

УДК 621.914

Цисар М.О. к.т.н., Псарницька Т.О., Косенчик Т.О., Новіков М.В.<sup>д.т.н., акад.</sup>  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ, м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОМ ТУНЕЛЬНОЇ МІКРОСКОПІЇ ТОПОГРАФІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГРАФЕНОВОГО ПОКРИТТЯ СФОРМОВАНОГО НА ПОВЕРХНІ SiO<sub>2</sub>

В роботі досліджувалася вуглецева наноструктура типу графен сформована на поверхні SiO<sub>2</sub>. Методом Раманівської спектроскопії було підтверджено наявність багатшарового графену. Подальші дослідження проводились на електронному та скануючому тунельному мікроскопах, які показали, що покриття з багатшарового графену носить мозаїчний характер і складається з острівців, що мають чітку границю переходу. На поверхні окремо взятих острівців були виявлені вуглецеві освіти типу фулерени і нанотрубки. Сканування в області відколу показало наявність сходинки висотою в 3нм отже товщина досліджуваної нами частини покриття становить менше 10 моно атомних шарів.

Перші спроби синтезу одиночних вуглецевих шарів було зроблено ще в 60–70-х роках минулого століття [1]. Формування здійснювалося на основі колоїдних розчинів оксиду графіту і вуглець містять газів. Самим розповсюдженим на даний момент є метод хімічного осадження з газової фази, в якості підкладок використовувалися різні метали і їх карбиди. Однак теоретичні дослідження в цій області почалися ще в 30-х роках того ж століття [2]. Попередній аналіз системи з двовимірної вуглецевої плівки товщиною в десятки атомних шарів показав її термодинамічну нестабільність. Саме через це тривалий час на поверхні вирощувалися тільки тривимірні структури. Проте дослідження карбиду кремнію дало новий поштовх в цьому напрямку. Виявилось, що при відпалі з поверхні SiC випаровується кремній і формується монокристалічна одношарова вуглецева плівка [3]. Ще одним розвиненим напрямом є нанесення електрофоретичних методом з наступним відпалом нанодіперстних алмазів нанесених на поверхню пластин з високоорієнтованого піролітичного графіту [4]. Крім цього графен отримують з водно-спиртового розчину методом розщеплення вуглець компонентів. Отримуваний структури таким методом є метастабільних. Мінімальна товщина плівки становила 30 графенових площин проте вони згортали в нанотрубки при обробці ультразвуком [5]. З появою нових зондових методів з'явилися спроби механічного знімання плівки графена наприклад за коштами голки атомно-силового мікроскопа, які також не принесли бажаного результату.

Якісний прорив у відділенні плівки графена був здійснений тільки в 2004 році. Графен отримували з високоорієнтованих піролітичного графіту шляхом багатшарового механічного відщеплення на підкладці з оксиду кремнію [2]. Після чого підкладку розчиняли хімічними реагентами і отримували вільні монокристали графену. Для вимірювання електронних властивостей індивідуального графенової площини (лінійного монокристалу) його наносили на металеву решітку (scaffold). Завдяки цьому було показано, що новий матеріал володіє унікальними електронними та іншими властивостями. На ряду з електрофізичними розвиваються так само методи визначення механічних характеристик графенових матеріалів. Так для визначення товщини покриття, дефектності поверхні, зносостійкості і твердості в графено-

вих зразках використовують зондові методи, рентгеноструктурний аналіз або Раманівську спектроскопію.

Перспективу в використання графену в серійному виробництві і відносно нескладної модифікацією властивостей в залежності від умов експлуатації готових виробів відкриває саме рідиннофазний підхід [1,2]. Зразки отримані цим методом і досліджувалися методами растрової електронної, скануючої тунельної мікроскопії і рамановської спектроскопії, лу й визначенню по ньому значення шорсткості обробленої поверхні деталі.

#### Список літератури

1. Грайфер Е.Д. Графен: хімічні методи к синтезу і модифікації / Е.Д. Грайфер, В.Г. Макроченко [и др.] // Успехи химии. - 2011. - Т. 80, № 8. - С. 784-804.
2. Geiml A.K. The rise of graphene / A.K. Geiml, K.S. Novoselov // Nature Materials - 2007. - 6. - p.183-191.
3. Bolen M.L. Graphene formation on step-face 4H-SiC(0001) / M.L. Bolen, R.Colby, E.A. Stach, M.A. Sarano // J. Appl. Phys. - 2011. - 110. - p.074307-074313.
4. A'oune A.M. Experimental evidence of a single nano-graphene / A.M. A'oune, B.L.V. Prasad, H. Sato, T. Enoki, Y. Kaburagi, Y. Hishiyama // Chemical Physics Letters - 2001. - 348. - p.17-20.
5. Viculis L.M. A chemical route to carbon nanotostrols / L.M. Viculis, J.J. Mack, R.V. Kamet // Science. - 2004. - 306. - p.666-669.

