 1 і 2 з урахуванням корегуючих установок.

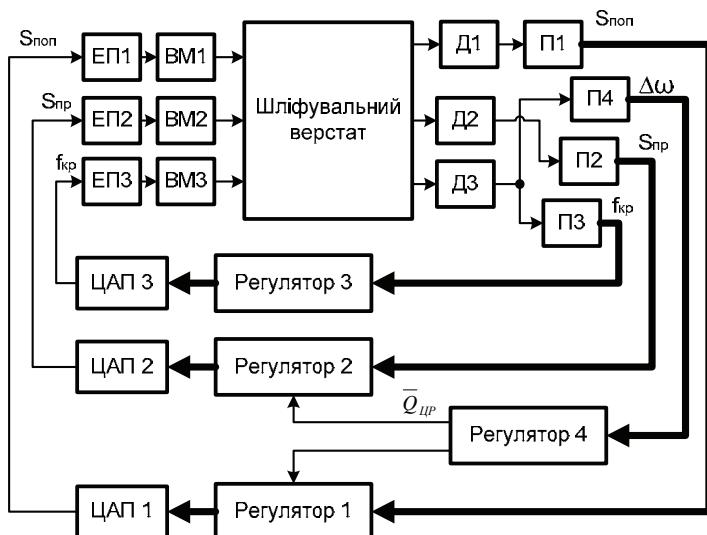


Рис. 3 – Структурна схема системи покоординатного управління шліфувальними верстатами

Другий рівень системи реалізує принцип управління зі зворотним зв'язком по стану поточної шорсткості обробленої поверхні деталі. В основу його розробки покладено принцип допускового контролю. Цифровий регулятор 4 на основі вимірювань миттєвої швидкості обертання шліфувального круга та за допомогою інформаційної технології обробки цього сигналу визначає прогнозоване значення амплітуди мікронерівностей поверхні деталі, яка обробляється. Ця технологія складає такі обчислювальні процедури: виділення сигналу девіацій та подання його обмеженим рядом Фур'є; визначення діючого значення та його порівняння з еталонними рівнями амплітуд девіацій. Якщо діюче значення сигналу девіацій перевищує встановлений виробничим завданням рівень то регулятор 4 корегує величини подач. Управляючі впливи на регулятори 1 та 2 у вигляді корегуючих установок

подаються під час пауз між прямим і зворотнім ходом алмазного інструменту.

**Моделювання каналів управління подачами круга.** В динамічному відношенні первинний перетворювач поперечної подачі шліфувального круга подаємо аперіодичним ланцюгом з запізненням та деякою смугою нечутливості ( $\Delta_1$ )

$$H_1(p) = \frac{\Delta_1 k_{\pi_1} e^{-p\tau_{\pi_1}}}{T_{\pi_1} p + 1}, \quad (4)$$

де  $k_{\pi_1}$ ,  $\tau_{\pi_1}$ ,  $T_{\pi_1}$  - відповідно коефіцієнт передачі, запізнення та постійна часу блоку  $\Pi_1$ .

Похибка дискретизації аналогового сигналу цим блоком знаходить своє кількісне відображення у коливаннях його вихідного коду. На основі статистичної обробки експериментальних даних з використанням інформаційного підходу визначено закон розподілу [2]

$$f_1(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \text{ при } x \in (-0.12, 0.12),$$

$$\text{та похибку } \Delta_1 = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.05.$$

Передаточну функцію екстраполятора нульового порядку подаємо у такому вигляді [3]

$$W_2(p) = \frac{1 - e^{-p\tau_r}}{p}. \quad (5)$$

Передатну функцію регулятора поперечною подачею як деякого довільного цифрового фільтру подаємо у вигляді [3]

$$W_3(p) = \frac{1}{\tau_r} (1 - e^{-p\tau_r}). \quad (6)$$

Передатні функції блоків ЕП1 та ВМ1 отримано у такому вигляді [2]

$$W_4(p) = \frac{k_M T_{\pi_1}^2}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (7)$$

де

$$a_4 = \tau_{me} T_{me} T_{\vartheta} T_{dm} T_M,$$

$$a_3 = T_M \left[ (\tau_{me} + T_{me}) T_{\vartheta} T_{dm} + \tau_{me} T_{me} (T_{\vartheta} + T_{dm}) \right] + \tau_{me} T_{me} T_{\vartheta} T_{dm};$$

$$a_2 = T_M \left[ T_{\vartheta} T_{dm} + \tau_{me} T_{me} + (\tau_{me} + T_{me})(T_{\vartheta} + T_{dm}) \right] + (\tau_{me} + T_{me}) T_{\vartheta} T_{dm} + \tau_{me} T_{me} (T_{\vartheta} + T_{dm});$$

$$a_1 = T_M (T_{\vartheta} + T_{dm} + \tau_{me} + T_{me}) + T_{\vartheta} T_{dm} + \tau_{me} T_{me} + (\tau_{me} + T_{me})(T_{\vartheta} + T_{dm});$$

$$a_0 = \tau_{me} + T_{me} + T_{\vartheta} + T_{dm}.$$

У результаті аналізу структурної схеми (рис. 3) та математичних перетворювань маємо таку передатну функцію каналу

$$W_5(p) = \frac{k_M}{p^2(a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0)}. \quad (8)$$

В результаті аналізу полюсів виразу (8) встановлено, що канал для управління поперечною подачею шліфувального круга без суттєвих втрат точності подається такою передатною функцією

$$W_5(p) = \frac{b_1 p}{(\zeta T_{33} p + 1) \left( \frac{T_{33}}{\zeta} p + 1 \right) (T_{34} p + 1)}. \quad (9)$$

Блоки П1, Р1 та ЕП1 вносять запізнення в роботу каналу. В результаті досліджень встановлено, що це запізнення складає  $2T_0$ . З урахуванням цієї обставини з-перетворення виразів для передатних функцій каналу управління поперечною подачею за управлюючим та збурювальним впливами мають наступний вигляд

$$W_6(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, \quad W_7(z^{-1}) = \frac{k_M T_M (1 - l_4) z^{-1}}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}, \quad (10)$$

$$\text{де } b_0^\circ = A_1 + A_2 + A_3, \quad b_1^\circ = -[A_1 + A_2 + A_3 + A_1(l_2 + l_3) + A_2(l_1 + l_3) + A_3(l_1 + l_2)];$$

$$b_2^\circ = A_1(l_2 + l_3) + A_2(l_1 + l_3) + A_3(l_1 + l_2) + A_1 l_2 l_3 + A_2 l_1 l_3 + A_3 l_1 l_2;$$

$$b_3^\circ = -(A_1 l_2 l_3 + A_2 l_1 l_3 + A_3 l_1 l_2);$$

$$a_1^\circ = -(A_1 l_2 l_3 + A_2 l_1 l_3 + A_3 l_1 l_2); \quad a_2^* = l_2 l_3 + l_1 l_3 + l_1 l_2; \quad a_3^\circ = -l_1 l_2 l_3;$$

$$l_1 = e^{-\frac{T_0}{\zeta T_{33}}}, \quad l_2 = e^{-\frac{\zeta T_0}{T_{33}}}, \quad l_3 = e^{-\frac{T_0}{T_{34}}};$$

$$A_1 = \frac{b_1 T_{34}}{T_{33} T_{34} (\zeta^2 + 1) - \zeta (T_{33}^2 - T_{34}^2)} + \frac{b_1 \zeta}{(\zeta T_{34} - T_{33})(1 - \zeta^2)};$$

$$A_2 = \frac{b_1 \zeta}{(\zeta T_{34} - T_{33})(\zeta^2 - 1)}; \quad A_3 = \frac{b_1 T_{34}}{\zeta (T_{33}^2 - T_{34}^2) - T_{33} T_{34} (\zeta^2 + 1)}.$$

В основу розробки цифрового регулятора поперечною подачею покладено принцип його синтезу на базі еталонної моделі каналу з використання квадратичного критерію якості. Закон оптимального управління поперечною подачею шліфувального круга сформульовано у такому вигляді

$$D(z^{-1}) u_t = R_l(z^{-1}) y_{m,t+d+1} - F(z^{-1}) y_t, \quad (11)$$

де  $y_{m,t+d+1}$  - прогнозоване значення вихідного сигналу каналу, ступеневі поліноми мають вигляд

$$R_l(z^{-1}) = \frac{\Delta_l k_M T_M (1 - l_4)}{\varepsilon_{don}} z^{-1},$$

$$D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}, \quad F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}.$$

Коефіцієнти цих поліномів такі

$$f_0 = 1, \quad f_1 = \frac{a_1^\circ + 1}{a_1^\circ}, \quad f_2 = \frac{a_1^\circ a_2^\circ + a_1^\circ + a_2^\circ}{a_1^\circ a_2^\circ};$$

$$g_0 = \frac{b_0^\circ}{a_0^\circ}, \quad g_1 = \frac{b_1^\circ - \frac{b_0^\circ a_1^\circ}{a_0^\circ} + \frac{b_0^\circ (a_1^\circ + 1)}{a_1^\circ}}{a_0^\circ},$$

$$g_2 = \frac{b_2^\circ + \frac{b_1^\circ (a_1^\circ + 1)}{a_1^\circ} + \frac{b_2^\circ (a_1^\circ a_2^\circ + a_1^\circ + a_2^\circ)}{a_1^\circ a_2^\circ} - \frac{b_0^\circ a_2^\circ}{a_0^\circ} - a_1^\circ \left[ b_1^\circ - \frac{b_0^\circ a_1^\circ}{a_0^\circ} + \frac{b_0^\circ (a_1^\circ + 1)}{a_1^\circ} \right]}{a_0^\circ}.$$

На основі виразу (8) в результаті перетворень отримана в роботі [2] передатна функція цифрового регулятора 1

$$W_1(z^{-1}) = \frac{H(z^{-1})B(z^{-1})}{b_0^\circ A(z^{-1}) + D(z^{-1})B(z^{-1})}. \quad (12)$$

В останньому виразі коефіцієнти ступеневого поліному  $H(z^{-1})$  мають такий вигляд

$$h_0 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4)}{\varepsilon_{don}} b_0^\circ, \quad h_1 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_1^\circ}{\varepsilon_{don} a_1^\circ},$$

$$h_2 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_2^\circ}{\varepsilon_{don} a_2^\circ}, \quad h_3 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_3^\circ}{\varepsilon_{don} a_3^\circ}.$$

Після підстановки коефіцієнтів та математичних перетворень виразу (10) маємо таке

$$W_1(z^{-1}) = 767.113 \frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.2182z^{-2}}. \quad (13)$$

На основі виразів (10) та (13) побудована імітаційна модель каналу для управління поперечною подачею шліфувального круга (рис. 4). Імітаційним моделюванням отримано графік вихідного сигналу цього каналу (рис. 5).

У результаті аналізу структурної схеми каналу для управління поздовжньою подачею алмазного інструменту із застосуванням імітаційного моделювання та математичного апарату  $z$ -перетворень отримано наступні вирази для передатних функцій за управлюючим та збурювальним впливами

$$W_8(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, \quad W_9(z^{-1}) = \frac{k_M z^{-1} [1 - T_M + (T_M - l_4) z^{-1}]}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}.$$

У цих виразах враховано запізнювання, яке вносять блоки П2, екстраполятор та ЕП2, в роботу каналу.

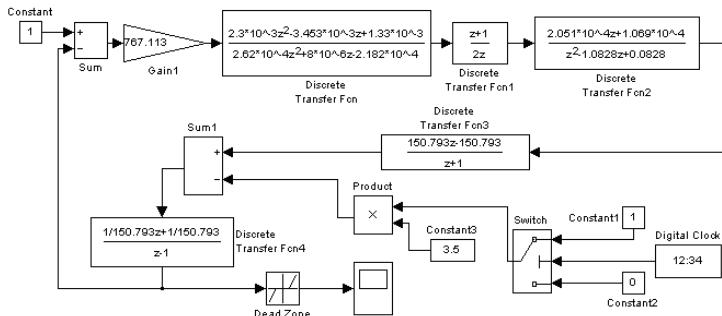


Рис. 4 – Імітаційна модель каналу для управління поперечною подачею

В основу розробки цифрового регулятора 2 в умовах дії випадкових завад покладено принцип його синтезу на базі еталонної моделі каналу. Мінімізацією квадратичного критерію якості отримана його передатна функція

$$W_2(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (14)$$

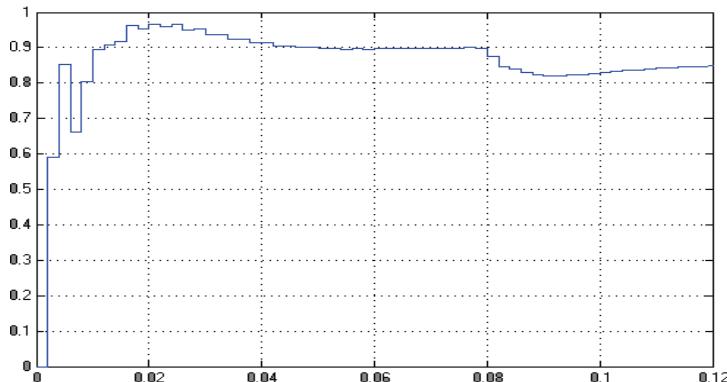


Рис. 5 – Вихідний сигнал імітаційної моделі

На основі виразів (10) та (15) побудована імітаційна модель каналу для управління поздовжньою подачею шліфувального круга (рис. 6). Імітаційним моделюванням отримано графік вихідного сигналу (рис. 7).

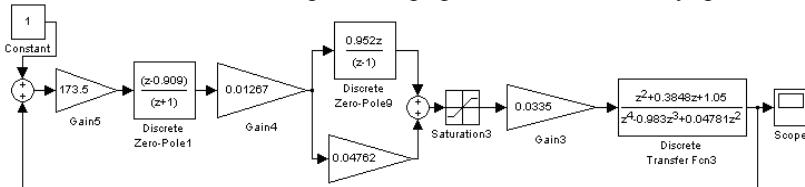


Рис. 6 – Імітаційна модель каналу управління поздовжньою подачею

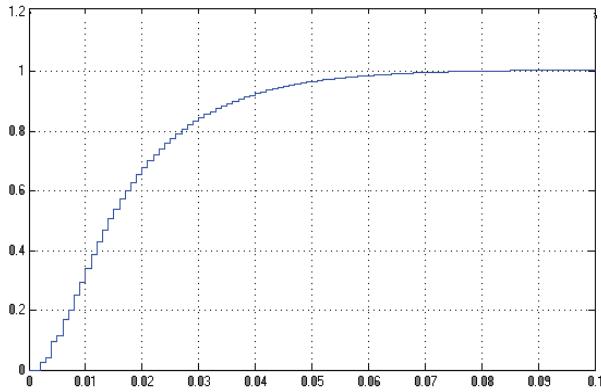


Рис. 7 – Вихідний сигнал імітаційної моделі

Алгоритми покоординатного управління поперечною та поздовжньою подачами шліфувального круга розроблено з урахуванням обмежень, які накладає на їхні величини умова отримання прогнозованого значення амплітуди мікронерівностей обробленої поверхні деталі. Ці обмеження закладено в наступний алгоритм програмного завдання регулятором 1 величини поперечної подачі шліфувального круга:

- програма обробки партії деталей задає припустиме значення амплітуди мікронерівностей  $R_z$  обробленої поверхні деталі;
- регулятор 1 на підставі аналізу банку даних вибирає  $Q_1$  і задає чорновий цикл обробки деталі  $S_{non} = Q_1 S_{non,m}$ ;
- він періодично після виконання шліфувальним кругом одного проходу обчислює поточний припуск обробки  $h = h_n - kS_{non}$ , де  $k = 0, 1, 2, \dots$  ;
- якщо  $h_n - kS_{non} \leq h_k$ , то регулятор 1 задає чистовий цикл обробки деталі  $S_{non} = Q_1 \left[ S_{non,k} + (S_{non,m} - S_{non,k}) \frac{h}{h_k} \right]$ .

На основі алгоритму програмного завдання регулятором 1 величини поперечної подачі шліфувального круга, а також такої детермінованої математичної моделі виконуючого механізму

$$U(t) = b_1 \left[ e(t) + T_{\partial 1} \frac{de(t)}{dt} + T_{\partial 2} \frac{d^2 e(t)}{dt^2} + T_{\partial 3} \frac{d^3 e(t)}{dt^3} \right] \quad (15)$$

отримано позиційний алгоритм управління нею в наступному вигляді

$$U_n = U_{n-1} + b_1 \left( 1 + \frac{T_{\partial 1}}{T_0} \right) e_n - b_1 \left( 1 + \frac{2T_{\partial 1}}{T_0} \right) e_{n-1} + \frac{b_1 T_{\partial 1}}{T_0} e_{n-2}. \quad (16)$$

В основу розробки алгоритму управління поздовжньою подачею

шліфувального круга покладено те, що вона за своєю сутністю є швидкістю руху виконуючого механізму. У результаті математичних перетворень швидкісний алгоритм управління цією подачею отримано в такому вигляді

$$U_n = U_{n-1} + K_p \left( \frac{T_0}{2T_n} + \frac{T_\delta}{T_0} \right) e_n + K_p \left( \frac{T_0}{2T_n} - \frac{2T_\delta}{T_0} \right) e_{n-1} + K_p \frac{T_\delta}{T_0} e_{n-2}. \quad (17)$$

Функціонування системи покоординатного управління шліфувальними верстатами на підставі розроблених алгоритмів організовано за допомогою середи реального часу, з перериваннями в залежності від ходу технологічного процесу алмазного шліфування.

**Висновок.** На підставі аналізу графіків встановлено, що розроблені канали задовольняють вимогам системи по швидкості перетворення та якості регулювання. Встановлено також, що розроблене прикладне програмне забезпечення для цифрових регуляторів 1 та 2 забезпечує покоординатне управління процесами алмазного шліфування. Обґрунтовано, що девіації швидкості обертання шліфувального круга є джерелом непрямої інформації про фактичну амплітуду мікронерівностей поверхні деталі, яка обробляється верстатом, та сигналом зворотного зв'язку, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого квалітету чистоти від його встановленого значення програмою обробки партії деталей

**Список літератури:** 1. Енікеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. 2. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / Снікеев О.Ф., Зиков І.С. // Вестник Национального технического университета «ХПІ». – Харків: №57, 2008.– С. 87-93. 3. Основи синтезу і проектування спідкуючих систем верстатів та промислових роботів: Навчальний посібник / Снікеев О.Ф., Суботін О.В. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – 268 с.

*Поступила в редколлегию 06.06.11*

М.Э.Колесник, аспирант каф. стратегического управления НТУ «ХПИ»

## **МЕТОДИКА МИНИМИЗАЦИИ РИСКА В ПРОЦЕССЕ ОПТИМИЗАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ПРОЕКТА**

В данной работе рассматривается этап в процессе оптимизации содержания проекта, отвечающий за минимизацию рисков. Также рассмотрена непосредственная подготовка информации для метода оптимизации риска.

В даній роботі розглядається етап у процесі оптимізації змісту проекту, що відповідає за мінімізацію ризиків. Також розглянута безпосередня підготовка інформації для методу оптимізації ризику.

Для решения задачи оптимизации содержания проекта по критериям прибыль, сроки, стоимость, качество и риски проекта с помощью метода, основанного на применении обобщенного критерия и неявного перебора необходимо иметь решение однокритериальных задач. В том числе задачи оптимизации рисков проекта при наличии ограничений и заданных альтернативных вариантах выполнения работ или их комплексов, представленных в виде сетевых моделей. Решение данной задачи во многих случаях может иметь и самостоятельное значение.

Причиной возникновения риска является неопределенность, которая присутствует во всех проектах. Существуют известные риски и неизвестные. Известные – это те риски, которые идентифицированы и подвергнуты анализу. В отношении таких рисков можно спланировать ответные действия. Но для неизвестных рисков спланировать ответные действия невозможно. В таких случаях разумным решением для команды проекта является выделение общего резерва. Хотя специфические риски и условия их возникновения не определены, менеджеры проекта знают, исходя из прошлого опыта, что большую часть рисков можно предвидеть. Однако, часто лица, принимающие решения, предпочитают формировать содержание проекта, не задавая веса рисковым событиям.

Формирование содержания проекта традиционно осуществляется на эвристическом уровне. Часто работы или комплексы работ включаются в состав проекта без достаточного анализа их влияния на другие работы. При этом количество рассматриваемых альтернатив обычно невелико. Данная ситуация объясняется большой трудоемкостью анализа альтернативных вариантов работ или их комплексов в многоэтапных проектах. В работе [2] предложены модель и метод оптимизации содержания проекта с точки зрения времени его выполнения. В работе [3] рассматриваются модель и метод оптимизации содержания проекта по критерию затраты на его осуществление при наличии ограничений на сроки. В работе [4] впервые предложена

многокритериальная модель задачи оптимизации содержания проекта по критериям время и стоимость при наличии альтернативных вариантов выполнения работ или их комплексов, заданных в виде сетевых моделей. В работе [5] предложены модель и метод оптимизации содержания проекта по срокам и стоимости его выполнения при наличии ограничений на качество продукта после выполнения определенных этапов проекта.

Управление рисками проекта включает в себя процессы, относящиеся к планированию управления рисками, их идентификации и анализу, реагированию на риски, мониторингу и управления рисками проекта. Большинство из этих процессов подлежат обновлению в ходе проекта. Цели управления рисками проекта – повышение вероятности возникновения и воздействия благоприятных событий и снижение вероятности возникновения и воздействия неблагоприятных для проекта событий. Для достижения успеха на протяжении всего проекта организация должна предпринимать заранее и последовательно предупредительные меры по управлению рисками. В данной работе рассматривается непосредственно этап планирования рисков, на котором происходят процессы выбора подхода, планирование и выполнение операций по управлению рисками проекта.

Целью работы является создание модели и метода решения задачи оптимизации содержания проекта, с точки зрения рисков, связанных с его осуществлением, при наличии ограничений.

Подготовка информации начинается с формирования целевой функции, которая отражает оптимизацию рисков (1). Далее представлена последовательность действий, необходимых к осуществлению. Ниже представлена математическая модель задачи оптимизации содержания проекта.

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{M_h} \sum_{i=1}^I P_{hj} v_{hji} x_{hj} = R_{\text{пред}} \rightarrow \min_{x_{hj}} \quad (1)$$

$$T_{\text{проекта}} \leq T_{\text{задан}}, T_{\text{проекта}} = \phi(x_{hj}); \quad (2)$$

$$S_h = S_{h-1} + K_h - \sum_{i=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj}, \quad S_h \geq 0, h = \overline{1, H}; \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{M_h} x_{hj} = 1, h = \overline{1, H}, \quad x_{hj} \in \{0, 1\}, j = \overline{1, M_h}, h = \overline{1, H}. \quad (5)$$

1. Альтернативные варианты выполнения работ по проекту, а также их взаимосвязи друг с другом следует представить в виде сетевой модели. Необходимо определить стоимость и длительности работ каждой из альтернатив.

2. Осуществить анализ, с целью выявления альтернатив, которые охватывают несколько этапов. Если определенная альтернатива охватывает более одного этапа, то эти этапы объединить в один.

3. Оценить нижние границы для риска проекта, который возникает при выполнении операций на каждом  $h$ -м этапе,  $h = \overline{1, H}$ .

Для оценивания указанных нижних границ произвести следующие действия:

3.1 Для каждого этапа  $h = \overline{1, H}$  задать фиктивные вершины начала  $S(start)$  и окончания  $T(target)$ .

3.2. Оценить риски, связанные с выполнением операций на каждом  $h$ -том этапе, в соответствии с каждой  $j$ -ой альтернативой.

$$R_{hj}^{neg} = \sum_{i=1}^l P_{hji} V_{hji}.$$

Определить минимальный риск, который может сопутствовать выполнению работ на каждом  $h$ -том этапе,  $h = \overline{1, H}$ .

$$R_{h\min}^{neg} = \min \left\{ R_{hj}^{neg} \right\}_{j=1}^{M_h}.$$

И так подготовка информации закончена, приступаем непосредственно к этапу оптимизации рисков, а точнее – минимизации, которая представлена в виде последовательности действий.

1.  $R_H := 0$ , где  $R_H$  – множество вариантов  $j$ , выбранных на всех  $H$  этапах проекта;

$$R_{\min} = \left\{ R_{h\min}^{neg} \right\}_{h=1}^H; \\ h := 1; f := 0; f^* := +\infty.$$

2. Начинаем рассмотрение с 1-го варианта, т.е.  $j_h = 1$ .

3. Проверяем, выполняются ли ограничения задачи на  $h$ -том этапе.

3.1 Проверяем выполнение ограничения (2). Для этого на каждом этапе  $h$  вводим фиктивную вершину «финиш».

3.2 Определяем с помощью метода критического пути время  $t_h$  выполнения всех операций от 1-го до  $h$ -го этапа включительно.

$$T_{\text{проекта}} = t_h.$$

Проверяем  $T_{\text{проекта}} \leq T_{\text{план}}$ .

Если ограничение не выполняется, переходим к шагу 8.

3.3 Проверяем выполнение ограничения (3)

$$S_h = S_{h-1} + K_h - \sum_{j=1}^{M_h} w_{hj} x_{hj}, \quad S_h \geq 0, \quad h = \overline{1, H}.$$

Если оно не выполняется, переходим к шагу 8.

4. Определяем риски, которые возникают при выполнении операций на всех этапах от 1-го до  $h$ -го включительно.

$$q'_h = \sum_{k=1}^h \sum_{j=1}^{M_h} \sum_{r=1}^R b_r \Psi_{kj,r} x_{kj,r}$$

Присваиваем значение  $f := q'_h$ .

5. Оцениваем нижнюю границу для значения обобщенного показателя качества продукта, которое может быть получено в результате выполнения всех оставшихся этапов, т.е. начинается от  $h+1$  –го этапа до  $H$  включительно.

$$Q'_{est,h} = Q_{h+2_{min}} + Q_{h+2_{min}+1} + \dots + Q_{H_{min}}$$

Значения  $Q_{h+2_{min}}, Q_{h+2_{min}+1}, \dots, Q_{H_{min}}$  были определены на этапе подготовки информации.

Если  $f + Q'_{est,h} \geq f^*$ , то использование  $j$ -го варианта не приведет к решению лучшему, чем рекордное, переходим к шагу 8.

6. Если  $h < H$ , рассмотрим следующий этап проекта,  $h := h + 1$  и возвращаемся к шагу 2.

7. Задаем новое значение рекорда  $f^* = f$  и запоминаем множество  $Q_H := \{j_h\}_{h=1}^H$ . Осуществляем редукцию  $f := q'_{h-1}$ .

8. Если  $j_h < M_h$ , анализируем следующий вариант, т.е.  $j_h := j_h + 1$  и возвращаемся к шагу 3.

9. Если  $h > H$ , возвращаемся на предыдущий этап, т.е.  $h := h - 1$  и изменяем значение  $f := q'_{h-1}$ . Извлекаем из памяти значение  $j_h$  и возвращаемся к шагу 8. Если  $h=1$  и  $Q_H := \{\emptyset\}$ , задача не имеет решения, иначе получено оптимальное решение.

Значение целевой функции  $Q = f^*$ .

Таким образом, в работе получила дальнейшее развитие модель задачи оптимизации содержания проекта, разработан этап в процессе оптимизации содержания проекта, отвечающий за минимизацию рисков. Также разработана непосредственная методология подготовки информации для метода оптимизации риска.

## Литература

1. A Guide to the Project Management Body of Knowledge / by Project Management Institute, 2004. – 402 p.
2. Кононенко И.В. Математическая модель и метод минимизации сроков выполнения работ по проекту / И.В. Кононенко, Е.В. Емельянова, А.И. Грицай // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №2/6 (26). – С. 35–40.
3. Кононенко И.В. Математическая модель и метод минимизации затрат по проекту при ограничениях на сроки выполнения работ / И.В. Кононенко, Е.В. Емельянова // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: сб. науч. тр. Темат. вып. :

- Системный анализ, управление и информационные технологии. – № 4. – X., 2009. – С. 46–53.
4. Кононенко И.В., Мироненко В.А. Математическая модель и метод оптимизации содержания проекта с точки зрения времени и стоимости его выполнения. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 1 / 2 (43) 2010 С. 12-17.
  5. Кононенко И. В. Двухкритериальная оптимизация содержания проекта при ограничениях на качество продукта / И. В. Кононенко, И. В. Протасов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. - 2010. – №5/4 (47). - С. 57-60.

**Г.И. КОСТЮК**, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**В.А. ФАДЕЕВ**, д-р техн. наук, проф., ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков;  
**Е.А. ВОЛЯК**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

Проведено дійсний аналіз теоретичних і експериментальних результатів адгезійної взаємодії. Показано, що експериментальні результати різних авторів узгоджуються з рядом теоретичних моделей, а за рейтингом адгезійна взаємодія практично збігається з результатами оцінок за різницю електронегативностей контактуючих матеріалів, тоді як теоретичні моделі не завжди дають реальну оцінку.

The valid analysis of theoretical and experimental results of adhesive interaction is carried out. It is shown that experimental results of different authors Will be co-ordinated with a number of theoretical models, and on a rating adhesive interaction practically coincides with results of estimations on a difference electroaffinities of contacting materials whereas theoretical models not always state a real estimation.

Проведен действительный анализ теоретических и экспериментальных результатов адгезионного взаимодействия. Показано, что экспериментальные результаты разных авторов согласующихся с рядом теоретических моделей, а по рейтингу адгезионное взаимодействие практически совпадает с результатами оценок по разности электроотрицательностей контактирующих материалов, тогда как теоретические модели не всегда дают реальную оценку.

**1. Введение.** Значительное количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию адгезии и адгезионному взаимодействию [1...21], к сожалению, не дает возможности оценить работоспособность тех или иных теоретических моделей или определить для какого класса материалов и условий они приемлемы.

Применение покрытий на деталях режущем инструменте (РИ) требует решения двух задач:

- повышение адгезии покрытия к основному материалу детали;
- минимизация адгезионного взаимодействия материала покрытия и материала контроллера детали или обрабатываемого материала (РИ).

Выяснение возможности получения достоверной информации на основе теории сократит затраты на дорогостоящие и длительные экспериментальные исследования, что также существенно сократит время на выбор покрытий и даст возможность повысить работоспособность деталей и РИ за счет снижения адгезионной составляющей износа.

Все это позволяет утверждать об актуальности и возможности проводимого сравнения в целях выявления моделей и условий в которых они дают наиболее точный прогноз адгезионного взаимодействия.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и

науки «Новые и ресурсосберегающие и технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 – «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам «Создание физико-технических основ повышения качества материала аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», а также в рамках хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

**2. Анализ моделей, описывающих адгезионные характеристики индивидуальных материалов.** В настоящее время существует довольно большое количество теоретических, а часто только оценочных моделей расчета адгезионных характеристик материалов и величины адгезионного взаимодействия контактирующих материалов [1 - 12], что также существенно сократит время на выбор покрытий и даст возможность повысить работоспособность деталей и РИ за счет снижения адгезионной составляющей износа.

Все это позволяет утверждать об актуальности и важности проводимого сравнения в целях выявления моделей и условий, в которых они дают наиболее точный прогноз адгезионного взаимодействия.

Работы в этом направлении исследований адгезии в процессах трения и пластической деформации проводились в середине прошлого века и достаточно подробно отражены в работе А.П. Семенова.

Молекулярное взаимодействие трущихся твердых тел представлены в работах У. Гарди, Ф. Бoudена, Б.В. Дерягина, И.В. Крагельского, Д. Тейбора, Дж. Юнга.

Г. Финч исследует схватывание металлов в условиях совместной пластической деформации и делает вывод, что схватывание происходит в результате разрушения при деформации пленок на контактирующих поверхностях.

Плавлением поверхностей трущихся тел объясняет схватывание Г.Д. Полосаткин. В то же время В.Д. Кузнецов считает, что расплавление поверхностей или даже повышение температуры до высоких значений, не являются обязательными для образования межатомных и межмолекулярных связей, хотя и способствуют этому. Автор также выделяет роль химического сродства трущихся металлов при трении чистых поверхностей. Достаточность для схватывания наличия только чистых поверхностей также отмечается в работах.

А.П. Семенов в качестве эффективного метода изучения схватывания применяет экспериментальное исследование совместного пластического деформирования контактирующих металлов, которое заключается во вдавливании различной формы пуансонов в пары листовых образцов из исследуемых материалов на ступенчато увеличивающуюся глубину.

Обсуждаются различные гипотезы схватывания: рекристаллическая, диффузионная, гипотезы, основанной на соотношении механических свойств

поверхностных пленок и основного металла. Наиболее интересна энергетическая гипотеза А.П. Семенова.

**3. Анализ возможности применения существующих теорий и оценок адгезионного взаимодействия контактирующих материалов.** Сначала проведем качественное сопоставление результатов расчетов по формулам (1) и (12) из работы [2] соответственно для индивидуальных материалов. Видно, что расчеты по выражениям (10), (11) и (3) – (9) из работы [2] для индивидуальных материалов по удельной энергии адгезии –  $E_a$  имеют корреляцию между собой по рейтингу и по электроотрицательности за исключением меди, для которой есть существенное отличие рейтингов 2 и 6, что говорит о возможности оценивания адгезии по электроотрицательности материала (табл. 1).

Таблица 1

Адгезия индивидуальных материалов

Материал	Характеристики материала		$E_a, \text{Дж}/\text{м}^2$			Рейтинг	$\Delta\text{ЭОС}$	Рейтинг	
			Расчетная формула						
	$R, 10^{10} \text{ м}$	$E, 10^{-11} \text{ Па}$	(10)	(11)	(3)-(9) из [2]				
V	1,31	1,77	1,31	1,36	1,20	4	1,63	3	
Cr	1,25	2,87	2,37	2,30	2,34	4	1,66	4	
Ti	1,46	1,03	1,00	0,82	0,97	3	1,54	1	
Mo	1,36	3,3	2,74	2,64	2,39	5,6	2,16	7	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1,43	3	2,84	2,40	2,18	6,5,5	1,73	5	
Cu	1,28	1,2	0,89	0,96	0,77	2	1,90	6	
Al	1,43	0,7	0,60	0,56	0,53	1	1,61	2	

Для контактирующих материалов адгезионное взаимодействие оценивалось по краевому углу смачивания, напряжению адгезии  $\sigma_A$  (Па), по удельной энергии адгезионного взаимодействия  $E_A$  ( $\text{Дж}/\text{м}^2$ ) и по разности электроотрицательностей контактирующих материалов (см. табл. 3). Сравнения рейтингов по минимуму адгезионного взаимодействия показало, что для исследованных пар рейтинги практически совпадают или близки между собой, исключение составляет пара Ni–ZrC, что говорит о реальности оценок адгезионного взаимодействия по формулам (1) и (12) из [2] и по разности электроотрицательности (табл. 1).

Таблица 2

## Сравнение адгезионного взаимодействия контактирующих материалов

Подложка	Покрытие	$\theta, {}^\circ$	Рейтинг	$\sigma_{IV}$ , МПа	Рейтинг	E <sub>a</sub> , Дж/м <sup>2</sup>				РЭО	Рейтинг		
						Расчетная формула							
						(1)	рейтинг	(12)	рейтинг				
Графит (алмаз)	Fe	37,00	6	1,78	3	2,25	3	3,20	9	0,72	8		
C	Co	48,00	8	1,81	4	2,20	2	3,01	7	0,67	7		
C	Ni	45,00	7	1,70	2	2,27	4	2,90	6	0,64	5		
C	Al	38,00	6	0,91	1	0,74	1	1,63	3	0,94	11		
Ni	NbC	16,58	3	1,70	2	3,40	10	3,33	11	0,96	12		
Ni	VC	14,20	2	1,70	2	4,29	14	3,35	12	0,99	13		
Ni	TaC	11,97	1	1,70	2	3,78	13	3,36	13	0,86	9		
Ni	TiC	30,15	5	1,70	2	3,33	9	3,17	8	0,9	10		
Ni	ZrC	24,15	4	1,70	2	3,25	7	3,25	10	0,69	6		
Ni	HfC	28,13	5	1,70	2	3,17	6	3,20	9	0,66	5		
Ni	TiN	69,42	9	1,70	2	3,47	10	2,30	5	0,41	4		
Ni	ZrN	71,90	10	1,70	2	3,73	12	2,23	4	0,2	3		
Ni	TiO <sub>2</sub>	103,60	11	1,70	2	3,29	8	1,30	2	0,01	2		
Ni	ZrO <sub>2</sub>	117,46	12	1,70	2	3,10	5	0,92	1	-0,2	1		

Для более широкого круга покрытий было проведено сравнение по рейтингам между расчетными величинами удельной энергии адгезии  $E_A$  и напряжений адгезии  $\sigma_A$  с экспериментальными их значениями и разностью электроотрицательностей контактирующих материалов для 34 пар, из которых только три не имеют полного совпадения рейтинга (хотя они и близки между собой) с рейтингом по экспериментальным значениям и по разности электроотрицательности (табл. 3). Все это подтверждает возможность оценки порядка величины адгезионного взаимодействия по разности электроотрицательностей контактирующих материалов. Был оценен минимум и максимум адгезионного взаимодействия контактирующих материалов, как при использовании покрытий для нанесения на материал так и на подложку (табл. 4).

Таблица 3

Рейтинги по экспериментальным значениям и по разности  
электроотрицательности

Пара материалов	$E_a$ расчет, $\text{Дж/м}^2$	Рейтинг	h, мкм	$\sigma_{\text{расч}}, \text{МПА}$	Рейтинг	Экспериментальные данные				$\Delta EOC$	Рейтинг
						$E_a$ , $\text{Дж/м}^2$	Рейтинг	$\sigma, \text{МПА}$	Рейтинг		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
88%WC+ 12%Co – Cu	2,21	4	1-10	384,1-121,46	5			250-210- 280	6	-1,507	10
	2,59	4	1-10	688,36-217,68	7					1,507	10
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> – Cu	1,75	2	10-500	145,71-20,61	4			15	1	-1,01	1
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> – Ni	3,27	5	10-500	198,88-28,13	4					-1,02	1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – Сталь	3,63	5	120- 1300	53,76-16,33	3			40-70	4	0	3
	3,31	5	120- 1300	51,32-15,59	3					0	3
ZrO <sub>2</sub> – Сталь	3,02	5	120- 1300	38,58-11,72	2			40-70	4	0,28	4
	3,16	5	120- 1300	39,43-11,98	2					0,28	4
Cr – Fe	3,42	5	0,01-0,1	5591,84- 1768,3		4,64-1,53- 0,33	4	73210- 820	9	-0,17	2
Cu – Fe	2,07	4	0,01-0,1	2809,73- 888,51		3,93-1,54- 0,32	3	59040- 800	8	0,07	3
Cu – Al	1,52	2	0,01-0,1	2408,41- 761,61		3,04-0,88- 0,26	2	43140- 780	7	0,29	4
Al – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	3	0,01-0,1	2022-639,63		1,38-0,19	1			-0,22	2
Al – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		3				1,79	5			-0,22	2
TiO <sub>2</sub> – Cr	4,51	6	1-10	630,80-199,48	5	3,349	8			0,24	4
TiO <sub>2</sub> – Fe	3,39	5	1-10	546,94-172,96	5	3,379	9			0,07	3
TiO <sub>2</sub> – Ni	3,29	5	1-10	538,72-170,36	5	2,69	7			-0,01	3
TiO <sub>2</sub> - Si	2,90	4	1-10	505,81-159,95	5	4,866	10			0	3
WC+Co – Сталь	3,23	5	500- 1000	20,79-14,7	3			25-40-60	3	0,24	4
	4,71	6	500- 1000	41,49-29,34	4						
Cr – Сталь	3,58	5	10-30	180,94-104,47	5			более 100	6	-0,17	2
	3,28	5	10-30	173,23-10,01	1					-0,17	2
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Сталь	3,68	5	40-80	105,57-74,65	5			более 80	5	-0,94	1
	3,25	5	40-80	99,21-70,15							1
Cu – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	3	5-6	118,44-108,12	5			35	3	0,07	3
Ti – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,53	4	2-3	203,58-166,22	5			101	6	-0,29	2
Cu – Сталь	1,94	3	10-30	86,18-49,75	5			240	6	0,07	3
	2,28	4	10-30	93,37-53,91						0,07	3
Cu – Mo	2,41	4	5-10	135,78-96,01	5			120	6	-0,26	2
Al - AlN	2,05	4	1-3	213,87-123,48	7	1,95	6	127	6	0,18	4
Ti – AlN	2,81	4	1-10	303,79-96,07	5			120	6	0,11	4
Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	3	4-5	101,13-90,46	5	1,79	5	23	2	-0,22	2
Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	1	4-5	22,50-6,36	1			23	2	-0,22	2

Таблица 4

## Минимум и максимум адгезионного взаимодействия

Покрытие-Подложка	$\sigma$ , МПА								$\Delta EOC$	Рейтинг		
	Расчетная формула для определения $E_a$ - (1)				Расчетная формула для определения $E_a$ - (12)					макс.	мин.	
	$h$ , м											
	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	Рейтинг	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	Рейтинг				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
BN- Al	5444,70	1721,77	544,47	2	5944,22	1879,73	594,42	2	1	1	6	
Mo <sub>2</sub> C- Ni	7754,73	2452,26	775,47	5	7674,92	2427,02	767,49	5	0,39	5	2	
WC Ni	8801,46	2783,27	880,15	6	8768,07	2772,71	876,81	6	0,19	6	1	
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Ni	6289,11	1988,79	628,91	3	6414,55	2028,46	641,46	3	0,89	4	3	
NbC- Ni	6110,66	1932,36	611,07	3	6048,21	1912,61	604,82	3	0,95	2	5	
VC- Ni	7662,15	2422,98	766,21	5	6771,26	2141,26	677,13	4	0,92	3	4	
Mo <sub>2</sub> C- Ni	7754,73	2452,26	775,47	5	7645,75	2417,80	764,57	5	0,39	5	2	
Mo <sub>2</sub> C- Co	7776,97	2459,29	777,70	5	7878,33	2491,35	787,83	5	0,39	5	2	
Mo <sub>2</sub> C- Si	7370,11	2330,63	737,01	4	5438,07	1719,67	543,81	1				
Mo <sub>2</sub> C- Cu	5639,15	1783,26	563,92	2	7757,37	2453,10	775,74	2				
Mo <sub>2</sub> C- Ge	5128,81	1621,87	512,88	1	5242,76	1657,91	524,28	1				

Видно, что есть достаточная кореляция величины напряжений адгезии, полученная по формулам (1) и (12), а для многих материалов – и со значениями разности электроноотрицательностей, что говорит о реальности оценок адгезионного взаимодействия по разности электроотрицательности.

Наш эксперимент по выявлению покрытий на коэффициент трения, деформацию стружки, силы резания, чистый износ и износостойкость твердых сплавов с покрытиями показал влияние покрытий на эти величины за счет адгезионного взаимодействия и это влияние пропорционально разности электроотрицательностей [14]. Но в то же время необходимо проверить работоспособность теоретических исследований для конкретных материалов сталей 38ХС и титанового сплава ВТ-14. Данные такого исследования приведены в табл. 5. Видно, что данные для стали 38ХС практически всегда коррелируют с изменением разности электроотрицательностей.

Таблица 5

## Работоспособность теоретических исследований

Покрытие	$E_a, \frac{Дж}{м^2}$	$\sigma, \text{МПа}$			F, H						
					h, м						
		Рейтинг	$10^8$	$10^{-5}$	Гинд, мкм						
					300		400		500		Рейтинг
					38ХС						
$\text{Al}_2\text{O}_3$	3,72	1	5958	188	749	30	2994	107	4677	163	2
HfN	3,91	4	5853	185	735	29	2941	105	4595	160	1
$0,8\text{ZrN} + 0,2\text{HfN}$	4,26	7	7055	223	886	35	3545	126	5539	193	6
ZrN	4,29	8	7304	231	918	37	3670	131	5734	200	7
TaN	4,74	11	9323	295	1171	47	4684	167	7319	255	11
TiN	4,41	10	7780	246	977	39	3909	139	6108	213	10
$0,5\text{AlN} + 0,5\text{TiN}$	4,29	9	7305	231	918	37	3670	131	5735	200	8
AlN	4,15	6	6803	215	855	34	3418	122	5341	186	5
$\text{Cr}_3\text{N}_2$	4,08	5	6449	204	810	32	3241	116	5063	176	3
TiC	3,73	2	7374	233	926	37	3705	132	5789	202	9
$\text{Cr}_3\text{C}_2$	3,74	3	6724	213	845	34	3379	120	5279	184	4
BT14											
$\text{Al}_2\text{O}_3$	2,13	3	4510	143	567	23	2266	81	3541	123	1
HfN	2,51	6	4693	148	590	24	2358	84	3684	128	2
$0,8\text{ZrN} + 0,2\text{HfN}$	2,53	9	5442	172	684	27	2734	97	4272	149	7
ZrN	2,51	7	5590	177	702	28	2809	100	4389	153	8
TaN	2,66	11	6986	221	878	35	3510	125	5485	191	11
TiN	2,56	10	5920	187	744	30	2975	106	4648	162	10
$0,5\text{AlN} + 0,5\text{TiN}$	2,51	8	5591	177	702	28	2809	100	4389	153	9
AlN	2,47	4	5243	166	659	26	2634	94	4116	143	5
$\text{Cr}_3\text{N}_2$	2,49	5	5035	159	633	25	2530	90	3953	138	4
TiC	2,00	1	5397	171	678	27	2712	97	4237	148	6
$\text{Cr}_3\text{C}_2$	2,05	2	4976	157	625	25	2500	89	3907	136	3

В то же время теоретические данные для титанового сплава BT-14 совпадают по рейтингу адгезионного взаимодействия и результатам теоретических и экспериментальных данных, которые имеют последовательность покрытий HfN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $0,2\text{ HfN} + 0,8\text{ ZrN}$ ,  $\text{Mo}_2\text{N}$ ,  $0,5\text{ TiN} + 0,5\text{ AlN}$  и TiN, которая тоже не совпадает с разностью электроотрицательностей только для  $0,5\text{ TiN} + 0,5\text{ AlN}$  и TiN, что связано с самодиффузией титана, тогда как в теории по рейтингу по силе адгезии покрытия распределены так:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , HfN,  $\text{Cr}_3\text{C}_3$ ,  $\text{Cr}_3\text{N}_2$ , AlN, TiC,  $0,2\text{ HfN} + 0,8\text{ ZrN}$ , ZrN,  $0,5\text{ AlN} + 0,5\text{ TiN}$  и TiN (подчеркнутые ---

бллизки между собой, — совпадают по рейтингу, не подчеркнутые — не исследованы экспериментально).

Рейтинг по напряжению адгезии для энергии в теории такой: TiC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlN, HfN, ZrN, 0,2 HfN + 0,8 ZrN, 0,5 AlN + 0,5 TiN; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfN, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, AlN, TiC, 0,2 HfN + 0,8 ZrN, ZrN, 0,5 TiN + 0,5 AlN и TiN, TaN.

Видно, что рейтинг покрытий в основном совпадает с разностью электроотрицательностей, исключая Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и HfN, которые поменялись местами, а для титаносодержащих покрытий 0,5 TiN + 0,5 AlN и TiN рейтинг изменился из-за самодиффузии титана в сплав BT-14, что повышает адгезию.

**Выводы.** В заключение можно отметить, что сравнение результатов теоретических расчетов экспериментальных результатов показало, что с высокой достоверностью можно оценивать адгезионное взаимодействие контактирующих материалов по разности электроотрицательностей.

**Список литературы:** 1. Рогожина Т.С. Контактная энергия в зоне адгезии металлов // Электронный научный журнал «Исследовано в России». 2. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкокометаллического бланкета термоядерного реактора И.В. Витковский, А.Н. Конев, В.С. Шоркин // Журнал технической физики, 2009. – Т. 79. – Вып. 2. – С. 11 – 16. 3. Связь между изменением энергии Гиббса химической реакции и краевыми углами смачивания в системах жидкий металл-оксид А.В. Иванов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2002. – Т. 43. – №5. 4. Лунев В.М. Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения / В.М. Лунев, О.В. Немашкало // ФИП, 2010. – Т. 8. – №1. – Vol. 8. – № 1. – С. 64-71. 5. Синькевич Ю.В. Влияние электроимпульсного полирования подложки на прочность сцепления гальванических покрытий / Вестник ПГУ. №2. – Серия В. Прикладные науки. промышленность. 2008г. – С. 228-232. 6. Вакилов А.Н. Адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма / А.Н. Вакилов, М.В. Мамонов, В.В. Прудников // Физика твердого тела. – 1997. – Т. 39. – №6. – С. 964-967. 7. Молодечкина Т.В. Определение адгезионных свойств диоксида титана к различным подложкам / Т.В. Молодечкина, В.П. Глыбин, Л.М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2003. – №4. – С. 119-121. 8. Исследование возможности замены гальванических хромовых покрытий на газотермические покрытия, напыленные высокоскоростной грелкой TOP GUN-K / Балдаев Л.В., Димитриенко Л.Н. [http://www.tspc.ru/about/lit/tspc\\_lit\\_6.pdf](http://www.tspc.ru/about/lit/tspc_lit_6.pdf). 9. Костюк Г.И., Фадеев В.А., Бруяка О.О. Повышение работоспособности покрытий на РИ при обработке сталей с учетом адгезионного взаимодействия: сб. науч. тр. «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». – Вып. 3 (63). – 2010. – С. 63-72. 10. Костюк Г.И., Фадеев А.В., Куриной А.Н., Босенко Т.П. Исследование износа РИ с покрытием при его моделировании на машине трения: сб. науч. тр. «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». – Вып. 3 (63). – 2010. – С. 104-112. 11. Костюк Г.И., Степаненко В.Н., Костюк Е.Г., Костюк А.Н., Карапышев Ю.Ю. Деформация стружки после получистового течения стали 39ХС и сплава ЭИ702 и чистового течения жаропрочной стали 30Х14А РИ с покрытиями: сб. науч. тр. «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». – Вып. 3 (63). – 2010. – С. 134-140. 12. Костюк Г.И., Миргородский А.Ю., Хаки Махмуд Салех. Силы резания при обработке конструкционных материалов твердыми сплавами с различными покрытиями: сб. науч. тр. «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». – Вып. 3 (63). – 2010. – С. 165-172. 13. Костюк Г.И., Миргородский А.Ю., Воляк С.Н. Связь между коэффициентом трения покоя и адгезионным взаимодействием конструкционных материалов с материалом РИ при применении температуры и нормальной нагрузки: сб. науч. тр. «Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов». – Вып. 3 (63). – 2010. – С. 248-261.

Поступила в редакцию 07.07.11

**В.Г. ШКУРУПІЙ**, канд. техн. наук, доц., ХНЭУ, Харьков;  
**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков

## УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ ВЫСОТЫ МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ НА ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПРОЦЕССЕ ДОВОДКИ

У роботі обґрунтовані основні умови зменшення висоти мікронерівностей на оброблюваній поверхні в процесі доведення. Дано практичні рекомендації з удосконалювання процесу доведення прецизійних деталей із дзеркальними поверхнями

The basic terms of diminishing of height are in-process grounded mikroburries on the processed surface in the process of polishing. Practical recommendations are Given on perfection of process of polishing of precisionnykh details with mirror surfaces

В работе обоснованы основные условия уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности в процессе доводки. Даны практические рекомендации по совершенствованию процесса доводки прецизионных деталей с зеркальными поверхностями

Ключевые слова: Процесс доводки, абразивные зерна, зернистость порошка, связка круга, шероховатость поверхности

**Введение.** При изготовлении ответственных деталей машин к шероховатости обрабатываемых поверхностей предъявляются высокие требования в связи с необходимостью обеспечения заданных эксплуатационных характеристик деталей (износостойкости, оптических свойств и т.д.). Шероховатость обрабатываемых поверхностей данных деталей формируется на финишных операциях, которые осуществляются, как правило, с использованием различных абразивных инструментов (шлифовальных кругов, хонинговых головок, притиров и т.д.) [1]. Как показывает практика, наилучшие результаты достигаются на операциях доводки свободным абразивом (алмазной пастой и алмазным мелкозернистым порошком). В настоящее время накоплен большой опыт эффективного применения процессов доводки [2]. Вместе с тем, все возрастающие требования к показателям шероховатости поверхности при доводке деталей из труднообрабатываемых материалов предопределяют необходимость поиска новых технологических решений. Поэтому целью настоящей работы является теоретическое обоснование условий уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности при доводке.

**Основное содержание работы.** При обработке абразивными зернами одного размера с углом при вершине  $2\gamma$  (рис. 1) отношение параметров шероховатости поверхности  $R_{max} / R_a = 4$ , а положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности определяется линией, разделяющей микропрофиль на две одинаковые части ( $a = 0,5 \cdot R_{max}$ ) [3]. Относительная опорная длина микропрофиля обработанной поверхности  $\varepsilon(y)$  принимает вид прямой линии. Исходя из этого,

уменьшить параметр шероховатости  $R_a$  можно уменьшением параметра  $R_{max}$ , который зависит от количества зерен  $n$ , участвующих в формировании шероховатости обработанной поверхности. Чем больше  $n$ , тем меньше параметр  $R_{max}$ . В идеале, при бесконечном увеличении количества зерен  $n$ , можно получить фактически нулевое значение  $R_{max}$ . Это вытекает из зависимости для определения параметра шероховатости поверхности  $R_{max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot n}$ , полученной из условия (рис.

$$1, a): \quad 2 \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot R_{max} \cdot n = B, \quad \text{где} \quad B - \text{ширина обработки, м; } n = n_0 \cdot i;$$

$$n_0 = k \cdot \frac{R_{max}}{\bar{X}} \cdot \pi \cdot D_{инст} \cdot B - \text{количество зерен, расположенных на рабочей поверхности инструмента и участвующих в резании; } k - \text{количество зерен, расположенных на единице площади рабочей поверхности инструмента (условная поверхностная концентрация зерен), штук/м}^2; \bar{X} - \text{размер зерна (зернистость абразивного или алмазного порошка), м; } D_{инст} - \text{диаметр инструмента, м; } i = \tau / \tau_1 - \text{количество вращений инструмента за время } \tau; \tau_1 = \pi \cdot D_{инст} / V_{инст} - \text{время одного вращения инструмента, с; } V_{инст} - \text{скорость инструмента, м/с. После преобразований получим}$$

$$R_{max} = \sqrt{\frac{\bar{X}}{2 \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{инст} \cdot \tau}}. \quad (1)$$

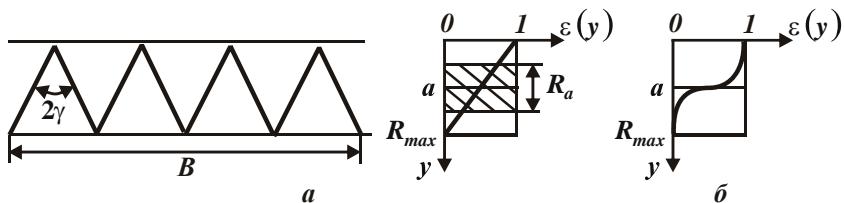


Рис. 1. Расчетная схема параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке (а) и график функции  $\varepsilon(y)$  (б).

Из зависимости (1) вытекает, что уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  можно уменьшением  $\bar{X}$  и увеличением параметров  $\gamma$ ,  $k$ ,  $V_{инст}$  и  $\tau$ . Для данной схемы обработки за счет увеличения времени  $\tau$  можно уменьшить параметр  $R_{max}$  вплоть до нуля. Однако при этом необходимо исключить перемещение обрабатываемой детали в радиальном направлении, в противном случае шероховатость поверхности с увеличением  $n$  будет уменьшаться лишь до определенной величины, после чего будет оставаться неизменной или увеличиваться. Это вытекает из зависимости (1) с

учетом того, что время  $\tau$  формирования шероховатости поверхности не бесконечно, а ограничено перемещением обрабатываемой детали по нормали к рабочей поверхности круга на величину  $R_{max}$ , т.е.  $\tau = R_{max} / S_{pad}$  (где  $S_{pad}$  – скорость радиальной подачи обрабатываемой детали, м/с). После преобразований зависимость (1) выразится

$$R_{max} = \sqrt[3]{\frac{\bar{X} \cdot S_{pad}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инстр}}} . \quad (2)$$

Как видно, параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  в данном случае определяется режимом обработки и характеристиками инструмента и не зависит от времени  $\tau$ , т.е. является ограниченной величиной. Чем меньше  $S_{pad}$ , тем меньше  $R_{max}$ . Следовательно, достижение небольших значений  $R_{max}$  требует снижения производительности обработки. В связи с этим, эффективно на окончательном этапе обработки (при формировании шероховатости поверхности) использовать схему выхаживания, согласно которой съем обрабатываемого материала происходит лишь под действием упруго-восстанавливающей силы с уменьшающейся во времени скоростью радиальной подачи. Это позволит обеспечить заданную шероховатость поверхности без существенного снижения производительности обработки.