УДК 621.77437.621.774.8

Вышинский<sup>1</sup> В.Т. к.т.н., доц., Рахманов<sup>1</sup> С.Р. ст. препод., Сафонов<sup>2</sup> Л.А. к.т.н.

- 1 - Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина
- 2 - ООО «НПФ «ВОСТОК-ПЛЮС», г. Днепр, Украина

#### ІЗГОТОВЛЕННЯ ДЛИННОМЕРНЫХ БЕЗШОВНЫХ КОНИЧЕСКИХ ТРУБ НА СТАНАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Длинномерные трубчатые изделия переменного сечения, являясь равнопрочными для определенного вида нагружения, позволяют достичь существенной экономии металла в случае применения их в качестве несущих элементов различных металлоконструкций. В ряде случаев бесшовные трубы переменного сечения обеспечивают достижение определенного технического эффекта – например, в трубопроводах с изменяющейся по длине скоростью потока среды.

Практика показала, что наибольшими технологическими возможностями из известных (горячая прокатка, в частности на пильгерстане; штамповка; прессование; обкатка; холодное волочение) для производства бесшовных труб переменного сечения обладает процесс холодной пильгермовой прокатки. Наиболее простым и производительным является процесс прокатки коротких конических труб, длина которых не превышает длину развертки ручья калибров. Этот способ нашел широкое применение при производстве конических труб для велосипедных и мотоциклетных вилки и рам [1,2].

Во ВНИИМЕТМАШе был разработан и опробован технологический процесс холодной прокатки труб переменного сечения [3], заключающийся в непрерывном изменении диаметра очага деформации трубной заготовки на стане ХПП. Максимальный и минимальный диаметры наружной и внутренней поверхностей прокатываемой трубы равны соответствующим изменениям диаметра очага деформации. Протяженность изделия зависит от интенсивности изменения диаметра очага деформации. (длина хода рабочей клетки). Он получил дальнейшее развитие во ВНИИТИ, где впервые были разработаны и изготовлены специализированные станы холодной прокатки конических труб ХППК-40 и ХППК-75 с механическим регулируемым

приводом рабочей клетки, а также основные положения технологического процесса холодной прокатки конических труб [4], схема которого приведена на рис. 1.

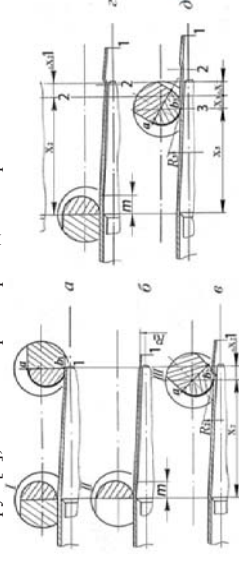


Рис.1 - Схема технологического процесса холодной прокатки длинномерных конических труб на станах с изменяющейся длиной хода клетки

На рис.1,а показано исходное (переднее) положение калибров, с которого начинается процесс прокатки трубы заданных размеров и формы. В положении калибров II (рис. 1,б), соответствующем раскрытию зева подлачи и поворота (крайнее заднее положение клетки), происходит подача трубной заготовки на величину  $m$  и ее поворот. При движении клетки вперед происходит деформация поданного металла. Сечение 1 перемещается вперед на величину линейного смещения. За время первого цикла прокатки происходит изменение длины хода клетки на величину  $\Delta R_x$  (положение III, рис.1,в) и формируется сечение 2 готовой трубы. Участок 1-2 готовой трубы состоит из части рабочего конуса и части мгновенного очага деформации и имеет длину

$$l_{1+2} = m\mu_x^{(0)} + \Delta R_x \quad (1)$$

где  $m$  – величина разовой подачи заготовки;

$\mu_x^{(0)}$  – коэффициент вытяжки на первом двойном ходу клетки.

Прокатанную на стане ХППК трубу переменного сечения можно представить как последовательность элементарных участков, каждый из которых сформирован за один двойной ход клетки. Отсутствие калибрующего участка на ручье обусловлено подвижностью передней границы рабочего конуса, поэтому каждый элементарный участок готового изделия геометрически представляет собой комбинацию соответствующей части рабочего конуса, сформированного за предыдущий двойной ход, и элемента мгновенного очага деформации трубной заготовки, "замороженного" в крайнем переднем положении рабочей клетки (рис.1,в).

В работе [4] были получены зависимости для установления предельного значения величины разовой подачи исходя из заданной волнистости наружной поверхности; общее число двойных ходов, в течение которых должно формироваться заданное изделие; некоторая усредненная величина изменения длины хода рабочей клетки. Для отыскания необходимого закона изменения длины хода клетки  $\Delta R_x(x_i)$  использован дискретный подход, при котором прокатываемую трубу переменного сечения представляют как последовательность элементарных конических участков длиной  $l_i$ .

В результате уменьшения (увеличения) длины хода клетки на  $\Delta x_i$  происходит изменение радиуса формируемой наружной поверхности на величину  $\Delta R_{R_i}$ , определяемому через усредненную конусность ручья калибров  $\phi_{R_i}$  на участке ручья  $(x_i; x_i - \Delta x_i)$

$$\Delta R_{R_i} = a_i \Delta x_i \quad (2)$$

Таким образом, конусность  $\phi_{R_i}$  наружной поверхности сформированного на  $i$ -том с начала прокатки двойном ходу элементарного участка равна

$$\phi_{R_i} = \frac{\Delta R_{R_i}}{\Delta l_i} = \frac{\Delta R_{R_i}}{m\mu(x_i) + \Delta x_i} \quad (3)$$

Здесь  $\mu(x_i)$  – максимальное значение выгибки в течение рассматриваемого двойного хода клетки.

Коническая труба, состоящая из элементарных участков постоянной конусности, может быть сформирована только при соответствующем выборе закона изменения величины  $\Delta x_i$  и калибровки прокатного инструмента (величины  $a_i(\Delta x_i)$ ). Зависимость  $\Delta x_i(x_i)$  является механической характеристикой приводного механизма. Методика определения настроечных характеристик приводного механизма для прокатки конических труб заданных параметров приведена в работе [5].

Все более широкое использование в промышленности трубчатых изделий рациональной формы выдвигает задачу производства на станах ХПТК изделий с криволинейной образующей наружной или (и) внутренней поверхностей, описываемых какой-либо заданной зависимостью.

На рис.2 приведена схема к определению законов изменения величин хода клетки при прокатке труб переменного сечения. Рассматривая процесс формообразования трубы 1, образующая наружной поверхности которой описывается произвольной зависимостью  $Y(z)$  в системе координат  $Y'OZ$  (рис.2), отметим, что особенности технологического процесса накладывают ряд ограничений на поведение функции  $Y(z)$  в выбранном интервале аргумента  $z$  ( $0 \leq z \leq L_{пр}$ ) – например, непрерывность функции и ее первой производной во всем диапазоне изменения  $z$ .

Особо следует отметить, что максимальное значение первой производной  $\frac{dY(z)}{dz}$  ручья используемых калибров.

Основопологающее значение таких характеристик, как закон изменения длины хода клетки  $\Delta x_i(x_i)$  и исходный настроечный параметр  $\Delta x_1(x_1)$  обуславливает необходимость осуществления синтеза приводного механизма с целью обеспечения наилучшего соответствия его конструктивных параметров требованиям и условиям технологического процесса.

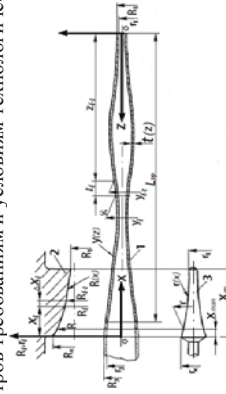


Рис.2- Схема к определению закона изменения длины хода клетки при прокатке трубы переменного сечения: 1 - труба; 2 - развертка гребня ручья; 3 - оправка

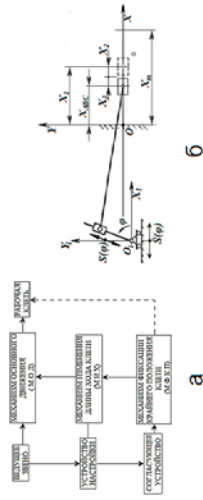


Рис.3- Структурная блок-схема приводных механизмов станов ХПТК (а) и условная схема приводного механизма стана ХПТК в виде регулируемого кривошипно-ползунного механизма (б)

Задача кинематического синтеза была сформулирована следующим образом – в заданном диапазоне изменения длины хода ведомого звена привода подобрать соотношения размеров звеньев таким образом, чтобы изменения длин хода клетки, обрабатываемые приводным механизмом, минимально отличались от изменений, необходимых для формирования изделия заданной формы и размеров. По ходу решения поставленной задачи была создана программа направленного поиска при синтезе рычажных приводных механизмов станов ХПТК, определены их сортаменты исходя из условий обеспечения прокатки конических труб заданных точностей форм.

В результате обобщения опыта эксплуатации и проектирования приводных механизмов станов ХПТК сформулированы требования, которым они должны удовлетворять, сформирована структурная блок-схема приводных механизмов станов ХПТК, представленная на рис.3 а.