Практика показывает, что в реальных условиях обработки относительная опорная длина микропрофиля обработанной поверхности  $\varepsilon(y)$  может принимать самую разнообразную форму в связи с различными по размерам и форме зернами, а также в связи со случайным характером участия зерен в съеме материала и формировании шероховатости поверхности. Появление в общей массе зерен буквально одного зерна, по размеру и форме отличного от остальных, приводит к изменению вида функции  $\varepsilon(y)$ . Присутствие в общей массе зерен определенного количества зерен разных размеров приводит к существенному изменению вида функции  $\varepsilon(y)$ , например, показанному на рис. 1,б. Соотношение  $R_{max}/R_a$  может изменяться в широких пределах (от 4 до 33 [4]), хотя параметр шероховатости  $R_a$  при этом почти не изменяется, а изменение соотношения  $R_{max}/R_a$  происходит за счет увеличения параметра  $R_{max}$ . В этих условиях уменьшить шероховатость поверхности можно за счет снижения разброса размеров абразивных зерен и их зернистости на основе применения нанотехнологий.

Необходимо отметить, что добиться уменьшения шероховатости поверхности можно при обработке как свободным, так и связанным абразивом. Однако во втором случае зернистость абразивных зерен больше, поэтому трудно изготовить абразивные инструменты (шлифовальные круги, притирки

и т.д.) малой зернистости. Естественно, обработка более крупными зернами приводит к увеличению высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности. В этом случае уменьшить шероховатость поверхности можно, например, за счет создания на шлифовальном круге плосковершинных зерен путем обтачивания круга алмазным карандашом [5]. При шлифовании по жесткой схеме абразивным или алмазным кругом с плосковершинными зернами высота микронеровностей на обрабатываемой поверхности может быть уменьшена в 10 и более раз. Эффект достигается за счет резания плосковершинными зернами, имеющими приблизительно одинаковую высоту выступления над уровнем связки. При этом в резании может участвовать небольшое количество зерен, т.е. формирование шероховатости поверхности может происходить за один проход круга, что позволяет существенно увеличить производительность обработки. При обработке свободным абразивом в формировании шероховатости поверхности должно участвовать значительно большее количество зерен, что предполагает более низкие показатели производительности обработки.

Экспериментально установлено, что наибольший эффект от создания площадок на вершинах режущих зерен достигается при шлифовании алмазными кругами на высокопрочных металлических связках. В этом случае за счет прочного удержания зерен в связке на их вершинах в процессе обтачивания круга алмазным карандашом образуются значительные по размерам площадки, что ведет к уменьшению высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности в процессе шлифования. Данный вывод вытекает из зависимости

$$R_{max} = \frac{1}{2 \cdot tg\gamma} \cdot \left( \frac{B}{n} - a_s \right), \quad (3)$$

полученной из условия:  $n \cdot (2 \cdot tg\gamma \cdot R_{max} + a_s) = B$ , где  $a_s$  – длина площадки на вершине зерна, м.

Как следует из зависимости (3), с увеличением  $a_s$  параметр шероховатости поверхности  $R_{max}$  может уменьшаться вплоть до нуля (даже при небольшом количестве зерен  $n$ ). Уменьшить  $R_{max}$  можно также увеличением количества зерен  $n$  за счет применения относительно мягких связок, обеспечивающих "утопление" зерен в связку при шлифовании и примерно одновысотное выступление вершин зерен [6]. К таким связкам можно отнести, например, органическую связку, которая применяется при изготовлении алмазных кругов (рис. 2).

Несомненно, при шлифовании (даже алмазными кругами с плосковершинными зернами) невозможно обеспечить такие низкие значения шероховатости поверхности, которые достигаются при доводке свободным абразивом.



Рис. 2. Структурная схема условий уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности при абразивной обработке.

Поэтому проведем анализ технологических возможностей процесса доводки прецизионных деталей с зеркальными поверхностями. В этом случае обработку производят пеноканифольными полировальниками. Положительный результат получен при использовании доводочного алмазно-абразивного состава с поливинилацетатной дисперсией, что позволило устраниТЬ токсичность ранее применяемых составов и уменьшить микронеровности на поверхности. Рекомендуется следующее соотношение компонентов (вес, %): алмазный микропорошок (5-8); поливинилацетатная дисперсия (5-7); вода (остальное). Состав готовят смешением компонентов. Варианты состава и их рабочие характеристики приведены в табл. 1.

Поливинилацетатная дисперсия при оптимальном ее содержании в доводочном алмазно-абразивном составе обеспечивает фиксацию абразивных зерен на полировальнике. Продукты механической деструкции поливинилацетата способны химически взаимодействовать с металлом обрабатываемой поверхности, особенно с образующимися в процессе царапания режущими элементами зерен, гребешками, что обеспечивает повышение съема металла и сглаживание поверхности, и приводит к увеличению ее светоотражающей способности.

При увеличении содержания поливинилацетатной дисперсии вязкость доводочного алмазно-абразивного состава повышается и он оказывает демпфирующее действие на полировальник. Абразивные зерна при этом свободно перемещаются в зоне обработки, не оказывая значительного режуще-царапающего действия, а производительность процесса доводки уменьшается. Уменьшение же содержания поливинилацетатной дисперсии в составе ниже 5% приводит к потере эффекта, оказываемого ею на процесс доводки.

Таблица 1

## Шероховатость поверхности для различных составов

№ п/п	АСМ 3/2, %	ПВА, %	ПАВ, %	Аммиак, %	Вода, %	Съем металла, г	Шероховатость $R_s$ , мкм	Коэффициент отражения $\rho_s$ , %
1	1,5	-	2,5	0,15	95,85	0,26331	0,08	98,4
2	6,0	-	2,5	0,15	91,35	0,28231	0,09	98,2
3	2,0	6,0	-	-	92,0	0,27312	0,09	99,0
4	3,0	6,0	-	-	91,0	0,41349	0,09	99,0
5	4,0	6,0	-	-	90,0	0,56331	0,10	98,1
6	5,0	6,0	-	-	89,0	0,64632	0,05	99,1
7	6,0	6,0	-	-	88,0	0,68922	0,04	99,2
8	7,0	6,0	-	-	87,0	0,65734	0,05	99,2
9	8,0	6,0	-	-	86,0	0,64931	0,06	99,1
10	9,0	6,0	-	-	85,0	0,63110	0,07	99,0
11	6,0	3,0	-	-	91,0	0,51006	0,09	98,2
12	6,0	4,0	-	-	90,0	0,63789	0,08	98,3
13	6,0	5,0	-	-	89,0	0,65123	0,05	99,0
14	6,0	6,0	-	-	88,0	0,67123	0,05	99,2
15	6,0	7,0	-	-	87,0	0,64341	0,04	99,2
16	6,0	8,0	-	-	86,0	0,62789	0,05	99,0

АСМ 3/2 – алмазный микропорошок; ПВА – поливинилацетатная дисперсия; ПАВ – оксиэтилированные аминоспирты.

Содержание алмазного микропорошка в доводочном алмазно-абразивном составе свыше оптимального содержания (при капельном методе подачи суспензии в зону обработки) не приводит к повышению производительности процесса доводки, т.к. насыщение полировальника абразивными зернами может происходить до определенной степени, а затем алмазный микропорошок непроизводительно минует зону обработки.

Поливинилацетат и продукты его механической деструкции, происходящей при царапании абразивными (алмазными) зернами металлических поверхностей, способны образовывать прозрачную тончайшую пленку на обработанной поверхности, которая оказывает консервирующе действие на ювелирные металлические поверхности и, следовательно, уменьшает коррозионный процесс.

Сглаживание поверхности в процессе доводки обеспечивает высокую светоотражающую способность поверхностей, обрабатываемых с помощью разработанного доводочного алмазно-абразивного состава. Этот же состав может быть использован для обработки прецизионных деталей с заменой алмазного микропорошка обычными абразивами (макропорошками электрокорунда или карборунда).

Предлагаемый доводочный алмазно-абразивный состав может успешно применяться при доводочных процессах высокоточных деталей с зеркальными поверхностями, т.к. он обладает указанными выше достоинствами, а по-

ливинилацетатная дисперсия является весьма доступным веществом.

**Выводы.** В работе теоретически обоснованы основные условия уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности при абразивной обработке, состоящие в обеспечение примерно одновысотного выступления зерен на рабочей поверхности инструмента. Показано, что при доводке свободным абразивом уменьшить высоту микронеровностей на обрабатываемой поверхности можно увеличением количества зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, и уменьшением разброса размера зерен и их зернистости. Показано также, что при шлифовании по жесткой схеме абразивными и алмазно-абразивными инструментами уменьшить высоту микронеровностей на обрабатываемой поверхности можно созданием площадок на вершинах зерен (созданием плосковершинных зерен) и обеспечением "утопания" зерен в связку круга при шлифовании, например, используя относительно мягкую органическую связку, которая применяется при изготовлении алмазных кругов.

Даны практические рекомендации по совершенствованию процесса доводки прецизионных деталей с зеркальными поверхностями с точки зрения существенного уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности. Доказана эффективность применения в данном случае доводочного алмазно-абразивного состава с поливинилацетатной дисперсией, обеспечивающего сглаживание поверхности в процессе доводки и ее высокую светоотражающую способность. Этот состав может быть использован для обработки различных прецизионных деталей с заменой алмазного микропорошка обычными абразивами (макропорошками электрокорунда или карбогрунда).

**Список литературы:** 1. Сагарда А.А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А.А. Сагарда, И.Х. Чеповецкий, Л.Л. Мишинаевский. – К.: Техніка, 1974. – 179 с. 2. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – К.: Наук. думка, 1984. – 272 с. 3. Новиков Ф.В. Аналитическое определение параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научно-технической конференции, Одесса – Киев: АТМ Украины. – 2009. – С. 140-144. 4. Шкурупий В.Г. Підвищення ефективності технологій фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стріочек: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / В.Г. Шкурупий. – Одеса, 2006. – 21 с. 5. Новиков Ф.В. Повышение качества обработки при круглом наружном алмазном шлифовании специальных твердосплавных инструментов / Ф.В. Новиков, С.А. Дитиненко // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. – Вып. 67. – С. 74-85. 6. Новиков Ф.В. Условия формирования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке / Ф.В. Новиков, В.П. Ткаченко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып. 60. – С. 171-176

Поступила в редакцию 5.05.2011г.

**Г.И. КОСТЮК**, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**І.В. ДОЩЕЧКИНА**, канд. техн. наук, НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А.Н. КОСТЮК**, инж., ХНУРЭ, Харьков;  
**Р.В. ВОРОПАЙ**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА ПЛАСТИН С ПОКРЫТИЕМ ПРИ ЭФФЕКТИВНОМ ТОЧЕНИИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ 65Г

Наведено експериментальні результати дослідження динамічного зношування різальних пластин «Сандвік Коромант» Н13А з покриттям 0,18HfN+0,82ZrN при точенні загартованої сталі 65Г і показано можливість прогнозування їх стійкості та об'єму матеріалу, що зникається за термін стійкості.

Ключові слова: різальні пластиини, зношування, покриття, стійкість, об'єм матеріалу, що зникається за період стійкості.

The experimental results of the dynamic wear of "Sandvik Coromant" cutting plates with 0,18HfN+0,82ZrN coating are quoted under (tempered) chilled steel 65Г turning and the possibility of their wear resistance and the removed material volume during wear resistance period is shown/

Keywords: cutting plates, deterioration, a covering, the firmness, the removed volume of a material during firmness.

Приведены экспериментальные результаты исследования динамического износа режущих пластин «Сандвик Коромант» Н13А с покрытием 0,18HfN+0,82ZrN при точении закаленной стали 65Г и показана возможность прогнозирования их стойкости и снимаемого объема материала за период стойкости.

Ключевые слова: режущие пластины, износ, покрытие, стойкость, снимаемый объем материала за период стойкости.

**1. Введение.** Закалка, цементация и другие виды упрочнений приводят к существенному изменению геометрии детали в результате ее коробления, и тогда она требует последующей обработки, чаще всего шлифования, но многие дефекты не могут быть устранены шлифованием. И тогда на первый план выступает точение, которое обеспечивает достаточную точность и требуемую шероховатость.

В то же время наплавка твердых сплавов и детонационное напыление не позволяют использовать детали без последующей формообразующей обработки, т.е. требуют использования точения, строгания, фрезерования или другой механической обработки. Все это говорит об актуальности и важности проводимых исследований.

**2. Приборы, материалы и методы исследования.** Исследовался износ режущего инструмента (РИ) – пластины Н13А производства «Сандвик Коромант» с покрытием 0,18 HfN + 0,82 ZrN при точении стали 65Г, закаленной в масле при температуре 850° С (выдержка 20 минут) и со средним отпуском при температуре 450° С (выдержка 50 минут). Структура стали – тростит отпуска, твердость 46 HRC.

Покрытие  $0,18\text{HfN}+0,82\text{ZrN}$  наносилось при потенциале на подложке 350 В, давлении азота  $P = 3 \cdot 10^{-3}$  мм рт.ст, время нанесения покрытия – 30 мин, микротвердость –  $H_\mu = 36$  ГПа. Износ измерялся на инструментальном и оптическом микроскопах, где определялись также размеры лунки на передней поверхности. Точение производилось на модернизированном станке 1А62 при таких режимах резания: число оборотов  $n = 630$  об/мин, глубина резания – 0,5 мм, подача – 0,15 мм/об.

**3. Результаты эксперимента и их обсуждение.** Исследовалась динамика износа по передней и задней поверхностям, а также размеров лунки. Проводилось контрольное фотографирование поверхностей пластины «Сандвик Коромант» H13A.

Так, износ по передней  $h_{\text{пп}}$  и задней  $h_{\text{зп}}$  поверхностей во времени показан на рис. 1. Видно, что скорость износа по передней поверхности существенно снижается во времени, тогда как скорость износа по задней поверхности после приработки сохраняется постоянной.

Анализ зависимости глубины лунки от времени (рис. 2) свидетельствует о том, что во время приработки РИ и обрабатываемого материала скорость износа высокая, далее во времени она снижается и к 480 с работы стабилизируется, а глубина лунки не растет. Для полноты исследования было проведено фотографирование передней и задней поверхностей режущей пластины после 442 с (а), 884 с (в), 1326 с (с) на рис. 3. Видно, что характер износа существенно отличается от случая обработки незакаленных сталей.

1. На передней поверхности появляется две лунки вблизи режущей кромки, а не одна, как при обработке незакаленных сталей ( $t = 442$  с, рис. 3, а);
2. В дальнейшем происходит объединение этих лунок в одну узкую по длине и большую по ширине (рис. 3, в,  $t = 884$  с);
3. При последующей обработке реализуется развитие размеров лунки по длине (рис. 3, д,  $t = 1326$  с);
4. По задней поверхности после приработки ( $t = 442$  с) в дальнейшем износ растет линейно (рис. 3, б, г, е).

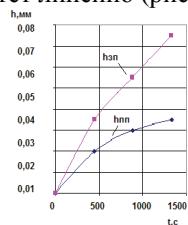


Рис. 1. Зависимость износа по задней  $h_{\text{зп}}$  и передней  $h_{\text{пп}}$  поверхностям пластины с покрытием от времени точения закаленной стали 65 Г

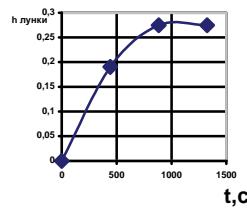


Рис. 2. Зависимость глубины лунки на передней поверхности пластины с покрытием  $0,18\text{ HfN}+0,8\text{ ZrN}$  от времени работы РИ



а



б



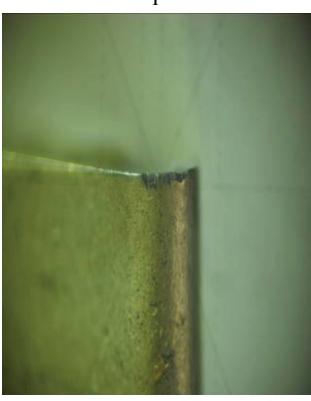
в



г



д



е

Рис. 3. Фотографии износа передней и задней поверхностей режущей пластины после 320 с (а), 640 с (б), 960 с (г), 1280 с (е)

Для выявления эффективности обработки была построена зависимость снимаемого объема материала за время работы от износа по задней поверхности, которая показана на рис. 4. Видно, что износ сначала растет быстро до 442 с, а затем стабилизируется. Снимаемый объем обработки линейно растет, что дает возможность прогнозировать его до критического износа.

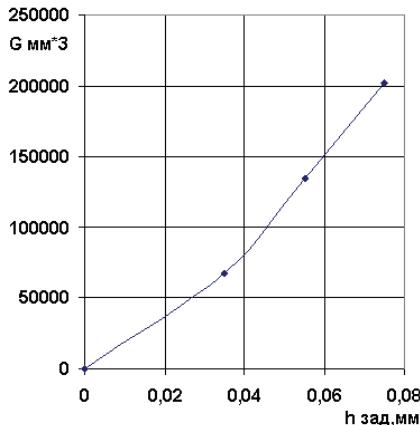


Рис. 4. Зависимость снимаемого объема материала за период стойкости от износа по задней поверхности пластины с покрытием

Во все исследованные промежутки времени необходимо определить эффективность обработки, которую оценим по величине снимаемого объема за период стойкости и динамике износа по задней поверхности (примем критерием износа достижение износа по задней поверхности  $h_{\text{зп}} = 0,4 \text{ мм}$ ). В результате этого мы сможем определить снимаемый объем за период стойкости по величине прогнозируемой величины стойкости:

$$T_{np} = \frac{h_{\text{зп},kp}}{V_{\text{изн.зп}}} = \frac{h_{\text{зп},kp} \times (t_3 - t_2)}{h_{\text{зп}3} - h_{\text{зп}2}}. \quad (1)$$

Получив период стойкости, можем определить величину прогнозируемого снимаемого объема за период стойкости:

$$G_{np} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times T_{np} = \frac{G_3 - G_2}{t_3 - t_2} \times \frac{h_{\text{зп},kp} \Delta t_{32}}{h_{\text{зп}3} - h_{\text{зп}2}}, \quad (2)$$

где  $h_{\text{зп},kp}$  – допускаемый износ по задней поверхности;  $h_{\text{зп}3}$  – износ по задней поверхности к концу третьего периода работы;  $h_{\text{зп}2}$  – износ по задней

поверхности к концу второго периода работы;  $t_3$  и  $t_2$  – время работы в третьем и во втором периодах, а  $G_3$  и  $G_2$  – снимаемый объем материала за время  $t_3$  и  $t_2$ .

Такой подход позволяет прогнозировать снимаемый объем за период стойкости без проведения полномасштабного эксперимента.

#### **4. Выводы.**

1. Показана возможность прогноза снимаемого объема за период стойкости и стойкости пластины с покрытием при заданных режимах резания без полномасштабного эксперимента.

2. Показано, что характер динамики износа на передней поверхности при обработке закаленной стали 65Г отличается от известного ранее: сначала вблизи режущей кромки появляются две лунки на передней поверхности, которые со временем соединяются (находясь вблизи режущей кромки), а после соединения увеличивается длина лунки, причем ее глубина сохраняется и у самой режущей кромки покрытие продолжает успешно работать.

3. Принципиально доказана возможность замены шлифования точением при обработке закаленных сталей.

**Список литературы:** 1. Kostyuk G.I. The effective cutting tools having the coating and hardened layers. Monograph-reference book. National aerospace university named by N.E. Gukovsky «Kharkov aviation institute». 2007. – 633 p.

*Поступила в редакцию 08.07.11*

**E.V. НАБОКА**, к.т.н., доцент НТУ «ХПИ»

## **ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ И НЕКОТОРЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО ДЕТАЛИ**

У статті розглянуто питання впливу технологічної спадковості та деяких геометрических параметрів на якість деталі.

В статье рассмотрены вопросы влияния технологической наследственности и некоторых геометрических параметров на качество детали.

The article deals with the question influence of technological heredity and some geometrical parameters on the quality of parts.

**Актуальность.** Проблема управления технологическими процессами изготовления деталей обычно ограничивается рамками отдельных операций. Однако для обеспечения качества машин необходимо всесторонне исследовать эксплуатационные свойства деталей, учитывая действие технологической наследственности. Это означает, что все операции и их технологические переходы следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики формируются всем комплексом технологических воздействий и изменяются при эксплуатации машины.

### **Качественная постановка задачи.**

Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их параметров. Носители информации активно участвуют в технологическом процессе, проходя через различные операции и переходы, испытывая воздействия технологических факторов.

В технологической цепочке существуют своего рода "барьеры". Некоторые технологические факторы преодолеть эти "барьеры" не могут и в таком случае их влияние на конечные свойства объекта отсутствуют. Другие факторы такие "барьеры" проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо.

Следовательно, процессом технологического наследования можно управлять, с тем чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всего технологического процесса, а свойства, влияющие отрицательно, - ликвидировать в его начале.

Использование метода корреляционного анализа требует большого количества замеров, что представляет существенные трудности, особенно для высокоточных деталей.

При обработке заготовок большое внимание уделяют точности геометрических показателей. Часто качество деталей оценивают по точности размера. Выдерживание заданного размера с жесткими допусками на размеры не представляет таких технических трудностей, как обеспечение точности формы. Кроме того, условия формообразования деталей настолько сложны, что одновременно могут возникать ряд отклонений от формы поверхностей.

Важной составной частью понятия "качество поверхностного слоя" являются микронеровности поверхности, обусловленные технологическим процессом изготовления деталей. Они решающим образом влияют на эксплуатационные показатели узлов трения машины в целом.

Геометрические отклонения поверхностей оценивают по отношению шага неровностей к их высоте. В зависимости от числовых значений этого отношения различают шероховатость и волнистость поверхностей. Если эти значения превышают 1000, отклонения считают макроскопическими.

Таким образом, существует актуальная задача по изготовлению деталей с соблюдением допусков, которая способствует созданию высококачественной машины, несмотря на то, что каждая деталь ограничивается поверхностями, размеры и форма которых отличаются от номинальных.

Метод выбора допусков размеров имеет принципиальное значение.

Метод аналогов заключается в том, что конструктор отыскивает среди ранее сконструированных и находящихся в эксплуатации машин и узлов такие, в которых имеются детали, аналогичные конструируемым.

Развитием метода аналогов является метод подобия. Для назначения допусков этим методом отыскивают подобие конструктивных признаков и условий эксплуатации. Однако иногда бывает сложно установить собственно подобие, что ограничивает применение метода.

Наиболее обоснованным является расчетный метод. Пользуясь этим методом, назначают квалитеты (классы, степени точности) различных поверхностей деталей на основе физических явлений при эксплуатации, связанных чаще всего с контактированием деталей в собранной машине.

Каждая деталь характеризуется бесконечно большим числом размеров. Детали лишь на чертежах характеризуются номинальными (идеальными), а фактически ограничены реальными поверхностями. Детали всегда имеют отклонения формы. Обеспечение допустимого отклонения формы в производственных условиях всегда затруднено.

Изготовление деталей с соблюдением допусков способствует созданию высококачественной машины, несмотря на то, что каждая деталь ограничивается поверхностями, размеры и форма которых отличаются от номинальных.

При решении проблемы качества деталей необходимо опираться на количественные показатели. На рисунке 1 схематично представлена деталь типа двухступенчатого вала.

$$f(\varphi) = (\varphi + 2\pi).$$

В любом поперечном сечении размеры вала определяются переменным радиусом  $R$ , отсчитываемым от центра  $O$  номинального сечения диаметром  $D_h$ . Радиус  $R$ , именуемый текущим размером, зависит от угловой координаты  $\varphi$ . Текущий размер также меняется по координате  $z$ . Начальное значение радиуса оговаривается. Так, им может быть радиус  $R_1$  с угловой координатой  $\varphi_1$ . Любой контур поперечного сечения удовлетворяет условию замкнутости, т.е.

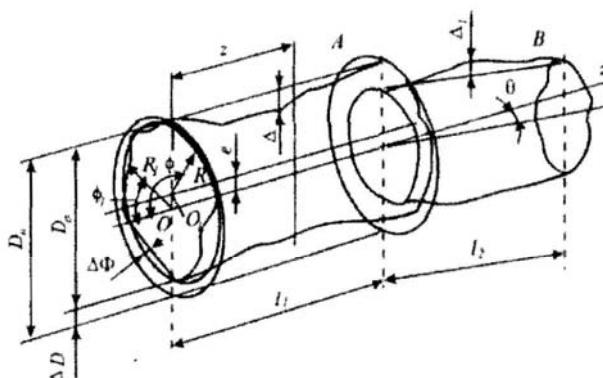


Рис. 1 - Схема отклонений параметров двухступенчатого вала

Реальный контур на левом торце вала ограничивается прилегающей окружностью (штриховая линия) диаметром  $D_d$ . Отклонение от круглости, характерное для каждого сечения, обозначено  $\Delta\Phi$ . Для каждого сечения можно определить отклонение  $\Delta D$  размера. Прилегающая окружность имеет центр в точке  $O_1$ . Поэтому действительный контур детали отличается от номинального (идеального), а их оси смешены на расстояние, равное эксцентриситету  $e$ . Ось действительного контура в общем виде не является прямой линией. Это характерно для любого сечения ступени вала А длиной  $l_1$ .

Таким образом, для оценки качества детали ее форма имеет первостепенное значение. Отклонения формы удобно описывать с помощью

рядов Фурье. Зависимость  $f(\phi)$  погрешности действительного профиля от угла поворота рассматривается в полярной системе координат:

$$f(\phi) = a_0/2 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\phi + b_k \sin k\phi),$$

где  $a_0/2$  - нулевой член разложения;  $k$  - порядковый номер соответствующей гармоники;  $a_k, b_k$ - коэффициенты ряда Фурье  $k$ -й гармоники.

Вместо рядов для фактических целей удобно пользоваться тригонометрическим полиномом

$$f(\phi) = c_0/2 + \sum_{k=1}^{n'} c_k (\cos k\phi + \varphi_k),$$

где  $n'$  - порядковый номер высшей гармоники полинома. Величина  $c_0/2$  может быть принята за среднее значение функции  $f(\phi)$  в течение периода  $T=2\pi$  и определяется расстоянием от базового значения текущего размера до средней линии отклонений профиля. Поэтому значение  $c_0/2$  представляет собой отклонение размера.

Первый член разложения  $c_1 \cos(\phi + \varphi_1)$  характеризует расстояние между центром вращения  $O_1$  и геометрическим центром  $O$ , т.е. эксцентриситет  $e$ . Он указывает на отклонение расположения поверхности и выражает его количественно. Последующие члены полинома, начиная со второго, характеризуют спектр отклонений формы детали в поперечном сечении. Второй член  $c_2 \cos(2\phi + \varphi_2)$  характеризует овальность сечения, а третий член  $c_3 \cos(3\phi + \varphi_3)$  - огранку с трехвершинным профилем и т.д. Поэтому сечение детали следует представлять очерченным контуром, имеющим отклонение размера с центром, смещенным от геометрического центра. Контур имеет овальную форму, на которую наложены огранки с различным числом вершин. Остальные члены ряда характеризуют соответствующие волнистость и шероховатость.

Приведенные рассуждения справедливы и для ступени В (см. рис. 1.) вала длиной  $l_2$ . Однако у этой ступени может оказаться своя ось, повернутая на угол  $\theta$  в любой из плоскостей относительно оси  $z$ , а также могут возникнуть свои собственные погрешности. Отклонения профилей цилиндрических поверхностей целесообразно представлять и в продольных сечениях. Условие замкнутости контура здесь не соблюдается.

Тригонометрический полином для описания продольного сечения можно применить, используя цилиндрическую систему координат (координатами являются  $R, \phi, z$ ). Условно принимаем, что период  $T = 2l$  ( $l$  - длина участка цилиндрической поверхности). Полином имеет вид

$$f(z) = c_0/2 + \sum_{k=1}^{n'} c_k \sin k\pi z/(2l).$$

где  $k$  - порядковый номер члена разложения.

Первый член разложения показывает, что при  $z = 0$ ;  $f(z) = 0$ , а при  $z = 1$ ;  $f(z) = c_1$ . Следовательно, этот член характеризует конусообразность, так как образующая профиля имеет соответствующий наклон. Второй член разложения  $f_2(z) = c_2 \sin(\pi z)/l$  характеризует выпуклость контура, а при сдвиге фазы  $f_2(z) = c_2 \sin(\pi z/l - \pi/2) = c_2 \cos(\pi z/l)$ , т.е. он характеризует вогнутость контура. Так, на ступени А вала возникла седлообразность величиной  $\Delta$ , а на ступени В - бочкообразность  $\Delta_1$ .

Профиль детали в продольном направлении также представляет собой сложное сочетание конических поверхностей с наложенными на них седлообразными, бочкообразными, волнистыми профилями.

**Список литературы:** 1. Шухгалтер Л.Я. Управление качеством машин. М.: Машиностроение, 1977. 96 с., 2. Технологические основы обеспечения качества машин / К.С. Колесников, Г.Ф. Баландин, А.М. Дальский и др. М.: Машиностроение, 1990. 256, 3. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. М.: Наука и техника, 1977. 256 с., 4. Роботнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1977. 383 с., 5. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / Под ред. А.М. Дальского. М.: МГУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 564 с.

*Поступила в редакцию 12.03.11*

**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р. техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;  
**И.А. РЯБЕНКОВ**, канд. техн. наук, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков;  
**В.С. ДЕРЯБИН**, канд. техн. наук, ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АЛМАЗНОГО РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ГИДРОАППАРАТУРЫ**

У роботі теоретично та експериментально обґрунтована ефективність застосування алмазних різців замість твердосплавних різців на операціях розточування бронзових втулок, використовуваних у деталях гідроапаратури, а також ефективність застосування процесу розточування отвору діаметром 6 мм у магнітному кільці твердістю HRC 62-63 замість процесу внутрішнього шліфування

In-process in and experimentally theory efficiency of application of diamond chisels is grounded instead of hard-alloy chisels on the operations of boring of bronze hobs, in-use in the details of gидroapparatury, and also efficiency of application of process of the rasta-chivaniya opening by a diameter 6 mm in a magnetic ring by hardness of HRC 62-63 instead of process of the internal polishing

В работе теоретически и экспериментально обоснована эффективность применения алмазных резцов взамен твердосплавных резцов на операциях растачивания бронзовых втулок, используемых в деталях гидроаппаратуры, а также эффективность применения процесса растачивания отверстия диаметром 6 мм в магнитном кольце твердостью HRC 62-63 взамен процесса внутреннего шлифования

Ключевые слова: Детали гидроаппаратуры, растачивание отверстия, алмазный инструмент, энергоемкость обработки, точность обработки

**Постановка проблемы.** Изготовление высокоточных деталей гидроаппаратуры, выполненных из труднообрабатываемых материалов, требует применения эффективных научноемких технологий механической обработки, обеспечивающих высокие показатели качества и производительности. Одним из наиболее перспективных направлений в этом плане является резание инструментами из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ), которые обладают высокой твердостью, износостойкостью и теплопроводностью и позволяют существенно снизить силовую и тепловую напряженность процессов обработки различных по физико-механическим свойствам материалов: от пластичной меди до самого твердого в природе материала – алмаза [1,2]. Практикой установлено, что применение алмазных резцов на ряде операций обработки деталей гидроаппаратуры авиационного назначения позволяет повысить производительность и качество обработки и открывает новые технологические возможности их высококачественного изготовления. Поэтому целью работы является определение технологических возможностей эффективного использования инструментов из СТМ на финишных операциях обработки высокоточных деталей гидроаппаратуры.

**Основная часть.** Наиболее сложной в изготовлении является ответственная деталь гидроаппаратуры – блок цилиндров, выполненный из стали 7ХГ2ВМФ твердостью HRC 51...56 и содержащий 9 глухих отверстий, к точности обработки которых предъявляются высокие требования. Данные отверстия обрабатываются под диффузионное сваривание с втулками из бронзы Бр 010С2Н3 твердостью HB  $\geq$  75. Традиционная технология включает растачивание отверстий и их последующее хонингование. Однако при этом не обеспечивается стабильно отклонение от цилиндричности в пределах 0,01 мм. Применение фрезерования твердосплавными концевыми фрезами отверстий на современном высокооборотном станке с ЧПУ мод. "Picomax-60M" позволило решить данную проблему [3,4]. Вместе с тем, как показывает практика, существенным недостатком высококачественного изготовления блока цилиндров является низкая точность обработки отверстий в бронзовых втулках.

Согласно действующей технологии обработки отверстий в бронзовых втулках, первоначально производится их растачивание резцом из твердого сплава ВК8 с обеспечением погрешности формы обрабатываемой поверхности в пределах 10 мкм и шероховатости поверхности  $R_a = 1,25$  мкм. Затем отверстие обрабатывается рейберами (методом пластического деформирования металла на фрезерном станке), что уменьшает погрешность формы обрабатываемой поверхности до 3-х мкм. После этого применяется доводка текстолитовым притиром пастой КТ. Данная технология характеризуется достаточно высокой трудоемкостью обработки, что связано в первую очередь с относительно низкими показателями точности обработки, достигаемыми на операции растачивания отверстий твердосплавным резцом на токарно-винторезном станке мод. 16К20. Для улучшения этих показателей приходится применять трудоемкий процесс рейберования. В связи с этим предложено на операции растачивания вместо твердосплавных резцов использовать алмазные резцы и обработку производить на высокооборотном обрабатывающем центре мод. "Picomax-60M" ( $n = 8000$  об/мин;  $S = 0,03$  мм/об; снимаемый припуск при черновой обработке – 0,2 мм, а при чистовой обработке – 0,05 мм; количество проходов – 2).

Эффективность применения алмазных инструментов, как известно, обусловлена прежде всего низким коэффициентом трения  $f$  алмаза с обрабатываемым материалом, что согласно формуле проф. Зворыкина К.А., приводит к увеличению условного угла сдвига материала  $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi)/2$ , где  $\gamma$  – передний угол инструмента;  $\psi$  – условный угол трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента ( $\operatorname{tg} \psi = f$ ). Это создает объективные предпосылки снижения силовой и тепловой напряженности процесса резания, т.к. энергоемкость обработки (условное напряжение резания)  $\sigma$  связана с углом  $\beta$  зависимостью [5]:  $\sigma = \sigma_{\text{сж}} / \operatorname{tg} \beta$ , где  $\sigma_{\text{сж}}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, МПа. Из зависимости сле-

дует, что чем больше угол  $\beta$ , тем меньше  $\sigma$  и соответственно тангенциальная  $P_z = \sigma \cdot S$  и радиальная  $P_y = \sigma \cdot S / K_{pes}$  составляющие силы резания, где  $S$  – площадь поперечного сечения среза, м<sup>2</sup>;  $K_{pes} = P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$  – коэффициент резания. Между энергоемкостью обработки  $\sigma$  и коэффициентом резания  $K_{pes}$  существует связь [5]:  $\sigma = \sigma_{cyc} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pes}^2}\right) / K_{pes}$ . Поэтому тангенциальная  $P_z = \sigma \cdot S$  и радиальная  $P_y = \sigma \cdot S / K_{pes}$  составляющие силы резания в конечном итоге могут быть выражены через коэффициент резания  $K_{pes}$  в соответствии с зависимостями:  $P_z = \frac{\sigma_{cyc} \cdot S}{K_{pes}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pes}^2}\right)$ ;  $P_y = \frac{\sigma_{cyc} \cdot S}{K_{pes}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pes}^2}\right)$ . Как видно, составляющие силы резания вполне однозначно определяются коэффициентом резания  $K_{pes}$ . С его увеличением они уменьшаются, причем, радиальная  $P_y$  составляющая силы резания – с большей интенсивностью. Поэтому основным путем уменьшения составляющих силы резания является уменьшение  $K_{pes}$ .

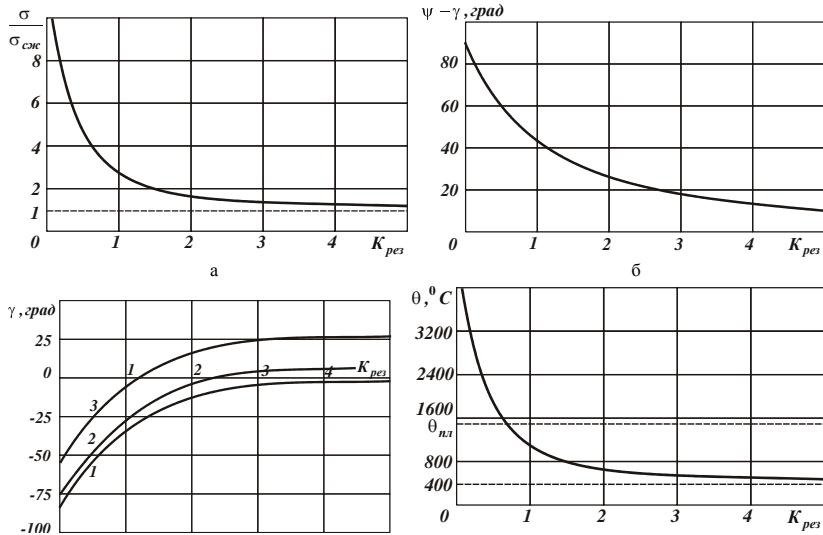


Рис. 1. Зависимости отношения  $\sigma / \sigma_{cyc}$  (а), угла  $\psi - \gamma$  (б), переднего угла инструмента  $\gamma$  (в) и температуры резания  $\theta$  (г) от коэффициента резания  $K_{pes}$ : 1 –  $\psi = 10^\circ$  ( $f = 0,176$ ); 2 –  $\psi = 20^\circ$  ( $f = 0,364$ ); 3 –  $\psi = 40^\circ$  ( $f = 0,839$ ); обрабатываемый материал – сталь ШХ15.

Расчетами установлено, что с увеличением  $K_{pez} \rightarrow 10$  энергоемкость обработки  $\sigma$  уменьшается фактически до значения  $\sigma_{cж}$  (рис. 1,а). Увеличить  $K_{pez} = P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$  можно уменьшением разности углов  $(\psi - \gamma)$ , рис. 1,б.

Для алмаза коэффициент трения  $f$  может принимать значение 0,1. Тогда условный угол трения  $\psi$  образующейся стружки с передней поверхностью инструмента (исходя из зависимости  $tg\psi = f$ ) равен  $6^0$ , а коэффициент резания  $K_{pez}$  (при  $\gamma = 0$ ) – равен 10. Это указывает на то, что при резании алмазным инструментом может быть реализовано условие  $\sigma \rightarrow \sigma_{cж}$ , при котором толщина среза фактически равна толщине стружки, а разрушение обрабатываемого материала подчиняется условию разрушения материала на сжатие. Таким образом показано, что применение алмазного инструмента потенциально позволяет реализовать минимальную энергоемкость обработки  $\sigma$  при нулевом и даже отрицательном переднем угле инструмента  $\gamma$  (рис. 1,в). В результате достигается двойной эффект обработки: уменьшается силовая напряженность процесса резания и появляется возможность повышения прочности режущего клина инструмента и его износостойкости за счет применения нулевого и даже отрицательного переднего угла  $\gamma$ . Кроме того, уменьшение энергоемкости обработки  $\sigma$  ведет к уменьшению температуры резания  $\theta = \sigma \cdot z / c \cdot \rho$  [6], где  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – относительная величина температуры, изменяется в пределах 0...1 и определяется из уравнения  $\bar{l}_1 = c \cdot \rho \cdot a \cdot V \cdot tg\beta / \lambda = -\ln(1-z) - z$ ;  $\bar{l}_1$  – безразмерная величина;  $a$  – толщина среза, м;  $V$  – скорость резания, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К).

Расчетами установлено, что с увеличением параметров  $a, V$  и  $\beta$  относительная величина температуры  $z$  увеличивается, асимптотически приближаясь к значению  $z \rightarrow 1$  (рис. 2). Следовательно, чем меньше условный угол сдвига материала  $\beta$ , тем меньше относительная величина температуры  $z$  и соответственно температуры резания  $\theta$ . Из этого вытекает, что при резании алмазным инструментом, вследствие уменьшения условного угла сдвига материала  $\beta$ , появляется возможность уменьшения величины  $z$  и температуры резания  $\theta$ . Это также позволяет увеличить скорость резания  $V$  и соответственно производительность обработки при заданном значении температуры резания  $\theta$ . Таким образом показано, что уменьшение температуры резания  $\theta$  происходит по двум каналам: путем уменьшения энергоемкости обработки  $\sigma$  и уменьшения относительной величины температуры  $z$ , хотя в обоих случаях первопричиной уменьшения  $\theta$  является уменьшение условного угла

сдвига материала  $\beta$  (определяющего параметры  $\sigma$  и  $z$ ).

При существенном увеличении скорости резания  $V$  относительная величина температуры  $z \rightarrow 1$ . Тогда зависимость для определения температуры резания  $\theta$  принимает упрощенный вид  $\theta = \sigma \cdot c \cdot \rho$ . На рис. 1,г приведены рассчитанные по данной зависимости значения температуры резания  $\theta$  с учетом значений  $\sigma$ , графически представленных на рис. 1,а. Как видно, с увеличением коэффициента резания  $K_{pez}$  температура резания  $\theta$  непрерывно уменьшается, принимая при  $K_{pez} > 1$  значения, меньшие температуры плавления  $\theta_{nл}$  обрабатываемого материала. Из этого вытекает, что определяющим параметром в зависимости  $\theta = \sigma \cdot z / c \cdot \rho$  является энергоемкость обработки  $\sigma$ , поскольку даже при  $z=1$  температура резания  $\theta$  за счет уменьшения  $\sigma$  может быть уменьшена до приемлемых значений. Следовательно, важнейшим условием уменьшения  $\theta$  необходимо рассматривать применение алмазных инструментов, обеспечивающих снижение энергоемкости обработки  $\sigma$  путем уменьшения условного угла сдвига материала  $\beta$  (вследствие снижения интенсивности трения образующейся стружки с передней поверхностью инструмента).

Глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали  $l_2$  (определяющая толщину нарушенного поверхностного слоя материала) выражается зависимостью [6]:  $l_2 = a \cdot z / \bar{l}_1$ . Расчетами установлено, что с увеличением скорости резания  $V$  параметр  $l_2$  уменьшается, а с уменьшением толщины среза  $a$ , наоборот, увеличивается (рис. 2). Поэтому с целью повышения качества обработки скорость резания  $V$  необходимо увеличивать, осуществляя режим высокоскоростного резания. Как отмечалось выше, это условие с наибольшей эффективностью может быть реализовано при резании алмазным инструментом.

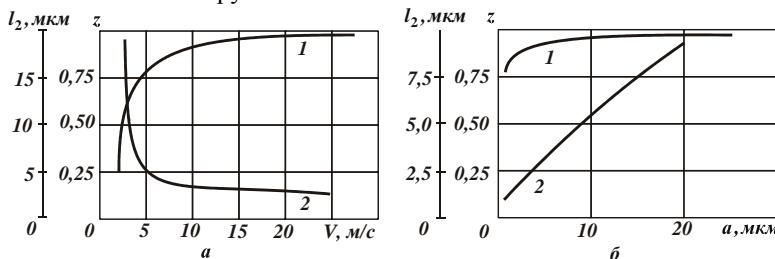


Рис. 2. Зависимости относительной величины температуры  $z$  (1) и параметра  $l_2$  (2)

от скорости резания  $V$  (а) и толщины среза  $a$  (б) при резании закаленной стали ШХ15 (коэффициент температуропроводности  $\lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\operatorname{tg}\beta = 0,25$ ): а –

$$a = 5 \text{ мкм}; б - V_{kp} = 27,5 \text{ м/с.}$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что благодаря уникальным режущим свойствам алмазного резца, в процессе алмазного растачивания бронзовых втулок снижается силовая и тепловая напряженность процесса, а стойкость алмазного резца по отношению к твердосплавному резцу увеличивается более чем в 5 раз. Это стабильно обеспечивает погрешность формы обрабатываемой поверхности на уровне 1...2 мкм и шероховатость поверхности  $R_a = 1,25$  мкм. При этом исключается волнообразность на обрабатываемой поверхности, которая постоянно имела место в процессе рейберования, обеспечиваются допуски овальности и конусности, прямолинейности и разноразмерности 9-ти отверстий (которые находятся в пределах 5 мкм). Применение алмазного растачивания позволяет исключить трудоемкую операцию рейберования. В результате предложенный технологический процесс обработки отверстий в бронзовых втулках включает лишь операции растачивания алмазным резцом и доводку пастой КТ.

Применение алмазных резцов взамен твердосплавных резцов при подрезке плоского торца бронзовой втулки также позволяет уменьшить погрешность формы обрабатываемой поверхности и обеспечить допуск плоскостности торца 5 мкм, шероховатость поверхности  $R_a = 0,4$  мкм. В результате снимаемый припуск может быть уменьшен в 3 раза. Это позволяет окончательную обработку производить алмазным резцом, а предварительную – твердосплавным резцом. Традиционно подрезка плоского торца бронзовой втулки осуществляется твердосплавными резцами на токарно-винторезном станке мод. ТВ-125П ( $n = 1000$  об/мин;  $S_{черт} = 0,1$  мм/об;  $S_{чист} = 0,05$  мм/об). При использовании алмазного резца обработку рекомендуется производить на современном токарном станке "Spinner" ТС-600.

Доводка торца в размер производится пастой КТ 3/2 (ТУ 2-037-273-88) путем притирки на стеклянной плите с последующей полировкой торца на бумаге (смоченной керосином) пастой КТ 1/0. Вследствие перехода к обработке отверстия и торца бронзовой втулки алмазным резцом появляется возможность уменьшить машинное время в 2 раза (до 0,8 часа), а повышение стабильности параметров точности и шероховатости поверхности позволяет повысить износстойкость деталей пар трения.

Полученные результаты были использованы для совершенствования операций обработки внутренних цилиндрических поверхностей деталей гидроаппаратуры, в частности, для обработки отверстия в магнитном кольце с наружным диаметром 20 мм и внутренним диаметром 6 мм, изготовленном из сплава АНКОЗА твердостью HRC 62-63. Данное кольцо является ответственной деталью насос-регулятора. Традиционно отверстие в кольце обрабатывается методом шлифования абразивным кругом ПП 10x20x3 25А 16СТ, который предварительно подвергается правке для получения наружного диаметра менее 6 мм. Процесс внутреннего шлифования протекает с высокой силовой и тепловой напряженностью, что приводит к интенсивному износу круга, быстрой потере его режущей способности и фактически к невозмож-

ности стабильно обеспечить требуемые параметры качества обработки. В связи с этим предложено перейти от шлифования к расточке отверстия твердосплавным резцом производства фирмы ISKAR. Проведенные исследования показали положительные результаты в плане повышения качества и производительности обработки. В процессе расточки стабильно обеспечивается шероховатость поверхности на уровне 7-го класса чистоты, что не достигалось при шлифовании. Поэтому предложено твердосплавные резцы фирмы ISKAR использовать при окончательной обработке со съемом припуска величиной 0,2 мм, а предварительную обработку выполнять с применением резцов из твердого сплава Т15К6, обеспечивающих высокую размерную стойкость. При предварительной обработке обеспечивается изменение диаметра отверстия с 6 до 8,2 мм, а при окончательной обработке – до 8,5 мм.

**Выводы.** В работе теоретически и экспериментально обоснованы условия эффективного использования алмазных резцов взамен твердосплавных на операциях расточки отверстий деталей гидроаппаратуры. Показано, что эффект обработки, обусловленный снижением силовой и тепловой напряженности процесса резания, достигается благодаря снижению интенсивности трения сходящей стружки с передней поверхностью резца и соответственно увеличению условного угла сдвига материала  $\beta$  и уменьшению энергоемкости обработки  $\sigma$ . Расчетами установлено, что с увеличением коэффициента резания  $K_{pez}$  (равного отношению тангенциальной и радиальной составляющих силы резания) энергоемкость обработки непрерывно уменьшается и при  $K_{pez} \rightarrow 10$  принимает значения, близкие к пределу прочности на сжатие обрабатываемого материала. Этим объясняются многочисленные экспериментальные данные (опубликованные в научно-технической литературе) об уменьшении сил и температуры резания при алмазной лезвийной обработке.

В работе экспериментально установлено, что применение алмазных резцов на операции расточки отверстий в бронзовых втулках обеспечивает высокие требования по точности и шероховатости обрабатываемой поверхности, чего ранее не достигалось при резании твердосплавными резцами. Это позволяет исключить трудоемкую промежуточную операцию рейберования, осуществляя сразу после операции алмазной расточки доводку пастой КТ с обеспечением требований по точности и шероховатости обработки. В работе также обоснована эффективность применения процесса растачивания отверстия диаметром 6 мм в магнитном кольце твердостью HRC 62-63 взамен процесса внутреннего шлифования.

**Список литературы:** 1. Синтетические сверхтвердые материалы: В 3-х т. Т.3. Применение синтетических сверхтвердых материалов / Редкол.: Н.В. Новиков (отв. ред.) и др. – К.: Наук. думка, 1986. – 280 с. 2. Зубарь В.П., Тимчук А.Г., Чоленко М.В. Лезвийная обработка закаленных сталей и чугунов взамен шлифования // Сучасні технології в машинобудуванні. – 36. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ". – Вип. 5. – 2010. – С. 32-38. 3. Рябенков І.О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроаппаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / І.О. Рябен-

ков. – Одеса, 2009. – 21 с. 4. Новиков Ф.В., Рябенков И.А., Дерябин В.С., Машко А.А. Концепции развития механической обработки высокоточных изделий // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – “Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні”. – 2010. – Вип. 101. – С. 234-240. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 6. Новиков Ф.В., Яценко С.М. Повышение эффективности технологии финишной обработки деталей пар трения поршневых насосов // Физические и компьютерные технологии. – Труды 13-й Международной научно-технической конференции. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2007. – С. 8-20.

Поступила в редакцию 5.05.2011г.

УДК 621.923

**Г.В. НОВИКОВ**, канд. техн. наук, Науч. центр НТК "Эльбор", Харьков.

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗОВ В БРИЛЛИАНТЫ

Узагальнено практичний досвід ефективного застосування електроерозійного виправлення алмазних кругів на металевій зв'язці при обробці природних алмазів у діаманти, наведені конкретні практичні рекомендації

Practical experience of effective application of electro-erosive correction of diamond circles is generalized on a metallic copula at treatment of natural diamonds in diamonds, concrete practical recommendations are resulted

Обобщен практический опыт эффективного применения электроэррозионной правки алмазных кругов на металлической связке при обработке природных алмазов в бриллианты, приведены конкретные практические рекомендации

Ключевые слова: Шлифование, природный алмаз, алмазный круг, электроэррозионная правка, производительность обработки

**Введение и постановка задачи.** С организацией промышленного производства синтетических алмазов шлифование металлических и неметаллических труднообрабатываемых материалов (твердых сплавов, природных алмазов, изделий из стекла и хрусталя и т.д.) осуществляется фактически кругами из синтетических алмазов, которые в силу их высокой твердости и остроты режущих кромок обеспечивают обработку с низкой силовой и тепловой напряженностью процесса и высоким качеством обрабатываемых поверхностей [1, 2]. Вместе с тем, для эффективного применения алмазных кругов на высокопрочных металлических связках требуется их качественная подготовка к работе, включающая устранение биения, вскрытие алмазоносного слоя, поддержание высокой режущей способности круга в процессе

шлифования и т.д. Однако решить на практике эти вопросы традиционными методами весьма сложно. Поэтому целью работы является обобщение опыта эффективного применения электроэрозионной правки алмазных кругов на металлической связке при обработке природных алмазов в бриллианты, а также твердосплавных блок-матриц для синтеза алмазного порошка.

**Материалы и результаты исследований.** 1. При создании алмазно-абразивного инструмента необходимо обеспечить удержание алмазного зерна в связке с силой, равной прочности его на раздавливание. Суммарная сила резания, действующая на отдельное зерно инструмента

$$P_1 = \sqrt{P_{z1}^2 + P_{y1}^2} = P_{y1} \cdot \sqrt{K_{us}^2 + 1},$$

при коэффициенте шлифования  $K_{us} = P_{z1} / P_{y1} < 0,5$  мало отличается от нормальной  $P_{y1}$  составляющей силы резания (где  $P_{z1}$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н). Следовательно, зерно в связке должно удерживаться таким образом, чтобы исключить его утопание под действием силы  $P_{y1}$ . Для этого твердость связки  $HV_{cs}$ , например, по Виккерсу, должна удовлетворять условию  $HV_{cs} = P_{y1} / \pi \cdot t g \gamma \cdot h^2$ , где  $h$  – глубина заделки зерна в связке, м;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного зерна. Очевидно, чем больше твердость связки  $HV_{cs}$ , тем меньше  $h$  и больше высота его выступания, что повышает режущую способность алмазно-абразивного инструмента.

Рассмотрим случай практической реализации данного условия применительно к обработке природных алмазов в бриллианты. Длительное время процесс огранки алмазов осуществляется с использованием ограночного чугунного диска, шаржированного микропорошком из синтетических алмазов АСН или АСМ зернистостью 7...20 мкм и поверхностной концентрации алмазных зерен – 0,0032 карат/см<sup>2</sup> [3]. Ограночный диск имеет зону шлифования и полирования. Шлифование выполняется с удельным давлением  $P_{yo} = 2,5 \dots 6,5$  Н/мм<sup>2</sup>, а полирование – с  $P_{yo} = 1,0 \dots 2,5$  Н/мм<sup>2</sup>. Недостатком такого инструмента является малое количество зерен, участвующих в резании – 15...20%. Остальные 80...85% зерен в силу слабого удержания их рабочей поверхностью преждевременно выкрашиваются. Это предопределяет низкую стойкость инструмента. Для повышения прочности удержания зерен, т.е. увеличения глубины заделки зерна в связке  $h$ , применяют различные способы "укатки" зерен, однако решить проблему повышения стойкости инструмента не удаётся.

Ограночный диск с гальваническим закреплением мелкодисперстных алмазных порошков имеет более высокую прочность удержания зерен. Концентрация алмазного порошка достигает 75% от рабочей площади диска. По сравнению с чугунными дисками, ограночный диск с гальваническим покрытием никель-железо обеспечивает повышение стойкости в 4,5 раза и повышение производительности обработки в 1,7 раза. В связи с этим, ограночные диски, у которых алмазоносный слой изготавливается методом гальваниче-

ского осаждения алмазного порошка на чугунный диск, получили широкое применение на предприятиях. Толщина алмазоносного слоя диска небольшая (составляет несколько слоев алмазных зерен зернистостью 5...10 мкм). Поэтому данный ограночный круг предназначен для разового использования. После износа алмазоносного слоя в процессе огранки алмазов, круг отдают на переработку, где вместо старого слоя гальваническим методом закрепляется новый слой. И так повторяется многократно. Изготовленные данным методом ограночные круги обладают высокой режущей способностью и успешно используются в производстве. Благодаря гальваническому методу, удается получить алмазоносный слой с высокой концентрацией алмазного порошка (200% и более), что важно при обработке природных алмазов. Основными недостатками данного ограночного круга являются высокая трудоемкость его изготовления и непродолжительное время эксплуатации.

Дальнейшим этапом совершенствования алмазно-абразивных инструментов для огранки алмазов стало создание специальных алмазных кругов на металлических связках (МН1, МО22 и других) методом порошковой металлургии, детонационного и плазменного напыления [4]. На Полтавском заводе искусственных алмазов и алмазных инструментов по данной технологии изготовлены алмазные круги на металлической связке МЗ-04 с характеристиками 6А2 300x60x5x50 АС6 10/7 4. Для повышения эффективности обработки в состав смазочно-охлаждающей жидкости вводят алмазный порошок той же зернистости с концентрацией до 35%. Для оценки эффективности технологии шлифования алмазов рассмотрим предыдущую зависимость. Силу  $P_{y1}$ , равную прочности зерна на раздавливание, представим в виде:  $P_{y1} = \alpha \cdot \bar{X}$ , где  $\alpha$  – размерный коэффициент, характеризующий марку алмаза (его прочность);  $\bar{X}$  – зернистость круга, м. Тогда безразмерный коэффициент  $\varepsilon = h / \bar{X}$ , определяющий степень заделки зерна в связке, выразится  $\varepsilon = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV_{ce} \cdot \bar{X}}}$ . Как видно, с уменьшением  $\bar{X}$

коэффициент  $\varepsilon$  возрастает, т.е. доля выступающей над уровнем связки части зерна уменьшается. Этим объясняется низкая работоспособность мелкозернистых алмазных кругов. Увеличение твердости связки  $HV_{ce}$  уменьшает коэффициент  $\varepsilon$ . Однако, с применением высокопрочных металлических связок нарушается режим самозатачивания круга. Следовательно, наиболее перспективным способом обработки природных алмазов в бриллианты следует рассматривать применение мелкозернистых кругов на металлических связках и эффективных методов их правки (электроэррозионной правки).