Привод стана ХПТК условно представлен в виде кривошипно-ползунного механизма (МОД) с подвижными кривошипным пальцем (аналог МИХ) и осью вращения кривошипа (аналог МФЗП) (рис.3 б).

В системе координат ХОУ с началом в крайней задней (неподвижной) точке траектории рабочей клетки (рис.3 б) ее текущая координата  $x_{фес}$  может быть найдена следующим образом

$$x_{фес} = x_1(\varphi) + x_2(\varphi; \psi) + x_3(\varphi; \psi) \quad (4)$$

Здесь  $x_1(\varphi)$  – координата рассматриваемой точки при функционировании только МОД.

$x_2(\varphi; \psi)$  – координата точки при работе только МИХ для значений аргументов  $\varphi$  и  $\psi$ ;

$x_3(\varphi; \psi)$  – аналогично для МФЗП.

Исходя из найденного (либо аналитически, либо численно) параметра  $x_{фес}$  могут быть определены основные технологико-механические характеристики приводного механизма.

Представленные выше общие принципы практически были реализованы при поэтапном синтезе приводного механизма стана ХПТК-15, предназначенного для производства высокоточных трубчатых изделий переменного сечения с диаметром наружной поверхности от 3 до 15 мм для использования в специальных энергетических установках НПО "ТЕХНОМАШ".

**Список литературы:**

1. Ас. 144134 СССР/ кл. 7а, 16 Автоматизированный стан холодной прокатки конических труб для вольфрамистого вилко /Бабасов М.В., Фурс Б.А., Горюн А.П., Кириленко А.В. (СССР). – Заявл. 09.04. 61; Опубл. 02.02. 62 //Открытие. Изобр. – №2. – Зс.; ш.
2. Бабасов М.В., Семенов О.А., Горюн А.П., Великов Ю.М. Производство труб переменного сечения для велосипедов //Трубы экономичных видов. – М.: Металлургия, 1982. – С. 36 – 40.
3. Анисифоров В.П., Вердеревский В.А., Богатов Н.Н. и др. Новый способ холодной прокатки труб переменного сечения //Труды ВНИИТЕМАШ. – 1964. Вып. 13. – С. 21 – 27.
4. Горюн А.П. Создание и исследование стана и технологии холодной прокатки конических и других сложных трубчатых профилей: Дисс. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск. – 1968. – 199 с.
5. Сафонов Л.А. Повышение эффективности процесса холодной прокатки труб переменного сечения на основе установления рациональных параметров и разработки новых конструктивных решений основного технологического оборудования: Дисс. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск. – 1992. – 229 с.

## УДК 629.42

Рубан В.Н., ст. препод.  
 Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РЕМОНТЕ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ НА СТАНКЕ КЖ20

**Введение.** Для восстановительного ремонта поверхности катания колесных пар локомотивов и мотор вагонных секций машин рельсового транспорта без выкатки используются станки Краматорского завода тяжелого станкостроения моделей КЖ20, КЖ20М, КЖ20МХ, КЖ20Б, КЖ20ТФ1.

Станок устанавливается ниже уровня рельс и дает свободный проезд локомотива над станком. Колесные пары локомотива устанавливаются на станок в позицию обработки ма-неровой лебедкой и четырьмя роликами станка. Две центровые бабки надежно базируют по центровым гнездам колесную пару. При обработке обеспечивается получение точного профиля и равенства диаметров колес по кругу катания в соответствии с современными требованиями восстановления фасонного профиля колес под локомотивом.

Шероховатость обработанной поверхности не больше Rz 80.

Рекомендуемые режимы резания: скорость резания 60-80м/мин; минутная подача 100-150 мм/мин; глубина резания до 5 мм. Обработка ведется комплектом сборных фасонных фрез (рис.1).

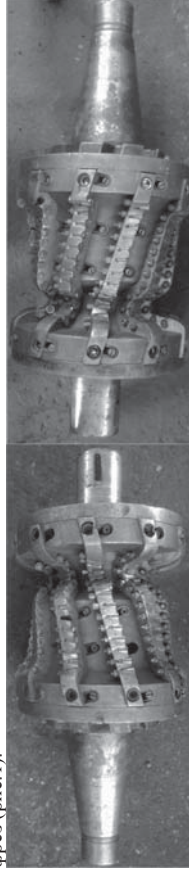


Рис. 1 - Комплект фасонных фрез

Комплект состоит из двух фрез, левой и правой. В зависимости от профиля поверхности катания сборная фасонная фреза имеет от 120 до 130 цилиндрических реза, изготовленных из твердого сплава Т14К8. Комплект цилиндрических твердосплавных резов, при использовании их с двух сторон, обеспечивает восстановление профиля поверхности катания 16-18 колесных пар локомотивов.