Необходимо отметить, что метод порошковой металлургии позволяет получить алмазоносный слой ограночного круга значительно большей толщины – 3...5 мм, что существенно увеличивает срок его работы.

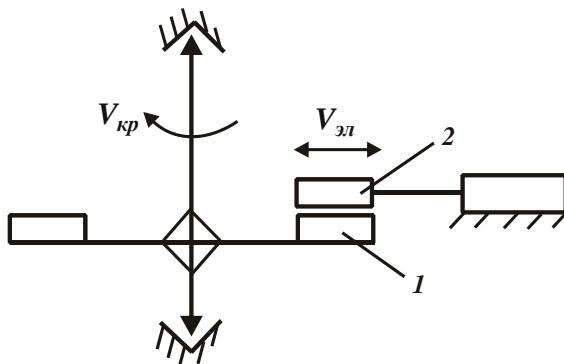


Рис. 1. Схема электроэррозионной правки ограночного круга: 1 – алмазоносный слой круга; 2 – электрод.

Недостатком этого метода является более низкая концентрация алмазного порошка в алмазоносном слое по сравнению с гальваническим методом изготовления ограночного круга. Использование вакуумной камеры при спекании круга позволяет получить 150%-ную концентрацию алмазного порошка, что является хорошим результатом. Более высокая насыщенность режущего слоя алмазными зернами создает его высокую твердость, что ограничивает глубокое внедрение обрабатываемого кристалла в режущую поверхность (поскольку природные алмазы обладают чрезвычайно высокой твердостью), а это обеспечивает получение более качественных граней на кристалле и исключает образование сколов. Кроме того, повышенная концентрация зерен увеличивает режущие свойства круга. Огранка осуществляется в 2 операции. При черновой обработке (подшлифовке) используются круги зернистостью 10/9 мкм, а при чистовой – круги зернистостью 5/4 мкм.

При обработке ограночный круг базируется на оправке-оси и закрепляется механическим способом. Для нормального протекания процесса обработки биение режущей поверхности ограночного круга не должно превышать 0,01 мм. Поэтому ограночный круг обязательно проходит динамическую балансировку, т.к. вибрации существенно влияют на величину биения режущей поверхности (диаметр диска 300 мм, а частота его вращения превышает 3000 об/мин). Попытки механическим способом устранить увеличенное биение не приводят к положительным результатам. Несмотря на то, что происходит съем алмазоносного слоя, профиль режущей поверхности фактически не изменяется (остается исходным) и биение не устраняется. Естественно, производить огранку таким кругом не представляется возможным. В связи с этим была предложена идея устранения биения режущей поверхности круга с использованием метода электроэррозионной правки. Для этого было изготовлено специальное оборудование. Чтобы исключить ряд погрешностей при правке круга, ее производили на граночном станке, где размещали все необходимые элементы правки. Важным моментом данного решения явилось то,

что ограночный круг правился в собранном виде (на оправке-оси). Правящий электрод был изготовлен из графитового материала и имел пазы для попадания охлаждающей жидкости в зону правки. Электроду сообщали возвратно-поступательные движения на всю ширину алмазоносного слоя (рис. 1). Направляющие электрода изготавливались из закаленной стали и соединялись между собой посредством шариков. Такая конструкция исключала вибрации электрода и уменьшала погрешности при выравнивании режущей поверхности. Возвратно-поступательные движения электрода осуществлялись от электродвигателя с редуктором посредством кривошипно-шатунного механизма. Величину движения электрода регулировали увеличением или уменьшением штанги шатуна. Электродвигатель с редуктором имел небольшие габариты и легко устанавливался на приспособлении. Все устройство крепилось на столе граночного станка.

Врезная подача графитового электрода на алмазоносный слой круга осуществляется посредством пары винт-гайка по штифтовым направляющим. Длина этого перемещения составляет 1...4 мм. Путем поворачивания винта можно вводить графитовый электрод в контакт с режущей поверхностью ограночного круга. Процесс электроэрозионной правки происходит при обильном охлаждении зоны правки с использованием технической воды. Принудительная подача жидкости осуществляется от насосной станции (с использованием водяной помпы от заточного станка мод. ЗД642Е). Для сбора отработанной жидкости под вращающимся ограночным кругом установлен специальный поддон, откуда вода поступала обратно в бачок насосной станции. Для исключения разбрызгивания жидкости при вращении круга использовался защитный кожух. Источником технологического тока электроэрозионной правки служил специальный импульсный генератор. Электроэрозионная правка алмазных ограночных кругов с зернистостью 5...10 мкм имеет свои особенности, связанные, прежде всего, с поддержанием необходимого зазора между электродом и правящей поверхностью круга. Решить эту задачу удалось путем использования электрода из графита и обильной подачи охлаждающей жидкости непосредственно в зону правки.

Электроэрозионная правка характеризуется переносом снятого материала связки алмазного круга на правящий электрод (на круг подается положительный заряд, а на электрод – отрицательный), который в застывшем виде накапливается в пазах электрода. Наступает такой момент, когда в отдельных местах он перемыкает зазор между электродом и связкой круга. В результате резко увеличивается сила тока правки и на поверхности круга образуются борозды (за счет более интенсивного снятия материала). При дальнейшей правке на режущей поверхности образуются значительные неровности. Описанный выше случай относится к правке электродом, изготовленном из металла. Устранить застывший на электроде материал связки сложно из-за небольшой величины выступания зерен. Данная задача успешно решается при использовании электрода из графита. Перенесенный на электрод материал связки легко отрывается от графитового электрода, т.к. температуры плавле-

ния графита и материала связки разные и поэтому между ними не происходит прочного сцепления.

Практика показывает, что при обработке природных алмазов все же более предпочтительно применение ограночных кругов, изготовленных гальваническим методом. Это обусловлено меньшими затратами дорогостоящего алмазного порошка. Вместе с тем, изготовление ограночных кругов гальваническим методом, как известно, является экологически вредным производством, что ограничивает его практическое применение.

Установлено, что эксплуатация ограночных кругов, изготовленных методами порошковой металлургии (т.е. спеченных кругов), требует более высокой квалификации рабочего-огранщика. Это связано, прежде всего, с высокой стоимостью данных кругов и необходимостью их экономного расходования. Использование электроэрозионной правки собранного ограночного круга непосредственно на рабочем месте (на граночном станке) позволяет обеспечить требуемое биение режущей поверхности круга – в пределах 0,01 мм.

Процесс огранки природных алмазов характеризуется появлением на режущей поверхности круга задиров и глубоких царапин. Для их устранения круг необходимо периодически править. Этому способствует увеличенная толщина алмазоносного слоя круга, составляющая 5 мм. Кроме того, как отмечалось выше, ограночные круги необходимо подвергать динамической балансировке для исключения вибраций и появления дополнительных перемещений режущей поверхности в направлении обрабатываемого кристалла.

Установлено, что технология спекания алмазного круга без применения вакуумной камеры обеспечивает 100%-ную концентрацию алмазных зерен. При использовании вакуумной камеры достигается 150%-ная концентрация при одновременном обеспечении требований по твердости спеченного алмазоносного слоя круга. В противном случае присутствие кислорода при спекании приводит к окислению материала, и он получается рыхлым.

2. В настоящее время для обработки природных алмазов широко используются алмазные круги на металлической связке формы 1A1 150x5x32x5 AC6 80/63...63/50 M2-01. После спекания данного круга необходимо придать ему товарный вид, устранить радиальное биение (составляющее 0,1...0,5 мм) и обеспечить правильную геометрическую форму рабочей поверхности. Для этого традиционно используется абразивная правка абразивным кругом, которая может быть осуществлена, например, на заточном станке ЗД642Е. В качестве правящего инструмента можно использовать любые абразивные круги, геометрические параметры которых позволяют установить их на шпиндельном узле станка с сообщением вращательного движения со скоростью 20–25 м/с. Алмазный круг при этом устанавливается на специальное приспособление "фортуна" (которое входит в ЗИП заточного станка) и ему сообщается вращательное движение со значительно меньшей скоростью 2–5 м/мин. Вращательные движения абразивного и алмазного кругов должны быть встречными. В процессе правки происходит съем алмазоносного слоя круга, устранение радиального биения и формирование требуемой геометрии профиля круга. Основными недостатками данного метода правки являются большой расход дорогостоящих абразив-

ных кругов и значительная запыленность рабочего места, требующая работы в респираторе.

Повысить эффективность подготовки алмазного круга к работе можно применением электроэррозионной правки [5, 6], которая может быть осуществлена на том же заточном станке. Для этого алмазный круг устанавливается на шпиндельном узле станка и ему сообщается вращательное движение со скоростью 25–30 м/с. Правящий электрод представляет собой набор стальных пластин (толщиной 1,5–2 мм), скрепленных болтом и прикрепленных к стальной державке. Ширина рабочей части электрода составляет 40–50 мм. Изолированный электрод крепится в тисках, установленных на движущемся столе станка. Он является отрицательным полюсом и к нему подводится электрический ток от специального источника технологического тока. Положительным полюсом является алмазный круг. Для подвода к нему электрического тока, клемму соединяют с торцом шпинделя заточного станка через графитовую щетку с целью защиты подшипников качения шпинделя от разрядного тока. Процесс электроэррозионной правки алмазного круга осуществляется путем сообщения правящему электроду радиального и возвратно-поступательного продольного (на всю ширину электрода) перемещений (подач) в автоматическом режиме.

По мере устранения радиального биения и увеличения времени контакта правящего электрода с обрабатываемой поверхностью алмазного круга, технологический ток в цепи правки увеличивается. Установлено, что для эффективного ведения процесса электроэррозионной правки указанных выше алмазных кругов технологический ток должен составлять 30–35 А. Для обеспечения таких заданных значений технологического тока в процессе правки необходимо периодически корректировать величину зазора между алмазным кругом и правящим электродом (в связи с его износом) путем осуществления радиальной подачи электрода. Необходимым условием нормального протекания процесса электроэррозионной правки является наличие охлаждающей жидкости в зоне обработки. Для этого алмазный круг должен быть закрыт защитным кожухом, исключающим разбрызгивание охлаждающей жидкости. Установлено, что наибольший эффект обработки достигается при использовании чистой воды, т.к. смазочно-охлаждающие жидкости содержат масла, которые при воздействии разрядного тока вызывают образование на поверхности алмазного круга "черного нагара", а содержание соды  $\text{Ca}_2\text{CO}_3$  в охлаждающей жидкости (даже небольшой концентрации) "окрашивает" поверхность алмазного круга в зеленый цвет.

Практикой установлено, что электроэррозионная правка, так же как и механическая правка, обеспечивает необходимые требования к точности обработки алмазного круга. Однако при этом достигается более качественное вскрытие алмазоносного слоя круга, исключается использование дорогостоящих абразивных кругов, значительно улучшаются условия работы (хотя требуется установление на рабочем месте вытяжного устройства). Вместе с тем, по продолжительности процесс электроэррозионной правки уступает механической правке. Поэтому окончательный вывод о целесообразности ее использования следует принимать в каждом конкретном случае с учетом сопоставления производительности правки и затрат, связанных с приобретением абразивных кругов, используемых при механической правке.

3. Шлифование блок-матриц для синтеза алмазного порошка. Блок-матрица состоит из стальной обоймы с запрессованной в нее твердосплавной камерой, в которой происходит процесс синтеза алмазного порошка. Для обеспечения плоскостности верхней части блок-матрицы, производится ее шлифование алмазными кругами на плоскошлифовальном станке мод. ЗГ71.

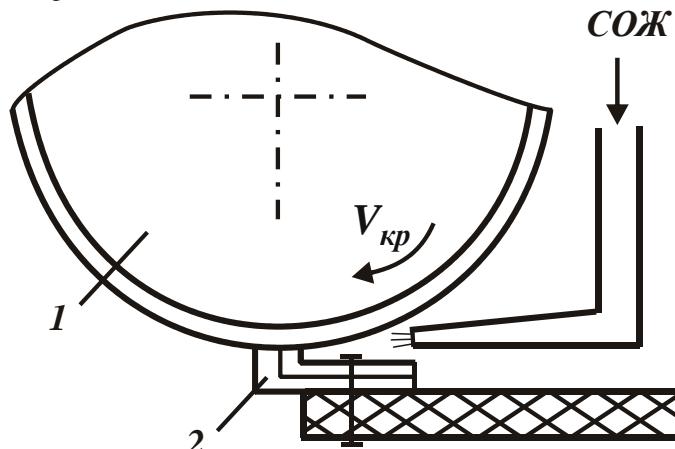


Рис. 2. Схема электроэррозионной правки алмазного круга (1) с использованием электрода (2).

Совместная обработка стали и твердого сплава алмазным кругом 1А1 250x20x5 на органической связке, как показывает практика, приводит к его интенсивному износу и снижению производительности обработки. Применение алмазного круга на керамической связке позволяет в определенной степени повысить производительность обработки и снизить износ круга. Однако полностью решить проблему высокопроизводительного шлифования не удалось. Проблема была решена за счет применения алмазного круга 1А1 300x20x5 на металлической связке М1-01 и его электроэррозионной правки. Для этого была произведена модернизация плоскошлифовального станка, включающая электроизоляцию алмазного круга и осуществление токоподвода к нему через графитовую щетку. В качестве правящего электрода первоначально использовалась обрабатываемая деталь. Источником технологического тока служил специально изготовленный генератор импульсов.

Однако, электроэррозионная правка алмазного круга непосредственно в процессе шлифования не позволила добиться ожидаемых результатов. Плотный контакт круга с обрабатываемой поверхностью, с одной стороны, приводил к существенному увеличению разрядного тока, а с другой стороны, вызывал интенсивное засаливание круга. Круг фактически не подвергался правке, его рабочая поверхность была полностью покрыта светло-серым слоем стальной стружки. Поэтому от такой идеи электроэррозионной правки круга пришлось отказаться. Взамен была предложена идея осуществления электроэррозионной правки с использованием ручного изолированного электрода. Первые опыты по практической реализации данной идеи показали по-

ложительные результаты. Например, новый алмазный круг на металлической связке М1-01, установленный на станок и имевший значительное биение рабочей поверхности, с помощью ручного электрода был подготовлен к работе за небольшой промежуток времени. Суть правки состоит в следующем. Изолированный Г-образный электрод прижимается к периферии круга в зоне интенсивного попадания на него охлаждающей жидкости (рис. 2). При этом не наблюдалось его отбрасывание в связи с отсутствием биения поверхности. Электроэррозионной правкой в данном случае быстро очищается поверхность круга от продуктов обработки (стального налета) и вскрывается алмазоносный слой. Время правки составляет 15 – 25 с при силе тока 15 – 20 А. Для осуществления такой правки (подзаправки) достаточно круг вывести из зоны обработки и выключить продольную подачу, что весьма удобно для рабочего. Следующую правку (подзаправку) круга необходимо производить при появлении шума в зоне обработки, что является первым признаком засаливания круга. Установлено, что стойкость алмазного круга на металлической связке М1-01 при правке с использованием ручного изолированного электрода многократно увеличивается. Это позволяет эффективно обрабатывать твердосплавные блок-матрицы при съеме значительных припусков. Количество прошлифованных блок-матриц между заправками круга при этом изменялось, однако, в основном из-за различной величины снимаемого припуска.

**Выводы.** В работе показаны возможности эффективного применения электроэррозионной правки алмазных кругов на металлических связках, используемых для обработки природных алмазов. Предложены новые конструктивные схемы осуществления электроэррозионной правки, позволяющие существенно повысить ее эффективность в производственных условиях. Приведены конкретные примеры реализации правки алмазных кругов на металлических связках в условиях обработки природных алмазов и твердосплавной оснастки синтеза искусственных алмазов.

**Список литературы:** 1. Беззубенко Н.К. Повышение эффективности алмазного шлифования путем введения в зону обработки дополнительной энергии в форме электрических разрядов: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / Н.К. Беззубенко. – Харьков, 1995. – 56 с. 2. Пахалин Ю.А. Алмазное контактно-эррозионное шлифование / Ю.А. Пахалин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 178 с. 3. Епифанов В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.В. Зыков. – М.: Высшая школа, 1971. – 203 с. 4. Рогов В.В. Инструмент из синтетических алмазов при ограночном шлифовании и полировании / В.В. Рогов, В.Н. Пепельнюк, В.В. Абрамов // Сверхтвердые материалы. – №4, 1986. – С. 57-58. 5. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 4. “Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 802 с. 6. Новиков Г.В. Повышение эффективности алмазно-искрового шлифования деталей с высокопрочными покрытиями: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.08 / Новиков Григорий Васильевич. – Харьков, 1989. – 210 с.

Поступила в редакцию 5.05.2011г.

**Г.И. КОСТЮК**, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**В.Н. ПАВЛЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**О.М. МЕЛКОЗЕРОВА**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## АДГЕЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ ПАР ТРЕНИЯ

Запропоновано метод для приблизного оцінювання характеристик адгезії контактуючих матеріалів з покріттями. Показано, що значення адгезії для пари матеріалів, отриманих за допомогою різних теорій, незначно відрізняються одне від одного. Знайдено зв'язок між міцністю з'єднання та енергією адгезії, що дозволяє визначити характеристики адгезії для всіх матеріалів. Міцність з'єднання зв'язана з товщиною покріття обернено пропорційно залежністю. Як приклад запропоновано розрахунок енергії та сили адгезії, а також міцності з'єднання для сталі 38ХС і титанового сплаву ВТ14 з різними покріттями.

Ключові слова: енергія адгезії, міцність з'єднання, сила адгезії, покріття.

In the given work the technique, for a rough estimate of characteristics of adhesion of contacting materials with coverings is offered. It is shown that values of energy of adhesion for pairs of the materials, received with application of various theories, slightly differ from each other. Communication between durability of coupling and energy of adhesion that allows to define adhesion characteristics practically for any materials is revealed. It is shown that durability of coupling is connected with thickness of a covering inversely proportional dependence. As an example calculation of energy and force of adhesion, and also durability of coupling for a steel 38ХС and titanic alloy BT14 with a number coverings is offered.

Keywords: energy of adhesion, durability of coupling, force of adhesion, coating.

В данной работе предложена методика для приблизительной оценки характеристик адгезии контактирующих материалов с покрытиями. Показано, что значения энергии адгезии для пар материалов, полученные с применением различных теорий, незначительно отличаются друг от друга. Выявлена связь между прочностью сцепления и энергией адгезии, что позволяет определять характеристики адгезии практически для производных материалов. Показано, что прочность сцепления связана с толщиной покрытия обратно пропорциональной зависимостью. В качестве примера предложен расчет энергии и силы адгезии, а также прочности сцепления для стали 38ХС и титанового сплава ВТ14 с разными покрытиями.

Ключевые слова: энергия адгезии, прочность сцепления, сила адгезии, покрытия.

**Введение.** В настоящее время для повышения износостойкости металлорежущего инструмента широко применяются специальные износостойкие покрытия, которые повышают эксплуатационные характеристики, как инструмента, так и деталей машин и механизмов. Исследование эффективности любого покрытия можно оценить экспериментально, что в значительной мере увеличивает затраты труда, времени, ресурсов. Поэтому для повышения эффективности экспериментальных данных необходимо подготовить достаточную теоретическую базу для определения основных механических характеристик, позволяющую построить методику для выбора наиболее перспективных

направлений варьировании химического состава поверхности инструмента для заданных условий обработки.

В данной работе разработана методика расчета адгезионных характеристик для однокомпонентных и многокомпонентных пар материалов. В настоящее время существует большое разнообразие теорий, которые позволяют определять адгезию.

Основными характеристиками адгезии являются: энергия адгезии, прочность сцепления и сила адгезии [1–13]. Первая характеристика в основном определяет свойства материалов, не учитывая конкретные условия, в которых находятся контактирующие материалы. Также очень важной характеристикой адгезии является прочность сцепления покрытия с подложкой. Существует множество способов для определения этой характеристики, в основном, – это проведение различного рода экспериментов с испытанием на изгиб, растяжение, нанесение сетки царапин, приклеивание и т.д. Основными методами, как показывают многочисленные работы, являются метод отрыва (для толстых пленок) и метод царапания (для тонких пленок) [1]. Все эти методы имеют свои преимущества и недостатки, в результате чего мы получаем большое количество данных, которые трудно сопоставить и определить, где имеет место высокое значение адгезии, а где – нет.

В данной статье предложен вариант определения адгезионных характеристик с использованием характеристик взаимодействующих материалов, толщины покрытия и параметров инденторов, которые, как правило, участвуют при проведении экспериментов.

Работа выполнялась в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») и по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрирования технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники», хоздоговорных работ и договоров о сотрудничестве.

**Методы определения энергии адгезии контактирующих материалов.** Адгезия характеризует прочность схватывания между двумя материалами, возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных тел, приведенных в соприкосновение. Существует множество теорий и выражений для определения приблизительного значения энергии адгезии пар материалов, вступающих в контакт, например:

- адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма (А.Н. Вакилов, М.В. Мамонов, В.В. Прудников) [2];

- определение энергии адгезии с помощью потенциалов ионизации для пары металл–окисел (Ф. Лондон) [3];

- определение энергии адгезии с помощью теории электроорицательности (Т.В. Молоденчика, В.П. Глыбин, Л.М. Лыньков) [4] и др.

В работе [5] можно подсчитать энергию адгезии двух различных, разнородных сред, используя свободную поверхностную энергию каждой среды по формуле (поверхностная энергия и энергия адгезии равны энергии упругих деформаций, возникающих при образовании свободной поверхности и вступлении тел в адгезионный контакт):

$$E_a = \frac{E_a^{(1)} E_a^{(2)} (k^{(1)} + k^{(2)})^2}{E_a^{(1)} k^{(2)^2} + E_a^{(2)} k^{(1)^2}}, \quad (1)$$

где  $E_a^{(1)}$  и  $E_a^{(2)}$  - поверхностные энергии контактирующих веществ;

$$k^{(1)} = \frac{v^{(1)}}{1 - v^{(1)}}, \quad k^{(2)} = \frac{v^{(2)}}{1 - v^{(2)}}, \quad (2)$$

где  $v^{(1)}$  и  $v^{(2)}$  - коэффициенты Пуассона контактирующих веществ. Верхние индексы (1) и (2) показывают, что соответствующие индексы относятся к разным веществам.

Для случая свободной поверхности (роль второй среды играет вакуум) поверхностную энергию можно определить по формуле [6]

$$E_a = \frac{3\pi_o^2 \gamma}{2b(2\mu + \lambda)}, \quad (3)$$

где  $\mu$  и  $\lambda$  - коэффициенты Ламе, которые можно вычислить по формулам

$$\mu = \frac{E}{2(1 + v)}, \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{vE}{(1 + v)(1 - 2v)}, \quad (5)$$

где  $\pi_o$  и  $b$  - некоторые константы, характеризующие механические свойства среды;  $\pi_o$  - характеризует натяжение поверхностного слоя,

$$\pi_o = \frac{2\mu}{\beta}, \quad (6)$$

где  $\beta$  – некоторый коэффициент пропорциональности, который можно определить через среднее межатомное расстояние  $l$  по таким формулам:

$$\beta = \frac{45}{4l}, \quad (7)$$

$$l = 1,41l_o, \quad (8)$$

$$l_o = \frac{1}{\sqrt[3]{n}}, \quad (9)$$

где  $n$  - число атомов среды в единице объема среды;  $b$  - дополнительная постоянная, характеризующая способность материала сопротивляться развитию неравномерности деформаций, в частности появлению изгибов материальных волокон и неравномерности их относительного удлинения, может иметь также смысл эффективной толщины пограничного слоя, в которой концентрируется поверхностная энергия;  $\gamma$  - величина, которая показывает, во сколько раз увеличится поверхность, концентрирующая в себе энергию;  $v$  - коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости вещества.

С учетом некоторых преобразований формулу (3) можно записать несколькими способами и получить несколько выражений для определения поверхностной энергии некоторой среды. Например:

$$E_a = 0,16\mu R , \quad (10)$$

где  $R$  - радиус атома, или

$$E_a = 8E \cdot 10^{-12} . \quad (11)$$

Таким образом, у нас есть три способа, пригодных для расчета поверхностной энергии единичной системы. В табл. 1 приведены значения энергии адгезии для некоторых простых материалов и для оксида алюминия, которые были рассчитаны различными способами. Таким образом, поверхностная энергия зависит только от свойств материала и не зависит от других характеристик.

Таблица 1  
Значения поверхностной энергии некоторых материалов,  
рассчитанных несколькими способами

Материал	Характеристики материала		E <sub>a</sub> , Дж/м <sup>2</sup>		
			Расчетная формула		
	R, 10 <sup>10</sup> м	E, 10 <sup>-11</sup> Па	(10)	(11)	(3)-(9) или [6]
V	1,31	1,77	1,31	1,36	1,20
Cr	1,25	2,87	2,37	2,30	2,34
Ti	1,46	1,03	1,00	0,82	0,97
Mo	1,36	3,3	2,74	2,64	2,39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,43	3	2,84	2,40	2,18
Cu	1,28	1,2	0,89	0,96	0,77
Al	1,43	0,7	0,60	0,56	0,53

Кроме теории, предложенной в [5] и [6], существует также теория Ю.В. Найдича, которая предполагает наличие связи между энергией Гиббса химической реакции и краевым углом смачивания [7]. Согласно этой теории энергию адгезии двух сред можно записать таким образом:

$$E_a = (\cos \theta + 1) \cdot \sigma_{lv} , \quad (12)$$

где  $\theta$  - краевой угол смачивания;  $\sigma_{lv}$  - поверхностное натяжение на границе жидкость – газ.

Таким образом, можно определить энергию адгезии двумя способами, используя формулы (1) и (12). В табл. 2 приведены значения энергии адгезии для некоторых материалов, которые были подсчитаны описанными выше способами.

**Определения прочности сцепления и силы адгезии покрытия к основному материалу.** Для полного описания адгезии покрытия и подложки необходимы значения энергии и силы адгезии, а также прочности сцепления. Согласно [1] зависимость между силой адгезии и прочности сцепления можно определить по формуле

$$F_a = \pi\sigma r^2, \quad (13)$$

где  $\sigma$  - прочность сцепления;  $r$  - радиус царепины, полученный результатом воздействия индентора на поверхность подложки.

Также существует выражение для определения энергии адгезии через силу адгезии

$$F_a = \frac{E_a^2 \cdot h}{\pi r^4 \cdot E}, \quad (14)$$

где  $h$  - толщина покрытия.

Используя выражения (13) и (14), можно получить выражение для прочности сцепления:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\pi h}} \sqrt{E_a \cdot E}. \quad (15)$$

Сходная формула была получена в [8] и имеет вид

$$\sigma = k \frac{1}{\sqrt{\pi r_{инд}}} \sqrt{F_a \cdot H}, \quad (16)$$

где  $r_{инд}$  - радиус индентора при вершине;  $H$  - критическая нагрузка;  $k$  - коэффициент Вивера (рекомендуется принимать  $k = 1$ ).

Зная энергию адгезии, подсчитанную по формуле (10) или (11), можно по формуле (15) рассчитать прочность сцепления и затем по формуле (13) – силу адгезии  $F_a$ .

В табл. 3 приведены значения прочности сцепления для некоторых пар материалов (покрытий – карбидов, нитридов, а также простых материалов, используемых в качестве подложки) в зависимости от толщины покрытия. Как показали расчеты, значения прочности сцепления для данных материалов отличаются друг от друга на 8,4...9,18%.

В табл. 4 приведены значения характеристик адгезии (энергии адгезии и прочности сцепления), а также их значения, взятые из других источников. Таблица показывает наличие связи между толщиной покрытия и прочностью

сцепления, а также частичное или полное совпадение энергии адгезии для пар различных материалов и совпадение прочности сцепления при соответственной толщине покрытия.

Таблица 2  
Значения энергии адгезии некоторых пар материалов

Подложка	Покрытие	$\theta, {}^\circ$	$\sigma_a, \text{Дж/м}^2$	$E_a, \text{Дж/м}^2$	
				Расчетная формула	
				(1)	(12)
Графит (алмаз)	Fe	37,00	1,78	2,25	3,20
	Co	48,00	1,81	2,20	3,01
	Ni	45,00	1,70	2,27	2,90
	Al	38,00	0,91	0,74	1,63
Ni	NbC	16,58	1,70	3,40	3,33
	VC	14,20	1,70	4,29	3,35
	TaC	11,97	1,70	3,78	3,36
Ni	TiC	30,15	1,70	3,33	3,17
	ZrC	24,15	1,70	3,25	3,25
	HfC	28,13	1,70	3,17	3,20
Ni	TiN	69,42	1,70	3,47	2,30
	ZrN	71,90	1,70	3,73	2,23
	TiO <sub>2</sub>	103,60	1,70	3,29	1,30
	ZrO <sub>2</sub>	117,46	1,70	3,10	0,92

В табл. 5 приведена прочность сцепления, полученная двумя способами, для некоторых простых материалов (Al, Ni, Co, Si) и некоторых покрытий (BN, Mo<sub>2</sub>C, WC, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, NbC, VC). Величина прочности сцепления, полученная через энергию адгезии, сходна по двум способам. Как показывают подсчеты, прочность сцепления и сила адгезии зависят от толщины покрытия, и тем больше, чем меньше толщина покрытия.

На рис. 1 – 4 показана трехмерные зависимости силы адгезии, прочности сцепления от толщины покрытия и радиуса царапания инденторов различных размеров. С помощью этих графиков можно определить параметры покрытия, при которых адгезионные характеристики будут иметь требуемые значения.

Например, на рис. 1 показана зависимость силы адгезии и прочности сцепления от толщины покрытия пары материалов – стали 38ХС и оксида алюминия, которая свидетельствует о том, что с ростом толщины покрытия сила адгезии и прочности сцепления уменьшается. Максимальная прочность сцепления  $\sigma$  в данном случае может составлять 5958 МПа, при силе адгезии

$F_a = 4677$  Н, радиус скругления индентора  $r_a$  при вершине – 500 мкм, при толщине покрытия  $h = 10^{-8}$  м. Минимальная прочность сцепления  $\sigma$  в данном случае может составлять 188 МПа, при силе адгезии  $F_a = 9$  Н, радиус скругления индентора  $r_a$  при вершине – 100 мкм, при толщине покрытия  $h = 10^{-5}$  м.

Нами были проведены расчеты значений характеристик адгезии для материалов 38ХС, BT14 и одиннадцати покрытий ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{HfN}$ ,  $0,8\text{ZrN}+0,2\text{HfN}$ ,  $\text{ZrN}$ ,  $\text{TaN}$ ,  $\text{TiN}$ ,  $0,5\text{AlN}+0,5\text{TiN}$ ,  $\text{AlN}$ ,  $\text{Cr}_3\text{N}_2$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ).

Таблица 3  
Прочность сцепления для некоторых пар материалов,  
полученных двумя способами

Покрытие – основной материал	$\sigma$ , МПА					
	Расчетная формула для определения $E_a$ (1)		Расчетная формула для определения $E_a$ (12)			
	$h$ , м					
	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$
BN - Al	5445	1722	544	5944	1880	594
Mo <sub>2</sub> C - Ni	7755	2452	775	7675	2427	767
WC - Ni	8801	2783	880	8768	2773	877
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Ni	6289	1989	628	6415	2028	641
NbC - Ni	6111	1932	611	6048	1913	605
VC - Ni	7662	2423	766	6771	2141	677
Mo <sub>2</sub> C - Ni	7755	2452	775	7645	2418	765
Mo <sub>2</sub> C - Co	7777	2459	778	7878	2491	788
Mo <sub>2</sub> C - Si	7370	2331	737	5438	1720	544
Mo <sub>2</sub> C - Cu	5639	1783	564	7757	2453	776
Mo <sub>2</sub> C - Ge	5128	1622	513	5243	1658	524

Таблица 4  
Сравнение данных по расчетам энергии адгезии,  
прочности сцепления с данными их других источников

Пара материалов	$E_a$ расч, Дж/м <sup>2</sup>	$h$ , мкм	$\sigma_{\text{расч}}$ , МПА	Данные из источников		
				$E_a$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma$ , МПА	
88% WC+12%Co - Cu	2,21	1-10	384,1-121,46		250-210-280	[9]
	2,59	1-10	688,36-217,68			
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Cu	1,75	10-500	145,71-20,61		15	[10]
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Ni	3,27	10-500	198,88-28,13			

Окончание таблицы 4

Пара материалов	$E_a$ расч, Дж/м <sup>2</sup>	h, мкм	$\sigma_{\text{расч}}$ , МПА	Данные из источников		
				$E_a$ , Дж/м <sup>2</sup>	$\sigma$ , МП А	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - Сталь	3,63	120-1300	53,76-16,33		40-70	[11]
	3,31	120-1300	51,32-15,59			
Cu - Fe	2,07	0,01-0,1	2809,73- 888,51	3,93-1,54-0,32	5904 0-800	[2]
Cu - Al	1,52	0,01-0,1	2408,41- 761,61	3,04-0,88-0,26	4314 0-780	[2]
Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	0,01-0,1	2022-639,63	1,38-0,19		[2]
				1,79		[6]
TiO <sub>2</sub> - Cr	4,51	1-10	630,80- 199,48	3,349		[4]
TiO <sub>2</sub> - Fe	3,39	1-10	546,94- 172,96	3,379		[4]
TiO <sub>2</sub> - Ni	3,29	1-10	538,72- 170,36	2,69		[4]
TiO <sub>2</sub> - Si	2,90	1-10	505,81- 159,95	4,866		[4]
WC+Co - Сталь	3,23	500-1000	20,79-14,7		25- 40-60	[12]
	4,71	500-1000	41,49-29,34			
Cr - Сталь	3,58	10-30	180,94- 104,47		более 100	[12]
	3,28	10-30	173,23-10,01			
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> - Сталь	3,68	40-80	105,57-74,65		более 80	[12]
	3,25	40-80	99,21-70,15			
Cu - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	5-6	118,44- 108,12		35	[1]
Ti - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,53	2-3	203,58- 166,22		101	[1]
Cu - Сталь	1,94	10-30	86,18-49,75		240	[1]
	2,28	10-30	93,37-53,91			
Cu - Mo	2,41	5-10	135,78-96,01		120	[1]
Al - AlN	2,05	1-3	213,87- 123,48	1,95	127	[6], [1]
Ti - AlN	2,81	1-10	303,79-96,07		120	[1]
Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	4-5	101,13-90,46	1,79	23	[6], [1]
Al - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01	4-5	22,50-6,36		23	

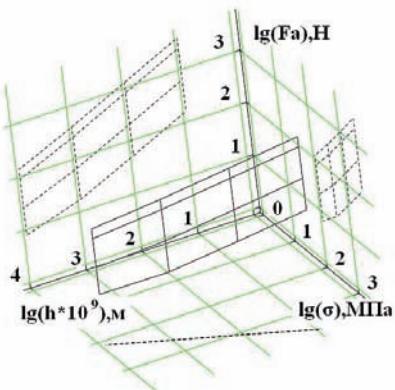


Рис. 1. Зависимость силы адгезии, прочности сцепления от толщины покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , основной материал – сталь 38ХС

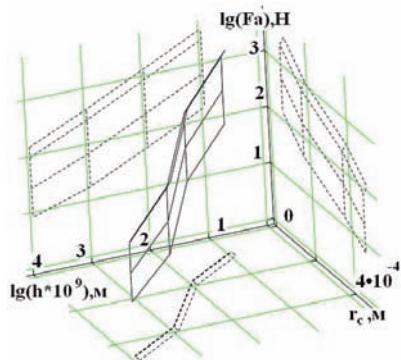


Рис. 2. Зависимость силы адгезии от толщины покрытия и радиуса царапания для пары материалов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и стали 38ХС

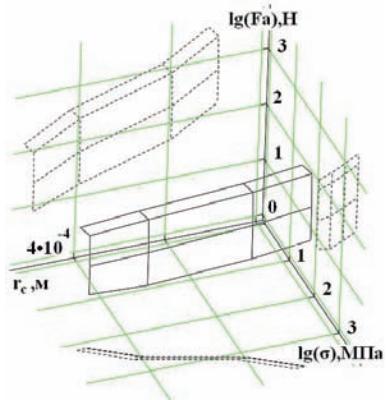


Рис. 3. Зависимость силы адгезии, прочности сцепления от радиуса царапания для пары материалов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и стали 38ХС

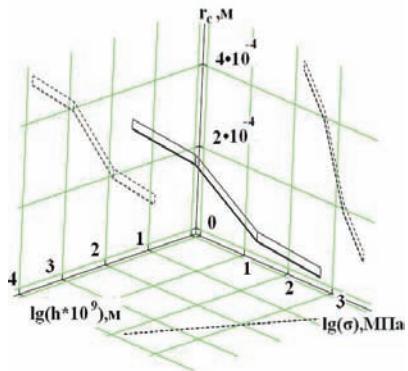


Рис. 4. Зависимость прочности сцепления от радиуса царапания и от толщины покрытия для пары материалов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и стали 38ХС

Таблица 5

Значения характеристик адгезии для стали 38ХС и титанового сплава ВТ14

Покрытие	E <sub>a</sub> , Дж/м <sup>2</sup>	σ , МПа			F, Н							
		h, м										
		Рей тинг	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-5</sup>	Рей тинг	
					г <sub>ннд</sub> , мкм							
					300		400		500		Рей тинг	
38ХС												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,72	1	5958	188	749	30	2994	107	4677	163	2	
HfN	3,91	4	5853	185	735	29	2941	105	4595	160	1	
0,8ZrN+ 0,2HfN	4,26	7	7055	223	886	35	3545	126	5539	193	6	
ZrN	4,29	8	7304	231	918	37	3670	131	5734	200	7	
TaN	4,74	11	9323	295	1171	47	4684	167	7319	255	11	
TiN	4,41	10	7780	246	977	39	3909	139	6108	213	10	
0,5AlN+ 0,5TiN	4,29	9	7305	231	918	37	3670	131	5735	200	8	
AlN	4,15	6	6803	215	855	34	3418	122	5341	186	5	
Cr <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	4,08	5	6449	204	810	32	3241	116	5063	176	3	
TiC	3,73	2	7374	233	926	37	3705	132	5789	202	9	
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	3,74	3	6724	213	845	34	3379	120	5279	184	4	
ВТ14												
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,13	3	4510	143	567	23	2266	81	3541	123	1	
HfN	2,51	6	4693	148	590	24	2358	84	3684	128	2	
0,8ZrN+ 0,2HfN	2,53	9	5442	172	684	27	2734	97	4272	149	7	
ZrN	2,51	7	5590	177	702	28	2809	100	4389	153	8	
TaN	2,66	11	6986	221	878	35	3510	125	5485	191	11	
TiN	2,56	10	5920	187	744	30	2975	106	4648	162	10	
0,5AlN+ 0,5TiN	2,51	8	5591	177	702	28	2809	100	4389	153	9	
AlN	2,47	4	5243	166	659	26	2634	94	4116	143	5	
Cr <sub>3</sub> N <sub>2</sub>	2,49	5	5035	159	633	25	2530	90	3953	138	4	
TiC	2,00	1	5397	171	678	27	2712	97	4237	148	6	
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	2,05	2	4976	157	625	25	2500	89	3907	136	3	

**Выводы.** Исходя из расчетов для стали 38ХС минимальное значение энергии адгезии было получено для оксида алюминия (3,72 Дж/м<sup>2</sup>), максимальное – для нитридов – 3,91...4,74 Дж/м<sup>2</sup>, среднее значение занимают карбиды с энергией адгезии 3,73...3,74 Дж/м<sup>2</sup>.

Для титанового сплава ВТ14 минимальное значение энергии получается при взаимодействии с карбидами (2,0...2,05), максимальное – с нитридами (2,51...2,66).

Таким образом, была проделана работа по оценке адгезионных характеристик для пары материалов – покрытие – основной материала также

были учтены некоторые механические характеристики материалов, толщина покрытия и геометрические параметры индентора.

Как показали расчеты, энергию адгезии можно определить несколькими способами – через некоторые механические характеристики, указанные выше, а также через краевой угол смачивания и поверхностное натяжение. Эти два способа дают приблизительно сходные результаты, но в связи с большей доступностью характеристик первого способа, необходимых для подсчета энергии адгезии, он соответственно более пригоден первый метод. Однако при дальнейшем расчете прочности сцепления первый метод по сравнению с экспериментом дает несколько завышенные результаты, хотя также пригоден для использования.

**Список литературы:** 1. Лунев В.М. Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения [Текст] / В.М. Лунев, О.В. Немашкало // ФИП. - 2010. - Т. 8, № 1. - С. 64 - 71. 2. Вакилов А.Н. Адгезия металлов и полупроводников в рамках диэлектрического формализма [Текст] / А.Н. Вакилов, М.В. Мамонов, В.В. Прудников // Физика твердого тела. - 1997. - Т. 39, № 6. - С. 964 - 967. 3. Щацуков А.Г. Современное представление о возможных механизмах адгезии металлических пленок к различным подложкам [Текст] / А.Г. Щацуков // Прикладная физика. - 2006. - № 5. - С. 16 - 21. 4. Молодечкина Т.В. Определение адгезионных свойств диоксида титана к различным подложкам [Текст] / Т.В. Молодечкина, В.П. Глыбин, Л.М.Лыньков // Доклады БГУИР.- 2003. - № 4. - С. 119 - 121. 5. Рогожина Т.С. Контактная энергия в зоне адгезии металлов [Электронный ресурс] / Т.С. Рогожина. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/174.pdf> - 02.2011. 6. Витковский И.В. Теоретическое определение адгезионных свойств материалов для жидкокометаллического бланкета термоядерного реактора [Текст] / И.В. Витковский, А. Н. Конев, В.С. Шоркин // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 28 – Вып. 2. – С. 11 - 16. 7. Иванов А.В. Связь между изменением энергии Гиббса химической реакции и краевыми углами смачивания в системах жидкий металл-оксид [Текст] / А.В. Иванов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Химия. – 2002. – Т. 28, № 5. – С. 311 - 314. 8. Синькевич Ю.В. Влияние электроИмпульсного полирования подложки на прочность сцепления гальванических покрытий [Электронный ресурс] / Ю.В. Синькевич. – Режим доступа:[http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/PtSm/2009\\_37/228-232.pdf](http://www.nbuv.gov.ua/portal/natural/PtSm/2009_37/228-232.pdf) - 02.2011. 9. Погребняк А.Д. Структура и свойства твердого сплава, нанесенного на медную подложку с помощью импульсно-плазменной технологии [Текст] / А.Д. Погребняк, М.В. Ильяшенко [и др.] // Журнал технической физики. – 2001. - Т. 71 – Вып. 7. – С. 111 - 118. 10. Боровинская И.П СВС-твердые сплавы на пороге XXI века [Текст] / И.П. Боровинская // Машиностроитель. – 2000. – № 3. – С. 15 - 21. 11. Практическое применение газотермических технологий нанесения защитных покрытий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.t-s-t.ru/pdf/GTP-light-2.pdf> - 02.2011. 12. Балдаев Л.В. Исследование возможности замены гальванических хромовых покрытий на газотермические покрытия, напыленные высокоскоростной грелкой TOP GUN-K [Электронный ресурс] / Л.В. Балдаев. – Режим доступа: [http://www.tspc.ru/about/lit/tspc\\_lit\\_6.pdf](http://www.tspc.ru/about/lit/tspc_lit_6.pdf) - 02.2011.

Поступила в редколлегию 06.07.11

**В.И. ПОЛЯНСКИЙ**, директор ООО "Империя металлов", Харьков.

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ ВО ВРЕМЕНИ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА

Произведено сравнение расчетных значений температуры, полученных с использованием классического уравнения теплопроводности и упрощенного уравнения баланса тепла в поверхностном слое обрабатываемой детали. Доказано незначительное отличие данных значений и возможность практического использования полученных теоретических решений

Виконано порівняння розрахункових значень температури, отриманих з використанням класичного рівняння теплопровідності та спрощеного рівняння балансу тепла в поверхневому шарі оброблюваної деталі. Доведено незначну відмінність отриманих значень і можливість практичного використання даних теоретичних рішень

Comparison of calculation values of temperature, got with the use of classic equalization of heat conductivity and simplified equalization of balance of heat in the superficial layer of workpart is produced. The insignificant difference of these values and possibility of the practical use of the got theoretical decisions is well-proven

Ключевые слова: температура шлифования, плотность теплового потока, адиабатический стержень, качество обработки

**Введение.** Практикой установлено, что формирование параметров качества обработки деталей происходит, как правило, под воздействием температурного фактора. Образование прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях является итогом высоких температур, возникающих в зоне резания [1-5]. Поэтому изыскание путей уменьшения тепловой напряженности механической обработки, в особенности процесса шлифования, представляет собой важную и актуальную задачу, направленную на повышение качества и производительности обработки. Целью работы является определение температуры шлифования на основе различных теоретических подходов и оценка возможности практического использования теоретических решений.

**Основное содержание работы.** Для оценки теплонапряженности процесса шлифования в работе [1] предложена упрощенная расчетная схема, в которой снимаемый припуск представлен пакетом элементарных прямолинейных адиабатических стержней с площадью поперечного сечения  $S$ , которые перерезаются шлифовальным кругом. На каждый стержень в течение его контакта с кругом действует тепловой источник плотностью  $q$ . В результате происходит нагревание стержня. При этом принято считать, что тепло распространяется вдоль стержня (стенки стержня изолированы) – вдоль координаты  $x$ . Следовательно, наибольшая температура достигается на торце стержня, контактирующего с шлифовальным кругом. По мере удаления от источника тепла (торца стержня) температура уменьшается.

Для расчета температуры  $\theta(x, \tau)$  в стержне может быть использована аналитическая зависимость [6], полученная на основе решения уравнения теплопроводности для граничного  $q(x=0) = q_0$  и начального  $\theta(\tau=0)=0$  условий:

$$\theta(x, \tau) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\frac{\tau}{\pi}} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot e^{-\frac{x^2}{4a^2 \cdot \tau}} - \frac{q_0}{\lambda} \cdot x \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}}\right) \right], \quad (1)$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $a^2 = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт·м·К;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время обработки, с;  $x$  – координата.

С учетом безразмерной величины  $z = \frac{x}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}}$ , имеем

$$\theta(z, \tau) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - \operatorname{erf}z) \right] \quad (2)$$

или в относительных величинах

$$\bar{\theta}(z, \tau) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \bar{\theta}(z), \quad (3)$$

где  $\bar{\theta}(z) = \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - \operatorname{erf}z) \right]$  – безразмерная функция температуры

[7,8].

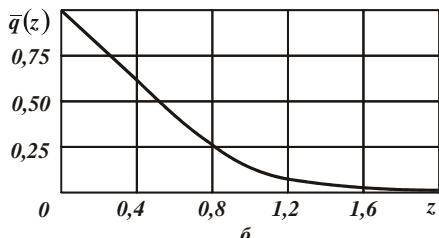
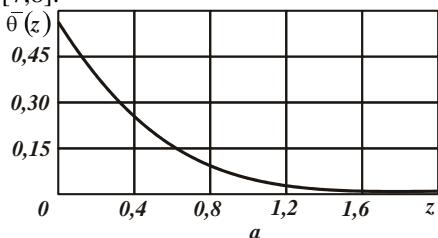


Рис. 1. Характер изменения функций: а –  $\bar{\theta}(z)$ ; б –  $\bar{q}(z)$ .

Максимальная температура шлифования  $\theta_{max_1}$  достигается при  $x=0$  и равна

$$\theta(x=0, \tau) = \theta_{max_1} = 1,129 \cdot a \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\tau}. \quad (4)$$

С учетом (4) зависимость (3) выразится

$$\theta(z) = \sqrt{\pi} \cdot \theta_{max_1} \cdot \bar{\theta}(z). \quad (5)$$

Плотность теплового потока

$$q(x, \tau) = -\lambda \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}(x, \tau) = q_0 \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2a \cdot \sqrt{\tau}} \right) \right] \quad (6)$$

или в относительных величинах

$$q(z, \tau) = q_0 \cdot \bar{q}(z), \quad (7)$$

где  $\bar{q}(z) = 1 - \operatorname{erf} z$  – безразмерная функция плотности теплового потока.

Графики изменения функций  $\bar{\theta}(z)$  и  $\bar{q}(z)$  показаны на рис. 1. С увеличением параметра  $z$  функции  $\bar{\theta}(z)$  и  $\bar{q}(z)$  неограниченно уменьшаются, асимптотически приближаясь к нулю. Это не позволяет определить истинное значение глубины  $z$  проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали. Его можно установить с лишь наперед заданной степенью точности, например, принимая  $z=1; 1,5; 2$  и т.д. Поэтому для определения данного значения  $z$  необходимо использовать другой подход к расчету температуры резания.

В случае действия теплового источника с постоянной плотностью  $q_0$  в течении весьма малого промежутка времени  $\Delta\tau$ , когда тепло распространяется вдоль адиабатического стержня на небольшую глубину  $\Delta x$ , решение можно упростить. Будем считать, что характер изменения плотности теплового потока  $q$  подчиняется зависимости  $q(x) = q_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta x}\right)$ . Количество тепла, вошедшее в стержень за время  $\Delta\tau$ , равно

$$Q_1 = q_0 \cdot S \cdot \Delta\tau. \quad (8)$$

Количество тепла, необходимое для нагревания стержня на глубину  $\Delta x$ , до температуры  $\theta$  за время  $\Delta\tau$ , равно

$$Q_2 = c \cdot \rho \cdot S \cdot \int_0^{\Delta x} \theta(x) \cdot dx. \quad (9)$$

Здесь  $\theta(x) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \int q(x) \cdot dx$ . С учетом граничного условия  $\theta(x = \Delta x) = 0$ ,

имеем

$$\theta(x) = \theta_{max_2} \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta x}\right)^2; \quad (10)$$

$$\theta(x = 0) = \theta_{max_2} = \frac{q_0}{\lambda} \cdot \frac{\Delta x}{2}. \quad (11)$$

Из условия  $Q_1 = Q_2$  получим

$$\Delta x = \sqrt{\frac{6 \cdot \lambda}{C \cdot \rho} \cdot \Delta \tau} = 2,45 \cdot a \cdot \sqrt{\Delta \tau}. \quad (12)$$

$$\theta(x=0) = \theta_{max_2} = 1,225 \cdot a \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\Delta \tau}. \quad (13)$$

Зависимость (13) имеет вид, аналогичный зависимости (4), отличающийся лишь числовым коэффициентом (рассматривая  $\Delta \tau = \tau$ ). Расхождение расчетных значений максимальной температуры, установленных по зависимостям (4) и (13), составляет всего 7,8%. В относительных величинах:

$$\theta(z) = \theta_{max_2} \cdot (1 - 0,816 \cdot z)^2 = \theta_{max_2} \cdot \bar{\theta}(z); \quad (14)$$

$$q(z) = q_0 \cdot (1 - 0,816 \cdot z) = q_0 \cdot \bar{q}(z), \quad (15)$$

где  $\bar{\theta}(z) = (1 - 0,816 \cdot z)^2$ ;  $\bar{q}(z) = (1 - 0,816 \cdot z)$ .

Проведем анализ температуры шлифования  $\theta(x)$  и величины  $\Delta x$  для случая  $q(x) = q_0$ . В данном случае решение примет более простой вид

$$\theta(x) = \theta_{max_3} \cdot \left(1 - \frac{x}{\Delta x}\right); \quad (16)$$

$$\theta(x=0) = \theta_{max_3} = 1,414 \cdot a \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \sqrt{\Delta \tau}; \quad (17)$$

$$\Delta x = 1,414 \cdot a \cdot \sqrt{\Delta \tau}. \quad (18)$$

В итоге пришли к зависимостям, аналогичным зависимостям (12) и (13) и отличающимся от них лишь числовыми коэффициентами. Как видно, расхождение значений максимальной температуры  $\theta(x=0)$  незначительно (13,7%), тогда как расхождение значений  $\Delta x$  больше и составляет 42%. Зависимость (17) также отличается от аналогичной зависимости (4) лишь числовыми коэффициентами. Расхождение значений максимальной температуры, рассчитанных по данным зависимостям, составляет 20%. В относительных величинах

$$\theta(z) = \theta_{max_3} \cdot (1 - 1,414 \cdot z) = \theta_{max_3} \cdot \bar{\theta}(z); \quad (19)$$

$$q(z) = q_0 \cdot \bar{q}(z), \quad (20)$$

где  $\bar{\theta}(z) = (1 - 1,414 \cdot z)$ ;  $\bar{q}(z) = 1$ .

Для более наглядного представления о характере изменения функции  $\theta(z)$  для трех рассматриваемых в работе случаев представим их графически в обобщенном виде. Расчет значений  $\theta(z)$  произведем по преобразованным зависимостям (2), (14) и (19):

$$\theta(z) = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - erfz) \right]; \quad (21)$$

$$\theta(z) = 1,225 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot (1 - 0,816 \cdot z)^2; \quad (22)$$

$$\theta(z) = 1,414 \cdot a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda} \cdot (1 - 1,414 \cdot z). \quad (23)$$

Для удобства анализа множитель  $a \cdot \sqrt{\tau} \cdot \frac{q_0}{\lambda}$  в зависимостях примем равным единице. Как следует из рис. 2, значение максимальной температуры шлифования  $\theta(z)$ , установленное на основе зависимости (23), наибольшее, а установленное на основе зависимости (21), – наименьшее. Во всем диапазоне изменения функции  $\theta(z)$ , описываемой зависимостью (22), ее значения неизначительно отличаются от значений функции  $\theta(z)$ , описываемой зависимостью (21). В диапазоне  $z < 0,7$  значения функции  $\theta(z)$ , описываемой зависимостью (23), также отличаются несущественно от значений  $\theta(z)$ , рассчитанных по зависимостям (21), (22). Это указывает на то, что температура шлифования  $\theta(z)$ , в особенности максимальная температура шлифования, с достаточной для практики точностью может быть описана упрощенными зависимостями (22) и (23), полученными на основе упрощенных расчетов, не требующих решения сложного дифференциального уравнения теплопроводности.

Необходимо отметить, что согласно полученным приближенным решениям (22) и (23) температура шлифования  $\theta(z)$  с увеличением координаты  $z$  уменьшается от максимального значения до нуля, тогда как в уточненном решении (21), она непрерывно уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю, но, не достигая нулевого значения. В этом отличие приведенных решений.

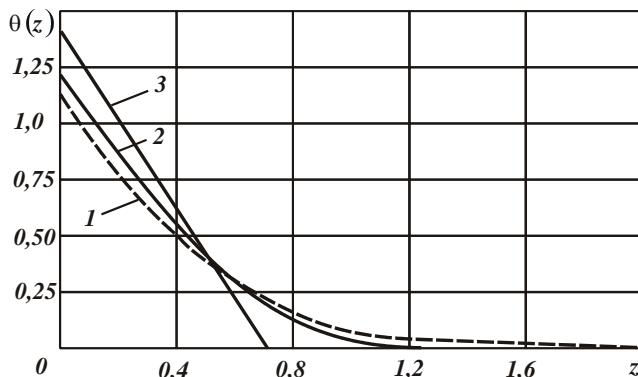


Рис. 2. Графики функции  $\theta(z)$ : 1 – расчет по зависимости (21); 2 – расчет по зависимости (22); 3 – расчет по зависимости (23).

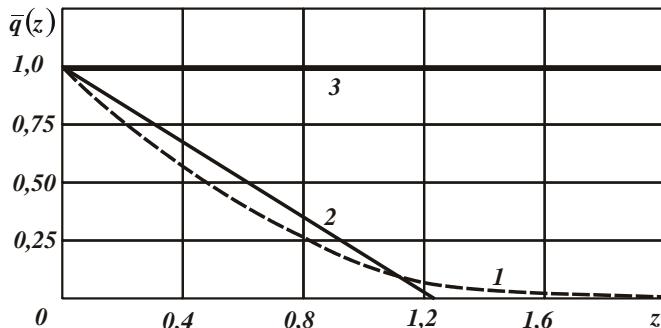


Рис. 3. Графики функции  $\bar{q}(z)$ : 1 – расчет по зависимости (7); 2 – расчет по зависимости (15); 3 – расчет по зависимости (20).

На рис. 3 в обобщенном виде представлены графики безразмерных функций плотности теплового потока  $\bar{q}(z)$ , описываемых соответственно зависимостями (7), (15) и (20). Как видно, расхождения значений  $\bar{q}(z)$  больше, чем расхождения значений  $\theta(z)$ . Для случаев, описываемых зависимостями (7) и (15), эти расхождения находятся в пределах 25%.

**Выводы.** В работе установлено, что значения максимальной температуры шлифования, рассчитанные на основе приведенных выше аналитических зависимостей (которые получены по различным методикам), отличаются незначительно. Следовательно, все вышеуказанные зависимости могут быть использованы для практических расчетов. Этим, собственно, и объясняется то, что различные методики расчета температуры резания (опубликованные в научно-технической литературе) приводят к достаточно высокой степени сходимости расчетных и экспериментальных данных.

**Список литературы:** 1. Теплофізика механічної обробки: підручник / О.В. Якимов, А.В. Усов, П.Т. Слободянік, Д.В. Іоргачов. – Одеса: Астропrint, 2000. – 256 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с. 3. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С.С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технология машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 10. "Концепции развития технологии машиностроения" – Одесса: ОНПУ, 2005. – 565 с. 5. Рябенков I.O. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / I.O. Рябенков. – Одеса, 2009. – 21 с. 6. Чупров И.Ф. Уравнения математической физики с приложениями к задачам нефтедобычи и трубопроводного транспорта газа: Учебное пособие / И.Ф. Чупров, Е.А. Канева, А.А. Мордвинов. – Ухта: УГГУ, 2004. – 128 с. 7. Корн Г. и Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров, – Москва, 1974. – 832 с. 8. Бугров Я.С. Высшая математика. Дифференциальные уравнения. Кратные интегралы. Ряды. Функции комплексного переменного / Я.С. Бугров, С.М. Никольский. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 448 с.

Надійшла до редакції 04.05.11

**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;  
**И.Е. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, ПГТУ, Мариуполь.

## **ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ НАПЛАВЛЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ**

В работе обоснованы условия повышения производительности шлифования износостойких наплавленных материалов высокой твердости. Показана эффективность применения схем круглого продольного многопроходного и глубинного шлифования с увеличенной скоростью детали, реализующих сегментообразную форму среза отдельным зерном круга

У роботі обґрунтовані умови підвищення продуктивності шліфування зносостійких наплавлених матеріалів високої твердості. Показано ефективність застосування схем круглого поздовжнього багатопрохідного й глибинного шліфування зі збільшеною швидкістю деталі, які реалізують сегментну форму зрізу окремим зерном круга

The terms of increase of the productivity of polishing of wearproof naplavlenykh materials of high hardness are in-process grounded. Efficiency of application of charts of the round longitudinal multi-pass and deep polishing is rotined with megascopic speed of detail, realizing the segmentoobraznuyu form of cut by separate grain of circle

Ключевые слова: Наплавленные материалы, абразивный круг, шлифование, скорость детали, производительность обработки

**Введение.** Обработка поверхностей крупногабаритных деталей (типа тел вращения) тяжелого машиностроения и металлургического назначения с наплавленными материалами твердостью HRC 62–63 осуществляется, как правило, шлифованием, поскольку применение резцов из твердых сплавов и синтетических сверхтвердых материалов при съеме значительных неравномерных припусков приводит к образованию сколов на обрабатываемых поверхностях и снижению качества обработки. При этом процесс шлифования характеризуется низкой производительностью обработки и высоким износом абразивного круга, работающим в режиме самозатачивания с целью обеспечения высокой режущей способности и снижения энергоемкости обработки [1]. Применение алмазных кругов на высокопрочных металлических связках в связи с их интенсивным засаливанием даже в условиях непрерывной электроэрозионной правки оказалось малоэффективным [2,3]. Поэтому, по-прежнему, актуальной задачей является определение новых технологических возможностей увеличения производительности обработки наплавленных материалов. Цель работы – обоснование условий повышения эффективности процесса круглого шлифования деталей с износостойкими наплавленными материалами.

**Основное содержание работы.** Производительность обработки при круглом шлифовании по жесткой схеме может быть определена по зависимости [4]:

$Q = S_{\text{меч}} \cdot V_{kp}$ , где  $S_{\text{меч}} = n \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot a_z^2$  – мгновенная суммарная площадь поперечно-го сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга,  $\text{м}^2$ ;  $V_{kp}$  – ско-рость круга,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $n = k \cdot B \cdot l$  – количество одновременно работающих зерен круга;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $a_z$  – средняя толщина среза отдельным зерном круга,  $\text{м}$ ;  $k = k_0 \cdot a_z / b$  – поверхность концен-трация зерен круга,  $\text{шт}/\text{м}^2$ ;  $k_0$  – количество зерен, расположенных на единице площасти рабочей поверхности круга, участвующих в резании,  $\text{шт}/\text{м}^2$ ;  $b$  – высота выступания режущего зерна над уровнем связки круга,  $\text{м}$ ;  $B$  – ширина шлифова-ния,  $\text{м}$ ;  $l = \sqrt{2 \cdot t / \rho}$  – длина дуги контакта периферии круга с обрабатываемым материалом,  $\text{м}$ ;  $t$  – глубина шлифования,  $\text{м}$ ;  $\rho = 1 / R_{kp} + 1 / R_{dem}$ ;  $R_{kp}, R_{dem}$  – соот-ветственно радиусы круга и детали,  $\text{м}$ . После несложных преобразований, имеем

$$Q = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{kp}}{b} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}. \quad (1)$$

Зависимость (1) получена из условия шлифования одинаковыми по размерам и высоте выступания над уровнем связки зернами круга, что позволяет упростить расчет и получить принципиальное решение. Параметр  $a_z$  определяет прочностные свойства рабочей поверхности круга, обусловленные прочностью зерен и связки круга. Как следует из зависимости (1), увеличить производительность обра-ботки  $Q$  можно увеличением  $\gamma$ ,  $k_0$ ,  $B$ ,  $a_z$ ,  $V_{kp}$ ,  $t$ ,  $R_{kp}, R_{dem}$  и уменьшением  $b$  (выполняя условие  $a_z = b$ ). Скорость детали  $V_{dem}$  при этом устанавливается по зависимости

$$V_{dem} = \frac{Q}{B \cdot t} = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{kp}}{b} \cdot \sqrt{\frac{2}{t \cdot \rho}}. \quad (2)$$

Как видно, с увеличением глубины шлифования  $t$  скорость детали  $V_{dem}$  должна уменьшаться, т.е. с точки зрения увеличения производительности обработки за счет максимального использования прочностных свойств рабочей поверхно-сти круга эффективно применять глубинное шлифование с относительно неболь-шой скоростью детали и шириной шлифования, равной высоте круга.

В работе [5] показано, что при алмазном шлифовании справедливы зависи-мости:  $k_0 = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$ ;  $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ , где  $m$  – объемная концентрация зерен в круге (безразмерная величина, равная, например, для алмазного круга 100%-ной концентрации  $m = 100$ );  $\bar{X}$  – зернистость круга,  $\text{м}$ ;  $\varepsilon$  – безразмерный коэффици-

ент, учитывающий степень выступания зерен над уровнем связки ( $\varepsilon < 1$ ). После преобразований зависимость (1) примет вид

$$Q = \frac{3 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot B \cdot \alpha^3 \cdot V_{kp}}{200 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}, \quad (3)$$

где  $\alpha = a_z / \bar{X}$  – безразмерная величина.

Наибольшее влияние на производительность обработки  $Q$  оказывает безразмерная величина  $\alpha$ , которая входит в зависимость (3) в третьей степени. Как показывает практика шлифования, с увеличением зернистости круга  $\bar{X}$  производительность обработки  $Q$  увеличивается. Из этого следует, что  $\alpha$  увеличивается с увеличением  $\bar{X}$ .

При круглом шлифовании по упругой схеме с фиксированным радиальным усилием  $P_y$  производительность обработки  $Q$  определяется из условия  $n = P_y / P_0$ , где  $P_0 = \pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot a_z^2 \cdot HV$  – радиальное усилие, действующее на отдельное зерно круга, Н;  $HV$  – твердость (по Виккерсу) обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>. Тогда

$$Q = S_{meh} \cdot V_{kp} = n \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot a_z^2 \cdot V_{kp} = \frac{P_y \cdot V_{kp}}{\pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot HV}. \quad (4)$$

В отличии от зависимости (1), в зависимость (4) входит меньшее количество параметров, за счет которых можно увеличить  $Q$ . Основным путем увеличения  $Q$  следует рассматривать увеличение радиального усилия  $P_y$ , которое может изменяться в широких пределах. С увеличением угла  $\gamma$  (в связи с затуплением зерен круга) производительность обработки  $Q$  уменьшается. Следовательно, при шлифовании по упругой схеме важно в процессе постоянно поддерживать высокую режущую способность круга, что позволит обеспечить высокопроизводительный съем припуска. Исходя из зависимости (4), известные эффекты шлифования, связанные с применением крупнозернистых абразивных кругов, реализацией режима самозатачивания круга и т.д., обусловлены уменьшением угла  $\gamma$ , который является обобщающим параметром.

При шлифовании по жесткой схеме, исходя из зависимости (1), увеличение угла  $\gamma$  не ведет к уменьшению  $Q$ , а ведет к увеличению радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , которая может быть определена из условия равенства значений  $Q$ , определяемых зависимостями (1) и (4):

$$P_y = \frac{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot HV}{b} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{\rho}}. \quad (5)$$

Как видно, уменьшить  $P_y$  можно уменьшением параметров  $\gamma$ ,  $k_0$ ,  $B$ ,  $a_z$ ,  $t$ ,  $R_{kp}$ ,  $R_{dem}$ ,  $HV$  и увеличением  $b$ . Скорость круга  $V_{kp}$  на  $P_y$  влияния не оказывает. Следовательно, добиться увеличения производительности обработки  $Q$  (без увеличения радиальной составляющей силы резания  $P_y$ ) можно увеличением скорости круга  $V_{kp}$ . Все остальные параметры, входящие в зависимость (5), фактически в одинаковой мере (обратно пропорционально) влияют на  $Q$  и  $P_y$ . Поэтому увеличение  $Q$  всегда сопровождается увеличением  $P_y$ , а это ведет к повышению силовой и тепловой напряженности процесса шлифования и снижению качества обработки.

Зависимость (5), по сути, выражает связь между жесткой и упругой схемой шлифования, рассматривая параметр  $P_y$  как радиальное усилие при шлифовании по упругой схеме. Каждому значению глубины шлифования  $t$  (при шлифовании по жесткой схеме) соответствует конкретное значение  $P_y$  при шлифовании по упругой схеме. Чем больше  $t$ , тем больше  $P_y$ . Следовательно, одну и ту же производительность обработки  $Q$  можно обеспечить как при шлифовании по жесткой, так и по упругой схемам, устанавливая в соответствии с зависимостью (5) значения  $t$  и  $P_y$ . Для поддержания в процессе заданного значения  $a_z$ , скорость детали  $V_{dem}$  при шлифовании по жесткой схеме необходимо устанавливать по зависимости (2). При шлифовании по упругой схеме скорость детали  $V_{dem}$  также устанавливается по зависимости (2), выражая в ней глубину шлифования  $t$  через радиальное усилие  $P_y$  в соответствии с зависимостью (5):

$$V_{dem} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot B \cdot V_{kp}}{P_y \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot a_z^3}{b} \right)^2. \quad (6)$$

Как видно, с увеличением радиального усилия  $P_y$  скорость детали  $V_{dem}$  уменьшается, также как и с увеличением глубины шлифования  $t$  при шлифовании по жесткой схеме. Параметры  $\gamma$ ,  $k_0$ ,  $B$ ,  $a_z$  и  $b$  влияют на  $V_{dem}$  в большей мере, чем при шлифовании по жесткой схеме.

Производительность обработки  $Q$  при шлифовании может быть определена на основе приближенной зависимости  $Q = n_0 \cdot \vartheta_0 / \tau_0$ , где  $n_0 = k \cdot B \cdot \pi \cdot D_{kp}$  – ко-

личество работающих зерен круга;  $D_{kp}$  – диаметр круга, м;  $\vartheta_0 = \frac{1}{3} \cdot l \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot a_z^2$  – объем риски-царапины, образованной от работы отдельного зерна,  $\text{м}^3$ ;  $\tau_0 = \pi \cdot D_{kp} / V_{kp}$  – время одного вращения круга, с. После преобразований производительность обработки  $Q$  определится

$$Q = \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{kp} \cdot l}{3 \cdot b}. \quad (7)$$

Зависимость (7) аналогична зависимости (1) для шлифования по схеме, показанной на рис. 1,а (глубинное шлифование), рассматривая длину дуги контакта периферии круга с обрабатываемым материалом (длину среза отдельным зерном) в виде  $l = \sqrt{2 \cdot t / \rho}$ . При шлифовании по схеме, показанной на рис. 1,б (многопроходное шлифование), глубина шлифования равна толщине среза  $a_z$ , тогда  $l = \sqrt{2 \cdot a_z / \rho}$ . В этом случае, очевидно, производительность обработки  $Q$  будет меньше, т.к.  $a_z < t$ . В работе [6] показано, что при шлифовании по данной схеме зерна проходят практически “след в след”, образуя неполные срезы, в результате чего вероятность участия зерен в резании меньше, чем при шлифовании по схеме, показанной на рис. 1,а. Поэтому режущие зерна в процессе шлифования менее нагружены и соответственно предельная (прочностная) толщина среза  $a_z$  больше – она может достигать значений глубины шлифования, устанавливаемой при многопроходном шлифовании. Это создает объективные предпосылки повышения производительности обработки  $Q$  за счет увеличения толщины среза  $a_z$ , которая входит в зависимость (7) с наибольшей степенью. На рис. 1 заштрихованным показана форма среза отдельным зерном круга. При глубинном шлифовании (рис. 1,а) она принимает запятообразную форму, а при многопроходном шлифовании (рис. 1,б) – сегментообразную форму. Для заданного значения  $a_z$  длина среза отдельным зерном  $l$  при глубинном шлифовании всегда больше, чем при многопроходном шлифовании. В последнем случае она будет увеличиваться с увеличением скорости детали  $V_{dem}$ , однако не существенно, поскольку  $V_{dem} \ll V_{kp}$ . В связи с этим в расчетах влияние  $V_{dem}$  на  $l = \sqrt{2 \cdot a_z / \rho}$  не учитывается.

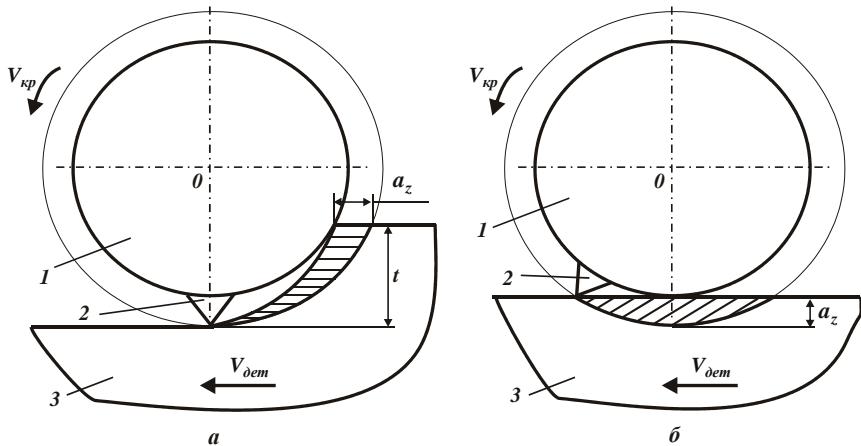


Рис. 1. Расчетные схемы параметров глубинного (а) и многопроходного (б) шлифования: 1 – круг; 2 – режущее зерно; 3 – обрабатываемый материал.

На рис. 2 приведены результаты численных расчетов переменных величин  $A_1 = a_z^3 \cdot \sqrt{t}$  (для схемы глубинного шлифования) и  $A_2 = a_z^{3,5}$  (для схемы многоходового шлифования), входящих в зависимость (7). По сути, величины  $A_1$  и  $A_2$  определяют относительную производительность обработки  $Q$ . Кривая 1 на рис. 2 получена для  $a_z = 5$  мкм, а кривая 2 – для  $a_z = 5 \dots 10$  мкм (рассматривая  $t = a_z$ ). Как видно, с увеличением глубины шлифования  $t$  переменная величина  $A_2$  увеличивается более интенсивно и принимает большие значения, чем переменная величина  $A_1$ . Это свидетельствует о возможности повышения производительности обработки  $Q$  в условиях многоходового шлифования за счет увеличения предельной (прочностной) толщины среза  $a_z$ , что достигается увеличением собственно прочности зерен и прочности удержания их в связке круга (путем увеличения твердости и зернистости круга). Как показывает практика круглого шлифования контактных поверхностей конусов и чащ (диаметром 5000 мм) засыпных аппаратов доменных печей с износостойким наплавленным материалом Пл-Нп 500Х40С2РЦ-Б-С (ГОСТ 26467-85) твердостью HRC 58–59 [1], наилучшие результаты были получены при шлифовании абразивными кругами ПП 500×63×203 14А СТ2 ВF на бакелитовой связке (усиленной стекловолокном) крупной зернистости: 16 – 18 (по FЕРА размер зерна 1,6 – 1,2 мм соответственно). Данные круги обладают высокой режущей способностью, реализуют режим самозатачивания и не требуют правки вплоть до полного износа. Применение абразивных кругов большей твердости приводит к образованию на обрабатываемых поверхностях прижогов вследствие существенного увеличения силовой и тепловой напряженности процесса шлифования. Это хорошо согласуется с полученной зависимостью (5), исходя из которой с увеличением пре-

дельной (прочностной) толщины среза  $a_z$  радиальная составляющая силы резания  $P_y$  интенсивно возрастает.

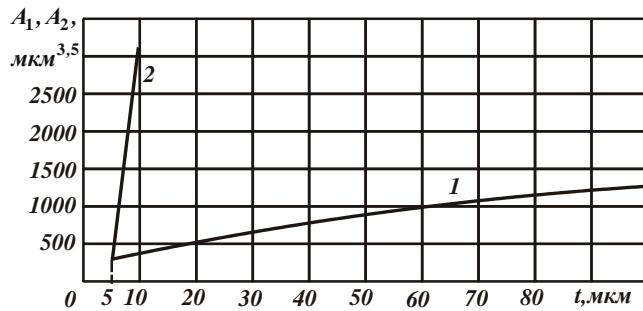


Рис. 2. Зависимости переменных величин  $A_1$  (1)

и  $A_2$  (2) от глубины шлифования  $t$ .

Скорость детали  $V_{dem}$  при многопроходном шлифовании (рис. 1,б) определяется аналогично зависимости (2):

$$V_{dem} = \frac{tg\gamma \cdot k_0 \cdot B \cdot a_z^3 \cdot V_{kp}}{3 \cdot b} \cdot \sqrt{\frac{2}{a_z \cdot \rho}}. \quad (8)$$

За счет увеличения предельной (прочностной) толщины среза  $a_z$  скорость детали  $V_{dem}$  будет принимать большие значения, чем в случае глубинного шлифования (рис. 1,а). Таким образом, теоретически обоснованы возможности повышения производительности обработки  $Q$  путем применения схемы многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали  $V_{dem}$ , реализующей сегментообразную форму среза отдельным зерном круга. На практике данную схему шлифования можно реализовать методами круглого врезного и продольного шлифования. В первом случае обработка производится всей шириной круга (ступками) с постоянной скоростью радиальной подачи. Во втором случае обработка может производиться по схеме как многопроходного, так и глубинного шлифования (с небольшой долевой продольной подачей  $S_d \ll 1$  и увеличенной глубиной шлифования). Особенностью осуществления глубинного шлифования является образование на рабочей поверхности круга заборного конуса [6], который обеспечивает равномерную нагруженность режущих зерен и равномерный износ круга вдоль образующей.

**Выводы.** В работе получены приближенные зависимости для установления максимально возможной производительности обработки, обусловленную прочностными свойствами рабочей поверхности круга, которые обобщенно определяются предельной (прочностной) толщиной среза  $a_z$ , а также получены зависимости для определения параметров режима резания при шлифовании по жесткой и упругой схемам. Установлено, что основным условием повышения производительности

обработки является увеличение предельной (прочностной) толщины среза и реализация схем глубинного и многопроходного шлифования. Показано, что в условиях круглого многопроходного и глубинного шлифования с увеличенной скоростью детали  $V_{dem}$ , реализующей сегментообразную форму среза отдельным зерном круга, можно обеспечить увеличение предельной (прочностной) толщины среза и тем самым повысить производительность обработки. Для реализации данных условий шлифования наплавленных материалов высокой твердости целесообразно использовать крупнозернистые абразивные круги, работающие в режиме самозатачивания.

**Список литературы:** 1. *Андилахай В.А.* Выбор оптимальной схемы шлифования контактных (наплавленных) поверхностей крупногабаритных изделий металлургического назначения / *В.А. Андилахай* // Труды 16-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”. – 2010. – С. 119-124. 2. *Рыбицкий В.А.* Опыт внедрения алмазного шлифования деталей с защитными покрытиями / *В.А. Рыбицкий*. – К.: Общество “Знание” УССР, 1987. – 23 с. 3. *Новиков Г.В.* Закономерности повышения производительности алмазного шлифования деталей с наплавками и покрытиями / *Г.В. Новиков, В.А. Андилахай* // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VII Международной научно-технической конференции: Курск. гос. техн. ун-т. Курск. – 2010. – С. 273-277. 4. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. *Ф.В. Новикова и А.В. Якимова*. В десяти томах. – Т. 1. “Механика резания материалов” – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с. 5. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. *А.Н. Резникова*. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. 6. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / *Ф.В. Новиков*. – Одесса, 1995. – 36 с.

Надійшла до редакції 04.05.11

**A.A. АНДРЕЕВ**, д-р техн. наук, проф., ННЦ «ХФТИ», Харьков;

**Г.И. КОСТЮК**, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;

**Н.А. МИНАЕВ**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННО-ИОННЫХ НАНОПОКРЫТИЙ Ti-TiN В МЕДИЦИНЕ И В ТЕХНИКЕ**

Подано результати дослідження нанопокріттів Ti-TiN. Отримано вакуумно-дугові багатошарові покріття Ti-TiN з товщиною шарів TiN 300 нм і шарів Ti близько 50 нм. Твердість покріттів становить 20...22 ГПа, що трохи нижче відомих значень для багатошарових покріттів TiN. Розмір кристаллітів становить 24...25 нм для TiN і 15 нм для фази  $\alpha$ -Ti. Спостерігається формування переважної орієнтації кристаллітів TiN з віссю аксіальної текстури, перпендикулярної площині поверхні росту. Показано можливість застосування цих покріттів у медицині.

Results of research nanostructure Ti-TiN are presented. Vakuumno-arc multilayered coverings TiN-Ti with thickness of layers TiN of 300 nanometers and layers Ti about 50 nanometers are received. Hardness of coverings makes 20 ... 22 ГПа that a little below known values for monolayer coverings TiN. The size makes 24-25 nanometers for TiN and 15 nanometers for a phase  $\alpha$ -Ti. Formation of primary orientation TiN with an axis of an axial structure, a perpendicular plane of a surface of growth is observed. Possibility of application of these coverings in medicine is shown.

Представлены результаты исследования нанопокрытий Ti-TiN. Получены вакуумно-дуговые многослойные покрытия TiN-Ti с толщиной слоев TiN 300 нм и слоев Ti около 50 нм. Твердость покрытий составляет 20...22 ГПа, что несколько ниже известных значений для монослойных покрытий TiN. Размер кристаллитов составляет 24...25 нм для TiN и 15 нм для фазы  $\alpha$ -Ti. Наблюдается формирование преимущественной ориентации кристаллитов TiN с осью аксиальной текстуры, перпендикулярной плоскости поверхности роста. Показана возможность применения этих покрытий в медицине.

**1. Введение.** Одним из наиболее широко применяемых материалов защитных покрытий является нитрид титана из-за его высоких физико-механических, антикоррозионных, теплофизических и других характеристик. При этом титан относительно дешевый по сравнению с другими тугоплавкими металлами и биологически безопасен.

Из равновесной фазовой диаграммы системы Ti—N [1] (рис. 1) видно, что возможно существование трех устойчивых твердых фаз:  $\delta$ -TiN с кубической кристаллической структурой Bi-NaCl, которая остается устойчивой в широкой области гомогенности и может содержать от 37,5 до 52 ат. % азота; гексагональной фазы  $\alpha$ -Ti, которая может содержать от 2,4 до 26 ат. % N и фазы  $\beta$ -Ti, содержащей около 1 ат. % N при 1000 °C [2], а также фазы  $\varepsilon$ -Ti<sub>2</sub>N, которая кристаллизуется в виде тетрагональной структуры и существует в относительно узком диапазоне (примерно 31,5...33,7 ат. % N при 1000 °C).

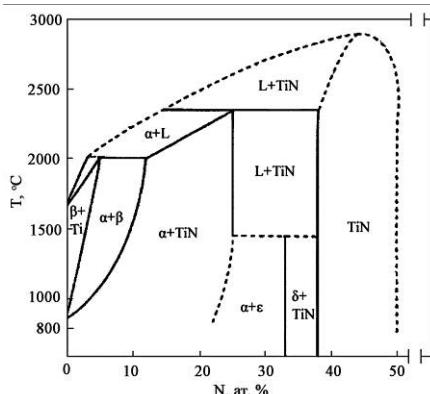


Рис. 1. Равновесная фазовая диаграмма системы Ti–N [1]

В качестве защитных покрытий используются, в основном, только их поликристаллические покрытия стехиометрического и нестехиометрического составов, которые могут применяться как износостойкие, анкоррозионные и биологически индифферентные и др.

Монослойные TiN покрытия, использующиеся для этих целей, обычно имеют твердость 24...28 ГПа и внутренние сжимающие напряжения около 2...4 ГПа [3]. Эти напряжения создают в подложке растягивающие напряжения, которые снижают ее усталостную прочность. Также известно, что для уменьшения разупрочняющего воздействия покрытия на подложку (т.е. для снижения сжимающих напряжений в покрытии) и увеличения усталостной прочности изделий с покрытиями применяются многослойные структуры TiN-Ti [4]. В частности, нанесение покрытий TiN-Ti на поршневые кольца двигателя внутреннего сгорания увеличило их срок службы в три раза по сравнению с кольцами без покрытий и в 1,7 раза - по сравнению с кольцами, покрытыми гальваническим хромом. При этом износ цилиндров уменьшился на 30 % [5]. Такие многослойные конструкции также увеличивают коррозионное сопротивление покрытия, так как препятствуют росту в нем сквозных столбчатых зерен, облегчающих создание сквозных пор.

Целью данной работы является исследование свойств многослойных покрытий TiN-Ti, которые используются для анкоррозионной защиты, а также увеличения биологической индифферентности и износостойкости изделий.

**2. Методика получения и исследования покрытий.** Образцы были получены при использовании вакуумно-дуговой установки «Булат-6» (рис. 2) [6].

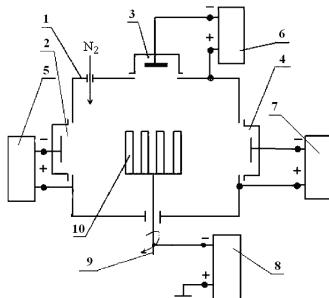


Рис. 2. Схема вакуумно-дуговой установки «Булат-6»:

1 – корпус вакуумной камеры; 2, 3, 4 – вакуумно-дуговые испарители; 5, 6, 7 – источники питания испарителей; 8 – источник питания подложки; 9 – поворотное устройство; 10 – обрабатываемые изделия

Полированнные подложки из нержавеющей стали X18H9T с размерами 18x19x2 мм и медной фольги толщиной 0,2 мм предварительно промывали щелочным раствором в ультразвуковой ванне, затем дистиллированной водой и помещали в вакуумной камере на поворотном устройстве. После откачивания вакуумной камеры до давления  $1 \cdot 10^{-3}$  Па на подложки подавали отрицательный потенциал 1000 В и при токе дуги 90 А производили очистку и активацию их поверхности бомбардировкой ионами титана в течение 3...4 мин. Затем в камеру напускали азот, на подложки подавали отрицательный потенциал смещения величиной - 200 В. Ток дугового разряда в испарителе – 110 А. При осаждении слоя TiN давление азота составляло 0,54 Па, во время осаждения титанового слоя подачу азота в камеру прекращали, и давление остаточных газов устанавливалось на уровне  $1 \cdot 10^{-3}$  Па. Толщина слоя TiN составляла 300 нм, толщина слоя Ti – 50 нм. Толщина слоя титана была выбрана из тех соображений, что в процессе его осаждения количество и размеры капельной фазы увеличиваются, что способствует увеличению пористости покрытия в целом и, таким образом, снижает его антикоррозионные свойства. Поэтому была выбрана толщина этого слоя 50 нм.

Фазовый состав и структурное состояние исследовались методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-3М в излучении Cu-K<sub>α</sub>. Съемка дифракционного спектра для фазового анализа проводилась в схеме 0-2θ сканирования с фокусировкой по Брэгу – Брентано в интервале углов от 25...90 град и в поточечном режиме с шагом сканирования  $\Delta(2\theta) = 0,05 \dots 0,2$  град и длительностью накопления импульсов в каждой точке 20...40 с. Для расшифровки дифрактограмм использовалась база дифракционных данных JCPDS. Размер кристаллитов определялся по уширению первых дифракционных линий (для наименьшего влияния микродеформации) из соотношения Селякова – Шеррера [7].

Морфология поверхности, а также микрофрактографии покрытий,

подвергнутых разрушению изгибом, исследовались на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-840.

Твердость измеряли микротвердомером ПМТ-3.

**3. Результаты и их обсуждение.** Морфология поверхности покрытий, осажденных при постоянном потенциале подложки - 200 В, осажденных при давлении 0,54 Па (верхний слой) показана на рис. 3. Поверхность покрытия ячеистая с размерами ячеек 0,2...4 мкм, на ней присутствуют макрочастицы (капли) с размерами примерно 0,1...10 мкм (рис. 3).

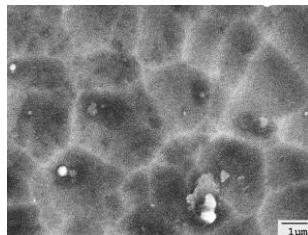


Рис. 3. Морфология поверхности покрытия TiN-Ti (наружный слой TiN)

Возможной причиной возникновения ячеек является неравномерное распыление поверхности растущего покрытия ионами из газометаллической плазмы, ускоренными отрицательным потенциалом подложки, в процессе осаждения [8]. Анализ фазового состава и структурного состояния по данным рентгенодифракционных исследований показал, что на дифракционных спектрах выявляются рефлексы, принадлежащие двум фазам  $\alpha$ -Ti и  $\delta$ -TiN (рис. 4).

Наблюдается формирование преимущественной ориентации кристаллитов с осью аксиальной текстуры [111], перпендикулярной плоскости поверхности роста.

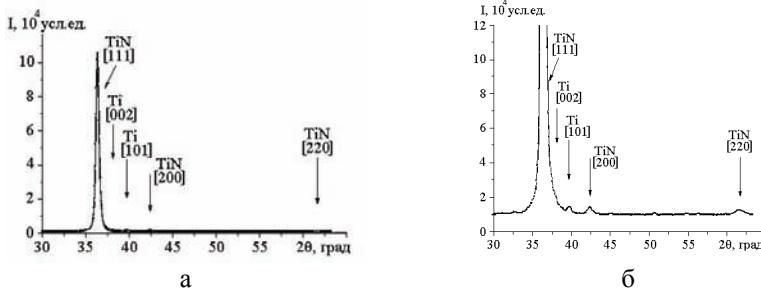


Рис. 4. Участки дифракционных спектров от покрытий TiN-Ti. Общий вид (а) и детализация дифракционных пиков малой интенсивности (б)

Наиболее интенсивные относятся к основной TiN фазе с кубической кристаллической структурой  $Bi-NaCl$ , а значительно менее интенсивные – к фазе  $\alpha$ -Ti с относительным объемным содержанием менее 6%.

Размер кристаллитов, определенный из соотношения Селякова – Шеррера, составляет 24...25 нм для TiN и 15 нм для фазы  $\alpha$ -Ti. Структура покрытий столбчатая (рис. 5), их твердость составляет 20...22 ГПа.

Проведенные исследования структуры и физико-механических характеристик покрытия TiN показывают, что по физико-механическим характеристикам и многолетней практике использования этого покрытия в медицине на имплантантах, зубных коронках и других деталях медицинского назначения позволяют утверждать, что это покрытие будет эффективным в медицинской технике.

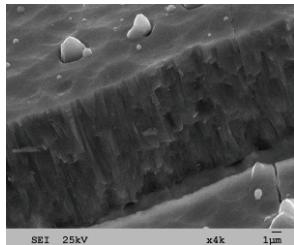


Рис. 5. Микрофрактограмма излома покрытия TiN-Ti (постоянный отрицательный потенциал подложки – 200 В)

**4. Выводы.** Получены вакуумно-дуговые многослойные покрытия TiN-Ti с толщиной слоев TiN 300 нм и слоев Ti около 50 нм. Твердость покрытий составляет 20...22 ГПа, что несколько ниже известных значений для монослойных покрытий TiN. Размер кристаллитов составляет 24...25 нм для TiN и 15 нм для фазы  $\alpha$ -Ti. Наблюдается формирование преимущественной ориентации кристаллитов TiN с осью аксиальной текстуры [111], перпендикулярной плоскости поверхности роста. Показана возможность применения этих покрытий в медицине.

**Список литературы:** 1. S. PalDey, S.C. Deevi. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: A review // Materials Science and Engineering. 2003, A 342, p. 58 – 79. 2. S. Sambasian and W.T. Petuskey. Phase chemistry in the Ti-Si-N system: Thermochemical review with phase stability diagrams // Journal of Materials Research. 1994, v. 9, N 9 p. 2362 – 2369. 3. H. Ljungcrantz, L. Hultman and J.-E. Sundgren. Ion induced stress generation in arc-evaporated TiN films // Journal of Applied Physics. 1995, v. 78 (2), p. 832 – 837. 4. M. Bromark, M. Larsson, Wear of Ti/TiN multilayer coatings // Surface and Coatings Technology. 1997, v. 90, p. 217 – 223. 5. V.V. Lyubimov, A.A. Voevodin, A.L. Development and testing of multilayer physically vapour deposited coatings for piston rings // Surface and Coatings Technology. 1992, v. 52, p. 145 – 151. 6. Андреев А.А., Саблев Л.Л. Вакуумно-дуговые покрытия. - Х.: ННЦ ХФТИ, 2010. - 317 с. 7. Палатник Л.С., Фукс М.Я. Механизм образования и субструктура конденсированных пленок. – М.: Наука, 1972. – 320 с.

Поступила в редакцию 7.07.11

**В.В. ТРЕТЬЯК**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**В.Д. СОТНИКОВ**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**С.А. МИРОШНИЧЕНКО**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А.С. ИВАКИН**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## РАЗРАБОТКА ГРУППОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИСТОВЫХ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СРЕДЕ СПРУТ ТП

В статті розглянуті можливості проектування технологічних процесів імпульсних технологій в середовищі сучасних САПР систем. Описані особливості використовування групових технологічних процесів у виробництві. Розглянута математична модель листової деталі і технологічного процесу для спеціальної технологічної групи належить до класу I «Дно-стіна», групі 2 «Чашки, коробки» згідно класифікатору листових деталей складних форм, штампованих на пресах ПЕГ по ОСТУ 1.41805-78. Проведений конструкторсько-технологічний аналіз технологічності для листових деталей представлених груп. Відображеня математична модель комплексної деталі для даних груп. Представлені алгоритм розробки групового ТП в середовищі СПРУТ ТП. Представлені графи для формування етапів обробки деталі і маршрутної технології. «

In article the possibilities are considered of planning of technological processes of impulsive technologies in the environment of the modern SAPR systems. Features are described of the use of group technological processes in production. A mathematical model is considered of sheet detail and technological process for the task technological force belonging to the class an I «Bottom-wall, to the group 2 «Cups, boxes» according to the classifier of sheet details of the difficult forms, stamped on the presses of PEG по OST 1.41805-78. The designer-technological analysis is conducted of technological for the sheet details of the presented groups. A mathematical model is reflected of complex detail for the given groups. An algorithm is presented of development of group TP in environment SPRUT TP. Columns are presented for forming of stages of treatment of detail and rout technology.

В статье рассмотрены возможности проектирования технологических процессов импульсных технологий в среде современных САПР систем. Описаны особенности использования групповых технологических процессов в производстве. Рассмотрена математическая модель листовой детали и технологического процесса для специальной технологической группы принадлежащей к классу I «Дно-стенка», группе 2 «Чашки, коробки» согласно классификатору листовых деталей сложных форм, штампемых на прессах ПЭГ по ОСТ 1.41805-78. Проведен конструкторско-технологический анализ технологичности для листовых деталей представленных групп. Отражена математическая модель комплексной детали для данных групп. Представлен алгоритм разработки группового ТП в среде СПРУТ ТП. Представлены графы для формирования этапов обработки детали и маршрутной технологии.

### **Введение.**

Конструкция современных авиационных двигателей такова, что детали листового типа занимают в ней важную позицию и являются наиболее многочисленной группой в общей номенклатуре изделия.

Данные детали используются в узлах компрессора, камеры сгорания и соплового аппарата. Технологические процессы изготовления таких деталей, применяемые в настоящее время в производстве, относятся к одним из наиболее сложных процессов. Листовые детали, как правило, изготавливаются

импульсными технологиями. Серийное производство нетрудоемких деталей не позволяет применять станки повышенной производительности, так как они мало универсальны, трудоемки в переналадке с операции на операцию и их трудно загружать рентабельно. Не оправдывается и применение высоко-производительных специальных приспособлений, поскольку стоимость обработанных с их помощью деталей, не покрывает затрат на приобретение специального оборудования.

Групповые технологические процессы [1] позволяют использовать методы и средства крупносерийного и массового производства в серийном производстве нетрудоемких деталей. Групповой технологический процесс [2] представляет собой единый технологический процесс, разработанный на некоторую группу специально подобранных разных деталей. В основе организации любого промышленного предприятия и каждого его подразделения лежит рациональное сочетание всех основных и вспомогательных средств. Несмотря на различие производственных условий и их особенностей, есть общие принципы [3,4], которым должна быть подчинена организация, а именно: специализация, пропорциональность, параллельность, непрерывность и ритмичность.

Каждый из этих принципов, соответственно, влияет на общий ход технологического процесса. Данные принципы - есть основа при проектировании групповых технологических процессов. Главным в идеи групповых технологических процессов является преодоление технологическими средствами трудностей в организации экономичного производства, обусловленных разнообразием деталей при малом заданном выпуске каждой из них.

**1. Конструкторско-технологический анализ номенклатуры и формирование специальной технологической группы деталей.** Детали специальной технологической группы, для которых предусмотрена разработка группового технологического процесса штамповки, принадлежат к классу I «Дно-стенка», группе 2 «Чашки, коробки» согласно классификатору листовых деталей сложных форм, штампемых на прессах ПЭГ по ОСТ 1.41805-78. Эскизы деталей приведены на рис. 1.

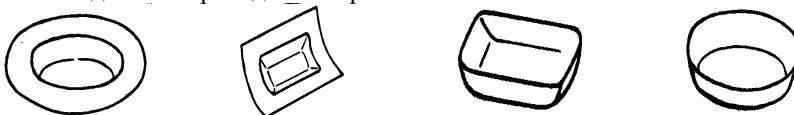


Рис.1 – Эскизы листовых деталей для различных групп

Детали данной группы изготавливаются из следующих материалов: Д16АМ, АК4-1, АМцМ, АмцП, Амгб, сплав 01420, сталь 20, 12Х18Н9Т, 30ХГСА, Х20Н6МД2Т (ВНС-4), ОТ4, ОТ4-1. Толщина штампемых листов 0,800...2 мм.

**2. Проектирование комплексной детали и матрицы соответствия деталей для условий мелкосерийного производства.** Комплексная деталь – это условная деталь, которая включает в себя всю номенклатуру поверхностей и форм базовых деталей с общими конструктивно-технологическими признаками. На основе эскизов деталей группы «Чашки, коробки» разработана комплексная деталь, эскиз которой приведен на рис.2. Комплексная деталь создана методом наложения на неё последующих деталей и добавления недостающих поверхностей и является типовым конструктивным элементом класса «Дно-стенка».

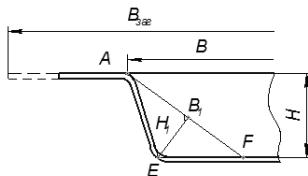


Рис. 2. – Эскиз комплексной детали

Таблица 1 – Матрица соответствия между деталями группы

Под группа деталей	Деталь	H/B	H <sub>1</sub> /B <sub>1</sub>	B <sub>шар</sub> /B	Материал
Б	Б1	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$\leq 2.2$	Д16АМ, АК4-1
	Б2	0.2...0.4	$\leq 0.3$	$\leq 2.2$	
	Б3	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$> 2.2$	
	Б4	$\leq 0.2$	0.3...0.45	$\leq 2.2$	
	Б5	0.2...0.4	0.3...0.45	$\leq 2.2$	
	Б6	$\leq 0.2$	0.3...0.45	$> 2.2$	
В	В1	$\leq 0.2$	$\leq 0.45$	$\leq 2.2$	АмцМ, АмцП
	В2	0.2...0.4	$\leq 0.45$	$\leq 2.2$	
	В3	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$> 2.2$	
	В4	$\leq 0.2$	0.3...0.45	$> 2.2$	
Г	Г1	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$\leq 2.2$	Амгб
	Г2	0.2...0.4	$\leq 0.3$	$\leq 2.2$	
	Г3	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$> 2.2$	
	Г4	$\leq 0.2$	0.3...0.45	$\leq 2.2$	
	Г5	0.2...0.4	0.3...0.45	$\leq 2.2$	
	Г6	$\leq 0.2$	0.3...0.45	$> 2.2$	
Д	Д1	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$\leq 2.2$	сплав 01420
	Д2	0.2...0.4	$\leq 0.3$	$\leq 2.2$	
	Д3	$\leq 0.2$	$\leq 0.3$	$> 2.2$	
	Д4	$\leq 0.2$	0.3...0.45	$\leq 2.2$	
	Д5	0.2...0.4	0.3...0.45	$\leq 2.2$	
	Д6	$\leq 0.2$	0.3...0.45	$> 2.2$	

Продолжение табл. 1

Под группа деталей	Деталь	H/B	H <sub>1</sub> /B <sub>1</sub>	B <sub>зар</sub> /B	Материал
E	E1	≤0.2	≤0.3	≤2.2	OT4, OT4-1
	E2	0.2...0.4	≤0.3	≤2.2	
	E3	≤0.2	≤0.3	>2.2	
	E4	≤0.2	0.3...0.45	≤2.2	
	E5	0.2...0.4	0.3...0.45	≤2.2	
Ж	Ж1	≤0.2	≤0.3	>2.2	12Х18Н9Т, сталь 20, 30ХГСА, Х20Н6МД2Т

Вся группа деталей «Чашки, коробки» разделена на 6 подгрупп (Б, В, Г, Д, Е, Ж) в зависимости от штампируемого материала. Каждая подгруппа содержит от 4 до 6 деталей-составляющих, обозначенных буквой, соответствующей подгруппе, и числом – порядковым номером внутри подгруппы. Таблица 1 представляет собой матрицу соответствия между деталями группы.

**3. Проектирование заготовок деталей.** В качестве заготовок для деталей, получаемых штамповкой-вытяжкой [3] применяется листовой прокат. Основным правилом для определения размеров заготовок является равенство объемов заготовки и отштампованной детали. При вытяжке без утонения стенок изменением толщины материала обычно пренебрегают и определение размеров заготовки производят по равенству площади заготовки и детали с припуском на обрезку. В группу «Чашки, коробки» входят круглые детали (являющиеся телами вращения) и детали коробчатого типа.

Для случая вытяжки круглых деталей простой формы заготовка имеет форму круга (рис.3), диаметр которого находится по формуле:

$$D = 1.13\sqrt{F},$$

где  $F$  - площадь поверхности готовой детали,  $\text{мм}^2$ .

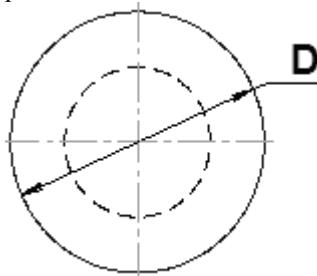


Рис. 3. – Эскиз заготовки круглой детали

В результате погрешностей процесса вытяжки в большинстве случаев применяется последующая обрезка неровного края или фланца детали, для при подсчетах размеров заготовки следует предусматривать соответствующий припуск под обрезку.

Для круглых деталей без фланца (рис.4) площадь поверхности определяется по формуле:

$$F = \sqrt{d^2 + 4dh}$$

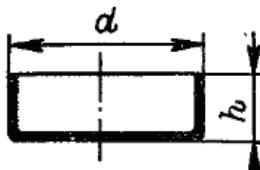


Рис. 4. – Эскиз круглой детали без фланца

Для круглых деталей с фланцем (рис. 5) площадь поверхности определяется по формуле:

$$F = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h}$$

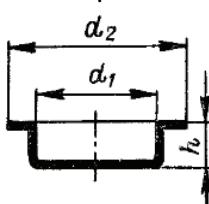


Рис. 5. – Эскиз круглой детали с фланцем

Для случая вытяжки коробчатых деталей с фланцами и без них заготовка чаще всего имеет вид овала, образованного двумя полуокружностями и параллельными сторонами (рис. 6). Эта форма наиболее предпочтительна, так как она наиболее проста для изготовления вырубного штампа.

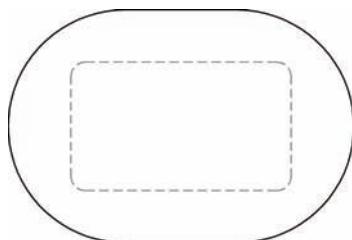


Рис. 6. – Эскиз заготовки детали коробчатого типа

Все указанные выше заготовки получают на вырубных штампах из листового проката.

#### **4. Разработка и обоснование плана группового операционного технологического процесса производства деталей**

Основой для проектирования плана группового технологического процесса послужил ОСТ 1.41805-78. Для проектирования использован программный пакет СПРУТ ТП [5].

Последовательность проектирования:

1. Создание библиотеки для общей группы деталей – листовые детали.
2. Создание объекта. В данном случае под объектом понимается конкретная группа деталей – чаши, коробки.
3. Создание экземпляров. На данном этапе описывается каждая деталь конкретной группы со своим определенным набором параметров (отношения Н/В, Н<sub>1</sub>/В<sub>1</sub>, В<sub>заг</sub>/В, материал) в виде отдельного экземпляра.
4. Описание ресурсов. К имеющемуся набору этапов, операций, переходов добавляются недостающие и используемые в проектируемом ТП.
5. Описание этапов обработки. Последовательность выполняемых этапов представляется в виде «дерева», в котором связями указывается четкая последовательность этапов обработки с указанием условий, которые в дальнейшем позволяют определить алгоритм выполнения этапов для конкретной детали группы. Общими для всех деталей являются этапы «Подготовительный» и «Контрольный». Разработано 6 этапов «Штамповка» в зависимости от материала детали (рис.7).

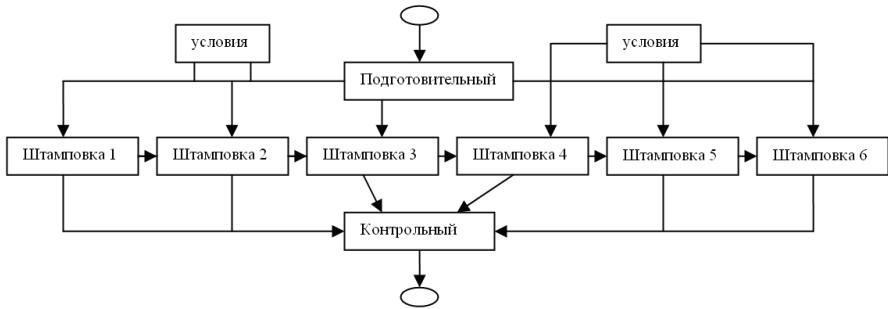


Рис.7. – Формирование этапов обработки

6. Описание операций обработки. Выполняется описание последовательности операций в каждом этапе отдельно. Представляется также в виде «дерева» с указанием условий для определения последовательности операций для конкретной детали группы (рис 7.).

7. Описание переходов обработки. На данном этапе проектирования осуществляется описание последовательности переходов в каждой операции отдельно. Каждая операция имеет вид «дерева» с необходимыми условиями для определения последовательности переходов в операциях для конкретной детали.

8. Проектирование ТП в автоматическом режиме. Для проектирования ТП необходимо создать новый экземпляр или выбрать из ранее созданных экземпляров. При этом в автоматическом режиме в зависимости от параметров экземпляра будет сформирован технологический процесс для штамповки-вытяжки данного экземпляра (рис. 8,9).

9. Получение технологической документации. Также в автоматическом режиме можно сформировать комплект технологической документации по ранее сформированному технологическому процессу.

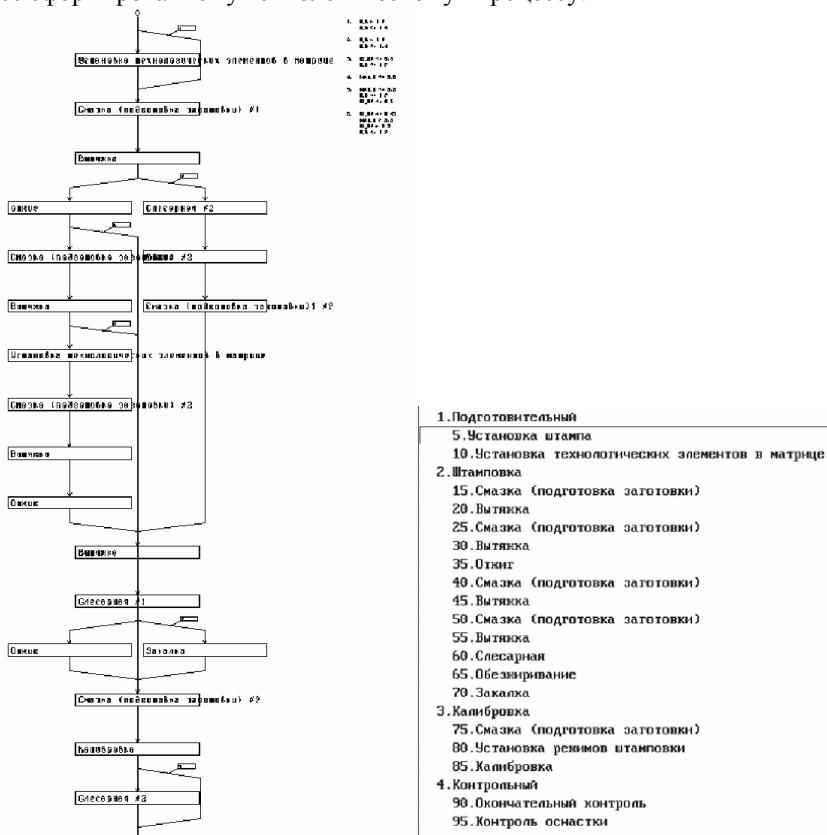


Рис. 8 – Формирование дерева маршрута обработки

Рис.9 – Формирование ТП экземпляра

Основными отличиями разработанных ТП являются количество операций штамповки-вытяжки, место и наличие термообработки, а также количество и последовательность переходов в одноименных операциях на разных этапах выполнения ТП.

В результате проведенной работы разработан групповой ТП изготовления листовых деталей штамповкой-вытяжкой для 31-й детали, которые отличаются геометрическими параметрами и материалом.

### **Заключение**

Применение в производстве листовых деталей принципов и основ группового автоматизированного проектирования особенно важны, так как это позволяет снизить затраты времени и рабочих фондов на данном этапе проектирования ТП [6].

В данной работе разработан групповой маршрутно-операционный ТП с использованием методов и средств автоматизированного проектирования ТП, для каждой из подгрупп разработан маршрут обработки и схема расщеповки согласно ОСТ 1.41805-78. Используя разработанную комплексную деталь и конструктивно-геометрические параметры можно создать чертеж для любой детали из данной группы, а по групповому маршруту вести обработку конкретной, необходимой нам детали из всей группы, имея лишь один комплект технологической документации.

**Список литературы:** 1. Фираго В. П. Основы проектирования технологического процесса. Методы обработки поверхности / В.П.Фираго. - М.: Машиностроение, 1975.- 468 с. 2. Митрофанов С.П. Организация группового производства / С.П. Митрофанов.- Л: Машиностроение, 1983, Т.1. – 407 с. 3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке /В.П.Романовский.- Л: Машиностроение, 1979.–520 с. 4. Сотников В.Д. Групові технологічні процеси в авіадвигунобудуванні: навчальний посібник / В.Д. Сотников. - Х.: ХАІ, 2008. - 80 с. 5. Третьяк В.В. Разработка групповых технологических процессов при изготовлении листовых деталей импульсной обработкой с использованием компьютерных информационных технологий / В.В. Третьяк, О.В. Мананков, Д.А. Овчар, А.В. Онопченко // Авиационно-космическая техника и технология: №3 (60). Научно-технический журнал, Харьков, «ХАІ». - 2009. - С. 17-20. 6. Евгеньев Г.Б. Систематология инженерных знаний: учеб. пособие для вузов / Г.Б.Евгеньев. – М : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 346 с.

*Надійшло до редколегії 15.04.2011 р.*

**Г.А. КРУТИКОВ**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ», Харків;  
**М.Г. СТРИЖАК**, асп., НТУ «ХПІ», Харків.

## ЛІНЕАРИЗАЦІЯ ЗВЕНА "ДРОСЕЛЬ – ГЛУХА КАМЕРА" ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ПРОПОРЦІЙНИМ ЕЛЕКТРОКЕРУВАННЯМ МЕТОДОМ ДОТИЧНИХ

Була здійснена заміна нелінійної ланки "квадратичний дросель – глуха камера" лінійним аналогом, при виконанні заміни реальної витратної характеристики цієї ланки не дотичною, а січною. Тоді залежність вагової витрати від перепаду тиску через дроселі підмембрanoї і надмембрanoї камер електропневматичного перетворювача стає лінійною.

Ключові слова: лінеаризація, дросель–глуха камера, витратна характеристика, хорда

Replacement of a nonlinear link "quadratic throttle – a deaf chamber" has been carried out by linear analog, at performance of replacement of a real throttling characteristic of this link not a tangent, and a secant. Then the dependence of the weight loss from a pressure drop through the throttles of a under-membrane and a over-membrane cameras electropneumatic converter is linear.

The key words: linearization, throttle – a deaf chamber, throttling characteristic, chord

Была осуществлена замена нелинейного звена "квадратичный дроссель - глухая камера" линейным аналогом, при выполнении замены реальной расходной характеристики этого звена не касательной, а секущей. Тогда зависимость весового расхода от перепада давления через дроссели подмембрanoй и надмембрanoй камер электропневматического преобразователя становится линейной.

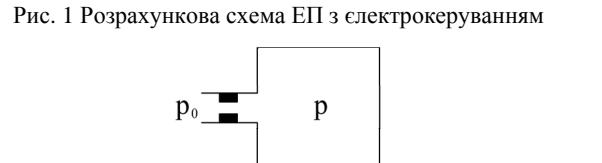
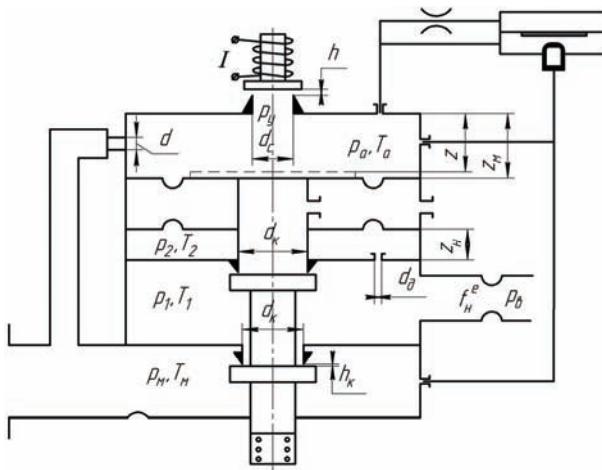
Ключевые слова: линеаризация, дроссель–глуха камера, расходная характеристика, хорда

На рис. 1 наведена розрахункова схема електропневматичного перетворювача (ЕП). Складність її дослідження полягає у тому, що на дроселі з діаметром  $d_o$  може виникнути знакозмінна витрата, отже ланка "дросель – глуха камера" ЕП (рис. 2 а) має суттєво нелінійний характер, що унеможливлює лінеаризацію її шляхом заміни нелінійної характеристики першими членами розкладання в ряд Тейлора в околі рівноважної точки ( $\Delta p = 0$ ).