Врезание производят небольшими импульсами на длине 400 мм по радиусу окружности поверхности катания колеса.

**Материал и результаты исследований.** Для эксперимента использовались, диаметры колес по кругу катания и составляли  $\phi$  1250 мм,  $\phi$  1050 мм,  $\phi$  957 мм твердость HB 270 (всем характеристикам для  $\phi$  1250 мм соответствует индекс «1», для -  $\phi$  1050 мм - «2», для -  $\phi$  957 мм - «3»). Исследования проводились с глубиной резания 1-6 мм, подачами 0,05-0,3 мм/зуб, со скоростями резания по кругу катания 30-125 м/мин.

Для определения общей эффективной мощности, расходуемой на резание, использовался амперметр, включенный в цепь двигателя привода фасонными фрезами, установленный на панели управления станком.

Сущность математической обработки экспериментальных данных заключается в определении значений показателей степени  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и коэффициентов  $C_1$ ,  $C_5$ ,  $C_v$  в зависимостях:

$$\begin{aligned} N &= C_1 \cdot t^x, \\ N &= C_5 \cdot s^y, \\ N &= C_v \cdot v^z. \end{aligned} \quad (1)$$

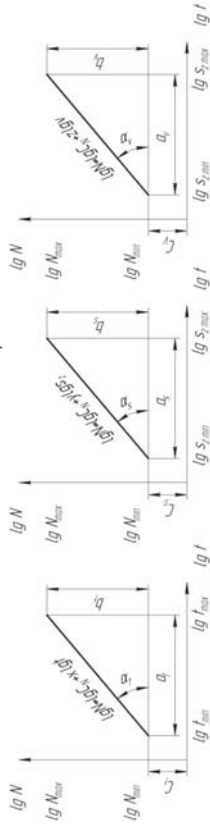


Рис. 2 - Графическое представление функций

Если прологарифмировать то получим выражения:

$$\begin{aligned} \lg N &= \lg C_1 + x \cdot \lg t; \\ \lg N &= \lg C_5 + y \cdot \lg s; \\ \lg N &= \lg C_v + z \cdot \lg v. \end{aligned} \quad (2)$$

Показатели степени  $x$ ,  $y$  и  $z$  и постоянной  $C_1$ ,  $C_5$ ,  $C_v$  можно найти как графически (рис.2), так и аналитически

$$\begin{aligned} a_1 &= \lg t_{\max} - \lg t_{\min} \\ b_1 &= \lg N_{\max} - \lg N_{\min} \\ a_5 &= \lg s_{\max} - \lg s_{\min} \\ b_5 &= \lg N_{\max} - \lg N_{\min} \\ a_v &= \lg v_{\max} - \lg v_{\min} \\ b_v &= \lg N_{\max} - \lg N_{\min}. \end{aligned} \quad (3)$$

Откуда

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \arctg \frac{b_1}{a_1}, \\ \alpha_5 &= \arctg \frac{b_5}{a_5}, \\ \alpha_v &= \arctg \frac{b_v}{a_v}. \end{aligned} \quad (4)$$

Значения показателей степени  $x$ ,  $y$  и  $z$  определяем при средних значениях  $t = 3,5$  мм,  $Sz = 0,177$  мм/нож,  $v = 82,5$  об/мин

Частные зависимости можно записать:

$$\begin{aligned} N &= C_1 \cdot t^{0,98}, \text{ кВт}; \\ N &= C_5 \cdot Sz^{0,67}, \text{ кВт}; \\ N &= C_v \cdot v^{0,89}, \text{ кВт}. \end{aligned} \quad (5)$$

Средние значения постоянных  $C_1$ ,  $C_5$ ,  $C_v$  как среднее арифметическое логарифмов:

$$C_{i,sp} = \frac{C_{i1} + \dots + C_{i,n}}{n}, \quad (6)$$

$$C_{s,sp} = \frac{C_{s1} + \dots + C_{s,m}}{m},$$

$$C_{v,sp} = \frac{C_{v1} + \dots + C_{v,l}}{l}.$$

Частные зависимости будут иметь вид:

$$N = C \cdot v^{0,89} \cdot S_z^{0,67} \cdot t^{0,98}, \quad \text{кВт}. \quad (7)$$

Разные показатели степени при глубине резания и подаче объясняются изменением сил деформации и трения. Как известно, ширина среза увеличивается пропорционально глубине резания:

$$b = \frac{t}{\sin \varphi}. \quad (8)$$

Показатель степени при глубине резания близок или равен единице, т.е. он влияет на мощность прямо пропорционально.