Використання для розрахунків величини провідності ( $\alpha$ ), розрахованої за відомою формулою для ламінарного дроселя, дає велику похибку у випадку турбулентного режиму течії повітря у дроселях [1].

Проведені досліди свідчать про те, що відхилення витратної характеристики від лінійної має місце навіть при мінімальному діаметрі дроселя, що дорівнює 0,5 мм.

Метод гармонічної лінеаризації [2, 3] придатний лише для визначення частоти та амплітуди можливих автоколивань. Однак для практичного лінійного аналізу цього буває недостатньо і доводиться застосовувати метод заміни реальних витратних характеристик дроселя не дотичними, а січними (рис. 3, а). Однак кут нахилу такої січної доводиться підбирати, що вносить деяку помилку, особливо, якщо значення, обране для цього кута, буде неточним.



Будемо оцінювати точність апроксимації за допомогою кривих зміни тиску в камері при її заповненні через реальний дросель і його лінійний аналог. В якості критерія точності апроксимації береться лінійна інтегральна оцінка цих функцій, яка є функціоналом, що потребує мінімізації.

Лінійна модель ланки  $RC$  будеться на двох припущеннях:

- 1) між перепадом тиску і ваговою витратою існує лінійний зв'язок;
- 2) процес заповнення камери вважаємо ізотермічним:

$$\alpha(p_0 - p) = \frac{W}{R \cdot T} \cdot \frac{dp}{dt}, \quad (1)$$

де  $\alpha$  - провідність дроселя;  $W$  - об'єм камери;  $p_0, p$  - тиск перед дроселем і в камері;  $T$  - температура оточуючого середовища;  $R$  - газова постійна.

Рішення рівняння:

$$p = p_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right); \quad \tau = \frac{W}{R \cdot T \cdot \alpha}; \quad (2)$$

Нелінійна модель будеться на основі рівняння теплового балансу глухої камери [4]:

$$k \cdot R \cdot T dA = W dP; \quad (3)$$

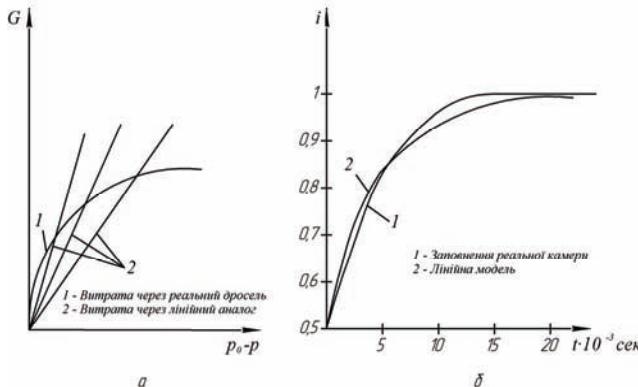


Рис. 3 Заміна реальних витратних характеристик дроселя січними (а) та лінерізація за допомогою кривих зміни тиску в камері при її заповненні (б)  
де  $A$  - вагова кількість газу в камері;  $k$  - показник адіабати.

$$\mu \cdot f \cdot p_0 \cdot \sqrt{k \cdot g \cdot R \cdot T} \cdot i^{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{k}{k-1} \left( 1 - i^{\frac{k-1}{k}} \right)} = W \frac{dp}{dt}, \quad (4)$$

де  $\mu \cdot f$  - ефективна площа дроселя.

Для докритичного режима час заповнення камери з об'ємом  $W$  через дросель з перерізом  $\mu \cdot f$  від  $i_h = \left( \frac{p}{p_0} \right)_h$  до деякого значення  $i$  дорівнює:

$$t = \frac{2 \cdot W}{(k-1) \cdot \mu \cdot f \cdot R \cdot B \cdot \sqrt{T}} \left( D - \sqrt{1 - i^{\frac{k-1}{k}}} \right), \quad (5)$$

$$\text{де } B = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot k}{R \cdot (k-1)}}; \quad D = \sqrt{1 - i_h^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Це рівняння можна вирішити відносно  $i$ :

$$i = \left[ 1 - \left( D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{1}{k-1}}, \quad (6)$$

де

$$\tau = \frac{2 \cdot W}{(k-1) \cdot \mu \cdot f \cdot R \cdot B \cdot \sqrt{T}};$$

або

$$p_0 - p = p_0 \cdot \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{1}{k-1}} \right\}. \quad (7)$$

Перетворимо рівняння (7), змінивши початок відрахунку з тим, щоб заповнення почалось з  $i_h = \left( \frac{p}{p_0} \right)_h$ :

$$p_0 - p = (1 - i_h) \cdot p_0 \cdot e^{-\frac{R \cdot T}{W} \alpha \cdot t}. \quad (8)$$

В якості лінійної інтегральної оцінки візьмемо вираз:

$$I = p_0 \int_0^{t_k} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} dt - (1 - i_h) \cdot p_0 \int_0^{\infty} e^{-\frac{R \cdot T}{W} \alpha \cdot t} dt, \quad (9)$$

де  $t_k$  - час заповнення камери через реальний дросель.

$$t_k = \frac{2 \cdot W \cdot D}{(k-1) \cdot \mu \cdot f \cdot R \cdot B \cdot \sqrt{T}}; \int_0^{\infty} e^{-\frac{R \cdot T}{W} \alpha \cdot t} dt = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{\frac{R \cdot T}{W} \alpha + s} = \frac{W}{R \cdot T \cdot \alpha}, \quad (10)$$

де  $s$  - оператор Лапласа.

Прийнявши  $I = 0$ , отримаємо значення  $\alpha$ , яке мінімізує інтегральну оцінку:

$$\alpha = \frac{(1 - i_h) \cdot W}{R \cdot T \cdot \int_0^{t_k} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( D - \frac{t}{\tau} \right)^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} dt}. \quad (11)$$

Зробивши деякі перетворення виразу (11) і перейшовши до нової змінної, отримаємо:

$$\alpha = \frac{(1 - i) \cdot \frac{k-1}{2\sqrt{T}} \cdot B \cdot \mu \cdot f}{\int_0^{\varphi_h} \left\{ 1 - \left[ 1 - \varphi^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} d\varphi}, \quad (12)$$

$$\text{де } \varphi = \sqrt{1 - i^{-\frac{1}{k}}}; \varphi_h = \sqrt{1 - i_h^{-\frac{1}{k}}}.$$

Отриманий вираз не залежить від величини ємності і лінійно пов'язаний зі значенням  $\mu \cdot f$ . На величину оптимального значення впливає значення  $i_h$ .

$$\alpha = \beta(i_h) \cdot \mu \cdot f; \quad \beta = \frac{\frac{k-1}{2\sqrt{T}} \cdot B \cdot (1 - i_h)}{\int_0^{\varphi_h} \left\{ 1 - \left[ 1 - \varphi^2 \right]^{\frac{k}{k-1}} \right\} d\varphi}; \quad (13)$$

Значення  $\beta(i_n)$  розрахувалося в пакеті прикладних програм "Matkad". Величина  $i_n$  варіювалася в межах від 0,53 до 0,99 з кроком 0,01. Отриманий результат наведений на рис. 4.

За отриманим з графіка значенням  $\beta$  був розрахований перехідний процес заповнення камери об'ємом  $W = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$  через дросель діаметром  $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Той же процес був розрахований за нелінійними рівняннями. Обидві ці криві сполучені на рис. 3.б.

При наближенні  $i_n$  до одиниці  $\alpha$  наближається до нескінченності й у цьому випадку, як вказано в роботі [3], дросель глухої камери не створює опору. Цей крайній, вироджений випадок, який повністю відповідає формальному підходу при використанні принципа малого параметра ( $\Delta p = p_0 - p \rightarrow 0$ ), можливий лише у дуже вузькій області зникаюче малих збурень. Графік (рис. 4) допомагає розширити область застосування лінеаризованої моделі на скінченні збурення.

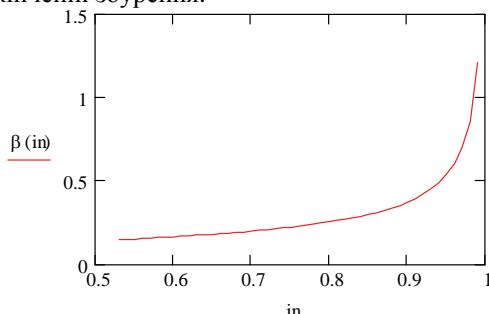


Рис. 4 Графік залежності  $\beta$  від відношення тисків  $i_n = (p / p_0)_n$

Отримане рішення не може, звичайно, дати вичерпну відповідь на питання: як вибрати провідність дроселя лінійного аналога звена "квадратичний дросель – ємність" ЕП, який забезпечить найкраще співпадіння процесів у всьому діапазоні перепадів тисків на дроселі. Такого рішення, очевидно, й не може бути, оскільки перепад тисків на дроселі змінюється у широкому діапазоні при роботі ЕП у перехідному режимі. При лінійному аналізі, коли використовується принцип малого параметра, можна вважати, що навіть для найменших діаметрів дроселя  $i_n$  буде не менше 0,9.

**Список літератури:** 1. Залманзон Л. А. Проточные элементы пневматических приборов контроля и управления. М.: АН ССРР, 1961. 2. Попов Е. П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах. М.: Наука, 1973. 3. Залманзон Л. А. Об учёте влияния нелинейности характеристик глухих камер пневморегуляторов на процесс регулирования/ Автоматика и телемеханика, №5 1955. 4. Герц Е. В., Крейнин Г. В. Динамика пневматических приводов машин-автоматов. М.: Машиностроение, 1964.

Поступила в редколлегию 27.05.2011

**Л.Є. ЗАХЛЕБІНА**, інж., ХНУРЕ, Харків;

**I.A. КАРАВАН**, інж., ХНУРЕ, Харків;

**I.II. НЕВЛЮДОВ**, д-р техн. наук, проф., ХНУРЕ, Харків;

**O.M. ЦИМБАЛ**, канд. техн. наук, ХНУРЕ, Харків.

## **ЗАВДАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА ІХ ОПИС У РОБОТОТЕХНІЦІ**

Розглянуто основні принципи побудови систем прийняття рішень, особливості інтелектуальних завдань, загальна постановка задачі прийняття рішень. Значну увагу приділено багатостадійним системам прийняття рішень як найбільш типовим для робототехніки. Сформульовано поняття адаптивних систем прийняття рішень, розглянуто формальне подання процесу прийняття рішень. Система прийняття рішень, робототехніка, штучний інтелект.

Article deals with basic principles of decision-making system development. The specifics of intellectual tasks, the general task setting are considered. The actual attention is given to multi-stage systems of decision-making, as the most typical for robotics. The definition of adaptive decision-making systems is provided, the formal presentation of adaptive decision-making process is considered.

Decision-making system, robotics, artificial intelligence

Рассмотрены основные принципы построения систем принятия решений, особенности интеллектуальных задач, общая постановка задачи принятия решений. Значительное внимание уделено многостадийным системам принятия решений как наиболее типичным для робототехники. Сформулированы понятия адаптивных систем принятия решений, рассмотрено формальное представление процесса адаптивного принятия решений.

Система принятия решений, робототехника, искусственный интеллект.

Однією з основних проблем робототехніки є планування дій для вирішення завдань, поставлених перед роботом.

Інтелектуальні завдання передбачають необхідність свідомого пошуку відповідного засобу досягнення безпосередньо недосяжної мети [1].

Серед типів задач розрізняють:

- 1) задачі на знаходження;
- 2) задачі на доведення;

Задачі на знаходження полягають у пошуку невідомого раніше об'єкта, який мав би задовольняти умови, що пов'язують його з вихідними даними. При цьому під об'єктами розуміють різні категорії, наприклад геометричні задачі, завдання маніпулювання у робототехніці тощо.

Вирішення задач на доведення означає знайти підтвердження істинності (хибності) того, доказ чого випливає з початкових посилань (початкових даних).

Інтелектуальність задачі є поняттям відносним. М. Мінський з цього приводу писав: «Інтелектуальність можна визначити лише відносно ступеня нерозуміння задачі спостерігачем. Якщо теорема є зрозумілою до кінця, важко зберегти відчуття її «глибокості».

Інтелектуальність є властивою суб'єкта у тому випадку, якщо він здатен вирішувати задачі з априорі невідомими схемами рішення.

Розрізняють [1, 2] такі класи задач:

1. Задачі, для яких існує формальна схема розв'язання, подані певною формальною мовою. Розв'язання здійснюється за наявною схемою (детермінованою або ймовірною). До цього класу належать математичні задачі (диференційні рівняння, екстремальні задачі). З точки зору М. Мінського визначення не є чисто інтелектуальними (звісно – до певного рівня) і можуть розглядатися як людиною, так і ЕОМ.

2. Задачі, для яких не існує раніше готової схеми розв'язання, мають залучати знання про предметну область. Людина сама формує схему розв'язання – саме в цьому полягає творча діяльність людини. До цього класу належать евристичні програми, основою для яких є аналіз конкретної діяльності людини.

Задачі, для яких схема розв'язання є априорі невідомою, незважаючи на залучення знань про предметну галузь. Алгоритми пошуку реалізуються складними ієрархічними програмами, що імітують розумову діяльність людини. Саме до цього класу належать завдання планування поведінки, проектування та конструкування і саме цей клас відповідає «чисто інтелектуальним» завданням.

Метою запропонованої статті є розгляд особливостей прийняття рішень у інтелектуальних системах прийняття рішень.

**1. Загальна постановка завдання прийняття рішень.** Як указано у [2], завдання прийняття рішень (ЗПР) виникає, якщо є декілька варіантів дій (іншими словами – альтернатив) для досягнення заданого або бажаного результату. При цьому необхідно обрати найкращу у певному розумінні альтернативу.

Загальна постановка завдання формулюється [2, 3] у такий спосіб. Нехай  $X$  – множина альтернатив,  $Y$  – множина можливих наслідків (результатів). Припускається існування причинного зв'язку між вибором певної альтернативи  $x_i \in X$  і настанням відповідного результату  $y_i \in Y$ . Крім того, припускається наявність механізму оцінювання якості такого вибору – зазвичай оцінюється якість результату. У деяких випадках доцільно припустити, що існує можливість безпосередньо оцінювати якість альтернативи  $x_i$ .

Схематично ЗПР характеризується рис. 1.

Аналіз сформульованого завдання полягає у таких головних зауваженнях:

1. Визначення характеру зв'язку альтернатив з результатами (може бути детермінованим). У такому випадку існує однозначне відображення:

$X \xrightarrow{\phi} Y$  тобто реалізується функція  $y = \phi(x)$ ,  $x \in X$ ,  $y \in Y$  (рис. 2).

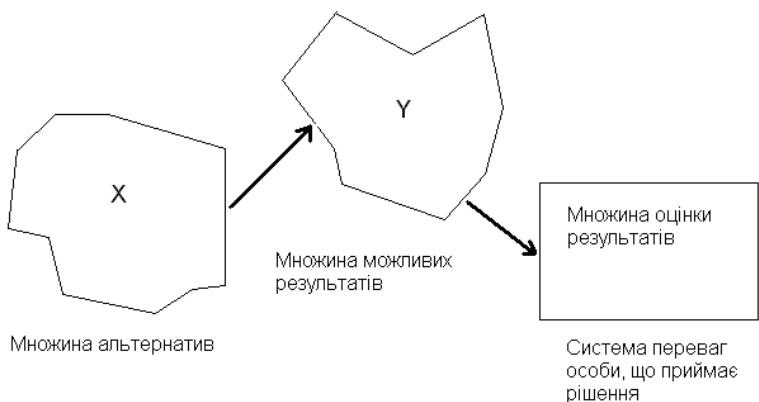


Рис. 1. Завдання прийняття рішень

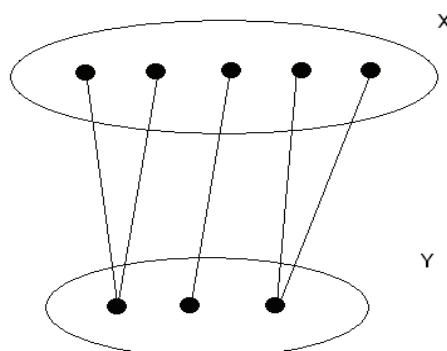


Рис. 2. Детермінований зв'язок

Зв'язок може мати ймовірнісний характер, при цьому вибір  $x$  визначає певну щільність розподілу ймовірностей на множині  $Y$ . У такому випадку вибір  $x_i$  вже не гарантує настання певного результату  $y_i$ . При цьому завдання прийняття рішення має називати ЗПР в умовах ризику (рис. 3).

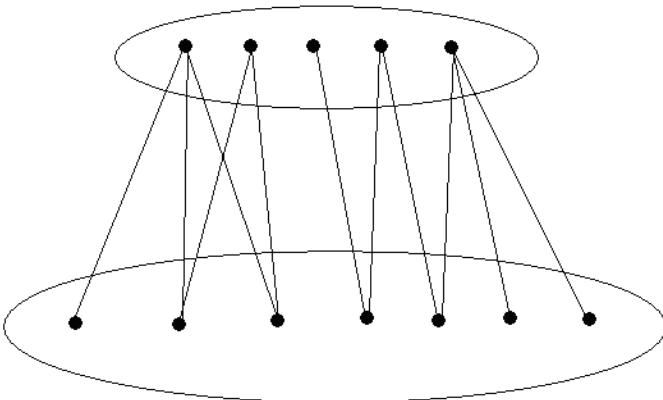


Рис. 3. Імовірнісний зв'язок

Графи, зображені на рис. 2 і 3, мають назву графів зв'язку альтернатив з результатами. Імовірнісний граф є «зваженим», у ньому кожен зв'язок характеризується вагою, тобто числом  $P_{ij}$  – імовірністю настання результату  $y_i$  для випадку вибору альтернативи  $x_i$ . Вочевидь

$$\forall i: \sum_j P_{ij} = 1.$$

Той же самий рисунок може ілюструвати третій вид альтернатив з результатами, що реалізується у завданнях ПР в умовах повної невизначеності. При цьому інформація імовірного характеру є відсутньою.

2. Наступний важливий момент загального завдання ПР полягає у дослідженні системи переваг особи, що приймає рішення (ОПР).

У такому розгляді проста ситуація виникає, коли кожен результат у можна оцінити конкретним дійсним значенням відповідно до певного заданого відображення

$$f : Y \rightarrow R.$$

У такому випадку порівняння результатів зводиться до порівняння відповідних їм значень, наприклад, результат  $y_i$  може вважатися кращим за  $y_j$ , якщо  $f(y_i) > f(y_j)$ . Результати є еквівалентними, якщо  $f(y_i) = f(y_j)$ . Для порівняння результатів використовуються вирази

$$y_i \prec y_j, y_i \sim y_j.$$

Така функція  $f$  називається цільовою або критеріальною функцією, функцією критерію оптимальності або просто критерієм оптимальності. Доволі часто такі функції також називають цільовими функціоналами [3].

Якщо припустити наявність детерміністського зв'язку між множиною альтернатив і множиною результатів:  $y = \varphi(x)$ , тоді функція  $f$ , задана на множині  $Y$ , трансформується у функцію  $J$ , задану на  $X$ , такою, що є суперпозицією  $\varphi$  і  $f$ :

$$J : X \rightarrow R, J = f \cdot \varphi.$$

У такому випадку задача вибору оптимального результату зводиться до задачі вибору оптимальної альтернативи на множині  $X$  і вирішується безпосередньо методами теорії оптимізації.

Більш реалістичною доволі часто є ситуація, коли на відміну від попереднього випадку «якість» або «корисність» результату у оцінюється не одним числом  $f(y)$ , а декількома. Інакше, припускається, що існує декілька показників якості рішення (критеріїв), що описуються функціями

$$f_k : Y \rightarrow R, k = 1, 2, \dots, m,$$

причому кожну з окремих цільових функцій  $f_i$  необхідно максимізувати. У випадку багатокритеріальних оцінювань результатів виникають значно більш складні математичні моделі ситуації вибору, ніж у однокритеріальному випадку. Критерії зазвичай є суперечними і, як правило, досягають максимуму у різних точках:  $y \in Y$ . При цьому виникають не тільки алгоритмічні, але й концептуальні труднощі: що розуміти під оптимальним рішенням у такому випадку?

Якщо обмежуватися вказаними трьома способами зв'язку альтернатив з результатами й двома способами опису переваг ОПР, виражених критеріальною мовою, можна [3] отримати таблицю основних задач вибору, показану на рис. 4, де  $z=f(y)$ ,  $f_k : Y \rightarrow R$ ;  $Z=f(y)$ ,  $f=f(f_1, \dots, f_m)$ ,  $f_k : Y \rightarrow R, k = 1, 2, \dots, m$ , знак «~» означає невизначеність у задачі ПР.

Один критерій	Багато критеріїв	
$z$	$Z$	Визначеність
$\tilde{z}$	$\tilde{Z}$	Невизначеність

Рис. 4. Основні задачі вибору

**2. Багатостадійні завдання прийняття рішень.** Завдання прийняття рішень у робототехнічних системах мають характерну особливість, що

практично виявляється у багатостадійності, багатокроковості, а також у наявності багатьох цілей.

Для спрощення розгляду у більшості випадків розглядаються одноцільові завдання. Моделі багатостадійних завдань передбачають наявність певного графа – дерева рішень, що за змістом описує шлях з заданої множини початкових вершин у задану множину кінцевих вершин. З кожною вершиною графа асоціюється певний стан  $S_i$ , у якому знаходиться об'єкт прийняття рішень, а дуги, що виходять з вершини, відповідають можливим переходам з одного стану в інший залежно від прийнятих рішень. Додамо, що кожна з дуг матиме свою вагу, виражену у числовій формі, що позначатиме «вартість» переходу з одного стану в інший (рис. 5, а).

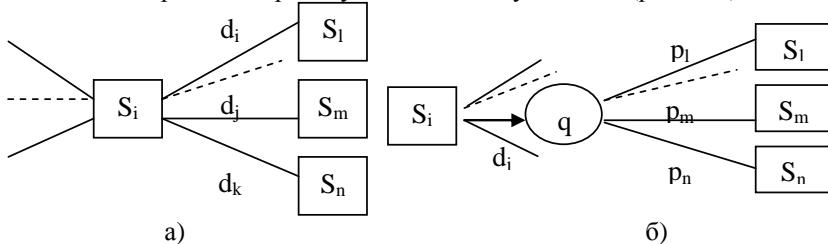


Рис. 5. Подання зв'язків вершин:  
а – вершини-розв'язки, б – імовірнісні зв'язки вершин

Таким чином, основне завдання полягатиме в оптимальному виборі початкової вершини (із множини можливих) і шляху від неї у будь-яку з припустимих кінцевих вершин.

Вважається, що система (об'єкт прийняття рішень) знаходиться у певному фазовому стані  $S_i$ , кількість станів має бути скінченною. З вершини  $S_i$  виходить декілька вершин графа, що відповідають різним рішенням, які можуть бути прийняті у даному стані. Вибір певної альтернативи  $d_i$  призводить до переходу системи в нову вершину-«розв'язок». Більш складна ситуація виникає, коли вибір рішення не визначає новий стан системи, але задає певну ймовірнісну множину станів (рис. 5, б).

Фактично, за умови скінченної розмірності простору вибір вершини  $d_i$  означає вибір певної допоміжної вершини  $q_{ij}$  і подальшу потенціальну можливість переходу в один зі станів  $S_l, \dots, S_m, S_n$  відповідно до заданих ймовірностей  $p_1, \dots, p_m, p_n$ , де  $\sum_{i=1, \dots, m, n} p_i = 1$  - так званий випадок імовірнісної невизначеності.

У [3] розглядається методологія розв'язання сформульованих багатоетапних завдань прийняття рішень.

Метод динамічного програмування (або метод Беллмана) ґрунтуються на двох основних моментах:

- 1) завдання пошуку оптимального шляху розв'язується з кінця;

2) будь-яке початкове завдання має поглинатися множиною аналогічних завдань з різними початковими вершинами.

Ще одним підходом до розгляду багатостадійних завдань прийняття рішень є марківські моделі [5].

Якщо розглядати систему  $S$  зі скінченою кількістю станів  $s_j$  ( $j=1, \dots, m$ ), слід враховувати її властивість до переходу у нові стани відповідно до певної матриці перехідних імовірностей:

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mm} \end{bmatrix},$$

де  $p_{ij}$  – імовірність переходу системи від стану  $s_i$  у стан  $s_j$ . Сума елементів матриці має становити 1.

Процес поведінки системи називають марківським, якщо ймовірність переходу системи у будь-який можливий стан у кожний момент часу визначається лише її станом у попередній момент і не залежить від більш ранньої передісторії.

**3. Адаптивне прийняття рішень і його особливості.** Термін «адаптація» досить широко використовується у системах керування і відповідає ситуації, коли зовнішній об'єкт (або внутрішні чинники) впливає на стан системи керування. В умовах зовнішнього впливу система керування має забезпечити підтримку процесу керування в заданих межах.

За аналогією адаптивне прийняття рішень також має підтримувати процес прийняття рішень у належному стані під впливом зовнішніх (внутрішніх) факторів. Є, однак, і відмінності. На відміну від систем керування, у яких процес керування є здебільшого безперервним, процес адаптивного прийняття рішень є дискретним і в основному відповідає багатоступневим (багатостадійним) завданням.

Отож можна вказати на таку постановку завдання.

Нехай існує множина  $X_0$ , що характеризує робототехнічну систему у момент  $t_0$ , тобто  $X_0 = \{x_0^0, x_0^1, \dots, x_0^n\}$  (вектор-стовпчик стану системи).

Процес прийняття рішень означатиме застосування до множини  $X_0$  сукупності операцій рішень  $D = \{D_0, D_1, \dots, D_n\}$  на кожному кроці.

У загальному випадку має місце декартовий добуток множин  $X * D = Y$ , де  $Y$  – множина, що характеризує стан робототехнічної системи у момент досягнення мети рішення.

З іншого боку, процес переходу робототехнічної системи із початкового її стану у цільовий є послідовністю перетворень векторів-стовпчиків станів системи:

$$\begin{bmatrix} x_0^0 \\ x_0^1 \\ \dots \\ x_0^{n0} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1^0 \\ x_1^1 \\ \dots \\ x_1^{n1} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_2^0 \\ x_2^1 \\ \dots \\ x_2^{n2} \end{bmatrix} \Rightarrow \dots \Rightarrow \begin{bmatrix} x_n^0 \\ x_n^1 \\ \dots \\ x_n^{nn} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} y^0 \\ y^1 \\ \dots \\ y^n \end{bmatrix}.$$

Проте вказана послідовність змін може характеризувати не тільки процес прийняття рішень, а й динаміку змін станів системи у часі.

Під час прийняття рішень стан системи змінюється в активному режимі, тобто на кожному кроці прийняття рішення мають змінюватися характеристики системи. Якщо розглядати послідовність дій (у загальному вигляді) стосовно прийняття рішень, необхідно визначати вказану функцію (вектор) прийняття рішень:

$$\begin{bmatrix} x_0^0 \\ x_0^1 \\ \dots \\ x_0^{n0} \end{bmatrix} * D_0 \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1^0 \\ x_1^1 \\ \dots \\ x_1^{n1} \end{bmatrix} * D_1 \Rightarrow \begin{bmatrix} x_2^0 \\ x_2^1 \\ \dots \\ x_2^{n2} \end{bmatrix} * D_2 \Rightarrow \dots \begin{bmatrix} x_{n-1}^0 \\ x_{n-1}^1 \\ \dots \\ x_{n-1}^{n-1} \end{bmatrix} * D_{n-1} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_n^0 \\ x_n^1 \\ \dots \\ x_n^{nn} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} y^0 \\ y^1 \\ \dots \\ y^n \end{bmatrix}.$$

У випадку адаптивного прийняття рішень необхідно враховувати наявність третьої сторони, наприклад, у вигляді об'єктів зовнішнього світу або сторони-конкурента, яка має вплив (негативний або позитивний) на процес прийняття рішень. З одного боку, вплив зовнішнього середовища має відчуватися системою безпосередньо, і тоді для урахування його існування і впливу на процес прийняття рішень необхідно вносити додатковий множник  $S$ , що характеризуватиме стан зовнішнього середовища (яке складається з певної множини об'єктів  $S_i = \{S_i^0, S_i^1, \dots, S_i^m\}$ , де індекс  $i$  означає наявність дискретного стану зовнішнього середовища):

$$\begin{bmatrix} x_0^0 \\ x_0^1 \\ \dots \\ x_0^{n0} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_0^0 \\ S_0^1 \\ \dots \\ S_0^{m0} \end{bmatrix} * D_0 \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1^0 \\ x_1^1 \\ \dots \\ x_1^{n1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_1^0 \\ S_1^1 \\ \dots \\ S_1^{m1} \end{bmatrix} * D_1 \Rightarrow \dots \begin{bmatrix} x_{n-1}^0 \\ x_{n-1}^1 \\ \dots \\ x_{n-1}^{n-1} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} S_{n-1}^0 \\ S_{n-1}^1 \\ \dots \\ S_{n-1}^{m-1} \end{bmatrix} * D_{n-1} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_n^0 \\ x_n^1 \\ \dots \\ x_n^{nn} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} y^0 \\ y^1 \\ \dots \\ y^n \end{bmatrix}.$$

Іншим підходом є введення функціональної залежності окремих актів прийняття рішень від станів середовища:

$$\begin{bmatrix} x_0^0 \\ x_0^1 \\ \dots \\ x_0^{n0} \end{bmatrix} * D_0 \left( \begin{bmatrix} S_0^0 \\ S_0^1 \\ \dots \\ S_0^{m0} \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1^0 \\ x_1^1 \\ \dots \\ x_1^{n1} \end{bmatrix} * D_1 \left( \begin{bmatrix} S_1^0 \\ S_1^1 \\ \dots \\ S_1^{m1} \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \dots \begin{bmatrix} x_{n-1}^0 \\ x_{n-1}^1 \\ \dots \\ x_{n-1}^{n-1} \end{bmatrix} * D_{n-1} \left( \begin{bmatrix} S_{n-1}^0 \\ S_{n-1}^1 \\ \dots \\ S_{n-1}^{m-1} \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \begin{bmatrix} x_n^0 \\ x_n^1 \\ \dots \\ x_n^{nn} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} y^0 \\ y^1 \\ \dots \\ y^n \end{bmatrix}.$$

Зовні два підходи відрізняються не досить виразно, але тлумачення обох може здаватися різним. У першому випадку система взаємодіє з середовищем безпосередньо, тобто взаємодія призводить до змін у станах робототехнічної

системи. Таким чином, акт прийняття рішення стосується стану системи, що зазнав впливу середовища.

В другому випадку акт прийняття рішення залежить від стану навколошнього середовища, тобто має враховувати його вплив. Можна сказати, що вирішувач, перетворює стан робототехнічної системи, будучи «середовищезалежним».

В принципі, напевно, той чи інший варіант розгляду відрізнятиметься за послідовністю виконання. Якщо взаємодія робототехнічної системи і зовнішнього середовища відбувається перед актом прийняття рішень, слід вести мову про першу формулу (1), якщо ж взаємодія відбувається під час самого акту, слід брати до уваги залежність функції прийняття рішень від впливу зовнішніх факторів і, відповідно, розглядати (2). Хоча, без сумніву, за своїм результатом обидва варіанти мають бути однаковими.

Наступним кроком має бути детальний розгляд взаємодії описаних елементів і одночасно самого процесу прийняття рішень.

Головними проблемами під час прийняття рішень у робототехнічній системі є:

- 1) аналіз досяжності мети за наявних умов ОПР і середовища;
- 2) наявність альтернативних шляхів досягнення цілей;
- 3) вплив зовнішніх чинників і необхідність їх урахування за допомогою механізмів адаптивного прийняття рішень.

Досяжність загальної мети системи прийняття рішень визначається досяжністю усіх підцілей, що послідовно приводять до переходу у цільовий стан. У свою чергу кожна мета (підціль) є певним станом робототехнічної системи.

Таким чином, досяжність мети та будь-якої підцілі визначається наявністю причинно-наслідкових ланцюжків в еволюції стану робототехнічної системи.

**Список літератури:** 1. Ефимов Е.И. Решатели интеллектуальных задач. – М.: Наука, 1982. – 320 с. 2. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с. 3. Петров Е.Г., Новожилова М.В., Гребенік І.В. Методи и засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах. – К.: Техніка, 2004. – 256 с. 4. Бондаренко М.Ф., Гвоздинський А.М. Оптимізаційні задачі в системах прийняття рішень. – Х.: ХТУРЕ, 1998. – 216 с. 5. S. Thrun, W. Burgard, D. Fox. Probabilistic Robotics. The MIT Press, 2005.

*Поступила в редколегию 08.07.11*

**Г.Л. ХАВИН**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ», Харьков.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ**

Розглянуто механізм взаємодії між інструментом та матеріалом при різанні з глибиною порівняною з радіусом закруглення вершини інструменту. Одержано співвідношення для обчислення ріжучої та стискаючої сил, що визначають формування стружки та якість поверхні.

The order of interaction between cutting tool and material for cutting process with commensurable depth and radius of tool point is considered. The relation for cutting and thrust forces calculation which cheap and ploughing formation is obtains.

Рассмотрен механизм взаимодействия между инструментом и материалом при резании с глубиной соизмеримой с радиусом закругления вершины инструмента. Получено соотношение для вычисления режущей и давящей составляющих силы резания, формирующих стружку и качество поверхности.

Ключевые слова: сила резания, радиус закругления вершины, моделирование процесса точения.

Моделирование процесса точения неоднородных хрупких материалов связано с большими трудностями, хотя бы по той причине, что на практике невозможно предсказать качество обработанной поверхности. С одной стороны для классических хрупких материалов существуют некоторые оценки процесса качества обработки, однако наличие в неоднородных материалах пустот и полостей не позволяет напрямую использовать эти соотношения. Особую трудность вызывают попытки учесть радиус закругления режущей кромки инструмента и глубину среза. Актуальность и практическая ценность обобщенных теоретических исследований особенно возрастает при использовании алмазного инструмента и работе с микросъемками материала, когда толщина удаляемого припуска меньше радиуса закругления режущей кромки.

Имеющиеся в литературе исследования основаны на представлении равнодействующей силы резания в виде двух составляющих – режущей и давящей (силы трения). В работах [1,2] для режущей и давящей силы используют поле линий скольжения. Авторы рассматривают два случая: первый, когда поток материала имеет точку разделения на режущей кромке, и другой когда, постоянный нарост формируется в течение всего резания. Модель резания [3] с закругленной режущей кромкой состоит из деления области скольжения на 27 различных подобластей. Модель [4] рассматривает малый режущий край и выражает силы как функцию свойств материала и геометрии инструмента. Действие общей силы в этом случае получено суммированием всех элементов, на которые дискретизируется кромка инструмента. В этой модели не предполагается разделения общей силы резания на режущую и давящую силы. Существуют и другие модели, использующие различные предположения [5-8].

Как известно, удельная энергия резания возрастает с убыванием толщины недеформированной стружки, что обычно представляют как эффект размера или масштабный фактор. Множество теорий объясняют причины существования эффекта размера. Наиболее распространенным объяснением является влияние радиуса закругления режущей кромки инструмента, который вызывает вдавливание обрабатываемого материала и интенсифицирует появление подповерхностной пластической деформации и дальнейшее отделения материала [9].

Главным вопросом для всех процессов механической обработки является моделирование сил резания, с одной стороны отвечающих за потребляемую энергию в течение процесса обработки и, с другой стороны, определяющих износ инструмента. Из огромного количества публикаций на эту тему можно сделать вывод о явной тенденции к использованию микрообработки. Причем необходимо заметить, что просматриваются два механизма стружкообразования. Один для хрупких материалов через механизм разрушения путем прорастания трещин и режим вязкой обработки, включающий в себя удаление материала через пластическую деформацию (как противоположность хрупкому разрушению).

Модель, представленная в настоящей работе, базируется на следующем механизме удаления стружки. Когда касательное напряжение  $\tau$  превысит критическое напряжение пластического течения материала  $[\tau]$  и коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$  не превышает критического значения трещиностойкости  $K_I$  (вязкости разрушения), тогда происходит удаление материала посредством механизма локальной пластической деформации. Если  $K_I$  превысит  $K_{Ic}$ , то съем припуска материала будет происходить через трещины разрушения.

Таким образом, переход между вязким и хрупким типом съема припуска происходит, когда коэффициент интенсивности напряжений становится равным вязкости разрушения материала. Модель, описанная ниже, представляет собой попытку связать геометрические параметры инструмента, свойства обрабатываемого материала, условия процесса обработки и рассчитать режущую и давящую силы, а также поведение стружки в процессе резания.

Рассмотрим случай ортогонального резания, когда режущая кромка перпендикулярна направлению скорости резания.. На рис.1 схематично показан процесс резания вокруг режущего края АВ, который представлен как дуга окружности с центром О и радиусом  $r$ . Инструмент движется со скоростью  $V$ , которая понимается как скорость резания. Режущий инструмент имеет номинальный передний угол  $\gamma$ . Силы резания могут быть вычислены интегрированием бесконечно малой области  $dx$  вокруг точки  $K$ , которая считается наиболее нагруженной точкой контакта (точка разделения).

Мгновенное значение недеформированной толщины стружки обозначено, как  $t_0$  и срезанная толщина стружки -  $t_1$ . На рис.1 можно видеть, что мгновенное значение переднего угла отличается от номинального значения переднего угла. Мгновенное значение переднего угла  $\gamma_k$  имеет отрицательные величину и это приводит к появлению сжимающих напряжений в поверхностном слое материала ниже режущего края инструмента.

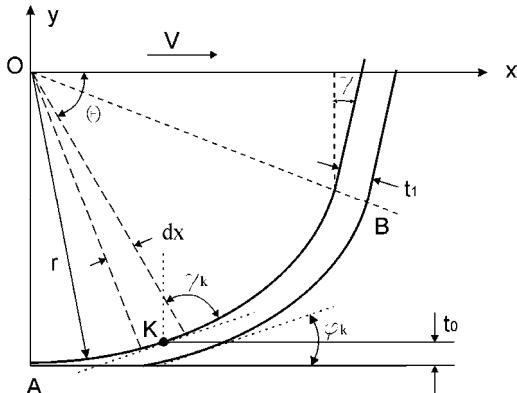


Рис. 1 – Схема взаимодействия вершины инструменту с обрабатываемым материалом

Выражение для мгновенного значения переднего угла зависит от толщины недеформированной стружки  $t_0$  и радиуса закругления режущей части инструмента, и может быть записано в виде [10]

$$\gamma_k = \theta = \sin^{-1} \left( \frac{t_0}{r} - 1 \right), \text{ если } t_0 \leq r(1 + \sin \gamma)$$

$$\gamma_k = \gamma, \text{ если } t_0 > r(1 + \sin \gamma).$$

Для определения аналитического выражения для составляющих силы резания приращение сил необходимо проинтегрировать по длине контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Мгновенное значение угла режущей кромки  $\varphi_k$  также зависит от мгновенного значения величины толщины недеформированной стружки. Угол режущей кромки выражается через мгновенное значение переднего угла из соотношения [11]

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{k_c \cdot \cos \gamma_k}{1 - k_c \cdot \sin \gamma_k}.$$

Отношение толщины недеформированной стружки к толщине срезанной стружки -  $k_c$ , называется коэффициентом усадки стружки и его обычно подсчитывают на основе измерений стружки до и после обработки. Из рис.1 режущая и давящая силы для единичной ширины соответствуют бесконечно малой режущей кромке  $dx$  и могут быть представлены следующими выражениями

$$dF_c = \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k, \quad (1)$$

$$dF_t = \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k - \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k,$$

где  $dF_c$  и  $dF_t$  представляют собой бесконечно малые значения режущей и давящей компонент силы резания соответственно. Угол  $\beta_k$  мгновенный угол трения, который рассчитывается по коэффициенту трения. Угол  $\beta_k$  меняется в процессе резания на макро и микроуровне. Касательное напряжение пластического сдвига  $\tau_c$  рассчитывается через свойства материала.

В режиме резания материала работают одновременно два механизма – стружкообразования и диспергирования поверхности (разрыхления или вспахивания). Фактически при обработке с глубиной резания меньше, чем радиус вершины инструмента, часть материала движется впереди наклонной поверхности инструмента как стружка, а часть материала движется ниже точки округления вершины инструмента, рис.1. Определить точку, где происходит это разделения крайне сложно. По данным [12] это постоянная величина равная  $37,6^\circ$ .

Режущая и разрушающая силы для формирования стружки и диспергирования поверхности можно получить интегрированием выражения (1). Запишем эти соотношения в виде:

$$F_c = \int_{-\pi/2}^{\gamma_k} \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k + \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta - \gamma) \cdot (t_0 - r(1 + \sin \gamma))}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \gamma)},$$

если  $t_0 > r(1 + \sin \gamma)$ , (2)

$$F_c = \int_{-\pi/2}^{\gamma_k} \frac{\tau_c \cdot \cos(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k, \text{ если } t_0 \leq r(1 + \sin \gamma).$$

$$F_t = \int_{-\pi/2}^{\gamma_k} \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k + \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta - \gamma) \cdot (t_0 - r(1 + \sin \gamma))}{\sin \varphi \cdot \cos(\varphi + \beta - \gamma)},$$

если  $t_0 > r(1 + \sin \gamma)$ , (3)

$$F_t = \int_{-\pi/2}^{\gamma_k} \frac{\tau_c \cdot \sin(\beta_k - \gamma_k) \cdot r \cos \gamma_k}{\sin \varphi_k \cdot \cos(\varphi_k + \beta_k - \gamma_k)} d\gamma_k, \text{ если } t_0 \leq r(1 + \sin \gamma).$$

где  $\tau_c$  - напряжение пластического сдвига;  $\beta$  - угол сдвига и  $r$  - радиус закругления вершины инструмента.

**Выводы.** Таким образом, получены аналитические выражения для определения составляющих силы резания, при помощи которых можно определить характер разрушения поверхностного слоя материала, в зависимости от геометрических параметров вершины инструмента и пластических свойств материала.

Роботу виконано за проектом М2307, що фінансується міністерством освіти та науки України.

**Список літератури:** 1. Waldorf, D. J., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., A Slip-Line Field for Ploughing During Orthogonal Cutting // ASME J. Manuf. Sci. Eng., 1998.-120.- p. 693-699. 2. Waldorf, D. J. A Simplified Model for Ploughing Forces in Turning // Trans. NAMRI/ASME, 2004.-32.- p. 447-454. 3. Fang, F. Z., Liu, X. D., Lee, L. C. Micro-Machining of Optical Glasses – A Review of Diamond-Cutting Glasses // Indian Academy of Sciences, 2003.- 28 (5).- p. 945-955. 4. Liu, K., Li, X. P. Modeling of Ductile Cutting of Tungsten Carbide // Trans. NAMRI/SME, 2001.- 29.- p. 251-258. 5. Kim, J. D., Kim, D. S. Theoretical Analysis of Micro-Cutting Characteristics in Ultra-Precision Machining // J. Mater. Process. Tech., 1995.- 49.- p. 387-398. 6. Endres, W. J., DeVor, R. E., Kapoor, S. G. A Dual-Mechanism Approach to the Prediction of Machining Forces, Part 1: Model Development // ASME J. Manuf. Sci. Eng., 1995.-117.- p. 526-533. 7. Schimmel, R. J., Endres, W. J., Stevenson, R. Application of an Internally Consistent Material Model to Determine the Effect of Tool Edge Geometry in Orthogonal Machining // ASME J. Manuf. Sci. Eng., 2002.-124.- p. 536-543. 8. Kishawy, H. A., Haglund, A. J., Deiab, I. M. An Analysis of Machining with Honed Tools Using ALE Finite Element Model: Ploughing Force and Minimum Chip Thickness // Trans. NAMRI/SME, 2006.- 34.- p. 277-284. 9. Subbiah, S. Some Investigations of Scaling Effects in Micro-Cutting. Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2006. 10. Liu, K. Ductile Cutting for Rapid Prototyping of Tungsten Carbide Tools, Ph. D thesis, National University of Singapore, Singapore, 2002. 11. Merchant, M. E. Mechanics of Metal Cutting Process // J. Appl. Phys. 1945.- 16.- p. 267-318. 12. Basuray, P. K., Mishra, B. K., Lal, G. K. Transition from Ploughing to Cutting During Cutting with Blunt Tool // Wear, 1977.- 43.- p. 341-349.

*Надійшло до редколегії 15.04.2011 р.*

**C.В. ЛУЦКИЙ**, канд. техн. наук, доц., ХНАДУ, Харків.

## СИСТЕМНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К КОНЦЕПЦИИ САМООРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Розглянуто аспекти концепції самоорганізації технічних систем з погляду системно-інформаційного підходу.

Теорія системно-інформаційного підходу (Сі-підхіду) розкриває закономірності властивостей процесу самоорганізації з позиції нового розуміння визначення й формалізації поняття інформація. Показано, що концепція самоорганізації виливається з принципу про внутрішні джерела розвитку матерії, які дозволяють показати домінуючу роль інформаційних зв'язків параметрів технічної системи, що знаходяться у відповідності до зовнішніх факторів впливу, а Сі-підхід пояснює інформаційні особливості процесів самоорганізації технічних систем і є інструментом при їхньому створенні.

In article aspects of the concept of self-organising of technical systems from the point of view of the system-information approach are considered.

The theory of the system-information approach (SI-approach) opens laws of properties of process of self-organising from a position of new understanding of definition and formalisation of concept the information. In article it is shown that the self-organising concept follows from a principle about internal sources of development of a matter which allow to show a dominating role of information communications of parametres of the technical system which are according to external factors of influence, and the SI-approach explains information features of processes of self-organising of technical systems and is the tool at their creation.

Рассмотрены аспекты концепции самоорганизации технических систем с точки зрения системно-информационного подхода.

Теория системно-информационного подхода (СИ-подхода) раскрывает закономерности свойств процесса самоорганизации с позиции нового понимания определения и формализации понятия информация. В статье показано, что концепция самоорганизации вытекает из принципа о внутренних источниках развития материи, которые позволяют показать доминирующую роль информационных связей параметров технической системы, находящихся в соответствии с внешними факторами воздействия, а СИ-подход объясняет информационные особенности процессов самоорганизации технических систем и является инструментом при их создании.

**Введение.** Проблема самоорганизации материальных систем в XXI веке становится одной из центральных проблем науки. Существенный вклад в решение этой проблемы вносят системный и информационный подходы.

В 1975 году на Западе возникла новая научная дисциплина - синергетика, установившая универсальность закономерностей явлений самоорганизации, которые не ограничиваются областью неживой природы, а распространяются на все материальные системы.

Основоположниками синергетики считаются Г. Хакен и И. Пригожин. Работы И. Пригожина по теории необратимых процессов в открытых неравновесных системах были удостоены Нобелевской премии по химии за 1977 год. В этих работах в отличие от кибернетики акцент делается не на процессы управления и обмена информацией, не на функционирование

системы, а на ее структуру, на принципы построения организации, на условиях ее возникновения, развития и самоусложнения.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Понятие самоорганизации технических систем исторически тесно связано с введением в физическую науку понятий времени и эволюции.

В XVII и в первой половине XIX веков в науке доминировала механистическая парадигма, поскольку в ней все процессы пытались объяснить путем сведения их к законам механического движения материальных частиц. Предполагалось, что эти частицы могут двигаться, не взаимодействуя друг с другом, а самое главное - их положение и скорость движения будут точно и однозначно определенными в любой момент в прошлом, настоящем и будущем, если заданы их начальное положение и скорость. Следовательно, в таком механическом описании время не играет никакой роли и поэтому его знак можно менять на обратный. Вследствие этого подобные процессы стали называть обратимыми. Однако в большинстве реальных случаев приходится учитывать изменение систем во времени, т. е. иметь дело с необратимыми процессами.

Впервые такие процессы стали изучаться в термодинамике, которая начала исследовать принципиально отличные от механических процессов тепловые явления. Тепло передается от нагретого тела к холодному, а не наоборот. С течением времени оно равномерно распределяется в теле или окружающем пространстве. Все эти простейшие явления нельзя было описывать без учета фактора времени. На такой феноменологической основе были сформулированы исходные начала или законы классической термодинамики, среди которых важнейшую роль играет закон энтропии.

Понятие энтропии характеризует ту часть полной энергии системы, которая не может быть использована для выполнения работы. Поэтому в отличие от свободной энергии она представляет собой деградированную, отработанную энергию. Если обозначить свободную энергию через  $F$ , энтропию -  $S$ , то полная энергия системы  $E$  будет равна  $E=F+ST$ , где  $T$  - абсолютная температура по Кельвину.

Согласно второму закону термодинамики энтропия в замкнутой системе постоянно возрастает и в конечном счете стремится к своему максимальному значению. Следовательно, по степени возрастания энтропии можно судить об эволюции замкнутой системы, а тем самым – и о времени ее изменения. Так впервые в физическую науку были введены понятия времени и эволюции, связанные с изменением систем. Но понятие эволюции в классической термодинамике рассматривается совсем иначе, чем в общепринятом смысле. Это стало очевидным после того, когда немецкий ученый Л. Больцман (1844 – 1906) стал интерпретировать энтропию как меру беспорядка в системе. Таким образом, согласно второму закону термодинамики замкнутая система, предоставленная самой себе, стремится к достижению наиболее вероятного состояния, заключающегося в ее максимальной дезорганизации. Поэтому чисто формально дезорганизацию можно рассматривать как

самоорганизацию с отрицательным знаком или самодезорганизацию. Тем не менее такой взгляд ничего общего не имеет с содержательной интерпретацией самоорганизации как процесса становления качественно нового, более высокого уровня развития системы. Для этого необходимо отказаться от таких абстракций, как изолированная система и равновесное состояние.

Наиболее фундаментальным из них является понятие открытой системы, которая способна обмениваться с окружающей средой веществом, энергией или информацией. Поскольку между веществом и энергией существует взаимосвязь, можно сказать, что система в ходе своей эволюции повышает энтропию, которая, однако, не накапливается в ней, а удаляется и рассеивается в окружающей среде. Вместо нее из среды поступает свежая энергия и именно вследствие такого непрерывного обмена энтропия системы может не возрастать, а оставаться неизменной или даже уменьшаться. Отсюда становится ясным, что открытая система не может быть равновесной, потому ее функционирование требует непрерывного поступления энергии и вещества из внешней среды, вследствие чего неравновесие в системе усиливается. В конечном итоге прежняя взаимосвязь между элементами системы, т. е. ее прежняя структура, разрушается. Между элементами системы возникают новые когерентные (или согласованные) отношения, которые приводят к кооперативным процессам и к коллективному поведению ее элементов. Так схематически могут быть описаны процессы самоорганизации в открытых системах, которые связаны с диссипацией (или рассеянием) энтропии в окружающую среду. И.Р. Пригожиным и его сотрудниками были сформулированы важнейшие условия процессов самоорганизации в диссипативных структурах [1].

С точки зрения парадигмы самоорганизации становится ясным, что условием развития динамических систем является взаимодействие системы и окружающей ее среды. Только в результате такого взаимодействия происходит обмен веществом, энергией и информацией между системой и ее окружением. Благодаря этому возникает и поддерживается неравновесность, а это в конечном итоге приводит к спонтанному возникновению новых структур. Таким образом, самоорганизация выступает как источник эволюции систем, она служит началом процесса возникновения качественно новых более сложных структур развития систем.

В последние десятилетия предпринималось немало попыток описания эволюции в терминах современных научных теорий. Наиболее интересным из них представляется кибернетический подход, развитый английским биологом-кибернетиком Россом Эшби, который связывает эволюцию с достижением ультраустойчивого состояния, при котором система постепенно адаптируется к своему окружению, пока не достигнет равновесия. Математическая теория катастроф, разработанная французским математиком Рене Томом (1927 г.) рассматривает переход равновесного устойчивого состояния системы (например, корабля, самолета, сооружения) к

неустойчивому и в конце концов – к катастрофе. Но эволюционные процессы имеют совершенно противоположный характер – они приводят к возникновению более устойчивых динамических систем [2].

**Изложение основного материала.** Харьковскими учеными автомобильно-дорожного университета и политехнического университета разработана теория системно-информационного подхода (СИ-подхода) к развитию техносферы, которая с позиции нового понимания определения и формализации понятия информации исследует закономерности свойств самоорганизации, которые являются источником и основой эволюции технических систем.

Согласно этой теории источником содержательной информации значения физической величины в стохастической системе служит математическое ожидание дискретной случайной величины  $I = M = \sum_i x_i P_i$ , а содержательное количество информации и определяется как

$$I_{\text{кол}} = \log_2 \frac{M}{\sigma} = \log_2 \frac{\sum x_i p_i}{\sqrt{D}}, \text{ где } D \text{ – дисперсия, } \sigma \text{ – среднеквадратичное}$$

отклонение случайной физической величины. Содержательное количество информации физической величины в детерминированной системе имеет вид

$$I = \log_2 \frac{X}{\Delta x}, \text{ где } X \text{ – параметр системы, } \Delta x \text{ – допустимое отклонение параметра.}$$

Содержательное комплексное информационное описание параметра по СИ-подходу имеет вид  $I_{\text{СИП}} = \sum_{i=1}^k \left( \ln X_i - \frac{J_{sh}}{p_i} \right)$ , где  $J_{sh}$  – количество информации по Шеннону [5].

Основы методологии СИ-подхода дополняют классическую теорию информации связи сформулированными четырьмя законами.

1. Закон тождественного отображения состояния свойств объектов при их взаимодействии

$$I(e_i) = I(e_j).$$

2. Закон информационного согласования свойств объектов при их взаимодействии

$$\log_2 \frac{M_A}{\sigma_A} = \log_2 \frac{M_B}{\sigma_B}.$$

3. Закон информационной аддитивности свойств объектов при их взаимодействии

$$I = \sum_{i=1}^t I_i, M = \sigma \cdot n^{\sum_{i=1}^t I_i},$$

где  $n$  – основа логарифма.

4. Закон информационного пространства свойств – информационно взаимосвязанные и согласованные без потери или излишка информации процессы и системы когерентны и взаимно однозначны численными значениями информационных кодов.

Развитие СИ-подхода к процессам и системам техносферы как научного направления включает в себя ряд этапов:

- разработка концепции определения понятия «содержательная информация»;
- разработка методологии численного определения количества, качества и ценности «содержательной информации»;
- разработка положений информационной алгебры;
- формализация законов «содержательной информации»;
- разработка методологии системно-информационного моделирования (СИ-моделирования);
- разработка системно-информационных моделей (СИ-моделей) процессов и систем;
- разработка методов системно-информационного анализа и синтеза процессов и систем;
- разработка критических технологий на базе СИ-моделей.

Компьютерно-интегрированные технологии машиностроения, созданные на базе СИ-моделей, включают в себя основные преимущества энерго-вещественно-информационной парадигмы, такие как:

- информационные характеристики системы являются надсистемными по отношению к распределению вещества и энергии и информационно связывают между собой различные свойства (физические, химические, экономические, социальные и т.д.) системы;
- логарифмическая форма представления СИ-моделей параметров процессов и систем в информационной среде позволяет резко уменьшить объем используемой памяти компьютера и его быстродействия при решении технических задач;
- параметры в информационной среде техносферы имеют структуру СИ-моделей и взаимосвязаны между собой информационными связями (см. рисунок);
- принцип информационной связи является фундаментальным свойством информационной среды техносферы, он определяет взаимосвязь между параметрами различных свойств на основе энерго-вещественно-информационной парадигмы;

– принцип информационной связи параметров позволяет создавать, эксплуатировать и ремонтировать машины информационного класса, у которых изменение одного параметра влечет информационное изменение других параметров;

– компьютерные СИ-модели параметров процессов и систем техносфера отражают реальные информационные процессы окружающего мира, они развиваются по одним и тем же информационным законам.