С увеличением подачи на зуб усадка стружки и коэффициент трения уменьшается, а следовательно, показатель степени будет меньше единицы и примерно соответствует степени, выражающей уменьшение усадки стружки и коэффициента трения с увеличением подачи.

Из теории резания известно, что с увеличением радиуса сопряжения режущих кромок увеличивается их длина и участки несвободного резания, одновременно возрастает ширина среза и уменьшается толщина. Это приводит к увеличению усадки стружки, а следовательно, силы резания и эффективной мощности. Общая выпрямленная ширина фрезерования (обрабатываемого профиля колеса) 165 мм.

При росте скорости резания значительно быстрее, чем при увеличении глубины резания и подачи, возрастает количество тепла, уносимое стружкой. Для средних значений параметров  $t = 3,5 \text{ мм}$ ,  $S_z = 0,177 \text{ мм/пож}$  и  $v = 82,5 \text{ об/мин}$  определим эффективную мощность для фрезерования поверхности катания колес по полученной зависимости:

$$N_{sp} = 0,117 \cdot t^{0,89} \cdot S_z^{0,67} \cdot v^{0,89} = 10,67 \text{ кВт}. \quad (9)$$

По найденной эффективной мощности определим силу резания из выражения:

$$P_z = \frac{N_{sp} \cdot 6120}{v} = 794 \text{ Н}. \quad (10)$$

Определим момент на шпинделе привода фрезы:

$$M = \frac{P_z \cdot D}{2000} = 99 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (11)$$

Выводы. По результатам экспериментальных исследований силовых характеристик сборных фасонных фрез получены коэффициенты условий обработки, по результатам построены графики зависимости.

Данные эксперимента могут быть применены для корректировки технологического процесса по ремонту поверхности катания колесных пар на станках КЖ20.

#### Список литературы

1. Инструкция з формування, ремонту та утримання колесних пар тягового рухомого складу залізнич Украни колі 1520 мм. ВНД 32.0.07.001-2001. (Нова редакція). - К.: Транспорт, 2011. - 168с.
2. Косилова А.Г., Мещерякова Р.К. Справочник технолога-машиностроителя / Косилова А.Г., Мещерякова Р.К. - М.: Машиностроение, 2001. - 694 с.
3. Бобров В.Ф., Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров - М.: Машиностроение, 1975. - 344 с.
4. Лурья Р.Д.ИИЖТа. Выпуск 58. М., «Транспорт», 1967.

УДК 621.9.048.6:621.9.048.7

Данілейко О.О. аспір., Джемелінський В.В. к.т.н., проф., Лесик Д.А. к.т.н., асиг. КШ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

### ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ СТАЛІ 30ХГСА КОМБІНОВАНОЮ ЛАЗЕРНО-ДЕФОРМАЦІЙНОЮ ОБРОБКОЮ

При сучасному рівні складності і високих пропонованих технологічних вимогах до промислових виробів, особлива увага приділяється їх надійності та довговічності. Відомо, що поверхня деталі піддається найбільш інтенсивним механічним, тепловим, хімічним та іншим впливам. Таким чином, основною причиною передчасного виходу з ладу деталі є руйнування і зношування поверхневого шару.

В даний час, для формування необхідних властивостей матеріалу деталей, використовуються як традиційні методи, так і сучасні висококонцентровані методи поверхневої обробки [1,2]. Для підвищення фізико-механічних властивостей оброблених деталей, один із найбільш ефективних методів є лазерне поверхневе термозміцнення за рахунок високих швидкостей нагрівання та охолодження.

Однак, для отримання поверхневого шару з більш якісними фізико-механічними властивостями все частіше розробляються комбіновані лазерно-деформаційні методи поверхневої обробки з використанням як динамічних [3], так і статичних методів поверхнево-пластичного формування (ППД) [4]. Відомо, що процес ППД металевих поверхонь забезпечує збільшення твердості деформованого шару, що обумовлено формуванням в поверхневому шарі матеріалу залишкових напружень стиску та збільшення щільності дислокацій [5]. Крім того, відбувається формування в зернах блокової структури, що приводить до підвищення твердості, міцності, перешкоджає зародженню і розвитку втомних тріщин в результаті механізму бар'єрного зміцнення [3,5] поверхневого шару.

Метою даного дослідження є визначення можливості використання комбінованої технології поверхневого зміцнення виробів ППД з наступним лазерним гартуванням.

Для поліпшення якості поверхневого шару сталевих виробів, запропоновано перед лазерним гартуванням провести деформаційне зміцнення з використанням як статичного, так і динамічного (ультразвукового) методів ППД (рис. 1).

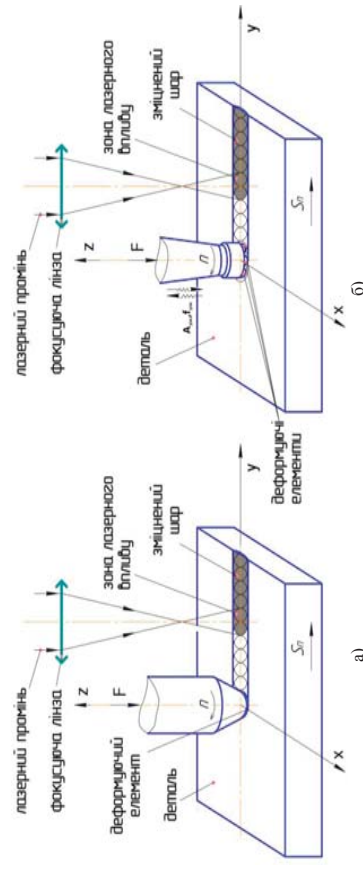


Рис. 1 – Схеми комбінованого лазерно-деформаційного поверхневого зміцнення: а) статичний метод ППД, б) динамічний метод ППД

В якості матеріалу для експериментальних досліджень була використана конструкційна сталь 30ХГСА, яка широко застосовується в літакобудуванні та машинобудуванні для вигот-

товлення деталей, які працюють при високих (знакозмінних) навантаженнях та несприятливих умовах (кріпильні деталі, зварні конструкції, вали, осі, корпуси, лопатки компресорних установок, ударні інструменти та ін.).

ППД зразків статичним методом проводили на розробленому стенді з числовим програмним керуванням (ЧПК) з використанням наконечника з кубічного нітриду бору на торці. Процес ППД здійснювали при наступних попередньо визначених режимах: частота обертання шпинделя  $n = 840$  об/хв., швидкість переміщення зразка  $S = 300$  мм/хв. Режими ППД динамічним інструментом детально описано в роботі [3].

Наступну лазерну термообробку (ЛТО) здійснювали Nd:YAG лазером безперервної дії ROFIN-SINAR DY044 з довжиною хвилі випромінювання 1,06 мкм. Процес ЛТО здійснювали при різних потужностях лазерного променя в діапазоні 1...4 кВт та швидкостях переміщення зразка від 3 до 8 мм/хв., а діаметр плями складав 7 мм. Тривалість лазерного впливу  $t_{лп}$  (с), що визначали відношенням  $d_{лп}$  (мм) лазерного променя на швидкість переміщення оброблюваної поверхні  $S$  (мм/с), знаходилась в діапазоні 0,1...0,06 с.

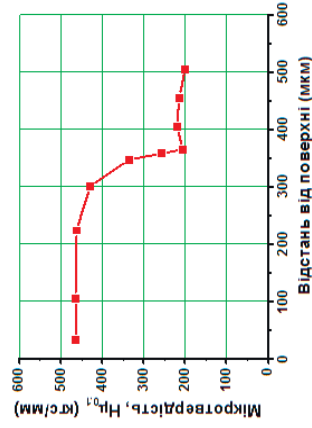


Рис. 2 – Розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару сталі 30Х1СН

Результатами експериментальних досліджень встановлено, що при використанні комбінованої обробки статичним методом ППД та наступним лазерним термозміцненням досліджуваної сталі за рахунок швидкісного нагрівання тонкого шару до температури плавлення і швидкісного охолодження з тепловідведенням тепла в основний об'єм металу, твердість поверхні підвищується більше чим у 2 рази в порівнянні з вихідною поверхнею (рис. 2), а глибина гартованого шару збільшується приблизно на 100 мкм в порівнянні з окремою ЛТО.

#### Список літератури

1. Коваленко, В.С., Головок, Л.Ф., Черненко, В.С. (1990). Упрощенне і легирование деталей машин лучом лазера. Техника, Киев, 192 с.
2. Головок, Л.Ф., Лук'яненко Л.Ф. (2009). Лазерні технології та комп'ютерне моделювання. Вістка, Київ, 296 с.
3. Lesyk, D.A., Martinez, S., Dzhemelinskiy, V.Y., Morduyuk, B.N., Lamikiz, A., Prokopenko, G.I. (2015). Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel. Surface & Coating Technology, Vol. 278, pp. 108-120.
4. Morisada, J., Fujii, H., Mizuno, T., Abe, G., Nagaoka, T., Fukusumi, M. (2009) Nanostructured tool steel fabricated by combination of laser melting and friction stir processing. Materials Science and Engineering A, Vol. 505, pp. 57-162.
5. Wried J. (2011). Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen durch Festklopfen [Text]. Darmstadt: Technischen Universität Darmstadt, S. 128.