Терминология, выработанная в этих областях исследования, приобрела общенациональный характер в описании и объяснении процессов самоорганизации. Самоорганизация по своему содержанию предполагает свойство систем самостоятельно активизировать процессы своего функционирования и развития на основе внутренне присущей системам способности упорядочить свои составляющие подсистемы и регулировать энергетические и информационные потоки, которыми она обменивается с внешней средой. По форме явление самоорганизации включает в себя целый спектр процессов, в том числе самоупорядочение, самообеспечение, самовоспроизведение, и связанные с ним процессы самообучения, самоконструирования, самоизготовления, самосборки, самовосстановления, самоограничения, самовоспроизведения, самосохранения. Под организацией понимается совокупность процессов или действий, ведущих к образованию и совершенствованию взаимосвязей между частями целого, обеспечивающих интеграцию их в систему [3].

Понятийная основа самоорганизации [4] характеризуется такими определениями.

Самоорганизация – свойство системы самостоятельно (т.е. без направляющего воздействия извне) реализовывать процессы, обеспечивающие ее функционирование и развитие.

Самоупорядочение – свойство системы за счет своих внутренних факторов обеспечивать упорядоченность в пространстве и/или во времени отдельных элементов (частей) системы или протекающих в ней процессов.

Самообеспечение – свойство системы удовлетворять свои потребности в энергии (квазиэнергии) за счет привлекаемых в систему энергетических потоков из внешней среды (материалов, трудовых ресурсов, денежных средств), обусловленных деятельностью системы.

Самовоспроизведение – свойство системы непрерывно воспроизводить существенные начала (материальное, информационное и синергетическое), формирующие данную систему, противодействуя процессу энтропийного саморазрушения системы.

Техническая система проявляет себя по отношению к внешней среде посредством служебных параметров. Служебные параметры – это вершина пирамиды иерархично расположенных и информационно связанных внутренних параметров системы.

Самоорганизация технической системы проявляется в виде структуры информационно связанных параметров (рисунок), и эта структура зависит от характера внешнего воздействия, при котором проявляется служебный параметр. Множество других внутренних параметров технической системы информационно не связаны.

Таким образом, техническая система самоорганизуется при функционировании, взаимодействуя с внешней средой.

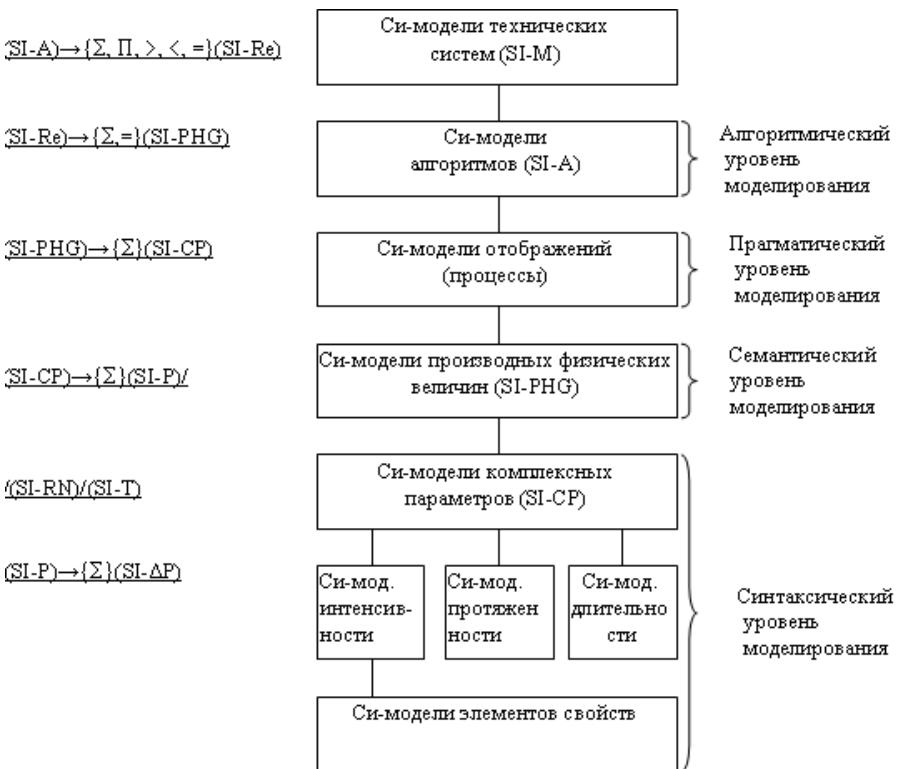


Рис. 1. Структура СИ-моделей параметров технических систем

Для решения задачи создания самоорганизующихся технических систем необходимо провести ряд научно-исследовательских работ:

1. Разработка элементов машин с информационно связанными параметрами: поверхности деталей, группа поверхностей, механизмы, сборочные узлы, машины и т.д.
2. Разработка и оптимизация конструкции машин с информационно связанными параметрами на базе информационно-функционального стоимостного анализа.

3. Разработка и оптимизация производственно-технологических структур на базе СИ-моделей, прогнозирование их эффективности на ранних этапах жизненного цикла изделий на базе удельных информационных коэффициентов: технологического времени, затрат энергии, затрат денежных средств и т.д.

4. Управление изготовлением и контроль качества машин на базе детерминированной и стохастической информации СИ-моделей изделий (анализируется изменение закона распределения стохастической информации параметров).

5. Диагностика и прогнозирование состояния информационно связанных параметров машины на базе анализа детерминированной и стохастической информации параметров в межрегламентный период эксплуатации.

6. Оптимизация затрат на ремонт информационно связанных параметров с наиболее существенным влиянием на работоспособность машины в межрегламентный период эксплуатации (анализируется изменение закона распределения вероятности стохастической информации параметров).

**Выводы.** Таким образом, концепция самоорганизации вытекает из принципа о внутренних источниках развития материи, которые позволяют показать доминирующую роль информационных связей, находящихся в соответствии с внешними закономерностями, а СИ-подход объясняет особенности самоорганизации технических систем и является инструментом при их создании.

**Список литературы:** 1. Николис Г, Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. – М., 1979. 2. Электронный источник kse-a852e71b.doc. 3. Социологический энциклопедический словарь / под ред. Г.В. Осипова. – М.: Издательская группа ИНФРА-М-НОРМА, 1998. – 468 с. 4. Мельник Л.Г. Научные основы самоорганизации экономических систем / Л.Г.Мельник. – Механізм регулювання економіки, 2010. № 3, Т. 1. 5. Сайт lutskyy-s-v.com.ua

*Поступила в редакцию 06.07.11*

**A.K. ГОРЛОВ**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**Е.П. РОГАЧЕВ**, канд. техн. наук, НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А.М. ЖУКОВ**, с.н.с., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**С.Н. ЛАШКО**, канд. техн. наук, НАКУ «ХАИ», Харьков.

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАННЯ ТОЧЕЧНИХ НАПЛАВЛЕННИХ ВЫСТУПОВ

Проведені досліди показали, що розроблений пристрій для формоутворення шипів з самоорієнтуючою і самовстановлюючою робочою порожнинною матриці забезпечують:

- виготовлення шипів без облоя, якщо похибка встановлення виступу відносно робочої порожнини матриці становить не більш, ніж 1,5 мм, при будь-якій її направленості;
- зниження деформації листової заготовки (неплоскості листа) завдяки безоблойному формоутворенню виступів;
- автоматизацію формоутворення виступів з будь-якими системами автоматичного переміщення листових деталей, що забезпечують похибку встановлення виступу не більш, ніж 1,5 мм

The conducted researches have shown that the developed device for формообразования thorns with a self-orientating and self-established working cavity of a matrix provide:

- Manufacturing of thorns without obloy if the error of installation of a ledge concerning a working cavity of a matrix makes no more than 1,5 mm, at its any orientation;
- Decrease in deformation of sheet preparation (неплоскости sheet) thanking безоблойному формообразованию ledges;
- Automation формообразования ledges with any systems of automatic moving of the sheet details, installations of a ledge providing an error no more than 1,5 mm.

Проведенные исследования показали, что разработанное устройство для формообразования шипов с самоориентирующейся и самоустанавливющейся рабочей полостью матрицы обеспечивают:

- изготовление шипов без облоя, если погрешность установки выступа относительно рабочей полости матрицы составляет не более 1,5 мм, при любой ее направленности;
- снижение деформации листовой заготовки (неплоскости листа) благодаря безоблойному формообразованию выступов;
- автоматизацию формообразования выступов с любыми системами автоматического перемещения листовых деталей, обеспечивающие погрешность установки выступа не более 1,5 мм.

**1. Введение.** Для увеличения противоскользящих свойств грузовых полов самолётов они покрываются различными видами рифлений. Анализ эксплуатационных характеристик полов с различными рифлениями показал, что достаточно высокие противоскользящие свойства обеспечивают точечные конические шипы с относительной высотой  $\bar{h}_w = 0,4...0,5$ . Такие шипы особенно эффективны на наклонных поверхностях, типа откидных рамп самолётов, в условиях неблагоприятной погоды (дождь, снег, грязь), обеспечивая уверенное перемещение людей и техники. В настоящее время на транспортных самолётах, для настилов полов используют ошипованные листовые детали с точечными выступами конической формы высотой 3...5мм и диаметром у основания 7,5... 10,0мм.

Одним из перспективных способов получения ошипованных листовых заготовок является способ электродуговой точечной дозированной наплавки электродного металла (выступа) с последующим их формообразованием в шип заданных размеров и формы [1, 2]. По сравнению с другими способами, а именно постановкой шип-заклепок, контактной приваркой шипов, прокаткой, данный способ изготовления позволяет повысить коэффициент использования материала до 98%, получать ошипованные панели с шипами различной формы.

Электродуговая дозированная наплавка позволяет получать листовые заготовки с выступами по форме близкими к полусфере. Экспериментальные исследования свойств заготовок с такими выступами показали, что микротвёрдость материала наплавленного выступа ниже по сравнению с микротвёрдостью электродной проволоки на 18...22%, и они обладают пониженными фрикционными свойствами. Усилие сдвига по сферическим выступам на 20...25% меньше, чем по коническим шипам.

Все это предопределило необходимость придания наплавленному металлу формы, способствующей увеличению противоскользящих свойств, методами пластического деформирования, что приводит также к увеличению его износостойкости, уменьшению остаточных сварочных напряжений, снижению неплоскостности заготовки в целом.

В результате пластического деформирования наплавленного металла получают шипы конической формы, а также шипы, цилиндрической формы с пирамидальными выступами (корончатого типа), обладающие более высокими противоскользящими свойствами (рисунок 1), чем выступы сферической и шипы конической формы.

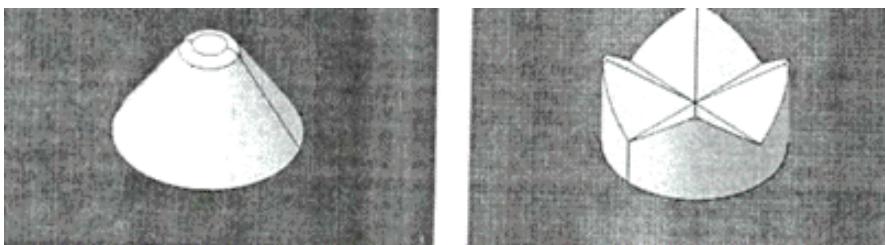


Рис. 1. Формы шипов

Формообразование шипов из наплавленного выступа возможно открытой или закрытой штамповкой.

Формообразование в открытых штампах рекомендуется для изготовления шипов конической формы и шипов в форме усеченного конуса с относительной высотой  $\bar{h}_w = 0,4...0,5$ . При формообразовании выступов по данной схеме рабочая полость матрицы выполняется по форме и размерам готового шипа.

Формообразование в закрытых штампах рекомендуется для изготовления шипов корончатого типа. Как правило, такие шипы имеют три или четыре выступа на общем цилиндрическом основании. В связи с чем, удельное давление несколько

увеличивается, чтобы обеспечить заполнение вершины шипа, а также формирование его боковой поверхности.

Рабочий инструмент представляет собой матрицу с цилиндрической полостью диаметром равным диаметру готового шипа у основания, а также пuhanсон, на торце которого тем или иным способом изготовлены полости по форме и размерам пирамидального выступа матрицы.

Таким образом изготовление шипов по данному способу происходит в два этапа. Учитывая огромное количество шипов на листовых заготовках, эти этапы изготовления шипов должны быть автоматизированы.

Процесс изготовления, нанесения выступов наплавкой, на листовую заготовку с заданным шагом и расположением полностью автоматизированы, т.к. перемещение листовой заготовки относительно наплавочной головки осуществляется с применением станков ЧПУ [3].

Однако, при автоматизации процесса формообразования выступов возникла существенная проблема, а именно, проблема точной установки наплавленного выступа относительно рабочей полости формообразующего устройства. В связи с этим необходимо было провести исследования по выявлению факторов, влияющих на точность нанесения выступов, разработать мер по их устранению и снижению их влияния и определить пути решения поставленной задачи, автоматизации процесса формообразования выступов.

Данная работа проводилась в рамках темы «Досконалення імпульсних технологічних систем виробництва деталей аерокосмічної техніки та автомобільної техніки». Тема Д104-2/2011-П № РО111U001073.

**2. Теоретическое рассмотрение вопроса.** Теоретические и экспериментальные исследования показали, что основной проблемой в решении задачи автоматизации формообразования выступов стала нестабильность точности наплавки выступов,  $R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$  (рисунок 2).



Рис. 2. Отклонение центра наплавленного выступа

Факторами, определяющими точность постановки наплавленного выступа, являются: блуждание дуги, вызывающее колебания и отклонения капли от оси

электрода; снос кагли металла восходящими потоками на стадии перехода; несимметричность температурных полей, обусловленная блужданием дуги (различная зона катодной очистки); несовершенство конструкции наплавочной головки, в результате чего возникает несимметричность потока защитного газа, неперпендикулярность электрода и листовой заготовки, несоосность приложения управляемой силы.

Отклонение оси выступа относительно оси наплавочной головки, как показали проведенные исследования, составляет  $R=0.3\ldots0.9$  мм, причем направление этого отклонения носит случайный характер и заранее не прогнозируется. Кроме того не исключается возникновение погрешности, вызванной точностью перемещения листовой заготовки на шаг, определяющий расстояние между соседними наплавленными выступами, что может вызвать увеличение отклонения.

Естественно, что при любой жесткой автоматической системе относительного перемещения листовой заготовки с выступами и формообразующего устройства на шаг, будет возникать погрешность установки наплавленного выступа относительно рабочей полости формообразующего устройства. Как показали экспериментальные исследования, такое расположение выступа относительно рабочей полости приводит к появлению обоя, искажению формы шипа и деформации листовой детали, вследствие, появления усилий сдвига и роста удельных давлений на листовую деталь.

Исследования течения металла в коническую полость матрицы (рисунок 3) показал, что на начальной стадии процесса происходит формирование боковой поверхности конуса без увеличения высоты. В движении находятся периферийные участки, объем которых растет по мере увеличения контактирующей поверхности наплавленного металла с пуансоном.

При дальнейшем движении матрицы, когда истечение материала между матрицей и листовой заготовкой становится затруднительным, происходит интенсивное увеличение высоты и окончательное оформление конической поверхности шипа. Эта стадия аналогична процессу течения металла в коническую полость и проходит при значительном увеличении потребного усилия деформирования. Полученные результаты характерны для случая, когда ось выступа совпадает с осью рабочей полости с матрицей.

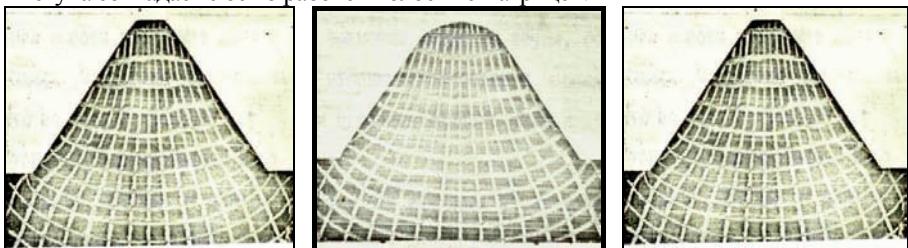


Рис. 3. Координатная сетка разъемных образцов после деформирования

Таким образом, для решения данной проблемы необходимо применять следящие устройства или системы, обеспечивающие требуемую точность установки наплавленного выступа относительно рабочей полости формообразующего устройства. Однако, учитывая непрогнозируемый характер направления и величину погрешности установки выступа, как показал анализ, необходимо применять сложные и дорогостоящие системы.

В связи с этим был внедрен процесс формообразования выступов с ручным перемещением листовой заготовки, который обладает простотой организации процесса, вследствие, применения стандартных оборудования и приспособлений для установки и поддержки листовых заготовок, а главное, возможностью высокой точности установки выступа относительно рабочей полости формообразующего устройства.

Применение серийного оборудования и оснастки позволило значительно сократить срок внедрения предложенного способа в производство. На рисунке 4 показана схема процесса формообразования выступов с применением серийного пресса КП-204.

Листовую заготовку 2 устанавливают на рабочие поверхности поддерживающих устройств 4 выступами вниз. Устройство для формовки 3 устанавливается на нижний хобот пресса, а плоский пуансон 1 на подвижный шток. Для перемещения заготовки на шаг, штамповщик вручную перемещает её до тех пор пока выступ не будет установлен в рабочую полость матрицы. При включении пресса пуансон 1 подводится к листовой заготовке, прижимает ее к устройству для формообразования, штампует выступ и возвращается в исходное положение.

После этого штамповщик вручную перемещением листовой заготовки обеспечивает установку следующего выступа в полость матрицы - рабочий цикл повторяется.

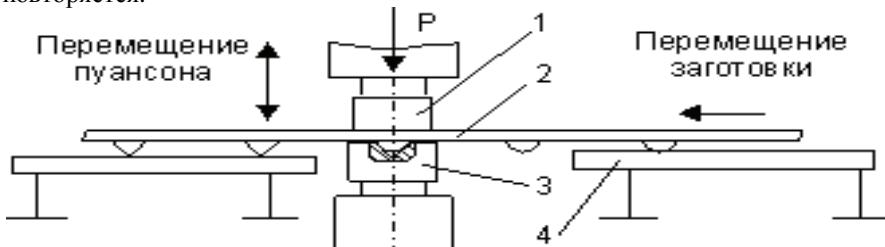


Рис. 4 Схема процесса формообразования выступов на прессе КП-204.

1- пуансон; 2- листовая заготовка; 3- устройство для формообразования выступов (матрица);  
4- стол для поддержки листовых заготовок; 5- рольганг.

Процесс позволяет получать шипы заданной формы высокого качества благодаря возможности установки выступа относительно рабочей полости матрицы с достаточно высокой точностью. Опыт производства ошипованных листовых деталей по данной схеме формообразования выступов показал, что наряду с достоинствами он имеет существенные недостатки, а именно, не высокую производительность и неблагоприятные условия труда. Повышенная утомляемость

рабочего-штамповщика связана с достаточно большими габаритами листовой заготовки, монотонностью процесса, неудачным расположением рабочей зоны штамповки.

Одним из направлений совершенствования процесса формообразования шипа является его автоматизация.

Предполагается следующая схема процесса:

- закрепление заготовки с наплавленными выступами (выступом вверх) в выбранной системе координат на устройстве обеспечивающем программное автоматическое перемещение;
- автоматическое совмещение оси рабочей полости матрицы с осью выступа;
- формообразование выступа;
- перемещение заготовки на шаг (по программе аналогичной что используется при наплавке выступа).

В связи с этим, для реализации данного процесса было предложено устройство для формообразования выступов, рабочая полость которого самоориентируется и самоустанавливается точно по оси выступа. Принцип работы такого устройства поясняется рисунком 5.

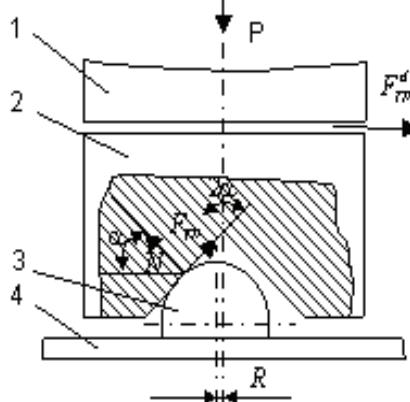


Рис. 5 Принципиальная схема устройства: 1 – опора; 2 – матрица; 3 – выступ; 4 – листовая заготовка

Предположим, что наплавленный выступ 3 установлен относительно рабочей полости матрицы 2 с погрешностью  $R$ . При соприкосновении боковой конической поверхности рабочей полости матрицы с полусферической поверхностью вершины выступа возникает сила реакции  $N$  со стороны поверхности неподвижного выступа, направленная перпендикулярно боковой поверхности матрицы. Если связь между соприкасающимися поверхностями опоры 1 и матрицы 2 не жесткая, то под действием этой силы произойдет перемещение матрицы в направлении, указанном на схеме.

В результате такого перемещения оси рабочей полости матрицы и выступа совместятся и погрешность установки выступа будет устранена. После этого, дальнейшим перемещением матрицы происходит формообразование выступа. Если обеспечить перемещение матрицы

относительно опоры во всех направлениях, в плоскости их соприкосновения, то рабочая полость матрицы будет самоорентироваться и самоустанавливаться при любых направлениях погрешности установки.

Силе реакции  $N$  противодействуют сила трения  $F_{tp}$ , действующая при движении боковой поверхности рабочей полости матрицы относительно поверхности выступа, а также сила трения  $F'_{tp}$ , действующая между соприкасающимися поверхностями опоры и матрицы.

Поскольку, здесь, действуют силы трения, величины которых зависят от материалов взаимодействующих поверхностей, а также угла  $\alpha$  при вершине рабочей полости матрицы, то для обеспечения работы устройства необходимо создать определенные условия. А именно, чтобы сумма сил, направленных на перемещение матрицы была больше или равна сумме сил, противодействующих этому перемещению.

Исследования показали, что на работоспособность устройства влияют угол при вершине рабочей полости  $\alpha$ , а также коэффициенты трения  $f_1$  и  $f_2$  между поверхностями рабочей полости матрицы и выступа, и между поверхностями опоры и матрицы соответственно.

Чем меньше значение коэффициентов трения, тем надежнее будет работать устройство. В связи с этим трение скольжения между поверхностями опоры и матрицы можно заменить на трение качения, что позволит значительно снизить усилие трения. Для этого между соприкасающимися поверхностями опоры и матрицы можно установить шаровые опоры, которые не только снижают трение, но и дают возможность перемещаться матрице относительно опоры во всех направлениях.

Коэффициент трения  $f_1$  зависит от материалов матрицы и выступа, поэтому его снизить можно смазкой поверхностей рабочей полости матрицы или выступа. Такой вариант возможен при холодном формообразовании выступа.

Угол при вершине конуса рабочей поверхности существенно влияет на работоспособность устройства. При больших углах  $\alpha$  может возникнуть заклинивание матрицы. Поэтому необходимо соблюдать условия:

$$\alpha_w = \alpha_m \leq \alpha_{kp} \quad (3)$$

где:  $\alpha_{kp}$  – критический угол при вершине конической поверхности рабочей полости матрицы при котором возможно заклинивание матрицы;

$\alpha_w$  – угол при вершине конического шипа.

Экспериментальные исследования показали, что для надежной работы устройства угол  $\alpha$  не должен превышать  $130^0$ .

**3. Результаты расчетов.** На основании предложенной принципиальной схемы устройства была разработана его конструкция, приведённая на рисунке 6.

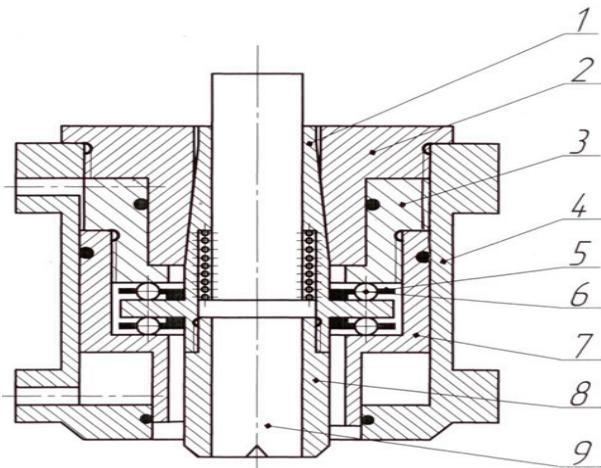


Рис. 6 Конструкция самоустанавливающейся формообразующей матрицы

В состав конструкции устройства входят: пневмоцилиндр, состоящий из корпуса 4; центрирующей крышки – 2; поршня – 7 и опорной крышки поршня – 3. В корпусе поршня 7 установлена подвижная обойма 1, опирающаяся на шариковые опоры, расположенные вокруг обоймы. Для предотвращения их скатывания друг к другу, предусмотрены сепараторы 5. Применение шариковых опор позволяет обойме перемещаться во всех направлениях. В обойму 1 по скользящей посадке устанавливается матрица 9 и закрепляется в ней опорной гайкой 8.

Пружина обеспечивает усилие, необходимое для перемещения матрицы при установке на выступ.

Сопрягающие поверхности центрирующей крышки 2 и обоймы 1 имеют конические поверхности, что позволяет обойме центрироваться относительно оси устройства в исходном положении.

Устройство работает в следующим образом:

При подаче сжатого воздуха в верхнюю полость цилиндра 4 поршень 7 совместно с обоймой 1 и матрицей 9 начинают перемещаться вниз, при этом обойма выходит из центрирующей полости крышки 2, что позволяет ей в дальнейшем совершать перемещения во всех направлениях. При дальнейшем движении обоймы с матрицей вниз, рабочая поверхность полости матрицы соприкасается с поверхностью наплавленного выступа. Под действием возникающей силы реакции, действующей со стороны поверхности выступа на поверхность рабочей полости матрицы и благодаря её подвижности, она смещается в сторону направления погрешности и центрируется относительно оси выступа. После этого включается пресс, который своим рабочим ползуном давит на матрицу 9, в результате чего происходит формообразование выступа.

По окончании формообразования в нижнюю полость пневмоцилиндра подается сжатый воздух и поршень вместе с обоймой и матрицей возвращается в исходное положение. При этом обойма входит в коническую полость крышки 2 и центрируется относительно оси формообразующего устройства.

Разработанное устройство закрепляется в рабочей зоне пресса между опорной площадкой и рабочим ползуном. Лист с наплавленными выступами располагается между опорной площадкой пресса и устройством для формообразования. К устройству подводится пневмосеть через управляющие пневмоклапаны.

В ходе экспериментальных исследований по формообразованию выступов предложенным устройством были произведены изготовление ошипованных листовых деталей из алюминиевых и титановых сплавов. Листовые детали из Al-сплавов были изготовлены с коническими шипами, а листовые титановые детали – с шипами корончатого типа. Формообразование шипов из Al-сплавов производилась в холодном состоянии, открытой штамповкой, а титановых шипов – в горячем состоянии, в закрытой штамповкой.

**4. Выводы.** Анализ проведенных исследований показал, что разработанное устройство для формообразования шипов с самоориентирующейся и самоустанавливающейся рабочей полостью матрицы обеспечивают:

- изготовление шипов без облоя, если погрешность установки выступа относительно рабочей полости матрицы составляет не более 1,5мм, при любой её направленности;

- изготовление шипов различных форм, как в холодном так и в горячем состоянии при различных схемах формообразования;

- снижение деформации листовой заготовки (неплоскости листа) благодаря безоблойному формообразованию выступов;

- автоматизацию формообразования выступов

с любыми системами автоматического перемещения листовых деталей, обеспечивающие погрешность установки выступа не более 1,5.

**Список литературы:** 1. Тарасов Н.М., Рогачев Е.П., Капустин О.С., Кладченко В.С. Получение наплавкой ошипованных листовых заготовок из алюминиевого сплава Д16АТ для настила пола самолёта.//Автоматическая сварка. –1995.–№2 с. 36-38,51. 2. Тарасов Н.М., Горлов А.К. Образование конических выступов на листовых заготовках с помощью дозированной наплавки и формовки.//Высокоскоростная обработка материалов давлением: Сб. научн. ст.– Харьков, 1982 г. – Вып.8.–с. 138-142. 3. Тарасов Н.М., Варуха Н.А., Горлов А.К., Рогачев Е.П. Автоматизация технологического процесса нанесения титановых шипов на настил грузового пола.//Прогрессивные технологические процессы оборудования и инструмент: Темат. Сборник научных трудов. – Харьков. 1987 г. – с.114-119.

Поступила в редакцию 6.07.2011

**Г.И. КОСТЮК**, д-р техн. наук, проф., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**Ю.В. ШИРОКИЙ**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## КОМБИНИРОВАННОЕ УПРОЧНЕНИЕ И НАНОСТРУКТУРЫ

Показано, что при комбинированному зміщенні реалізується утворення наноструктур, що збільшує мікротвердість до 46 ГПа, стійкість різального інструменту – до 65 разів, зносостійкість деталей – до 60 разів, корозійну стійкість – до 3,7 разів і міцність при втомі – до 1,7 раза. Усе це їй особливо збільшення міцності при втомі підтверджує утворення наноструктур при комбінованій обробці.

In article, it is shown that at the combined hardening formation nanostructures is realised that raises microhardness to 46 GPa, firmness of the cutting tool to 65 times, wear resistance of details to 60 times, corrosion firmness to 3,7 times and fatigue durability to 1,7 times. All it and especially increase of fatigue durability confirms formation nanostructures at the combined processing.

Показано, что при комбинированном упрочнении реализуется образование наноструктур, что повышает микротвердость до 46 ГПа, стойкость режущего инструмента – до 65 раз, износостойкость деталей – до 60 раз, коррозионную стойкость – до 3,7 раза и усталостную прочность до 1,7 раза. Все это и особенно повышение усталостной прочности подтверждает образование наноструктур при комбинированной обработке.

**1. Введение.** На протяжении более 25 лет нами были получены уникальные результаты по повышению стойкости режущего инструмента (РИ) до 20–65 раз, износостойкости деталей – до 18–60 раз, микротвердость достигала 46 ГПа для покрытия  $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$ , коррозионная стойкость увеличилась в 2–3,7 раза, усталостная прочность – в 1,5–1,7 раза (что особенно удивило оппонентов, так как практически любой вид упрочнения приводит к снижению усталостной прочности) при практическом сохранении шероховатости и геометрии деталей и режущего инструмента (см. обзоры в книгах [1 – 5]). Все это на-водило на мысль, что в материале покрытия и даже в основном материале детали или РИ происходят необычные структурные процессы, обеспечивающие такие глобальные изменения.

**2. Предпосылки к получению наноструктур при комбинированном упрочнении.** Теоретически в работе [6] была рассмотрена возможность получения наноструктур, но не указаны технологические параметры и методы их получения. В работах [6, 7] приведены результаты экспериментов по образованию наноструктур, где показано, что для получения наноструктур необходимы температуры 700...1500 К, скорости нарастания температур более  $10^7$  к/с, величины давления или температурных напряжений порядка  $10^9$  Па и наличие атомов катализаторов образования наноструктур. Теоретически предсказано появление наноструктур при комбинированной обработке с использованием ПИО и ИЛО в работе [8], а при использовании ПИО и ЛО – в [9]. Все это требует анализа экспериментальных результатов комбинированного упрочнения.

**3. Анализ результатов экспериментальных исследований.** Комбинированные технологии обеспечивают создание поверхностных слоев с требуемыми характеристиками. Распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя при плазменно-ионной обработке (ПИО), ионной имплантации (ИИ), лазерной обработке (ЛО) и ряде комбинированных процессов: плазменно-ионной и лазерной обработке (ПИО+ЛО), ионной имплантации и лазерной обработке (ИИ+ЛО) показано на рис. 3. Путем изменения толщины покрытия, использования многослойных покрытий, изменения энергии и сорта ионов при имплантации, плотности энергии и времени воздействия при лазерной обработке можно получить необходимые виды распределения микротвердости в поверхностных слоях толщиной до 1 мм. Это позволяет обеспечить необходимую износостойкость и предел усталостной выносливости за счет создания слоев с остаточными напряжениями сжатия, а также коррозионную устойчивость и другие характеристики детали. Использование лазерной обработки и ионного легирования позволяет производить выборочную обработку отдельных зон детали.

Даны перспективы создания комбинированных технологий, позволяющих повысить стойкость режущего инструмента в 7–37 раз, износостойкость – до 35 раз, коррозийную стойкость – до 5 раз, усталостную прочность – в 1,15–4,5 раза. Разработаны концепции создания конструкций установок для комбинированного прочнения и нанесения покрытий

Анализ табл. 1 показывает, что такое существенное повышение стойкости в комбинированной технологии за счет суперпозиции характеристик по стойкости невозможно, а высокие величины повышения свойств связаны с коренным изменением структуры упрочненного РИ.

Характеристики стойкости

Таблица 1

Технология повышения упрочнения	Инструментальные материалы	Вид упрочнения, покрытия	Вид обработки конструкционных материалов	Относительные стойкости конструкционных материалов		
				В исследовании	На производстве	В перспективе
1	2	3	4	5	6	7
Плазменно-ионная обработка инструмента	Твердые сплавы, быстрорежущие стали	Карбиды, нитриды, карбонитриды	Токарная, сверлильная, фрезерная, зубодолбежная	1,5-9	1,1-1,7	2-10
Ионное легирование и имплантация	Твердые сплавы, быстрорежущие стали, Инструментальные стали	Имплантация ионов W, Ti, Zr, C, B, N	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбонарезная	1,5-4	1,1-1,6	3-10
	Быстрорежущие стали и инструментальные стали, твердые сплавы	Лазерная закалка	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбонарезная	2,1-3,	1,5-2	2,3-4,

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
Электронно-лучевая обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы	Модификация электронным пучком	Токарная, сверлильная	1,4-4	нет	1,7-5
Плазменно-ионная + лазерная обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Покрытие, диффузионное проникновение, лазерная модификация	Токарная, фрезерная, сверлильная, резьбонарезная	3-11	нет	7-15
Плазменно-ионная обработка+ ионное легирование	Быстрорежущие стали, твердые сплавы и ионное легирование W, Zr, C, B, N, C, B, п.	Покрытие карбиды, нитриды, и карбонитриды	Токарная, фрезерная, сверлильная	4-12	нет	8-21
Плазменно-ионная + Лазерная + ионное легирование	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Покрытие, диффузионное проникновение ионное легирование и модификация	Точение, сверлильная, фрезерная, резьбонарезная	7-20	нет	10-33
Ионное легирование + лазерная обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы	Ионное легирование и лазерная модификация	Точение, фрезерная, сверлильная	5-15	нет	7-20
Электронная обработка + плазменно-ионная обработка + ионное легирование	Быстрорежущие стали, твердые сплавы, инструментальные стали	Электронная очистка, плазменно-ионное покрытие + ионное легирование	Точение, фрезерная, сверлильная	7-19	нет	12-25
Электронная обработка + плазменно-ионное покрытие + ионное легирование+ лазерная обработка	Быстрорежущие стали, твердые сплавы и лазерная модификация	Электронная очистка, покрытие, ионное легирование	Точение, сверление, фрезерная	8-25	нет	14-37

Сравнение износостойкости, получаемой в индивидуальных технологиях суперпозицией, не дают тех результатов, которые реализуются для комбинированной технологии, а получаются значения намного больше (см. табл. 2).

Коррозионная стойкость (табл. 3) также не может быть объяснена суперпозицией возможностей индивидуальных технологий.

Анализ табл. 4 показывает, что можно повысить усталостную прочность в комбинированной технологии только за счет увеличения энергетического

взаимодействия между зернами наноструктуры, не дающими возможности образования зародышей усталостной трещины, по сравнению с обычными видами упрочнений, которые обычно повышают вероятность появления усталостных трещин, а в лучшем случае сохраняют.

Таблица 2

Сравнение износстойкости

Техноло- гия обработки	Материал дета- лей	Вид покрытия или упрочнения	Повышение износстойко- сти, раз		
			в иссле- дованиях	на произ- водстве	в перс- пективе
ПИО	Конструкционные стали и сплавы	Покрытия: TiN,T, C,MoN,MoC,Cr2N, NbN,WC,B2,Z2O2, HfO2	1,3-6,8	1,25-1,3	1,267
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация N+, C+,Ar+,W+,Ae+,B+, Mg+,Cu,Na,Sm	1,2-4	1,2-1,25	1,5-5
ЛО	Конструкционные стали и сплавы	Лазерное упрочне- ние	1,3-4,3	1,2-1,3	1,4-4,7
ЭЛО	Конструкционные стали	Электронно-лучевое упрочнение	1,5	нет	1,7
ПИО+ ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Покрытие: нитриды, карбиды, имплантация: Mo+,Cu+,N,W, Zr,Ti	2-10	нет	2,5-35
ПИО + ЛО	Конструкционные стали	Покрытие TiN, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , лазерное упрочнение	2,3-3	нет	2,8-11
ПИО +ИЛО +ЛО	Конструкционные стали	Покрытие: TiN,MoN, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , имплантации B,W,C	5-8	нет	5,5-34
ПИО +ИЛО +ЛО +ЭЛО	Конструкционные стали электронная очистка, лазерное упрочнение	Покрытие: TiN, MoN, имплантация C ,W	7-10	нет	8-35

Таблица 3

## Коррозионная стойкость

Вид обработки	Материал деталей	Вид покрытия	Повышение коррозионной стойкости, раз	
			в исследований	на производстве
ПИО	Конструкционные стали и др.	Покрытие TiN, TiN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrN	1,2-3	1,1-2
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация ионов Fe, Ni, Y, B, C, H и др.	1,3-1,8	1,1-1,3
ЭЛО	Конструкционные стали	Электронно-лучевые покрытия из ZrO <sub>2+</sub> 3Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2-1,5	1,1-1,2
ЛО	Конструкционные материалы	Лазерное покрытие танталом	1,3-1,6	1,1-1,2
ПИО+ ИЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ИЛО-имплантация Y	2-3	нет
ПИО+ ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ЛО-покрытие Ta	2-3	нет
ПИО+ ЭЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ЭЛО-покрытие ZrO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-3,9	нет
ПИО+ ИЛО+ ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ИЛО-имплантация Y и C ЛО-покрытие Ta	2,3-4	нет
ПИО+ ЭЛО+ ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие ZrN Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ЭЛО-покрытие ZrO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ЛО-покрытие Ta	2,1 - 3,7	нет
ПИО+ ИЛО+ ЛО	Конструкционные материалы	ПИО-покрытие TiN+ TiC ИЛО-имплантация Y и C ЛО-покрытие Ta ЭЛО-очистка поверхности	2,5-5	нет

Результат проведенного исследования влияния комбинированного упрочнения на повышение стойкости приведен в табл. 5, где рассмотрены такие комбинированные технологии:

– плазменно–ионная (ПИО) и ионно–лучевая (ИЛО) обработка. Видно, что комбинированная обработка (ПИО+ЛО) дает возможности повысить стойкость от 0,5 до 6,25 до 36 раз, причем минимальные значения реализуются при обработке титановых сплавов титаносодержащими покрытиями и ионнолегированными твердыми сплавами. В то же время применение покрытия  $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$  и ионное легирование Hf и Zr позволяют обеспечить повышение стойкости до 36 раз при обработке титановых сплавов. Такого повышения стойкости простой суперпозицией свойств плазменно–ионного покрытия (повышение 2,5–3 раза) и ионного легирования (повышение 2,8–3,2 раза) не получили, значит можно ожидать повышения стойкости в 5,1–6,2 раза. Все это говорит, что происходят качественные изменения в поверхностном слое. Ранее нами были предприняты попытки объяснить этот эффект образованием твердых растворов комплексного внедрения. Такого улучшения свойств поверхностного слоя не получили (в этом случае микротвердость поверхности составляла 42 ГПа), что косвенно говорит об образовании наноструктурированных слоев.

Таблица 4  
Повышение усталостной прочности

Технология обработки	Материал детали	Вид покрытия или упрочнения	Повышение усталостной прочности, раз		
			в ис-следо-ваниях	на прои-зводстве	в перспективе
ПИО	Конструкционные легированные стали	Покрытие Ni,Cr, Al,Y	1,15-1,2	нет	1,3-2
ИЛО	Конструкционные стали и сплавы	Имплантация N	1,12-1,15	нет	1,2-1,8
ЛО	Конструкционные стали	Обработка в режиме с оплавлением	1,1-1,2	нет	1,2-1,9
ПИО	Конструкционные стали	ПИО-покрытие Cr, Ni,Al,Y ИЛО-имплантация	1,3-1,5	нет	1,6-3
ЛО + ПИО	Конструкционные стали	ЛО-обработка в режиме с оплавлением ПИО-покрытие Cr,I,Y	1,25-1,45	нет	1,5-2,5
ЛО+ПИО+ИЛО	Конструкционные стали	ЛО-обработка в режиме с оплавлением ПИО-покрытие Cr, Ni,Al,Y ИЛО-имплантация N	1,4 -1,7	нет	1,9-4,5

Таблица 5

Стойкость и относительная стойкость РИ с различными видами обработки поверхности

Вид обработки	Материал РИ	V, м/с	h <sub>n</sub> , мкм	T <sub>h</sub> =0,4 мин	T <sub>нr</sub> /T <sub>H</sub>	K <sub>пир+ил</sub> T <sub>пир+ил</sub> T <sub>Mo<sub>2</sub>N</sub>	K <sub>пир+ил+ло</sub> T <sub>пир+ил+ло</sub> T <sub>Mo<sub>2</sub>N</sub>	K <sub>ЛО</sub>
		1	2	3	4	5	6	7
ПИО+ИЛО TiN+NiN+AlN+ +Mo <sub>2</sub> N+ +CrN+SiN Ni <sup>+</sup> +Ti <sup>+</sup> E <sub>i</sub> = 30 кэВ D= 6·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	BK6+ +TiN+NiN++AlN+ +Mo <sub>2</sub> N+ +CrN+SiN Ni <sup>+</sup> +Ti <sup>+</sup> E <sub>i</sub> = 30кэВ D= 6·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	0,61	2,5	125	6,25	2,5		
			4	157	7,5	2,62		
			5	167	7,6	2,58		
			6,5	183	8,0	2,75		
			7,5	195	8,1	2,77		
			8,6	205	9,3	2,88		
			10	190	9	2,78		
			2,5	210	10,5	4,2		
			4	237	11,3	3,95		
			5	267	12,1	4,1		
ПИО+ИЛО ZrN+Zr <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =20 кэВ D=7·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	BK6+ ZrN+Zr <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =20 кэВ D=7·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	0,61	6,5	301	13,1	4,5		
			7,5	365	15	5,14		
			8,6	397	18	5,57		
			10	378	16,7	5,15		
			2,5	373	18,65	7,46		
			4	517	23,7	8,29		
			5	605	27,8	9,42		
			6,5	723	36	12,37		
			7,5	730	30,4	10,41		
			8,6	445	20,2	5,15		
ПИО+ИЛО 0,8ZrN+ +0,2HfN r <sup>+</sup> +Hf <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =2·10 <sup>4</sup> кэВ D=7·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	BK6+ +0,8ZrN+ +0,2HfN+ +Zr <sup>+</sup> +Hf <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =20 кэВ D=6·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	0,61	10	410	19,5	6,01		
			7,5	70	7			
			2,5	192	9,6	2,5	3,84	1,54
			4	238	11,3	2,62	3,95	1,5
			5	246	20,5	2,58	6,95	2,69
			6,5	279	12,1	2,74	4,16	1,52
			7,5	300	12,5	2,51	5,31	2,12
			8,6	340	15,4	2,88	4,77	1,66
			10	380	18,1	2,78	5,57	2
			2,5	192	9,6	2,5	3,84	1,54
ПИО+ИЛО+ЛО TiN+NiN+AlN+Mo <sub>2</sub> N+ +CN+SiN Ni <sup>+</sup> +Ti <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =30 кэВ D=6·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup> W <sub>u</sub> = 8 Дж	BK6+ +TiN+NiN+ +AlN+Mo <sub>2</sub> N+ +CN+SiN Ni <sup>+</sup> +Ti <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =30 кэВ D=6·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup> W <sub>u</sub> = 8 Дж	0,61	4	238	11,3	2,62	3,95	1,5
			5	246	20,5	2,58	6,95	2,69
			6,5	279	12,1	2,74	4,16	1,52
			7,5	300	12,5	2,51	5,31	2,12
			8,6	340	15,4	2,88	4,77	1,66
			10	380	18,1	2,78	5,57	2

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ПИО+ИЛО+ЛО ZrN+Zr <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =20 кэВ D=7·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup> W <sub>u</sub> =8 Дж	BK6+ +ZrN+Zr <sup>+</sup> + +ЛО E <sub>i</sub> =20кэВ D = 7·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup> W <sub>u</sub> = 8 Дж	0,61	2,5	321	16,5	4,2	6,6	1,57
			4	355	17	3,95	5,94	1,5
			5	405	18,2	4,1	6,17	1,5
			6,5	470	20,45	4,5	6,97	1,55
			7,5	530	22,5	5,14	7,71	1,5
			8,6	580	26	5,57	8,05	1,445
			10	620	29,5	5,16	9,1	1,76
			2,5	503	25,1	7,46	10,04	1,35
			4	760	36,2	8,29	12,66	1,53
			5	809	37	9,46	12,54	1,33
ПИО+ИЛО+ЛО 0,8ZrN+ +0,2HfN Zr <sup>+</sup> +Hf <sup>+</sup> E <sub>i</sub> =2·10 <sup>4</sup> эВ D = 7·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	BK6+ +0,8ZrN+ +0,2HfN+ +Zr <sup>+</sup> +Hf <sup>+</sup> + +ЛО E <sub>i</sub> = 20 кэВ D= 6·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup>	0,61	6,5	907	39	12,37	13,4	1,08
			7,5	980	40,1	10,41	13,7	1,32
			8,6	1050	48	6,34	14,9	2,35
			10	1090	51,8	6,02	15,98	2,65
ПИО++ИЛО+ЛО Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sup>+</sup> +Л <sub>Мод</sub> E <sub>i</sub> =2·10 <sup>4</sup> эВ D=7·10 <sup>20</sup> м <sup>-2</sup> W <sub>u</sub> =3 Дж	P18+ +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + +Al <sup>+</sup> +Л <sub>Мод</sub>	0,61	7,5	100	10	2,8		

Этот тезис подтверждается и при объединении в комбинированной обработке ПИО, ИЛО и лазерной обработки (ЛО), где реальным становится повышение стойкости до 51,8 раза (микротвердость поверхности – 46 ГПа, покрытие 0,2HfN+0,8ZrN; ионное легирование Hf<sup>+</sup> и Zr<sup>+</sup> и лазерная модификация). Величины повышения стойкости суперпозицией нарастания свойств таковы: (ПИО – 2,3 – 3 раза, ИЛО – 2,8 – 3,2 раза, ЛО – 1,8–2,5 раза); получаем 6, 8–8,7 раза, что намного меньше реально реализуемых. Все это еще раз подтверждает реальность образованияnanoструктур в этих условиях. Разброс же данных по повышению стойкости связан с недостаточно полным заполнением объема полями температур и температурных напряжений, когда nanoструктуры образуются только в части упрочняемого объема. Все это говорит о необходимости решения проблемы заполнения объема полями температур и температурных напряжений, а также подачи иона катализатора для ускорения роста nanoструктур.

**4. Выводы.** Показано, что при комбинированном упрочнении происходят изменения в структуре, приводящие к повышению стойкости режущего инструмента до 65 раз, износстойкости до 60 раз, коррозионной стойкости до 3 раз и усталостной прочности до 1,7 раза. Все эти уникальные свойства не могут быть объяснены суперпозицией повышения свойств за счет индивидуальных технологий, а усталостная прочность обычно после упрочнения снижается. Очевидно, комбинированно упрочненный материал и по своим характеристи-

кам соответствует наноматериалу, имеющему высокую микротвердость, высокую ударную вязкость, высокое значение коэффициента Пуассона, обеспечивающие высокую работоспособность упрочненного материала РИ.

Нестабильные характеристики комбинированно упрочненного материала можно объяснить недостаточно полным заполнением упрочняемого объема полями температур и температурных напряжений, что приводит к фрагментарному образованию наноструктур.

Доказана возможность получения наноструктур при комбинированном упрочнении.

**Список литературы:** 1. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Кн. 1 "Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий"/Г.И. Костюк, изд–во АИНУ, 2002. – 588 с. 2. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий / Кн. 2 "Справочник для расчета основных физических и технологических параметров, оценки возможностей, выбора типа технологий и оборудования, изд–во АИНУ, 2002. – 486 с. 3. Костюк Г.И. Эффективные режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем / Г.И. Костюк. – справочник. Х.:Антиква, 2003, - 412с. 4. Костюк Г.И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем / Г.И. Костюк. – Монография–справочник. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с. 5. Костюк Г.И. Физико-технические основы роботизированного производства: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2006. – 612 с. 6. Гречихин Л.И. Физика анончаниц и нанотехнологий. – Мин.: УП «Технопринт», 2000. – 397 с. 7. Костюк Г.И. Наноструктуры и нанопокрытия: перспективы и реальность: учеб. пособие / Г.И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с. 8. Костюк Г.И., Бруяка О.О., Суккарисх Мустафа Эззат. Наноструктуры в поверхностном слое детали при комбинированной обработке – действие ионов различных сортов, зарядности и энергий на конструкционные материалы. / Науково-технічний та громадянський часопис Президії Академії інженерних наук України "Вісті" видавн. АІНУ, 1(38)/2009, с. 201–215. 9. Костюк Г.И., Мелкозегрова О.М. Получение наноструктур в объеме детали при комбинированном упрочнении/ Науково-технічний та громадянський часопис Президії Академії інженерних наук України "Вісті" видавн. АІНУ, 1(38)/2009, с. 12 – 20.

Поступила в редколлегию 06.07.11

**В.Н. БОРЩЁВ**, д-р. техн. наук, проф., ХНУРЭ, Харьков;  
**И.Ш. НЕВЛЮДОВ**, д-р. техн. наук, проф., ХНУРЭ, Харьков;  
**М.А. ПРОЦЕНКО**, инж., ХНУРЭ, Харьков;  
**И.Т. ТЫМЧУК**, инж., ХНУРЭ, Харьков;  
**И.С. ХАТНЮК**, инж., ХНУРЭ, Харьков.

## **СБОРКА ДЕМОНСТРАТОРА ТРЕКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЖАТОЙ БАРИОННОЙ МАТЕРИИ**

Розглянуто основні принципи побудови і функціонування детектуючих систем для міжнародного CBM-експерименту, технологічні методи та прийоми виготовлення гібридних мікрозбірок для сенсорних систем, результати випробування демонстратора трекової систем. Показано ефективність використання розробленої та запропонованої фахівцями ДП НДТП повністю алюмінієвої COF-технології (chip on flex) у технологічному процесі збирання детекторного модуля

Мікростріповий демонстратор, комутаційний кабель, COF-технологія, гібридні мікрозбірки.

In the article the principles of construction of the microstrip demonstrator CBM01 module for CBM experiment with application of flexible aluminum-polyimide commutation cables are considered.

The efficiency of offered completely aluminum COF- assembly technology (chip on flex) which provide reduction of the technological cycle and manufacturing costs, minimization of mass-dimension characteristics, high-density assembling, capability of three-dimensional arrangement in the form of multilayer blocks and packages with higher functional content is shown.

Microstrip demonstrator, commutation cable, COF-technology, hybrid micro-assemblies

Рассмотрены основные принципы построения и функционирования детектирующих систем для международного CBM-эксперимента, технологические методы и приемы изготовления гибридных микросборок для сенсорных систем, результаты испытания демонстратора трековой системы. Показано эффективность использования разработанной и предложенной специалистами ГП НИТИП полностью алюминиевой COF-технологии (chip on flex) в технологическом процессе сборки детекторного модуля.

Мікростріповий демонстратор, комутаційні кабелі, COF-технологія, гібридні микросборки.

Экономическое развитие современных стран тесно связано с созданием высокотехнологичных и наукоемких отраслей промышленности, успешное функционирование и интенсивное развитие которых определяется востребованность выпускаемой продукции на международном и внутреннем рынках, обеспечивает процесс информатизации общества и является основой процветания любого государства. К таким высокотехнологичным отраслям современной электроники относится радиационное приборостроение [1, 2]. Ключевым элементом во всех приборах регистрации радиационного излучения является детектор, чувствительность и избирательность которого определяет характеристики прибора. Твердотельные кристаллические детекторы (сцинтилляционные, стриповые, матричные пиксельные и т. д.) являются практически единственным типом сенсоров, обеспечивающим как

обнаружение невидимых излучений, так и определение их типа и спектра. Они широко используются в физике высоких энергий для измерения энергии элементарных частиц и их координат. Однако сфера их использования не ограничивается экспериментальной ядерной физикой, а распространяется также на сферы промышленного приборостроения, мониторинга технологических процессов, робототехники, контроля в автоматических системах управления, в системах технического зрения и т. д.

Целью данной работы является анализ принципов построения микростриповых сенсорных модулей для международного эксперимента СВМ (Compressed Baryonic Matter) с применением инновационной алюминиевой “chip on flex” (COF) технологии сборки и оценка их эксплуатационных характеристик.

**1. Международный физический эксперимент “Сжатой Барионной Материи” СВМ (Compressed Baryonic Matter).** Международный эксперимент СВМ проводится в рамках программы исследования вещества в сверхплотном состоянии на новом ускорителе научного центра GSI (г. Дармштадт, Германия).

СВМ исследовательская программа исследует ядерную материю чрезвычайно высокой плотности. Материя таких форм, как полагают, существует внутри нейтронных звезд. В лаборатории плотная ядерная среда может быть создана при столкновениях тяжелоионных пучков с ядерными целями. Синхротроны (Дармштадт, Германия) обладают уникальными возможностями для этого исследования: с пучком интенсивностью до  $10^{12}$  ионов за импульс и энергией пучка до 45 ГэВ/нуклон.

Коллaborация СВМ включает в себя более 50 институтов (более 400 членов) из перечисленных выше стран [2–5].

Центральный компонент СВМ-эксперимента – кремниевая трековая система (STS) – служит для измерения траекторий и моментов всех заряженных частиц, образованных в мишени.

Кремниевая трековая система состоит из четырех трековых станций, расположенных на расстоянии 50, 60, 75 и 100 см от мишени (рис. 1). Для измерений параметров частиц использованы тонкие кремниевые микростриповые двухсторонние сенсоры с шагом стрипов  $\sim 50$  мкм, из которых могут быть собраны стандартные блоки детекторных модулей (субмодули) для трековых станций.

Трековые станции построены на детекторных модулях, расположенных “вертикально”, со стрипами ориентированными перпендикулярно к основной отклоняющей плоскости в магнитном поле. При этом электроника первичной обработки информации размещена за пределами активной области STS.

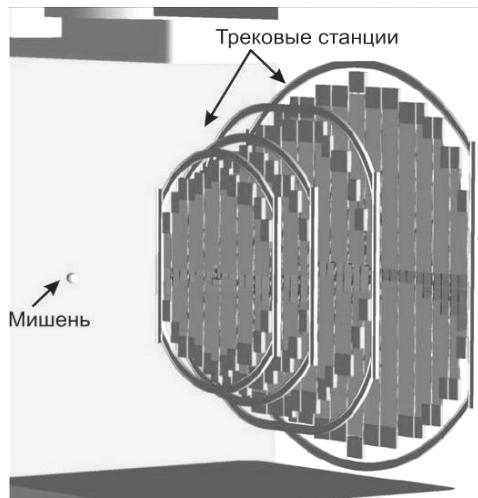


Рис. 1. Внешний вид кремниевой трековой системы

Основной принцип создания детекторов и детекторных модулей для указанного выше эксперимента (в котором принимает участие ГП НИТИП в составе СВМ-MPD-STS консорциума (Дубна, Россия; Дармштадт, Германия)) – высокая модульность, минимизация радиационной длины всех составных частей конструкции, которые находятся в рабочем объеме на пути частиц, при обеспечении необходимых характеристик и активном отведении тепла от считывающей электроники. Важнейшей проблемой при разработке детекторных блоков являются согласование электрических параметров линий связи с микросхемами обработки информации и снижение уровня индуцированных в линиях помех. Высокая скорость съема данных требует обеспечения обработки нескольких сотен каналов, передающих информацию, с быстродействием до 100 нс/канал. В целях минимизации массы рассеивающих материалов в активном объеме детекторной станции электроника первичной обработки информации (гибридные микросборки с микросхемами) размещается за пределами активной области трековой системы.

Достижение поставленной цели возможно за счет использования современной элементной базы (тонких двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов, многоканальных малошумящих гибридных микросборок и т.п.) в сочетании с прецизионной коммутацией. Коммутация гибридных микросборок с сенсорами, а также сенсоров между собой выполняется с помощью тонких ультралегких кабелей на основе алюминий-полиимидного диэлектрика [5–10].

Специалистами ГП НИТИП в рамках международного СВМ-эксперимента предусмотрено выполнение такого объема работ:

- разработка технологии изготовления коммутационных плат и кабелей;
- разработка инновационной “chip on flex” технологии сборки детекторных модулей;
- разработка и изготовление высокоточной оснастки для сборки модулей;
- изготовление кабелей и гибридных микросборок.

Принципиально новые решения для создания детекторных модулей базируются на результатах и опыте, полученном в рамках проекта ALICE, и требуют дальнейшего усовершенствования технологий изготовления и сборки компонентов детекторных модулей, которые обеспечат минимизацию массы материала (минимизацию фонового излучения) и необходимые количественные показатели по разрешающей способности и надежности.

**2. Структура и физические принципы работы кремниевых детекторов, их основные параметры и технология производства.** Детектирование заряженных частиц с помощью кремниевых сенсоров (детекторов) основано на том, что в процессе ионизации частицы передают часть своей энергии среде, в которой они движутся. Средние ионизационные потери заряженной частицы пропорциональны квадрату заряда частицы и не зависят от ее массы  $M$ . Зависимость средних ионизационных потерь заряженных частиц от величины  $pc/M = \gamma\beta$  имеет минимум при  $\gamma \sim 3$ , затем логарифмически увеличивается и выходит на плато, которое в твердых веществах всего на  $\sim 10\%$  больше, чем минимальное значение. Флуктуации ионизационных потерь обусловлены тем, что столкновения частиц с атомами среды происходит на разном расстоянии, причем часть столкновений происходит на близком расстоянии, и выбитые электроны ( $\delta$ -электроны) получают энергию, достаточную для того, чтобы, проходя через среду, самим образовывать ионы. Вследствие этого распределение флуктуаций ионизационных потерь резко асимметрично. Высокомный кремний в наибольшей степени пригоден для использования в качестве твердотельного наполнителя ионизационного детектора. Средняя энергия, расходуемая заряженной частицей на образование одной пары носителей в кремнии ( $\sim 3,6$  эВ), мала по сравнению с газами, в которых для образования одной пары ионов требуется несколько десятков электрон-вольт. Поэтому генерируемый частицей заряд в кремнии гораздо выше, чем в газе, а его флуктуации в несколько раз меньше. Значение наиболее вероятных потерь ионизирующей частицы в кремнии составляет  $\sim 28$  кэВ на 100 мкм. Отсюда следует, что на этой длине образуется примерно 8 тысяч электронно-дырочных пар. Время сбора заряда в кремниевых детекторах ( $\sim 10$  нс) на много меньше типичного времени рекомбинации ( $\tau_r = \sim 1$  мс). Поэтому неравновесные заряды, генерированные частицей, полностью собираются на электродах, что обеспечивает максимально возможную величину сигнала, его стабильность и пропорциональность потерянной частицей энергии. Для регистрации заряда, создаваемого частицей в сенсоре, необходимо

минимизировать ток утечки детектора, поскольку от него зависит собственный шум детектора. Однако практически невозможно получить кремний с удельным сопротивлением выше  $\sim 1,5 \cdot 10^4$  Ом·см. Достаточно малый ток утечки обеспечивается созданием переходной области между полупроводниками с различными типами проводимости (р-п-переход), которая запирается обратным напряжением.

Для производства кремниевых микростриповых детекторов в настоящее время применяется так называемая планарная технология, разработанная для микроэлектроники. Детекторы, изготовленные по планарной технологии, обладают высокой стабильностью, имеют малые обратные токи ( $1\ldots 10$  нА/см<sup>2</sup> при толщине чувствительного слоя 300 мкм и напряжении смещения  $\sim 100$  В). Благодаря применению фотолитографии для формирования рабочих областей (областей с р-п-переходом) на поверхности детектора может быть достигнута точность на уровне долей микрона. Это позволяет создавать микростриповые сенсоры, в которых области р-п-перехода имеют вид узких (до 5 мкм) полосок (стрипов), разделенных столь же узкими промежутками. При этом стоимость детектора практически не зависит от формы и размеров рабочих областей.

При создании современных детекторных установок высоких энергий решение о выборе размера и формы кремниевого микрострипового детектора принимается исходя из требований конкретной физической задачи и геометрии установки. Для снижения его стоимости стараются использовать всю площадь кремниевых пластин, которые обычно имеют форму диска диаметром 100 или 150 мм. В пределах одной установки часто применяются детекторы различной формы.

Наряду с односторонними микростриповыми детекторами, у которых имеющие форму полосок р-п-переходы сформированы только на одной (лицевой) стороне пластины, находят широкое применение двусторонние микростриповые детекторы, где стрипы формируются на обеих сторонах пластины. Несмотря на то, что двусторонние детекторы намного дороже, а их изготовление и монтаж существенно сложнее, с их помощью можно получить вдвое большую информацию о положении трека ионизирующей частицы при том же количестве вещества в детекторе, что очень важно в ряде экспериментов из-за проблемы многократного рассеяния частиц.

Основными параметрами кремниевых сенсоров являются: толщина сенсора, удельное сопротивление кремния, ориентация кристаллографических осей, способ считывания информации (бинарное и аналоговое считывание), шаг считывания и шаг стрипов, емкость стрипов на обратную сторону, межстриповая и переходная емкости, шумы детектора.

**3. Инновационная “chip on flex” (COF) технология сборки демонстратора трековой системы на основе алюминий-полимидных диэлектриков.** В настоящее время в ряде отраслей (медицинском приборостроении, в телекоммуникационной отрасли, в робототехнике и др.)

все шире используются сверхбыстро действующие многоканальные бескорпусные микросхемы с шагом контактных площадок 50 мкм и менее, что открывает возможность создания устройств с повышенной функциональной емкостью. Как правило, к таким устройствам предъявляются очень жесткие требования по массогабаритным характеристикам, объему и возможности компоновки изделия в трех плоскостях в виде многослойных блоков и пакетов [4–12]. Проблема соответствия таким высоким требованиям была решена за счет новых конструктивно-технологических решений на основе технологии “кристалл на гибкой плате” или “chip on flex” (COF), которая широко применяется фирмами 3M, Rogers, Olin Mesa и др. [8].

Безадгезивные алюминий-полиимидные лакофольговые диэлектрики, которые используются в качестве гибких коммутирующих элементов в COF-технологии, обладают всеми теми достоинствами, которыми обладают и безадгезивные медь-полиимидные материалы. Однако ряд их преимуществ по сравнению с медь-полиимидными диэлектриками позволил существенно расширить возможности COF-технологии на современном этапе.

Прежде всего алюминий обладает высокой коррозионной стойкостью. Кроме того, алюминий имеет радиационную длину, почти в 6 раз превышающую радиационную длину меди. Несмотря на то что алюминий по сравнению с медью обладает меньшей механической прочностью, меньшей теплопроводностью, удельным электрическим сопротивлением примерно в 1,6 раза большим удельного электрического сопротивления меди, важное значение имеет тот факт, что алюминий почти в 3,5 раза легче меди. Благодаря малой плотности алюминия обеспечивается большая электрическая проводимость на единицу массы. Таким образом, коммутирующие элементы на основе алюминий-полиимидных лакофольговых диэлектриков позволяют максимально минимизировать массу вещества в рабочем объеме, что особенно перспективно для сенсорных систем с высокой плотностью каналов информации.

Алюминиевая COF-технология хорошо адаптируется к существующему автоматизированному оборудованию ультразвуковой сварки типа Delvotec. При этом обеспечиваются высокое качество и надежность сварных соединений не только из-за того, что свариваются однородные материалы (алюминиевые контактные площадки электронных компонентов и алюминиевые проводники коммутирующих элементов), но также и из-за того, что сварочные электроды, применяемые в сварочных установках, позволяют обеспечить оптимальные режимы процессов сварки. Кроме того, коммутирующие элементы на основе безадгезивных алюминий-полиимидных диэлектриков позволяют значительно улучшить емкостные характеристики электронных устройств.

Специалистами ГП НИТИП (г. Харьков) разработана и освоена инновационная технология изготовления гибких коммутирующих элементов на основе безадгезивных алюминий-полиимидных лакофольговых

диэлектриков и технология сборки детекторных модулей и электронных узлов.

Практическое применение предложенная технология нашла при подготовке международного эксперимента ALICE (CERN, г. Женева, Швейцария) на базе нового ускорителя LHC (Большой Анондый Коллайдер). В этом эксперименте расшифровка процессов соударения разогнанных частиц будет осуществляться с помощью сложнейшей системы детекторов, фиксирующих траектории и энергии родившихся частиц с помощью сотен тысяч каналов обработки информации [11]. На основе разработанной инновационной технологии специалистами ГП НИТИП совместно с членами коллаборации ALICE были созданы микростриповые и дрейфовые детекторные модули (рис. 2) на алюминий-полиимидных гибких кабелях и платах, не имеющие аналогов в мире [10–12].

Гибкие кабели и платы на основе лакофольговых диэлектриков ФДИ-А-50 и ФДИ-А-24 (полиимид толщиной 10...20 мкм и алюминий толщиной 14...30 мкм) характеризуются пластичностью, гибкостью и стабильностью электрических характеристик и успешно заменяют проволочный монтаж при сборке детекторных модулей. За счет компоновки в трех плоскостях обеспечивается перекрытие соседних сенсоров в детектирующих системах, что практически исключает “мертвые зоны”, т. е. зоны, в которых не осуществляется детектирование.

Описанную компоновку невозможно реализовать при проволочном монтаже, так как в этом случае объекты сварки должны иметь одностороннее расположение и практически невозможно изменить конфигурацию проводников после сварки.

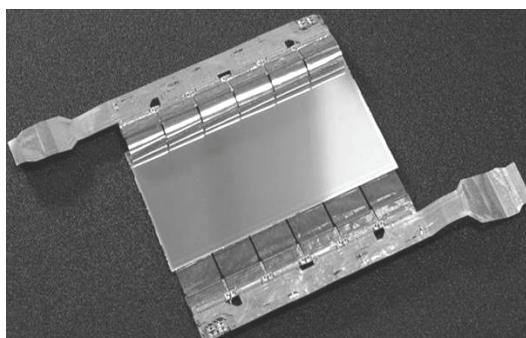


Рис. 2. Микростриповый детекторный модуль

Алюминиевая COF-технология также позволяет без ограничений располагать на одних и тех же гибких платах вместе с кристаллами микросхем различные навесные компоненты.

Разработанная инновационная технология ультразвуковой сварки алюминий-полиимидных плат и кабелей с микросхемами и приемниками радиационного излучения адаптирована для применения автоматизированных сварочных установок типа FK Delvotec-6400, ЭМ-4370 и др., позволяющих обеспечить точность позиционирования при сварке  $\pm 3\ldots 5$  мкм.

При участии специалистов ГП НИТИП в разработках гибких кабелей и плат для детекторных модулей международных проектов CBM, ALICE удалось значительно усовершенствовать сборочную технологию “chip on flex” и адаптировать ее к самым высоким современным требованиям и задачам.

Примером решения одной из таких сложных задач может служить проводящиеся на предприятии ГП НИТИП научно-исследовательские работы по созданию нового поколения микростриповых сенсорных модулей, которые предназначены для использования в трековых системах международных проектов CBM, ALICE.

**4. Конструкция демонстратора трековой системы. Результаты испытаний.** В ходе выполнения научно-исследовательской работы, проводимой ГП НИТИП совместно с ХНУРЭ в рамках международной программы CBM, спроектирован, создан и испытан на пучке протонов демонстратор трековой системы, состоящий из микрострипового детектора CBM01 и микрокабелей (рис. 3).

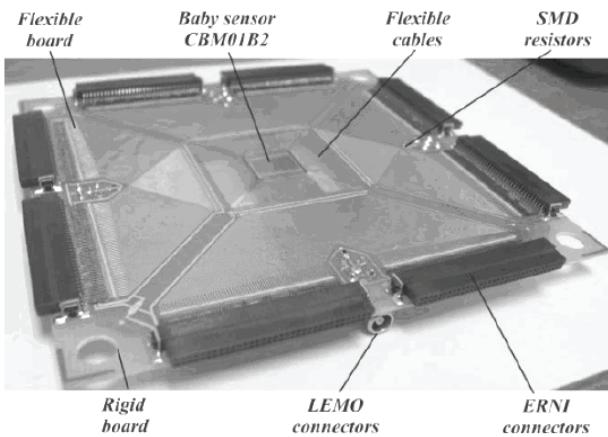


Рис. 3. Внешний вид демонстратора трековой системы

Конструкция демонстратора трековой системы, изображенного на рис. 3, состоит из таких основных частей:

- кремниевого микрострипового сенсора CBM01 (Baby sensor CBM01B2);

- жесткой несущей платы-основания (Rigid board);
- гибкой платы (Flexible board). Материал: фольгированный диэлектрик FDI-A-50 (толщина слоя алюминия – 30 мкм, толщина полииimidного слоя – 20 мкм);
  - гибких сигнальных проводников (Flexible sensor cables);
  - ERNI-соединителей (ERNI connectors);
  - LEMO-соединителей (LEMO connectors);
  - SMD-резисторов номиналом 1 МОм (SMD resistors).

Сборка демонстратора трековой системы осуществлялась в три этапа:

1. Приваривание сигнальных проводников к сенсору посредством ультразвуковой (УЗ) сварки.

2. Сборка гибкой коммутационной платы.

3. Монтаж кремниевого сенсора на жесткое несущее основание модуля.

В 2008 году проведено испытание первого изготовленного образца кремниевого микрострипового демонстратора трековой системы СВМ01, предназначенного для FAIR эксперимента. Испытание проходило на установке СВД-2 в Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) в г. Протвино (Россия) и способствовало получению учеными важных результатов.

Эксперимент SVD (Спектрометр с детектором вершин), выполнявшийся на ускорителе У-70 (ИФВЭ), основывается на исследовании столкновений сильно разогнанных элементарных частиц: протонов и нейтронов. Эксперимент посвящен исследованию фундаментальных основ процесса "термализации" при столкновении пучка протонов (энергия которых приближается к 70 ГэВ) с мишенью из жидкого водорода. Экспериментальная установка состояла из трех модулей верхнего трекера пучка и пяти детекторов вершин нижнего уровня мишени, все построено на основе кремневых микростриповых сенсоров с высоким пространственным разрешением.

В ходе проведения эксперимента одна из трековых систем установки СВД-2 была модифицирована посредством СВМ-демонстратора, что позволило на начальном этапе эксперимента оценить с помощью паразитного пучка ее эффективность. Полученный результат включает: данные о разрешающей способности детектора, полученные с помощью установки СВД-2, измерения пространственного разрешения (меньше 15 мкм) (рис. 4) и эффективности обнаружения частиц. Демонстратор трековой системы функционировал без сбоев и был полностью совместим с экспериментальной установкой СВД. Посредством демонстратора производились последовательные измерения энергии элементарных частиц и их координат.

Опытный образец СВМ демонстратора был сконструирован Консорциумом по кремневым трековым системам (СВМ-MPD), который объединяет лучших специалистов из разных институтов России, Украины и Германии.

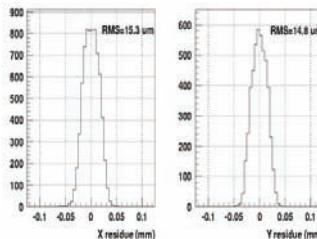


Рис. 4. Результаты испытания демонстратора трековой системы  
(пространственное разрешение трека частиц)

**Выводы.** Проведенные участниками СВМ-MPD-STS консорциума исследования и испытания демонстратора трековой системы доказали, что инновационная алюминиевая COF-технология обладает рядом преимуществ: экономичностью, технологичностью, эффективностью. Обозначенные в работе достоинства этой технологии позволяют эффективно использовать ее для сборки микростриповых детекторных модулей на базе технологических мощностей ГП НИТИП в рамках международного эксперимента СВМ.

Эта статья обусловлена желанием донести до отечественных и зарубежных потребителей лучшие достижения в области инновационных разработок в Украине, и мы надеемся, что наш опыт может быть полезен всем, кто разрабатывает и эксплуатирует электронные изделия с повышенной функциональной емкостью, высокими требованиями к радиационной стойкости, массогабаритным характеристикам, объему, надежности и долговечности.

- Список литературы:**
1. Астахин В.В., Трезвов В.В., Суханов И.В. Электроизоляционные лаки, пленки и волокна. – М.: Химия, 1986. – 158 с.
  2. Александрова Л.Г. Перспективные разработки в области гибких фольгированных диэлектриков // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1995. – № 1. – С. 38 – 40.
  3. Гончарова Т.С. Полимидные пленки в качестве межслойных изолирующих и пассивирующих слоев ИС // Зарубежная электронная техника. – 1989. – № 8 (339). – С. 53–82.
  4. ECSS-Q-70-71A Space product assurance. Data for selection of space materials and process. – Р. 197.
  5. Аткин Э.В., Бочаров Ю.И., Симаков А.Б. Проектирование БИС считывания сигналов микростриповых детекторов по субмикронной КМОП технологии // Труды XLVIII научной конференции МФТИ “Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук”, Москва-Долгопрудный, 25–26 ноября. – 2005. – Ч. II Общая прикладная физика. – с. 110 – 111.
  6. Фарассат Ф., Валев С. “Кристалл на плате” (СОВ): новая эра сборочной технологии // Технологии в электронной промышленности. – 2005. – № 6. – С. 71 – 76.
  7. Handbook of tape automated bonding. - New York: Van Nostrand Rainhold (edited by John H. Lau). - 1991. – 645 p.
  8. <http://www.inaeksu.vstu.vinnica.ua/kafs/mpa/microproc/r2.htm#2.1>.
  9. Still A. CDF Run II silicon tracking projects // Nucl. Instr. and Meth. – 2000.- A 447.-P. 1 – 8.
  10. Merkel P. et al. CDF Run IIb Silicon Detector: The Innermost Layer // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2004. - Vol. 51, No 5. – P. 2215-2219.
  11. Tricomi A. The CMS Inner Tracker Silicon Microstrip Modules: Production and test // Nucl. Instr. and Meth.- 2007. - A 570. – P. 248 – 252.
  12. List B. The H1 silicon tracker // Nucl. Instr. and Meth.- 2005.- A 549. – P. 33 – 36.

Поступила в редакцию 08.07.11

**О.О. БАРАНОВ**, канд. техн. наук, доц., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**М.С. РОМАНОВ**, канд. техн. наук, НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**А.А. БРЕУС**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**Р.В. ВОРОПАЙ**, инж., НАКУ «ХАИ», Харьков.

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ TiN НА ТВЕРДОСПЛАВНОМ РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ СТАЛИ 14Х17Н2**

Досліджена стійкість вакуумно-плазмового покриття TiN на ріжучих пластинах із твердого сплаву марки Т15К6 під час токарної обробки сталі 14Х17Н2. Виявлено, що при розміщенні підкладки на відстані 250 мм від виходу плазмовода перпендикулярно до її осі, найбільшу стійкість мають пластини, що були розташовані біля центра підкладки, а найменшу – пластини на периферії. Зниження стійкості при зміненні радіусу вздовж підкладки від 40 до 160 мм складає 42 %. На операціях напівчистового точіння підвищення стійкості складає 2,8 рази для пластин квадратної, шестигранної та п'ятигранної форми. Для операцій чистового точіння відносне підвищення стійкості складає 3,0-3,1 рази для різців квадратної та шестиранної форми, та у 2,1 рази – для різців п'ятигранної форми.

When turning steel 14H17N2, tool life of carbide inserts of hard alloy grade T15K6 coated by TiN vacuum-plasma coating is investigated. When placing the substrate with the inserts at a distance of 250 mm from the plasma duct exit perpendicular to its axis, the greatest tool life is achieved for the inserts located near the center of the substrate, the smallest - for the inserts at its periphery. At the radius increasing from 40 to 160 mm along the substrate, the fall of the tool life is 42%. At semi-rough turning, the increase in tool life is 2.8 times for square, hexagonal and pentagonal shaped plates. At finish turning, a relative increase in tool life is 3.0-3.1 times for square and hexagonal shaped plates, while for the pentagonal shaped plates - 2.1 times only.

Исследована стойкость вакуумно-плазменного покрытия TiN на режущих пластинах из твердого сплава марки Т15К6 при токарной обработке стали 14Х17Н2. Установлено, что при размещении подложки на расстоянии 250 мм от выхода плазмовода перпендикулярно его оси, наибольшую стойкость имеет пластины, находившиеся вблизи центра подложки, наименьшую – пластины на ее периферии. Падение стойкости при изменении радиуса вдоль подложки от 40 до 160 мм составляет 42 %. На операциях получистового точения наблюдается увеличение стойкости в 2,8 раза для пластин квадратной и шестиугранной и пятиугранной формы. Для операций чистового точения отмечено относительное увеличение стойкости инструмента в 3,0-3,1 раза для резцов квадратной и шестиугранной формы, и в 2,1 раза - для резцов пятиугранной формы.

Осаждение плазменно-ионных покрытий на режущий инструмент с целью повышения его износстойкости широко применяется в промышленности в течение более двадцати пяти лет [1-4]. В данной работе рассматривается эффективность использования нитрида титана (TiN) при его осаждении на поверхность твердосплавного режущего инструмента методом КИБ. Известно [1], что стойкость инструмента критически зависит от толщины покрытий – происходит падение стойкости при толщине меньше некоторого критического значения. Таким образом, даже если инструменты имели до осаждения покрытия одинаковый период стойкости, после осаждения может возникнуть разброс стойкости. В производстве подобный

разброс стойкости может серьезно повлиять на экономические показатели, усложняя организацию инструментального хозяйства [5]. Поэтому одной из задач исследования стойкости резцов с покрытием было определение зависимости стойкости от положения в камере при осаждении покрытия. Осаждение покрытия проводилось вакуумно-дуговым методом [6] на установке «Булат-б», схема расположения резцов в вакуумной камере и фотография оснастки приведены на рис. 1.

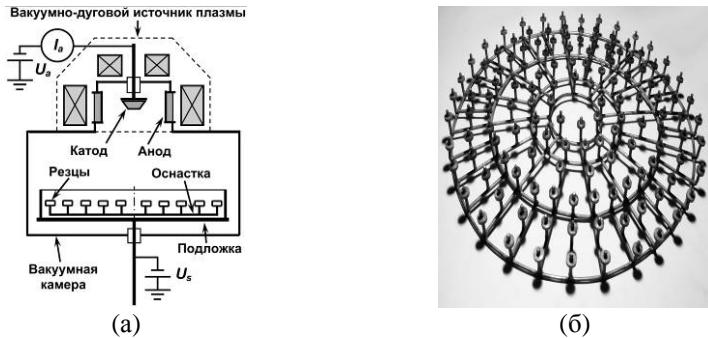


Рис. 1. Схема расположения резцов при осаждении покрытия (а) и фотография технологической оснастки для закрепления резцов (б)

При осаждении, подложка с пластинами располагалась на расстоянии 250 мм от выхода плазмовода перпендикулярно его оси.

Плазменно-ионной обработке подвергались сменные многогранные пластины с отверстием и стружколомающими канавками на одной стороне, изготовленные из твердого сплава марки Т15К6 (ГОСТ 3883-74, подгруппа применения ISO P10) и предназначенные для токарных проходных резцов.

Использовались пластины трех видов:

- пятигранной формы по ГОСТ 19065-80 – 10124-110416 (обозначение по ГОСТ 19042-80) или PNMM-110416 (обозначение по ISO) с длиной режущей кромки  $l = 11,5$  мм, толщиной  $s = 4,76$  мм и радиусом  $r = 1,6$  мм (масса  $m = 9,96$  г);
- квадратной формы по ГОСТ 19052-80 – 03124-150416 (ГОСТ 19042-80) или SNMM-150416 (ISO) с длиной режущей кромки  $l = 15,875$  мм, толщиной  $s = 4,76$  мм и радиусом  $r = 1,6$  мм (масса  $m = 11,2$  г), со стружколомающей канавкой типа 1;
- шестигранной формы с углом  $80^\circ$  по ГОСТ 19048-80 – 02114-080404 (ГОСТ 19042-80) или WNUM-080404 (ISO) с длиной режущей кромки  $l = 8,7$  мм, толщиной  $s = 4,76$  мм и радиусом  $r = 0,4$  мм (масса  $m = 7,57$  г).

Осаждение вакуумного ионно-плазменного покрытия производилось на следующих режимах:

- 1) ионная очистка в тлеющем разряде: давление  $P = 2,66$  Па, напряжение на подложке  $U_s = 1200$  В, время обработки  $t = 20$  минут;

2) ионная очистка в дуговом разряде ионами Ti: давление  $P = 6,65 \cdot 10^{-3}$  Па, напряжение на подложке  $U_s = 1000$  В, ток дуги  $I_a = 100$  А, ток стабилизирующей катушки  $I_f = 1,6$  А, ток фокусирующей катушки  $I_g = 0,6$  А, время обработки  $t = 6$  минут;

3) нанесение покрытия Ti: давление  $P = 6,65 \cdot 10^{-3}$  Па, напряжение на подложке  $U_s = 220$  В, ток дуги  $I_a = 100$  А, ток стабилизирующей катушки  $I_f = 1,6$  А, ток фокусирующей катушки  $I_g = 0,6$  А, время обработки  $t = 1,5$  минуты;

4) нанесение покрытия TiN: давление  $P = 0,13$  Па [7], напряжение на подложке  $U_s = 220$  В, ток дуги  $I_a = 100$  А, ток стабилизирующей катушки  $I_f = 1,6$  А, ток фокусирующей катушки  $I_g = 0,6$  А, время обработки  $t = 27$  минут, используемый газ – азот  $N_2$ .

Общее время плазменно-ионной обработки – 54,5 мин, из них время осаждения – 27 минут.

Стойкость режущего инструмента на износ исследовалась при токарной обработке коррозионностойкой, жаропрочной стали мартенситно-ферритного класса 14Х17Н2 (ЭИ268) [8]. С точки зрения механической обработки, этот материал относится ко второй группе труднообрабатываемых материалов: коррозионно-стойкие хромистые и сложнолегированные стали ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов [9].

Инструмент из твердого сплава марки Т15К6 рекомендуется для предварительной, получистовой и чистовой обработки этой группы сталей и сплавов при их прочности не более 1200 МПа и глубине резания не более 5 мм при подаче не более 0,3 мм/об [9]. Для закрепления пластин использовался резец сборный с многогранной пластиной с креплением клином, сечение державки резца  $25 \times 20$  мм<sup>2</sup> [9].

Обработка проводилась на токарно-винторезном станке модели 1К62 (мощность двигателя 10 кВт, ступенчатое регулирование частоты вращения шпинделя 12,5-2000 мин<sup>-1</sup>, продольной подачи 0,070-4,16 мм/об, поперечной подачи 0,035-2,08 мм/об).

Для механической обработки были выбраны следующие режимы обтачивания продольной подачей [9]:

- получистовая обработка: скорость резания  $V_p = 230$  м/мин, глубина резания  $t_p = 1,0$  мм при подаче  $s = 0,21$  мм/об;
- чистовая обработка: скорость резания  $V_p = 280$  м/мин, глубина резания  $t_p = 0,5$  мм при подаче  $s = 0,11$  мм/об.

Испытанию на износ подвергались пластины с покрытием одной партии осаждения. Зависимости износа для пластин, размещенных на расстоянии  $r = 40$  мм от центра подложки при осаждении, являются результатом усреднения по двум образцам пластины 10124-110416 и по трем образцам пластин 03124-150416 и 02114-080404; для  $r = 70, 100, 130$  и 160 мм - по трем образцам пластин каждого вида.

При определении износа использовался инструментальный микроскоп БМИ-1Ц с ценой деления 5 мкм. Зависимости износа  $h_3$  по главной задней

поверхности твердосплавных режущих пластин без покрытия и с покрытием, представлены на рис. 2 – для пластин пятигранной формы, рис. 3 – для пластин квадратной формы, и рис. 4 – для пластин шестиугольной формы. Критериями износа режущих пластин для операций получистовой и чистовой обработки были выбраны износ по задней поверхности резца 0,4 мм и 0,3 мм, соответственно [9].

Наиболее высокая стойкость для резцов без покрытия при получистовой обработке наблюдается у пластин квадратной формы – 12 минут, примерно такая же – 11,5 минут, - у пластин шестиугольной формы, и в 1,3 раза меньшая – 9 минут, - у пластин пятигранной формы. Таким образом, для главного угла в плане  $\varphi = 45\text{--}50^\circ$  условия резания практически одинаковы, однако, при уменьшении  $\varphi$  до  $36^\circ$  (пластины пятигранной формы), условия резания ухудшаются. При этом отмечено значительное действие сходящей стружки на вспомогательную режущую кромку пластины, результатом чего является ее износ. Для чистовой обработки тенденция сохраняется – лучшие результаты показали пластины квадратной и шестиугольной формы (8,3 и 8 минут, соответственно), в то время как стойкость пятиугольных режущих пластин составила 6,4 минуты (в 1,3 раза меньше).

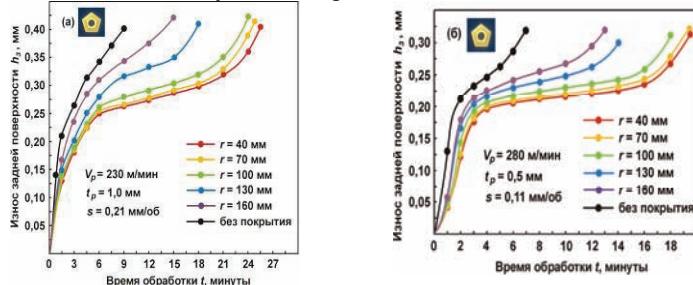


Рис. 2. Зависимость износа  $h_3$  твердосплавных режущих пластин пятиугольной формы при обработке: (а) – получистовой; (б) – чистовой

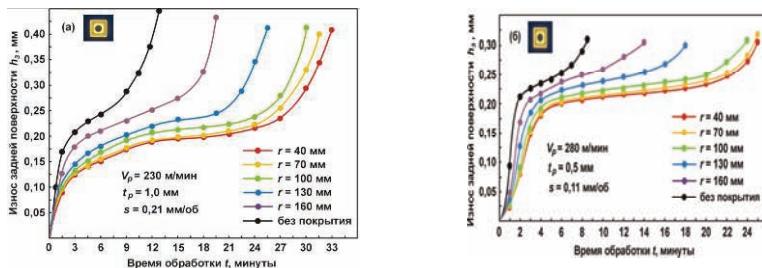


Рис. 3. Зависимость износа  $h_3$  твердосплавных режущих пластин квадратной формы при обработке: (а) – получистовой; (б) – чистовой

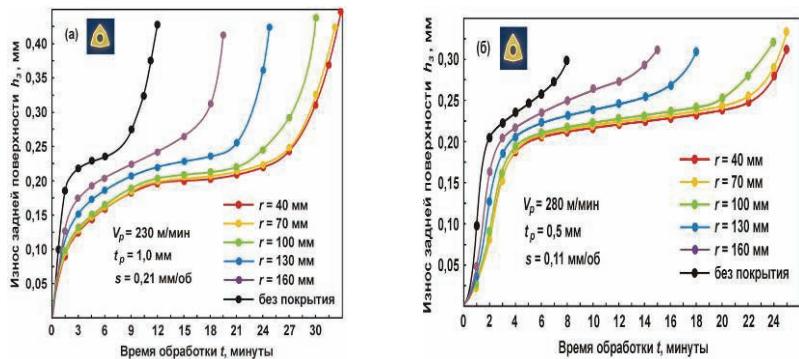


Рис. 4. Зависимость износа  $h_3$  твердосплавных режущих пластин шестиугольной формы при обработке: (а) – получистовой; (б) – чистовой

Основной износ резцов с покрытием происходил по главной задней поверхности. Хотя на передней поверхности отмечено возникновение и развитие лунки износа, этот процесс не является доминирующим. В целом, покрытие позволяет существенно повысить стойкость инструмента. Так, при получистовой обработке, наибольшая стойкость пластин квадратной формы составляла 33 минуты и была увеличена в 2,8 раз по сравнению с аналогичной пластиной без покрытия. Наибольшая стойкость пластин шестиугольной формы составляла 32 минуты и была также увеличена в 2,8 раз по сравнению с пластиной без покрытия. Подобные результаты – 25,5 минут и 2,8 раза – наблюдаются и для пластин пятиугольной формы. При чистовой обработке, наибольшая стойкость пластин квадратной формы – 25 минут, - соответствует увеличению в 3 раза, наибольшая стойкость пластин шестиугольной формы – 24,8 минуты, - соответствует увеличению в 3,1 раза, а наибольшая стойкость пластин пятиугольной формы – 19,2 минуты, - соответствует увеличению в 2,1 раза.

Как видно, на операциях получистового точения наблюдаются примерно одинаковые результаты для пластин квадратной и шестиугольной и пятиугольной формы (увеличение стойкости в 2,8 раза). В то же время, для операций чистового точения отмечено большее относительное увеличение стойкости инструмента (в 3,0-3,1 раза) для резцов квадратной и шестиугольной формы, и значительно меньший рост стойкости (в 2,1 раза) для резцов пятиугольной формы.

Кроме того, важным результатом является существенная неравномерность распределения стойкости инструментов с покрытием, в зависимости от расположения образцов относительно центра подложки в вакуумной камере при осаждении покрытия. Для всех пластин, наибольшую стойкость имеют образцы, расположенные наиболее близко к центру подложки ( $r = 40 \text{ мм}$ ), наименьшую – расположенные на наибольшем

удалении ( $r = 160$  мм). Падение стойкости пластины с покрытием на этом промежутке составляет 42 %.

Полученные результаты по величине и характеру износа можно объяснить следующим образом [1]. Стойкость твердосплавных инструментов возрастает при осаждении покрытия, поскольку, во-первых, покрытие снижает адгезионное взаимодействие инструмента с обрабатываемым материалом, в результате чего уменьшается интенсивность адгезионного изнашивания, и, во-вторых, покрытие является эффективным диффузионным барьером, которое препятствует диффузии кобальтовой связки в стружку и последующему удалению твердого сплава. Покрытие на передней поверхности также снижает адгезионное взаимодействие со стружкой и снижает максимальные нормальные напряжения. Что касается неравномерности распределения стойкости покрытия, то, вероятнее всего, она вызвана неодинакостью толщины покрытий, осажденных в разных областях подложки, причиной чего является распределение плотности обрабатывающего ионного потока, присущее вакуумно-дуговому источнику плазмы. Подобная зависимость стойкости от толщины покрытия на твердосплавных инструментах отмечалась и ранее [10]. Таким образом, проведенное исследование показало необходимость разработки специальных устройств, которые позволяют управлять распределением плотности обрабатывающего ионного потока от вакуумно-дугового источника плазмы. Подобные устройства позволили бы устранить разброс стойкости инструмента после плазменно-ионной обработки и повысить производительность процесса осаждения покрытия за счет увеличения количества одновременно обрабатываемых инструментов.

**Список литературы 1.** Внуков Ю.Н. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Ю.Н. Внуков. – Киев: Техника, 1992. – 143 с. **2.** Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. - М.: Машиностроение, 1993. – 336 с. **3.** Костюк Г.И. Идеология построения системного подхода, учета законов и закономерностей развития техники при создании гибких технологических систем высокой и сверхвысокой производительности на Украине / Г.И. Костюк, О.О. Баранов, Н.Н. Бычок // Вісті Академії інженерних наук України. – Вип. 3 (33). - Київ, 2007. - С. 112 – 125. **4.** А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с. **5.** Матлахов В.П. Зависимость физико-механических свойств нитрид-титановых покрытий от давления азота / В.П. Матлахов // Вестник Брянского государственного технического университета. - 2006. - №2(10). - С. 93 – 96. **6.** Стали и сплавы. Марочник: справ. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев и др. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с. **7.** Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справ. / Я.Л. Гуревич, М.В. Горюхов, В.И. Захаров и др. – М.: Машиностроение, 1986. - 240 с. **8.** Верещака А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака, И.П. Третьяков. – М.: Машиностроение, 1986. – 192 с.

Поступила в редакцию 06.07.2011

**A.B. ФАДЕЕВ**, канд. техн. наук, НТУ «ХПІ», м. Харків

## АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ КОРПОРАТИВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

**Анотація:** У статті розглянута задача управління розвитком підприємства, для чого було побудовано мультиплікативну модель декомпозиції динамічного ряду обраного показника.

**Аннотация:** В статье рассмотрена задача управления развитием предприятия, для чего была построена мультипликативная модель декомпозиции динамического ряда выбранного показателя.

**Annotation.** In this article I consider the problem of development management company, which was built multiplicative decomposition model of dynamic range chosen indicators.

Відмінною рисою кінця ХХ - початку ХХІ століття виступають процеси прогресуючої глобалізації, які поступово стирають регіональні і національні межі, формуючи єдиний інтегрований ринковий простір, що характеризується наявністю коеволюційних ефектів. За цих умов розвиток підприємств, залежить не стільки від їх внутрішніх реальних і потенційних можливостей, скільки від впливів ринкового оточення, що динамічно змінюється та викликає до життя одне з найбільш гострих протиріч процесу розвитку систем - протиріччя між швидкістю змін зовнішнього середовища і швидкістю реакції підприємства на них. Дане протиріччя зумовлює виникнення проблеми управління розвитком підприємства, вирішення якого дозволяє забезпечити адаптацію підприємства в ринкове оточення на підставі встановлення адекватних цільових орієнтирів його розвитку і розробки системи управлінських впливів щодо регулювання поведінки підприємства в часі.

Проблема управління розвитком підприємства є актуальною не тільки у сучасних умовах кризи, а й у часи стабільності. Саме тому цьому питанню приділяється велика увага з боку дослідників.

Управління організацією в наш динамічний час являє собою складну працю, що неможливо виконати успішно, керуючись тільки простими вивченими формулами. Керівник повинен поєднувати розуміння загальних істин та вагомість багаточисельних варіацій, завдяки яким виникають відмінності.

Розвитком підприємства треба керувати: слід мати програму розвитку, систему контролю за її виконанням, а також кошти на реалізацію.[2]

Метою даної статті є дослідити тенденції розвитку підприємства та визначити можливі причини кризи у майбутньому. Базою дослідження було обрано корпорацію «Консалтингова група «Асторія», що налічує 7 основних організацій: ТОВ «Аудиторська фірма «Київ», ТОВ «Міжрегіональна аудиторська фірма «Успіх», ТОВ «МИР», АТ «Міраж», ТОВ «Надія», Універсальна товарна біржа «Зірка», які ведуть свою діяльність незалежно один від одного. Кожна з цих організацій надає різні види послуг: аудиторські, юридичні, торгові, біржові, консалтингові. Це дозволяє корпорації займати велику частку на ринку. Але останнім часом деякі з перерахованих організацій стали збитковими. Причинами цього можуть бути і зовнішні, і внутрішні обставини. Однак корпорація залишається на ринку консалтингових послуг одним з провідних підприємств, має хорошу репутацію і не втрачає постійних клієнтів.

З метою дослідження тенденцій розвитку була побудована мультиплікативна модель декомпозиції динамічного ряду виручки від реалізації консолідованого звіту корпорації.[1]

Мультиплікативна модель декомпозиції динамічного ряду має такий вигляд:

$$Y = T * C * S * R, \quad (1)$$

де  $Y$  - динамічний ряд досліджуваного показника (результативний показник в абсолютному вираженні);

$T$  - трендова складова;

$C$  - циклічна складова;

$S$  - сезонна складова;

$R$  - випадкова складова.

Побудова даної моделі починається з визначення трендової складової  $T$ :

$$T = a + b * X_i, \quad (2)$$

де  $X_i$  - номери кварталів;

$a$ ,  $b$  - параметри моделі, які визначаються за допомогою методу найменших квадратів на підставі системи нормальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y}_i = a^*N + b^*\bar{x}_i \\ \bar{(y^*x)} = a^*\bar{x}_i = b^*\bar{x}_i^2 \end{array} \right. , \quad (3)$$

де  $y_i$  – центрована ковзка середня (СМА);

$N$  - кількість спостережень;

$x_i$  – номери кварталів;

$a, b$  - обчислюємі параметри.

Для рішення системи рівнянь заповнимо таблицю 1.

Таблиця 1

Розрахунок даних для рішення системи рівнянь

X	Y	Y*X	X^2
1	230,76625	230,76625	1
2	235,145	470,29	4
3	239,415	718,245	9
4	245,38625	981,545	16
5	245,8	1229	25
6	240,15	1440,9	36
7	234,5925	1642,1475	49
8	227,955	1823,64	64
9	224,2225	2018,0025	81
10	224,0825	2240,825	100
11	223,78	2461,58	121
12	223,6075	2683,29	144
13	226,1525	2939,9825	169
14	230,67625	3229,4675	196
15	233,95	3509,25	225
16	239,27625	3828,42	256
17	236,14375	4014,44375	289
18	222,46625	4004,3925	324
19	210,5	3999,5	361
20	195,315	3906,3	400
21	186,435	3915,135	441
22	187,37	4122,14	484
23	188,1	4326,3	529
24	190,3025	4567,26	576
25	193,44	4836	625
26	196,2625	5102,825	676
27	202,1975	5459,3325	729
28	205,4375	5752,25	784
406	6138,9275	85453,23	7714

На підставі отриманих даних розв'яжемо систему рівнянь:

$$6138,9275 = a * 28 + b * 406$$

$$85453,23 = a * 406 + b * 7714$$

$$a = 2660,01$$

$$b = 188,61$$

Занесши отримані значення у формулу трендової складової, обчислюємо значення Т для кожного з аналізуемых кварталів. Для узагальнення цієї та наступної складової результати розрахунків будемо представляти у вигляді таблиці (табл. 2).

На підставі отриманих значень центрованої ковзкої середньої і тренда побудуємо кореляційне поле для більш наглядного подання результатів (рис. 1).

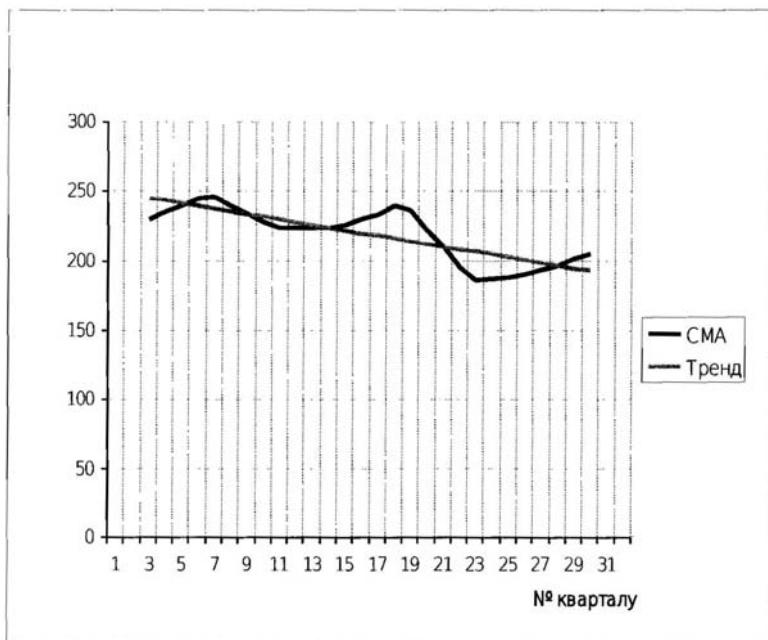


Рис. 1. Кореляційне поле

Розрахунок даних для побудови мультиплікативної моделі декомпозиції динамічного ряду виручки від реалізації ТОВ «АФ «Харків»

Таблиця 2

Рік	Квартал	Виручка від реалізації	Ковзанка середня	Центрована ковзанка середня (CMA)	Коефіцієнт зміни виручки від реалізації (K)	Третя (T)	Циклична складова (C)	Випадкова складова (R)
2003	1	228,17	-	-	-	-	-	-
	2	231,3	230,76625	0,987579423	245,561	0,939751223	0,993897972	
	3	227,9	235,145	0,939259797	243,612	0,965243912	0,963736978	
	4	225,33	239,415	1,0392617401	241,663	0,990669779	1,034482346	
2004	1	248,9	245,38625	1,000871076	239,714	1,023662573	1,005543813	
	2	245,6	245,8	1,007973963	237,765	1,033793872	1,014422996	
	3	247,76	240,15	1,054507599	235,816	1,018378736	1,06053491	
	4	253,34	234,5925	0,956126648	233,867	1,003102191	0,951463297	
2005	1	224,3	227,955	0,987036915	231,918	0,982912064	0,991645066	
	2	225	223,9	224,2225	0,998561697	229,969	0,975011849	1,004950511
	3	224	224,0825	0,999631832	228,02	1,002731778	1,005343486	
	4	223,68	223,78	0,999553133	226,071	0,9898666016	0,994615874	
2006	1	224,5	223,6075	1,0033991369	224,122	0,997704375	1,008678674	
	2	221,98	226,1525	0,981551006	222,173	1,017911717	0,987830033	
	3	224,54	230,67625	0,973398865	220,224	1,047461902	0,978962578	
	4	243,5	233,95	1,0408270688	218,275	1,07181308	1,03567959	
2007	1	240,87	239,27625	1,006660711	216,326	1,016091039	1,011360479	
	2	231,8	236,14375	0,981605484	214,377	1,101534913	0,987885812	
	3	257,33	222,46625	1,156714783	212,428	1,04754835	1,163326284	
	4	185,65	210,5	0,881947743	210,479	1,000099772	0,877591393	
2008	1	189,3	195,315	0,9692031594	208,53	0,936627823	0,973728487	
	2	187,64	186,435	1,006463379	206,581	0,902478931	1,01292748	
	3	180,01	187,37	0,960719432	204,632	0,9115643692	0,966210672	
	4	191,93	188,1	1,02036151	202,683	0,928050206	1,0153321469	
2009	1	190,5	190,3025	1,001037821	200,734	0,948033218	1,005711338	
	2	192,28	193,44	0,994003309	198,785	0,973111653	1,000362958	
	3	192,99	202,1975	0,98325903	196,836	0,997086407	0,988496356	
	4	204,05	205,4375	1,009161834	194,887	1,037511481	1,004177114	
2010	1	200,96	-	0,97820505	192,938	1,064778506	0,982771968	
	2	229,3	-	-	-	-	-	
	3	181,89	-	-	-	-	-	
	4	181,89	-	-	-	-	-	

Отриманий тренд дає можливість згладити вплив різних несуттєвих факторів і виявляє негативну спадну тенденцію виручки від реалізації корпорації у період 2003-2010 років.

На наступному етапі визначимо циклічну складову С:

$$C = CMA / T \quad (4)$$

Результати представлені в табл. 2.

На підставі отриманих даних будуємо графік (рис. 2).

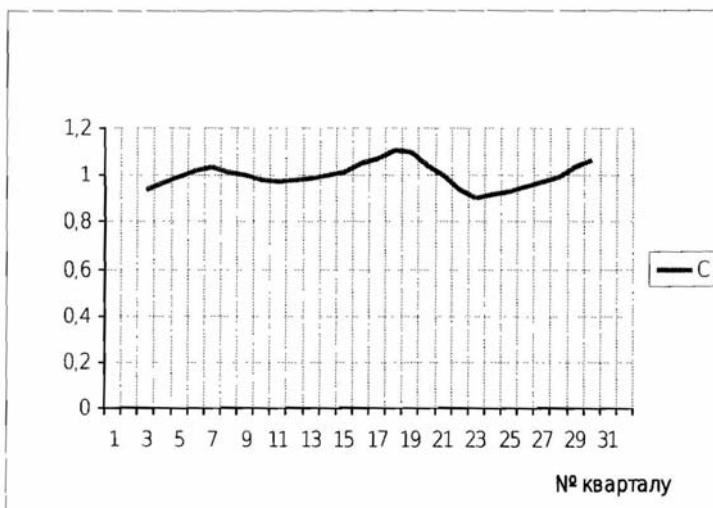


Рис. 2. Тенденції зміни циклічної складової

Перед сезонною складовою визначається коефіцієнт зміни вихідного показника, тобто виручки від реалізації (табл. 2):

$$K_i = \text{Виручка від реалізації} / \text{СМА} \quad (5)$$

На підставі отриманих даних для визначення сезонної складової складемо наступну таблицю (табл. 3):

Таблиця 3

## Виявлення сезонної складової

	I	II	III	IV
2003	-	-	0,98757942	0,958259797
2004	1,039617401	1,000871076	1,00797396	1,054507599
2005	0,956126048	0,987036915	0,9985617	0,999631832
2006	0,999553133	1,003991369	0,98155006	0,973398865
2007	1,040820688	1,006660711	0,98160548	1,156714783
2008	0,881947743	0,969203594	1,006463379	0,960719432
2009	1,02036151	1,001037821	0,994003309	0,983325903
2010	1,009161834	0,97820505	-	-
S <sub>кв</sub>	1,004963985	0,995353024	0,99364266	0,994316726

$$S_{\text{кв}} = [ \bar{K}_i - (\min K_i + \max K_i) ] / n \quad (6)$$

Значення  $n$  у цьому випадку беремо рівним 5, бо при розрахунку не враховуються найбільше й найменше значення для того, щоб уникнути випадкового впливу.

Далі розрахуємо останню з розглянутих складових - випадкову ( $R$ ):

$$R = K_i / S_{\text{кв}} \quad (7)$$

Отримані результати також були занесені до таблиці 2. Побудуємо графік зміни цієї складової (рис. 3).

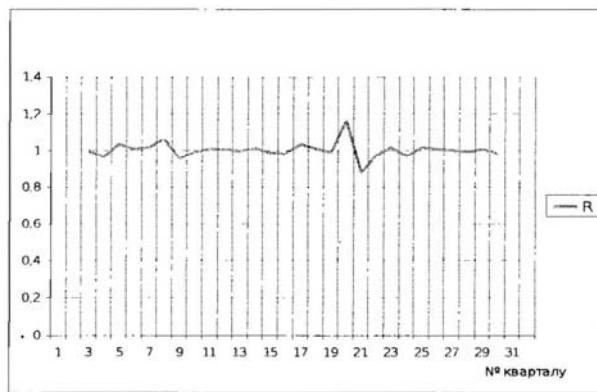


Рис. 3. Тенденції зміни випадкової складової

Таким чином був докладно розглянутий процес побудови моделі декомпозиції динамічного ряду виручки від реалізації продукції, товарів, робот, послуг корпорації «Консалтингова група «Асторія» за період 2003-2010 років. Основною метою було виявлення існуючого тренду та його формалізація для можливості прогнозування за інших рівних умов.

Прогнозування виручки від реалізації на період 2011-2018 років будемо також проводити в декілька етапів.

Для початку розрахуємо значення результативного показника (виручки від реалізації) з урахуванням впливу тренда за формулою 8:

$$Y_{\text{прогн}} = a + b * X_{\text{прогн}}, \quad (8)$$

де  $a$ ,  $b$  - розраховані раніше параметри рівняння.

Спираючись на отримані результати складемо таблицю (табл. 4) та будуємо графік (рис. 4).

Таблиця 4  
Прогнозні значення виручки від реалізації корпорації «Консалтингова група «Асторія» 2011-2018 року

$X_{\text{прогн}}$	$Y_{\text{прогн}T}$	$Y_{\text{прогн}TS}$	$Y_{\text{прогн}TSC}$
29	190,989	191,9370666	180,3731
30	189,04	188,1615357	181,6218
31	187,091	185,9015985	184,1723
32	185,142	184,0897873	188,4458
33	183,193	184,1023673	190,3239
34	181,244	180,4017635	183,7173
35	179,295	178,1551604	178,7078
36	177,346	176,3380941	173,3248
37	175,397	176,2676681	171,8631
38	173,448	172,6419913	169,6608
39	171,499	170,4087222	168,6818
40	169,55	168,586401	168,1994
41	167,601	168,4329689	171,4499
42	165,652	164,8822192	172,7078
43	163,703	162,6622841	174,3436
44	161,754	160,8347078	177,8978
45	159,805	160,5982696	176,9046

- - -

46	157,856	157,122447	164,5472
47	155,907	154,9158459	154,9313
48	153,958	153,0830146	143,3818
49	152,009	152,7635704	137,8659
50	150,06	149,3626748	136,763
51	148,111	147,1694077	136,5806
52	146,162	145,3313214	137,7789
53	144,213	144,9288712	141,032
54	142,264	141,6029026	141,1903
55	140,315	139,4229696	144,6529
56	138,366	137,5796282	146,4927

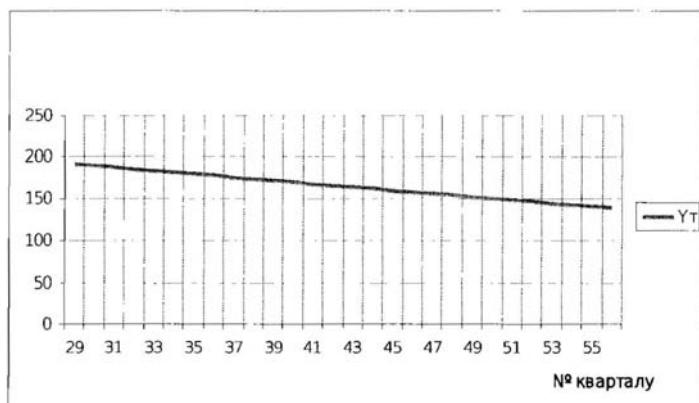


Рис. 4. Прогноз виручки від реалізації, враховуючи трендову складову

Отриманий результат ілюструє тенденцію до зниження розміру виручки від реалізації корпорації «Консалтингова група «Асторія» у найближчі 8 років. Однак на цей показник впливає досить велика кількість факторів. Виявимо вплив ще деяких з них.

Прогноз виручки від реалізації, враховуючи трендову і сезонну складові, визначимо за допомогою отриманих раніше (див. табл. 3) даних за формулою 9:

$$Y_{\text{прогн}TS} = Y_{\text{прогн}T} * S_{\text{кв}} \quad (9)$$

Результати занесені до таблиці 4. Відобразимо їх графічно (рис. 5).

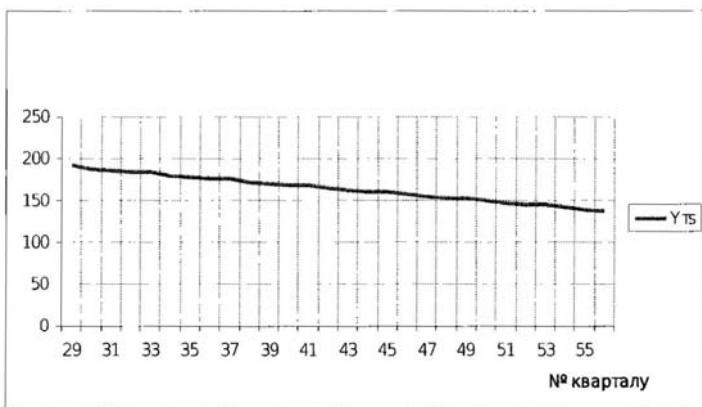


Рис. 5. Прогноз виручки від реалізації, враховуючи трендову і сезонну складові

Отже сезонна складова не змінила виявлений раніше тренд, що говорить невелику залежність досліджуваного підприємства від сезонного фактору.

На заключному етапі додаємо циклічну складову (табл. 4, рис. 6), розраховану за формулою 10:

$$Y_{\text{прогн}TS} = Y_{\text{прогн}TS} * C \quad (10)$$

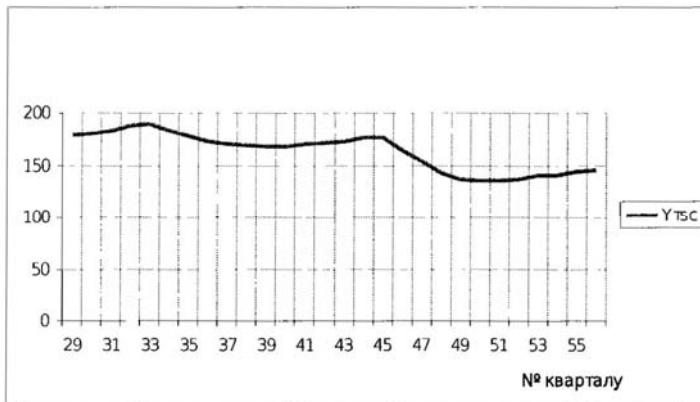


Рис 6. Прогноз виручки від реалізації, враховуючи трендову, сезонну та циклічну складові

Отриманий прогноз дає можливість звернути увагу на передбачувані успішні й невдалі періоди в діяльності корпорації «Консалтингова група «Асторія», а також, передбачати й запобігти негативним тенденціям.

У цілому прогноз негативний. Перші 4 роки - найбільш позитивні, тому що виручка від реалізації в цей період буде залишатися приблизно на одному рівні без значних коливань і, зокрема, до кінця 2011 року матиме найбільший за весь прогнозний період розмір. Але потім за інших незмінних умов очікується досить різке падіння. На цей період варто звернути особливу увагу. З метою запобігання кризи підприємству варто розробити стратегію, спрямовану на поповнення клієнтської бази або шукати альтернативні джерела доходу. Також велике значення має встановлення факторів, що спричинили настільки значимі втрати. Тільки за таких умов є можливість швидко й дієво їх усунути, а також уникнути в майбутньому подібних помилок.

Більш пильну увагу варто звернути на кінець 2018 року, тому що при правильному плануванні є реальна можливість вийти з депресивного проміжку. Однак отримані результати є лише прогнозом і з точністю стверджувати нічого не слід. Період 2012-2016 років повинен стати для корпорації «Консалтингова група «Асторія» періодом особливої уваги та пильності. Можливо, будуть необхідні кардинальні зміни або швидке вирішення непередбачених проблем. На передодні варто вжити заходів, спрямованих на зниження ризиків зазнати збитків, підготувати чітку стратегію роботи.

З метою дослідити тенденції розвитку було побудовано мультиплікативну модель декомпозиції динамічного ряду виручки від реалізації корпорації «Консалтингова група «Асторія». В результаті була виявленена негативна тенденція, яка за інших незмінних умов може привести підприємство до занепаду. Отримані результати підтверджують необхідність управління розвитком підприємства, необхідність мати програму розвитку, систему контролю за його виконанням, а також кошти на його реалізацію.

#### Література:

1. Азаренков Г. Ф. Економічний аналіз. Навчальний посібник. Ч.2. / Г. Ф. Азаренков, З. Ф. Петряєва, Г. Г. Хмеленко.– Харків: Вид. ХНЕУ, 2004. – 232 с.
2. Методологические основы управления потенциалом предприятия. Научное издание.– Харьков: Изд. ХНЭУ, 2004. – 216 с.

**В.А. ФАДЕЕВ, докт. техн. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков  
А.В. ЛОСЕВ, канд. техн. наук, НАУ «ХАИ», г. Харьков**

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ФИНИШНОЙ ОТДЕЛКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Проведен обзор существующих методов и оборудования для финишных отделочно-чистовых операций при обработке премиционных деталей ЛА. На основе анализа публикаций по теме установлено, что основным направлением развития этого класса технологии будет очистка поверхностей премиционных деталей от корпускулярных загрязнений. С учетом этого выделены методы, в наибольшей степени удовлетворяющие требованиям финишной обработки деталей премиционных механизмов ЛА. В качестве наиболее перспективного метода обоснован выбор термоимпульсного способа финишной очистки. Определены приоритетные задачи совершенствования термоимпульсного оборудования с учетом требований современного производства, использующего интегрированные CAD/CAE-системы.

**Ключевые слова:** премиционные детали, финишная обработка, микрочастицы, термоимпульсная очистка, математическое моделирование CAD/CAE-систем.

### Введение

В последние годы в авиационно-космической промышленности четко обозначилась тенденция повышения требований к качеству деталей, полученных путем механообработки. Это оказывает существенное влияние не только на совершенствование процессов изготовления деталей, но и на оптимизацию их финишной отделки и очистки.

В последнее время в связи с миниатюризацией узлов, внедрением высокоточных электронно-механических механизмов, увеличением количества входящих деталей и сложности сборки различного рода премиционных агрегатов ЛА все большее значение приобретают технологии очистки поверхностей от микрочастиц.

Особый интерес вызывают исследования, направленные на разработку автоматизированного оборудования для финишной обработки, методов научно обоснованного назначения режимов его работы и его интеграции в современное производство, комплексно использующего CAD/CAE - системы.

Поэтому целью настоящей работы является определение тенденций развития технологий финишной обработки, а также путей совершенствования методов очистки премиционных деталей ЛА с учетом требований современного производства.

### Тенденции развития финишной технологий обработки

Исследования в области выяснения механизмов образования заусенцев при механообработке и раз-

работке оборудования для их удаления начали интенсивно проводиться с 1970-х годов. До этого времени было известно и применялось на практике только 17 из существующих на сегодня 120 методов удаления заусенцев, более 90% из всех публикаций в области механизмов образования и их удаления были написаны после 1989 года [1].

Факторами, оказавшими основное влияние на развитие технологий и оборудования для удаления заусенцев и финишной отделки кромок, являлись:

- улучшение инструментов механообработки;
- повышение точности деталей;
- причины формирования заусенцев;
- минимизация и предотвращение заусенцев;
- планирование обработки по качеству кромок;
- разработка стандартов качества кромок;
- улучшение процессов удаления заусенцев.

Первые два фактора показывают, насколько внедрение новых технологий может зависеть от субъективных обстоятельств. Дело в том, что довольно долго необходимость финишной обработки кромок отверглась промышленностью. Необходимость замены инструмента по причине того, что он формирует все более крупные заусенцы, не была очевидной из-за кажущейся дороговизны. Ситуация радикально переменилась с массовым распространением инструмента со сменными твердосплавными пластинами, когда такая замена значительно удешевилась и уже не вызывала отторжения.

Повышение требований к точности деталей также привело к изменению отношения к проблеме очистки кромок - даже небольшие заусенцы при ужесточении допусков могли создавать проблемы

при сборке, а при эксплуатации приводить к повышенному износу или даже заклиниванию предCISIONНЫХ пар.

Параллельно интенсивно развивались исследования в области влияния качества финишной отделки кромок на эксплуатационные характеристики механизмов. Так, например, внедрение рекомендаций исследовательской группы Takagawa по качеству кромок, позволили поднять объемный КПД кондиционеров на 5 ... 15% [2]. Впоследствии была установлена связь качества финишной отделки кромок с ресурсными характеристиками и на сегодняшний день необходимость этих операций принята промышленностью и подтверждена соответствующими стандартами.

Исследования механизмов образования заусенцев и возможностей их минимизации были начаты в начале 70-х годов в СЦПА (Cillespie [3]), Германии (Schafer [4]) и Японии (Takazawa [5]). Наибольших результатов в области описания условий возникновения заусенцев на основе численного моделирования добился исследовательский коллектив Университета Беркли (Domfeld и группа CODEF).

На рис.1 в качестве примера приведены результаты моделирования образования заусенца при сверлении, выполненного исследовательской группой CODEF [6].

Стратегия в этом направлении заключалась в лозунге: "Если у Вас нет заусенцев, Вам не нужно их удалять". Конечно, такая цель является идеализированной, так как полностью избавиться от заусенцев в процессах механообработки невозможно. Однако, принцип предотвращения образования заусенцев в труднодоступных местах, пере нося их в процессе обработки на внешние кромки, с которых они могут быть легко удалены, минимизация величины заусенцев - эти направления совершенствования процессов изготовления механообработки оказались вполне успешными.

В качестве примера, на рис. 2 приведены результаты исследований, полученные для оптимизации траектории инструмента с целью уменьшения величины заусенцев на кромках при торцевом высокоскоростном фрезеровании, на основании алгоритма, предложенного в [7] (CODEF).

На рис. 3 приведены фотографии кромок обработанной детали для двух траекторий фрезы, представленных на рис. 2. Результаты были получены при одинаковых режимах резания одинаковыми фрезами. Из-за увеличения длины пути инструмента, время фрезерования в оптимизированном варианте увеличилось с 4,7 до 5,3 сек [8].

Такое увеличение времени обработки выглядит совершенно незначительным, особенно с учетом

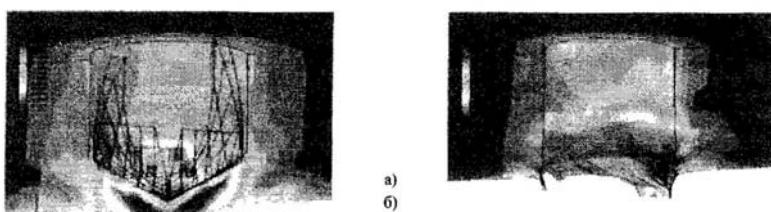


Рис. 1. Стадии формирования заусенца при сверлении (МКЭ моделирование):  
а) - начало выхода сверла; б) - окончательный вид заусенца

В результате проведения численного моделирования и факторных экспериментов были установлены зависимости для оценки величины заусенцев с учетом материала детали, режимов обработки, характеристик инструмента. На основе этих результатов CODEF заявила о разработке экспертной WEB системы для прогнозирования места, типа и размеров заусенцев при различных видах обработки (следует заметить, что попытки авторов воспользоваться этой системой окончились безрезультатно - портал не работает, поэтому скорее на сегодня можно говорить о попытке создания такого сервиса).

Выяснение механизмов образования заусенцев дало возможность управлять процессом их образования.

существенно сокращения длительности финишной отделки кромок из-за практически устранивших заусенцев на детали. Акцентируем внимание на том, что для рассматриваемого примера обработка кромок все еще необходима исходя из заданного их качества.

Создание стандартов, связанных с качеством кромок - еще одна задача, которая решалась совместными усилиями исследователей, промышленности и государственных. В этом направлении достигнуты определенные успехи, хотя введенны до настоящего времени стандарты касаются терминов, связанных с отделкой кромок [9]. Ряд фирм выпустили корпоративные стандарты качества кромок. Япония,

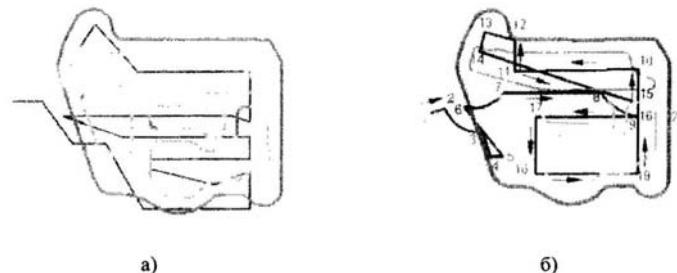


Рис.2. Результаты оптимизации траектории инструмента по критерию размера заусенцев [8]:  
а) - исходная траектория фрезы; б) - траектория после оптимизации



Рис.3. Виды кромок детали после оптимизации траектории (согласно рис.2) [8]

КНР, Южная Корея и Германия готовят международный стандарт, который должен быть введен в ближайшее время.

Известно о работах по подготовке государственного стандарта, ведущихся в США. эта работа осложняется тем, что как указывает Gillespie [10] из 42 недостатков детали, которых пользователь хотел бы избежать, 39 присутствуют на кромках и выбор метрик качества кромки не так прост.

К сожалению, следует отметить, что вопросы обеспечения качества кромок, а тем более очистки поверхностей от микрочастиц в отечественном машиностроении зачастую просто игнорируются, что оказывает непосредственное влияние на конкурентоспособность его продукции. Особенно это проявляется в моторостроении, производстве топливной аппаратуры, арматуры гидравлических и пневматических систем, продукции точного машиностроения.

Невнимание к вопросам обоснованного выбора и обеспечения качества кромок распространено и в авиационно-космической промышленности. Так, например, считается необязательной обработка поверхностей после электроискровой и лазерной обра-

ботки на современных станках с ЧПУ. Для того чтобы показать ошибочность таких представлений, приведем данные одного из ведущих производителей оборудования для финишной обработки прецизионных деталей - фирмы Extrude Hone (США).

В рекламных материалах фирмы приводятся результаты измерения коэффициентов расхода в топливных форсунках с отверстиями, полученные методом электроискровым методом без финишной обработки и с обработкой на экструзионно-абразивном оборудовании, выпускаемом фирмой. Прецизионное профилирование отверстия после финишной обработки повышает точность обеспечения массового расхода с  $\pm 6\%$  до  $\pm 1\%$ , а с этой характеристикой непосредственно связана топливная эффективность двигателя.

Как уже отмечалось выше, на сегодняшний день известно около 120 методов удаления заусенцев и финишной обработки кромок. К 2000 году в мире существовало около 1000 фирм, производящих оборудование для этих целей или предлагающих услуги, связанные с финишной обработкой.

Общей чертой современного оборудования для

финишной обработки прецизионных деталей является наличие систем ЧПУ (рис. 4), гибкость, быстрая перенастройка. В целом существующее оборудование позволяет проводить эффективную обработку кромок практически всей номенклатуры деталей машиностроения.

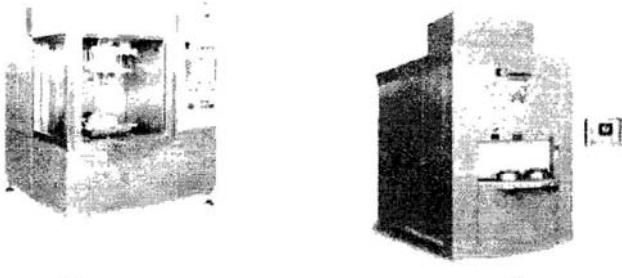


Рис.4. Современное автоматизированное оборудование установки для финишной обработки:  
а) - установка для электрохимической обработки фирмы Extrude Hone (США);  
б) - установка для термохимической обработки фирмы BOSH (ФРГ)

Для прецизионных деталей ЛА характерны глубокие отверстия малых диаметров ( $0,4 \dots 1,5$  мм), пересекающиеся каналы с расточками и карманами. Дополнительные трудности при обработке вызывают высокие требования к точности их изготовления.

Типичными для таких деталей являются отклонения от геометрической формы прецизионных пар -  $1 \dots 3$  мкм; допуск на зазор в пределах  $2 \dots 4$  мкм; шероховатость от  $3,2 \dots 0,8$  мкм для соединительных каналов и до  $0,04$  мкм для плунжерных золотниковых пар и др. Для их изготовления используются высоколегированные сплавы и стали, алюминиевые сплавы, имеющие различную твердость. В конструкции прецизионных деталей все чаще

применяются сразу несколько материалов (биметаллические детали, составные корпусные детали).

Из-за таких конструктивных особенностей для финишной обработки прецизионных деталей ЛА может применяться только несколько из разработанных на сегодня методов. В таблице 1 приведены сравнительные возможности этих методов для выполнения некоторых задач, характерных при изготовлении высокоточных деталей ЛА.

Анализ этих данных показывает, что выполнение полного комплекса операций по финишной отделке прецизионных деталей ЛА каким-либо одним

Таблица 1

Сравнительная характеристика методов финишной отделки прецизионных деталей ЛА

Типичные операции при финишной обработке прецизионных деталей ЛА	Экс-трущивнико-абразивный	Магнитно-абразивный	Термохимический	Электрохимический	Термийный
Очистка внутренних поверхностей (включая пересекающиеся отверстия)	*		*		*
Управление углом и радиусом кромки отверстий ( $\varnothing 1,5$ мм)	*		*	*	*
Управление углом и радиусом кромки отверстий ( $\varnothing < 1,5$ мм)	*			*	*
Формирование профиля отверстий для управления расходом					
Финишная обработка отверстий ( $\varnothing < 0,4$ мм)					
Очистка криволинейных и фасонных поверхностей			*	*	*
Очистка глухих отверстий					*
Финишная обработка сквозных отверстий ( $\varnothing > 5$ )	*				*
Удаление оплавленных слоев после лазерной и электроискровой обработки	*	*		*	
Финишная обработка прецизионных поверхностей		*		*	*

из представленных методов, невозможна. Однако вряд ли можно представить себе деталь, для которой требуется выполнение всех операций, упомянутых в табл.1.

Наибольшее количество операций (7 из 10) может быть выполнено термоимпульсным и экструзионно-абразивным методом. Их комбинация покрывает все перечисленные операции за исключением обработки сверхмалых отверстий, для которой необходимо специализированное оборудование.

В связи с уже упоминавшейся тенденцией к миниатюризации узлов высокоточных механизмов, повышения сложности сборок и требований к точности входящих деталей все больший интерес стало вызывать еще одно направление финишной отделки - очистка поверхностей от корпускулярных загрязнений (микро частиц, микрозаусенцев, молекулярных загрязнений и т.п.).

С учетом опыта развития технологий финишной обработки кромок, в настоящее время формулируются следующие направления исследований в этой области [11]:

- источники и механизм образования корпускулярных загрязнений;
- производственные и организационные меры их минимизации и предотвращения;
- разработка стандартов чистоты поверхности и средств метрологического оснащения;
- создание процессов и оборудования для очистки до заданного стандартами качества.

В качестве основного метода очистки поверхностей в настоящее время рассматривается воздействие потоком чистящей жидкости [12]. Такой метод весьма чувствителен к геометрии обрабатываемой детали, особенно для внутренних полостей и требует учета особенностей процесса очистки на самых ранних стадиях проектирования механизмов.

В настоящее время такие нормы проектирования существуют в виде самых общих рекомендаций, основанных на эмпирических данных. Группой CODEF планируется разработка инструментов автоматизированного проектирования процессов гидравлической очистки на основе моделирования процессов воздействия потока на загрязненную поверхность [11]. Дополнительной сложностью является влияние физико-химических, морфологических и механических свойств поверхности обрабатываемой детали на возможность перемещения и прилипания загрязняющих веществ при воздействии чистящей среды.

Исследования в области изучения механизмов образования микро частиц при механообработке находятся на самой ранней стадии. Однако, по некоторым образом, образование микро частиц неизбежно происходит при любых видах резания, включая обработку

абразивными частицами [13]. С этой точки зрения из всех методов, упомянутых в табл. 1 к образованию только два не приводят к дополнительным микrozагрязнениям при обработке - электрохимический и термоимпульсный метод.

Воздействие на деталь абразивными частицами, особенно при повышенных давлениях и скоростях несущего их потока, при обработке мягких материалов (алюминиевые сплавов, латуней) может привести к шаржированию поверхности (внедрению в нее абразивных микрочастиц).

Электрохимическая обработка позволяет удалить металлические микрочастицы, а термоимпульсная - микрочастицы любых материалов [13, 14]. С этой точки зрения термоимпульсный метод в наибольшей степени соответствует современным и вновь формирующимся требованиям по финишной отделке прецизионных деталей ЛА.

На основе приведенных данных, в качестве основных тенденций развития технологий финишной отделки прецизионных деталей можно выделить следующие:

1) для разработки технологий финишной отделки характерен системный подход, учитывающий основные факторы, определяющие качество обработки - изучение механизмов формирования заусенцев и загрязнений, разработку методов проектирования и производства с учетом требований их минимизации, создание стандартов качества, средств метрологического контроля, совершенствование технологии и оборудования для финишной отделки;

2) развитие оборудования для финишной отделки идет в направлении создания автоматизированных комплексов, для которых режимы обработки задаются на основе математического моделирования процессов изготовления деталей и данных специализированных экспертизы систем, среди которых в ближайшее время следует ожидать появления модулей, совместимых с наиболее распространенными CAD/CAM-системами;

3) в связи с ужесточением требований к точности деталей, входящих в прецизионные механизмы, к операциям финишной отделки будут выдвигаться все большие требования по управляемости процессов, установлению режимов обработки исходя из параметров качества кромок; следует ожидать появления требований, связанных с обеспечением разных параметров качества для различных кромок одной детали, что потребует создания более гибких процессов финишной отделки.

Дополнительные задачи, которые будут возникать в ближайшее время, могут быть связаны с разработкой технологий финишной обработки неметаллических деталей (из керамики, пластмасс, композиционных материалов).

## Перспективы развития термоимпульсной обработки

Термоимпульсный метод финишной отделки был предложен в конце 1970-х годов в Харьковском авиационном институте и являлся развитием термохимического метода, разработанного фирмой BOSH (ФРГ). При термохимической обработке удаление заусенцев на кромках происходит за счет сгорания в газовоздушной смеси с повышенным содержанием кислорода. Такой способ очистки не может применяться для обработки прецизионных деталей из-за осаждения на их поверхности окислов металла, возникающих при сгорании заусенцев (рис. 5,а), что требует дополнительного травления.

оборудования для финишной отделки может существенно улучшить технические характеристики продукции отечественного машиностроения. Тем не менее, оно до сих пор не получило распространения. Не рассматривая различные организационные причины, связанные с этим, отметим некоторые недостатки существующего термоимпульсного оборудования, которые сдерживают его внедрение:

1) подбор режимов обработки для каждого из видов деталей основывается на аналитических зависимостях, полученных при существенных допущениях, и требующих экспериментальной проверки; в условиях промышленного предприятия это требует больших затрат времени и ресурсов, что приводит к потере гибкости процесса;

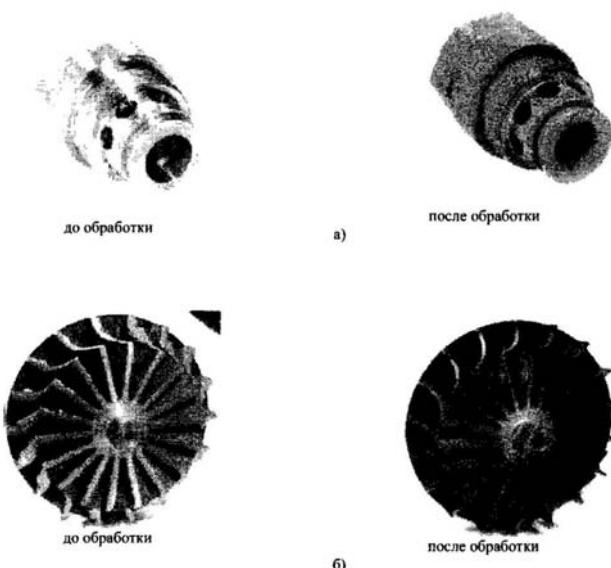


Рис.5. Детали, обработанные термическими методами:  
а) термохимическим; б) термоимпульсным

При термоимпульсной обработке удаление заусенцев и технологических загрязнений производится за счет быстротечного теплового воздействия высокой плотности. Часть топливной смеси сгорает в детонационном режиме, что приводит к резкой интенсификации процессов теплообмена между деталью и продуктами горения. Выпуск продуктов горения производится в горячем состоянии, поэтому окислы и удаленные материалы не осаждаются на обрабатываемых поверхностях (рис. 5,б). Имеется положительный опыт использования этих технологий на серийных заводах, в том числе для очистки прецизионных деталей ЛА [14].

Широкое использование термоимпульсного

2) применяющиеся в разработанных установках системы автоматики, исполнительные и измерительные устройства морально устарели, требуют настройки в ручном режиме, что не обеспечивает стабильности качества обработки.

для того, чтобы быть конкурентоспособным, новое поколение термоимпульсного оборудования должно соответствовать тенденциям развития технологий финишной обработки, сформулированным выше. Таким образом, можно сформулировать следующие задачи для развития финишных термоимпульсных технологий.

Необходима разработка математических моделей рабочего цикла термоимпульсной обработки и

создание на их основе метода автоматизированного проектирования технологических процессов в интегрированных CAD/CAE - системах. Соответствующее программное обеспечение должно быть совместимо по структуре данных с разрабатывающимися экспертными системами расчета величин заусенцев в зависимости от характеристик материала и режимов предшествующей обработки.

Необходимо радикально модернизировать системы дозирования энергии термоимпульсных установок, системы измерений и управления, для повышения точности дозирования энергии необходимо создать математические модели работы исполнительных механизмов этих систем. На основе результатов моделирования и сравнения их с данными экспериментов разработать системы ЧПУ для термоимпульсного оборудования.

Разработать и реализовать программу экспериментальных исследований по изучению новых технологических процессов термоимпульсной обработки, включая обработку деталей из пластмасс, керамических и композиционных материалов. Исследовать возможности повышения точности и управляемости термоимпульсных процессов финишной отделки.

## Выводы

1. Основными тенденциями развития оборудования финишной обработки прецизионных деталей являются создание автоматизированных комплексов, интегрированных со специализированными экспертными базами по определению размеров и места расположения заусенцев.

2. В ближайшее время к операциям финишной обработки будут ужесточаться требования по управляемости процессов, в том числе для обеспечения разных параметров качества для различных кромок одной детали, что потребует создания более гибких процессов финишной отделки.

3. В качестве наиболее перспективного метода финишной очистки обоснован выбор термоимпульсного метода. Определены приоритетные задачи его совершенствования с учетом требований современного производства, использующего интегрированные CAD/CAE -системы.

## Литература

1. Gillespie L. *Your burr technology efforts changed the world / L. Gillespie - Deburring Technology International Inc, 2009. - 37p.*
2. Takazawa K. *Design Principle and Manufacturing Technique for the Rotary Compressor of Room Air Conditioner / K. Takazawa // 5th International conference on deburring and surface finishin: r.thesis Kansas City, MO - Deburring technology international, 1998. - P.35.*
3. Gillespie L. *The Formation and properties of machining burrs: MS. Thesis / Gillespie LaRoux. - Utah State University, Logan, Utah, 1973. -140p.*
4. *Product design influences on deburring: Society of Manufacturing Engineers (SME): Technical paper: F. Schafer-Dearborn, 1975. -117p. -MR75-483.*
5. *Takazawa K. Burr Technology / K. Takazawa-Tokyo: Asakura Bookstore Company, 1980. - 230p.*
6. *Burr prevention and minimization for the aerospace industry. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 1999-2000. University of California, Berkeley. 2002. - P.4-9.*
7. *Optimization of the face milling process: tool path and tool design. Issues, Part 1. Algorithm and tool path design. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 2001-2002. University of California, Berkeley. 2002.- P.61-68.*
8. *Tool path planning in conjunction with exit order sequence. Laboratory for manufacturing automation. Research reports 2001-2002. University of California, Berkeley. 2002.- P.30-35.*
9. *DIN ISO 13715 Technical drawings - Edges of undefined shape - Vocabulary and indication on drawings (ISO 13715:2000).*
10. *Gillespie L. Mass Finishing Handbook/ L. Gillespie - New York City:Industrial Press, 2006. - 276p.*
11. *Avila M Strategies for burr minimization and cleanability in aerospace and automotive manufacturing / M Avila, J. Gardner, C. Reich-Weiser // SAE Transactions J. of Aerospace. - 2005. - 114 (1). P. 1073-1082.*
12. *Dornfeld D. Cleanability of mechanical components / D. Dornfeld, S. McMains, D. Arbelaez // Job of University of California, Berkeley. - 2008. - 12 p.*
13. *Лосев А.В. Повышение эффективности зачистки деталей пневматических и гидротягивных систем при использовании термоимпульсного метода: дис.... канд. техн. наук: 05.02.08; защищена 14.05.1995; утв. 07.10.1995 / Лосев Алексей Васильевич. -Х,1995. -210c.*
14. *Жданов А.А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностных деталей агрегатов авиационных двигателей: дис... канд. техн. наук: 05.07.04; защищена 25.01.2003; утв. 12.03.2003 / Жданов Александр Андреевич -Х, 2003. -120c.*

**B.B. ФРОЛОВ** канд. техн. наук., доц., НТУ «ХПИ», Харьков.

## РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В статье рассматривается подход к расчету технологических размерных цепей, который основан на совместном использовании генетического алгоритма и искусственной нейронной сети. Искусственная нейронная сеть используется для моделирования связанных технологических размерных цепей. Применение нейронной сети позволяет найти решение при самых неудачных сочетаниях точности размеров. Этот подход дает возможность оценить правильность маршрута обработки или подобрать допуска звеньев размерной цепи.

Ключевые слова: генетический алгоритм, нейронная сеть, размер, размерная цепь, технологическая операция

In a paper the approach to technological dimensional chains calculation which is grounded on sharing of genetic algorithm and a neural network is considered. The neural network is used for simulation of the linked technological dimensional chains. Application of a neural network allows discovering the decision at the most unsuccessful combinations of exactitude of the dimensions. This approach gives the chance to evaluate correctness of machining plan or to pick up the tolerance of links of a dimensional chain.

Keywords: genetic algorithm, neural network, dimension, dimensional chain, production operation

У статті розглядається підхід до розрахунку технологічних розмірних ланцюгів, що заснований на спільному використанні генетичного алгоритму та штучної нейронної мережі. Штучна нейронна мережа використовується для моделювання зв'язаніх технологічних розмірних ланцюгів. Застосування нейронної мережі дозволяє знайти рішення при самих невдалих сполученнях точності розмірів. Цей підхід дає можливість оцінити правильність маршруту обробки або підібрати допуску ланок розмірного ланцюга.

Ключові слова: генетичний алгоритм, нейронна мережа, розмір, розмірний ланцюг, технологічна операція

Технологические размерные расчеты выполняются на связанных размерных цепях, где один размер входит в несколько размерных цепей, описывающих размерные связи отдельных технологических операций. Основной проблемой при проектном расчете связанных размерных цепей является подбор допусков звена таким образом, чтобы они удовлетворяли всем размерным цепям, где присутствует данное звено. Решают данную задачу последовательным расчётом всех размерных цепей [1]. Данный подход часто приводит к тупиковым ситуациям, когда невозможно при заданном технологическом маршруте обработки детали получить точность размеров заданных чертежом, причём, чем в большее количество размерных цепей входит размер, тем сложнее найти разумное решение таким способом. Решение данной проблемы видится в использовании концепции мягких вычислений.

Сущность мягких вычислений состоит в том, что в отличие от традиционных, жестких вычислений, они нацелены на приспособление ко всеобъемлющей неточности реального мира. Руководящим принципом мягких вычислений является: «терпимость к неточности, неопределенности и частичной

истинности для достижения удобства манипулирования, робастности, низкой стоимости решения и лучшего согласия с реальностью».[2] Концепция мягких вычислений объединяет в себе нечеткую логику, искусственные нейронные сети (ИНС), генетические алгоритмы (ГА) и вероятностные вычисления. Расчет размерных цепей на основе ИНС предлагался автором в работе [3], а схема использования гибридного ГА для расчета размерных цепей – в работе [4]. Цель данной статьи – практическая реализация расчетов технологических размерных цепей на основе сочетания ГА и ИНС.

Рассмотрим особенности преобразования размерной цепи на примере обработки торцов ступенчатого валика. На рисунке 1 изображена модель валика, где черным выделены минимальные припуски на обработку торцов.

По нормативам, для такой точности осевых размеров необходимо однократное течение каждого торца валика. Максимальная величина припусков на каждом переходе и значения межоперационных размеров будут определяться маршрутом обработки. Для анализа маршрута обработки строим классическую размерную схему технологического процесса обработки торцов (см. рис. 2).

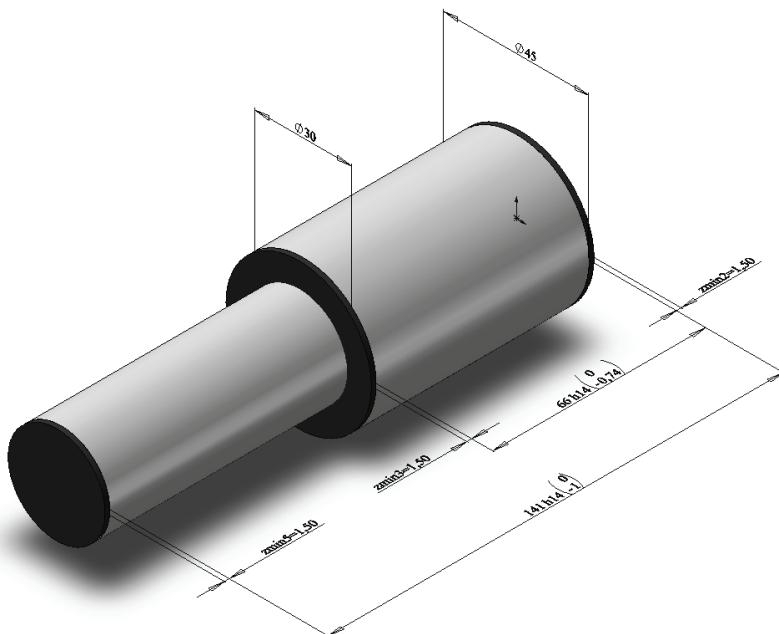


Рис. 1. Пространственная модель ступенчатого валика

Допуск припуска вычисляется по формуле 1:

$$Tz = z_{\max} - z_{\min}, \quad (1)$$

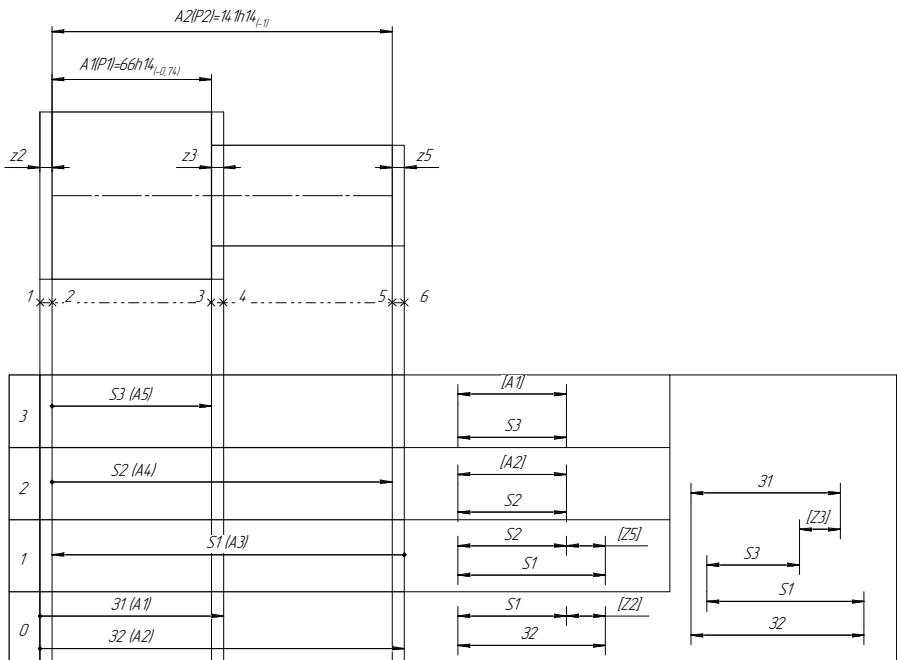


Рис. 2 Размерная схема технологического процесса

где  $T_z$  – допуск припуска;  $z_{\max}$  – максимальное значение припуска;  $z_{\min}$  – минимальное значение припуска, определяемое в зависимости от необходимой точности обработки поверхности. Для каждой размерной цепи выполняется условие 2

$$T_z = \sum_{i=1}^m T_i , \quad (2)$$

где  $T_i$  – допуска звеньев составляющих размерные цепи;  $m$  – количество звеньев размерной цепи. Подставим 1 в 2 и получим уравнение 3, которое легко можно преобразовать для использования в ИНС.

$$\left[ \sum_{i=1}^m T_i - (z_{\max} - z_{\min}) \right] \rightarrow \min \quad (3)$$

В результате, для размерной цепи 1 на рисунке 2 можно предложить использовать нейрон с линейной функцией активации, структура которого отражена на рисунке 3.

Для расчета припусков с помощью ИНС размерная схема технологического процесса преобразовывается в ИНС (см. рис. 4), состоящую из двух слоев: слой, содержащий нейроны для каждой размерной цепи; слой, содержащий один нейрон, где суммируются значения всех аксонов нейронов предыдущего слоя.

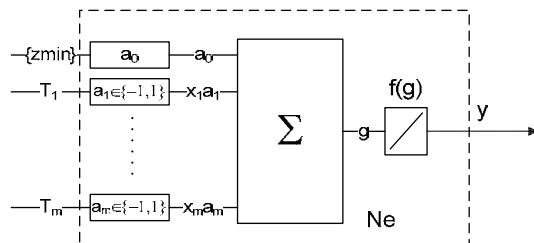


Рис. 3 Нейрон для расчета припусков

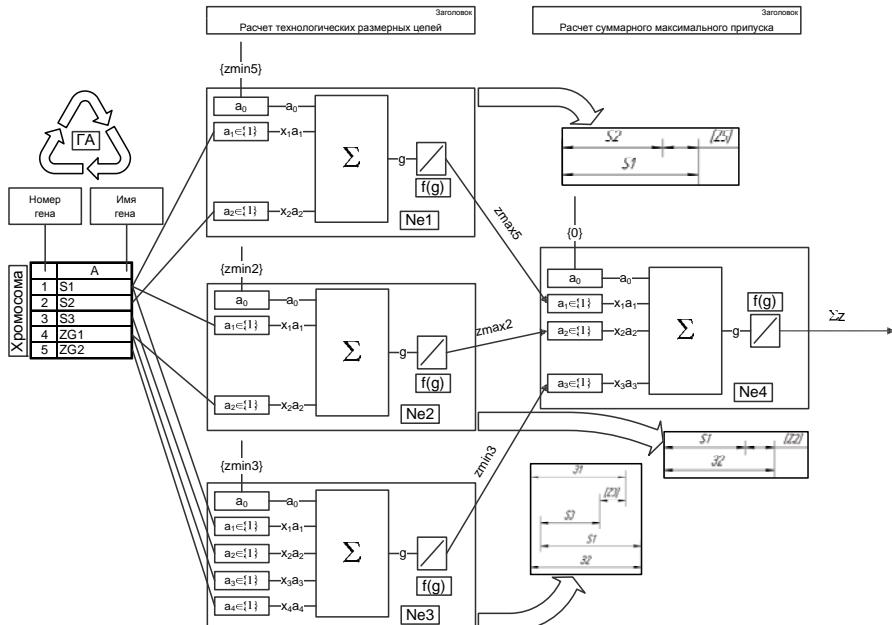


Рис. 4 ИНС для расчета технологических размерных цепей

На вход сети подается хромосома, состоящая из пяти генов, где значение каждого гена – допуск на размер соответствующей размерной цепи. Связи размерных цепей с отдельными нейронами (Ne1, Ne2, Ne3) первого слоя показаны стрелками на рисунке 4. Значения синапсов для каждого нейрона равны единице, поскольку данная сеть используется для подбора допусков, в противном случае значение синапса зависит от типа звена размерной цепи. Нейрон Ne4 во втором слое суммирует значения всех припусков на деталь. Таким образом, получаем целевую функцию, которая позволяет выполнить подбор допусков для каждого звена связанных размерных цепей. При формировании ИНС важно выявить зависимые звенья в наборе размерных цепей. Такая сеть может быть использована вместе с ГА в виде функции фитнесса. В зависимости от структуры хромосомы ИНС можно использовать в двух на-

правлениях. Первое – рекомендации по назначению допусков на составляющие звенья размерной цепи по операционным размерам с учетом точности обработки.

При этом предлагается вариант назначения допусков на размеры детали в зависимости от маршрута обработки. Второе – подбор допусков для межоперационных размеров при заданных значениях допусков размеров детали. На рисунке 4 изображена схема ИНС, соответствующая первому направлению. Для реализации второго направления хромосома должна содержать три гена ( $s_1, zg_1, zg_2$ ), которые определяются размерами, не зависящими от размеров детали (см. рис. 2). Количество входов сети, в этом случае, не изменяется, поскольку фиксированные допуска для  $s_2$  и  $s_3$  постоянно подаются на нужный вход нейрона.

ИНС реализуется с помощью Excel (см. рис. 5), где в виде функций пользователя добавлены алгоритмы, моделирующие нейроны с линейной функцией активации и нейроны с квадратичной функцией активации. Для формирования исходной модели проектирования разработана надстройка для Excel.

Функция фитнесса в виде ИНС										Программная реализация функции фитнесса и ограничений	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I		
1	S1	0.8	S1	0.8	1	2.6	2.6	1	9.6		
2	S2	0.3	S2	0.3	1	1.5	3	1	0		
3	S3	0.6	S1	0.8	1	3	4	1			
4	ZG1	0.7	ZG1	0.7	1	1.5					
5	ZG2	0.4	S1	0.8	1	4					
6		S3	0.6	1		1.5					
7		ZG1	0.7	1							
8		ZG2	0.4	1							
9	Имя	Гены	Цель	Входы	Веса	Аксон/Смещение	Входы	Веса	Аксон/Смещение		
Ограничения учитывающие особенности обработки											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0.8	1	S1	140	0.25	ИСТИНА	1	ИСТИНА	11	14	подрезание торца однократное
2	0.3		S2	140	0.25	ИСТИНА	1	ИСТИНА	11	14	подрезание торца однократное
3	0.5		S3	66	0.19	ИСТИНА	0.74	ИСТИНА	11	14	подрезание торца однократное
4	1		ZG1	66	0.74	ИСТИНА	3	ИСТИНА	14	17	заготовка
5	2		ZG2	140	1	ИСТИНА	4	ИСТИНА	14	17	заготовка
6			ИСТИНА			ИСТИНА		ИСТИНА			
7					min	max	min	max			метод обработки
8	ГЕНЫ	РЕЗУЛЬТАТ	ИМЯ	РАЗМЕР		УСЛОВИЯ					РАСШИРОВКА

Рис. 5 Программная реализация первого подхода

Здесь диапазон ячеек от B1 до B5 предназначен для ввода значений генов, которые генерируются ГА. Ячейки от D1 до D7 – входы ИНС, представленной на рисунке 4. Синаптические веса постоянны и вводятся в ячейки от E1 до E7. Начальное состояние каждого нейрона представляется в виде минимального припуска в ячейках F2, F4, F6. Функция активации нейронов располагается в ячейках F1, F3, F5. Второй слой сети реализуется в столбцах G – I. Ограничения, накладываемые методами обработки, записываются в специальный файл электронных таблиц. Для работы ГА формируется информационная модель комбинаторно – оптимизационного проектирования в формате XML (см. рис. 6). Модель состоит из двух разделов:

- Генетический алгоритм (galgorithm)
- Хромосома начального приближения (mcequipment).

```

<?xml version="1.0" ?>
- <model name="VAL001">
- <galgorithm type="1" parallel="1">
- <properties>
+ <level num="1">
</properties>
- <fitness>
- <level num="1" type="4">
<file>GACMAIN.xls$NET$B1:B5$1</file>
</level>
</fitness>
- <limitations>
- <level num="1" type="4">
<file>LICMAIN.xls$LIM$A1:A5$B1</file>
</level>
</limitations>
- <chromosome>
- <level num="1">
+ <gene num="1" name="S1" max="12" min="1" lgen="4">
+ <gene num="2" name="S2" max="12" min="1" lgen="4">
+ <gene num="3" name="S3" max="12" min="1" lgen="4">
+ <gene num="4" name="ZG1" max="12" min="1" lgen="4">
- <gene num="5" name="ZG2" max="12" min="1" lgen="4">
<decode phenotype="1" value="0.018" type="2" />
<decode phenotype="2" value="0.025" type="2" />
<decode phenotype="3" value="0.04" type="2" />
<decode phenotype="4" value="0.063" type="2" />
<decode phenotype="5" value="0.1" type="2" />
<decode phenotype="6" value="0.16" type="2" />
<decode phenotype="7" value="0.25" type="2" />
<decode phenotype="8" value="0.4" type="2" />
<decode phenotype="9" value="0.63" type="2" />
<decode phenotype="10" value="1.0" type="2" />
<decode phenotype="11" value="1.6" type="2" />
<decode phenotype="12" value="2.5" type="2" />
</gene>
</level>
</chromosome>
</galgorithm>
<mcequipment />
</model>

```

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
- <results model="VAL001">
<!-- Результаты оптимизации -->
<!-- Значения целевых функций: -->
- <yopt>
<level num="1">8.32</level>
</yopt>
<!-- Значения переменных: -->
- <xopt>
- <level num="1">
<x num="1" val="0.25" />
<x num="2" val="0.4" />
<x num="3" val="0.19" />
<x num="4" val="0.74" />
<x num="5" val="1" />
</level>
</xopt>
<!-- Статистика работы ГА: -->
+ <averfitness>
</results>

```

Рис. 6. Информационная модель комбинаторной оптимизации и результаты расчета

В первом разделе задаются:

1. Параметры генетического алгоритма (properties): граница, разделяющая начальный и конечный этапы алгоритма, взятая от величины эволюций в процентах; вероятность выполнения кроссовера; вероятность мутации; вероятность обновления популяции при стабилизации функции фитнесса; тип поиска алгоритма минимум или максимум; граничное количество эволюций; размер популяции; длина хромосомы в аллелях; длина хромосомы в генах; тип кроссовера; длина гена.

2. Ссылка на алгоритмическую модель функции фитнесса (fitness) в виде файла электронных таблиц и диапазона ячеек, где задаются значения генов (см. рис. 5).

3. Ссылка на алгоритмическую модель технических ограничений (limitations) в виде файла электронных таблиц с установленными ограничениями на изменения значений генов, исходя из методов обработки поверхностей (см. рис. 5);

4. Структура хромосом (chromosome) по уровням, где для каждого гена задается допустимое множество фенотипов в зависимости от разброса точностии определяемого методами обработки.

Во втором – хромосома первого приближения по необходимости.

Вычисления производятся с помощью модуля «Генетический алгоритм», который реализован в виде надстройки Excel (см. рис. 7).

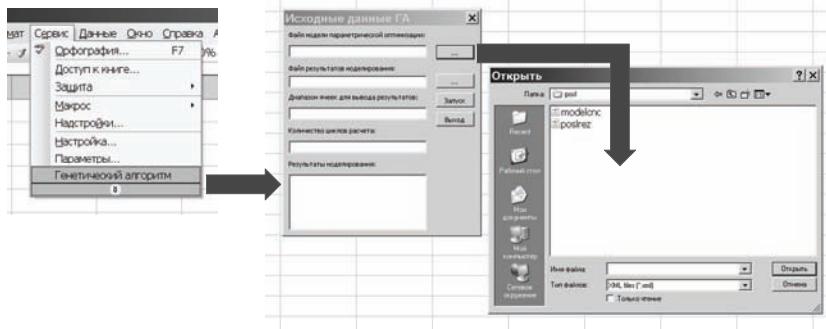


Рис. 7 Интерфейс работы с надстройкой «Генетический алгоритм»

Для оценки разброса значений ГА выполняем 50 последовательных расчетов. Результаты моделирования представлены на графике (см. рис. 8).

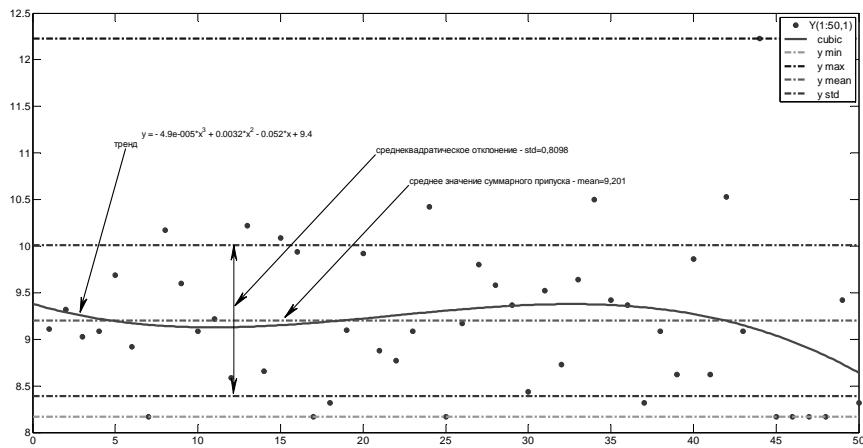


Рис. 8 Статистика расчетов по первому подходу

Разброс значений объясняется принципом работы ГА, основанном на концепции случайного поиска. Расчеты показывают, что глобальный минимум, для заданного маршрута обработки, находится между значениями суммарного максимального припуска от 8.5 до 10, если судить по среднеквадратическому отклонению.

При втором подходе подбираются допуска размеров S1, 31, 32 (см. рис. 2), поскольку остальные размеры являются независимыми и определяются из чертежа детали. Реализация и статистические данные второго подхода представлены на рисунках

Функция фитнесса в виде ИНС										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	S1	0.8	S1	0.8	1	3,3	3,3	1	<b>10.34</b>	
2	ZG1	0.6	S2	1	1	1.5	2.9	1	0	
3	ZG2	0.5	S1	0.8	1	2.9	4,14	1		
4		ZG1		0.6	1	1.5				Нейрон с линейной
5			S1	0.8	1	4,14				функцией активации
6			S3	0.74	1	1.5				=neuron(B5:B8;C5:C8;D6:1)
7			ZG1	0.6	1					
8			ZG2	0.5	1					
9	Имя	Гены	Цель	Входы	Веса	Аксон/Смещение	Входы	Веса	Аксон/Смещение	

Ограничения учитывающие особенности обработки											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	0.8	S1	140	0.25	ИСТИНА	1	ИСТИНА	11	14	подрезание торца однократное	
2	1	ZG1	66	0.74	ИСТИНА	3	ИСТИНА	14	17	заготовка	
3	2	ZG2	140	1	ИСТИНА	4	ИСТИНА	14	17	заготовка	
4			ИСТИНА		ИСТИНА		ИСТИНА				метод обработки
5				размер	условия	min	max	min	max		расшифровка
6	ГЕНЫ	РЕЗУЛЬТАТ	ИМЯ								

Рис. 9 Программная реализация второго подхода

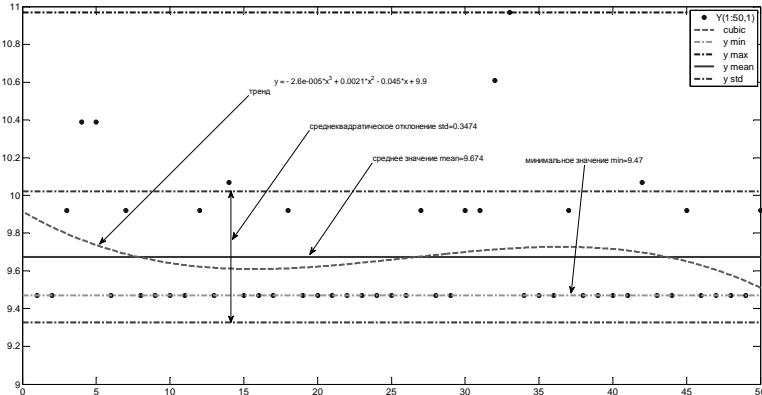


Рис. 10. Статистика вычислений по второму методу

Выводы: при использовании ИНС для решения комбинаторно – оптимизационной задачи расчета размерных технологических цепей используется принцип мягких вычислений, за счет которого решение будет получено при любом, даже очень плохом, сочетании допусков.

**Список литературы:** 1. Размерно – точностное проектирование технологических процессов обработки на основе расчета технологических размерных цепей. – 2-е изд., перераб. и доп. / С.Н. Корчак, В.И. Гузев, Г.И. Буторин, В.Н. Выбойщик, В.Л. Кулыхин, В.Ю. Шамин; Под общ. ред. В.И. Гузева. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – 101с. 2. BaseGroup Labs Технологии анализа данных. Мягкие вычисления. – Режим доступа: [http://www.basegroup.ru/glossary/definitions/soft\\_computing/](http://www.basegroup.ru/glossary/definitions/soft_computing/) 3. В.В. Фролов, Г.Н. Жолткевич Методика расчета технологических размерных цепей с помощью искусственных нейронных сетей / В.В. Фролов, Г.Н. Жолткевич // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №1, – С.96–100. 4. В.В. Фролов Аналisis и расчет размерных цепей деталей автотракторной техники на основе искусственных нейронных сетей / В.В. Фролов // Автомобильный транспорт. Сборник научных трудов. – Харків: ХНАДУ. – 2010. – №27, – С.104–109.

Поступила в редакцию 20.06.2011

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Сталинский Д.В., Романченко П.В., Сизый Ю.А.</b>	
Вибрации ручной шлифовальной машины при рабочем и холостом ходе .....	3
<b>Костюк Г.И., Исяк К.П., Татаркина И.С., Бреус А.А.</b>	
Эффективность токарной обработки закаленной стали 40Х РИ с покрытием.....	9
<b>Мовшович АЯ., Федосеева М.Е., Агорков В.В.</b>	
Унификация и стандартизация технологической оснастки — важнейшее условие ускоренной технологической подготовки производства .....	13
<b>Карпуш В.Е., Котляр О.В</b>	
Обґрунтування вибору найбільш ефективного методу багатокритеріальної оптимізації технологічних систем механічної обробки .....	19
<b>Єнікеєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Шишенко Л.О.</b>	
Система покоординатного управління якістю обробленої поверхні деталі в умовах неповної інформації .....	25
<b>Колесник М.Э.</b>	
Методика минимизации риска в процессе оптимизации содержания проекта .....	35
<b>Костюк Г.И., Фадеев В.А., Воляк Е.А.</b>	
Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов исследования адгезионного взаимодействия .....	40
<b>Шкурупий В.Г., Новиков Ф.В.</b>	
Условия уменьшения высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности в процессе доводки.....	48
<b>Костюк Г.И., Дощечкина И.В., Костюк А.Н., Воропай Р.В.</b>	
Исследование износа пластин с покрытием при эффективном течении закаленной стали 65Г .....	55
<b>Набока Е.В.</b>	
Влияние технологической наследственности и некоторых геометрических параметров на качество детали.....	60
<b>Новиков Ф.В., Рябенков И.А., Дерябин В.С.</b>	
Эффективность применения алмазного растачивания отверстий в деталях гидроаппаратуры .....	65
<b>Новиков Г.В.</b>	
Прогрессивные технологии алмазно-абразивной обработки природных алмазов в бриллианты.....	72
<b>Костюк Г.И., Павленко В.Н., Мелкозерова О.М.</b>	
Адгезионные характеристики контактирующих материалов с покрытиями для пар трения .....	81

<b>Полянский В.В.</b>	
Расчет температуры шлифования для неустановившегося во времени теплового процесса .....	92
<b>Новиков Ф.В., Иванов И.Е.</b>	
Пути повышения производительности шлифования износостойких наплавленных материалов высокой твердости.....	98
<b>Андреев А.А., Костюк Г.И., Минаев Н.А.</b>	
Физико-механические характеристики плазменно-ионных нанопокрытий Ti-TiN в медицине и в технике.....	106
<b>Третьяк В.В., Сотников В.Д., Мирошниченко С.А., Ивакин А.С.</b>	
Разработка группового технологического процесса листовых деталей с использованием импульсных технологий в среде СПРУТ ТП.....	111
<b>Крутіков Г.А., Стрижак М.Г.</b>	
Лінеарізація звена «дробель — глуха камера» електропневматичного перетворювача з пропорційним електрокеруванням методом дотичних .....	119
<b>Захлебина Л.Є., Караван І.А., Невлюдов І.Ш., Цимбал О.М.</b>	
Завдання прийняття рішень та їх опис у робототехніці.....	124
<b>Хавин Г.Л.</b>	
Моделирование составляющих силы резания.....	133
<b>Луцкий С.В.</b>	
Системно-информационный подход к концепции самоорганизации технических систем.....	138
<b>Горлов А.К., Рогачев Е.П., Жуков А.М., Лашко С.Н.</b>	
Автоматизация процесса формообразования точечных наплавленных выступов .....	146
<b>Костюк Г.И., Широкий Ю.В.</b>	
Комбинированное упрочнение и наноструктуры .....	155
<b>Борщев В.Н., Невлюдов И.Ш., Проценко М.А., Тымчук И.Т., Хатнюк И.С.</b>	
Сборка демонстратора трековой системы для международного эксперимента по исследованию сжатой барионной материи.....	164
<b>Баранов О.О., Романов М.С., Бреус А.А., Воропай Р.В.</b>	
Эффективность вакуумно-плазменного покрытия TiN на твердосплавном режущем инструменте при токарной обработке стали 14X17H2.....	174
<b>Фадеев А.В.</b>	
Аналіз тенденцій розвитку корпоративного підприємства .....	180
<b>Фадеев В.А., Лосев А.В.</b>	
Перспективи развития технологий финишной отделки прецезионных деталей летательных аппаратов.....	191
<b>Фролов В.В.</b>	
Расчет технологических размерных цепей на основе мягких вычислений .....	198

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"**

*Збірник наукових праць*

*Тематичний випуск*

*Технології в машинобудуванні*

*Випуск №40*

Науковий редактор д-р.техн.наук Тимофієв Ю.В.

Технічний редактор канд.техн.наук Фролов В.В.

Відповідальний за випуск канд.техн.наук Обухова І.Б.

Обл.вид. № 155-11

Підп.до друку 5.12.2010 р. Формат 60x84 1/16. Папір Copy Paper.

Друк-ризографія. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,5.

Облік.вид. арк. 9,9. Наклад 300 прим. 1-й завод 1-100. Зам. № 1118

Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ "ХПІ"

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---

Отпечатано в типографии ГП ХМЗ «ФЭД» ул. Сумская,132

Зак №1118

---