#### УДК 621.891

Корбут<sup>1</sup> С.В. к.т.н., доц., Лабунець<sup>2</sup> В.Ф. к.т.н., проф., Ралько<sup>2</sup> О.В. к.т.н., доц., Загребельний<sup>2</sup> В.В. аспірант

1-КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

2 - Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

### ТРИБОТЕХНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ СТАЛЕЙ ІЗ ЗНОСОСТІЙКИМИ КОМБІНОВАНИМИ ПОКРИТТЯМИ

**Вступ.** На сьогодні при виробництві і експлуатації машин і механізмів, а також різального інструменту все більше уваги приділяється поліпшенню їх якісних і економічних показників. Підвищення надійності, довговічності та зносостійкості сталевих виробів (СВ) призведе до підвищення продуктивності праці, економії сировини, матеріалів та енергії.

Під час експлуатації СВ їх поверхневий шар піддається різним механічним, тепловим і хімічним взаємодіям. Втрата працездатності в основному відбувається в результаті зношування. Для збільшення ресурсу роботи СВ та для захисту поверхонь від зношування застосовують поверхневе зміцнення матеріалу шляхом нанесення захисних зносостійких покриттів. За рахунок зміни матеріалу покриття і технологічних режимів їх нанесення можливо змінювати твердість, коефіцієнт тертя, теплопровідність, зносостійкість [1,2].

Нанесення зносостійких покриттів надає можливість отримати необхідні експлуатаційні властивості СВ [3]. З проведеного аналізу сучасних методів поверхневого зміцнення СВ встановлено [4,5], що нанесення на їх поверхні зносостійких покриттів є ефективним і доступним способом поліпшення його експлуатаційних і трибологічних властивостей. Потрібно відмітити, що одношарові покриття повною мірою не дозволяють отримати комплекс необхідних експлуатаційних і фізико-механічних властивостей. Найбільш перспективним методом зміцнення поверхневих шарів сталевих виробів є нанесення комбінованих покриттів, завдяки цьому будуть поєднуватися переваги кожного з методів. Багато сучасних методів нанесення покриттів можливо поєднувати один з одним.

Комбіновані методи модифікування поверхневих шарів СВ дозволяють збільшити фізико-механічні та експлуатаційні властивості.

**Методика та результати досліджень.** В роботі досліджувалися трибологічні властивості сталі У8 та швидкокристалічної Р6М5 з комбінованими покриттями нанесеними електроискровим легуванням та іонно – плазмовим напиленням. На поверхні досліджуваних зразків наносили спочатку твердий сплав ВК8 методом електроискрового легування на установці «ЭЛИТРОН-22» за режимами частота струму  $I = 2A$ , амплітуда струму  $A = 1,6$ , потім зразки піддавали іонно – плазмовій обробці (покриття TiN) на установці типу «Булат» при температурах 560 – 580 °С. Випробування на абразивну стійкість комбінованих покриттів проводили на установці, за схемою Брінеля-Хаворта в середовищі кварцевого піску. Свердлення композиції на основі вуглецистрічки ЭЛУР-ПА з покриттям нанесеним іонно-плазмовим напиленням проводили на вертикально-свердильній установці НС 124. Швидкість різання складала 0,36 м/с, подана – 0,03 мм/об. Зносостійкість оцінювали за величиною зносу по передній та задній поверхням свердла.

Результати досліджень на абразивну стійкість сталей с покриттями наведені на рис. 1. При свердленні полімерних композиційних матеріалів на основі вуглепластики спостерігається інтенсивний абразивний знос свердла (рис.2). Абразивне зношування є переважачим механізмом зношування свердел зі сталі Р6М5 при обробці різних матеріалів.

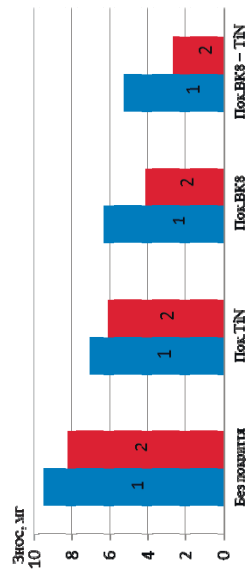


Рис. 1 – Зносостійкість сталей в умовах абразивного зношування (середовище тертя кварцевий пісок зернистістю 500 мкм):  
1 – У8;  
2 – Р6М5

Однак, для свердління полімерних композиційних матеріалів характерні підвищені температури і стружкуутворення шляхом крихкого руйнування твердих волокон, закріплених у м'якій матриці як під дією ріжучих лез, так і за рахунок вдавлювання поперечної ріжучої крайки. Ці особливості призводять до того, що в деяких випадках спостерігається викривлення і абразивне зношування різальних крайок свердел після свердління вуглепластика.

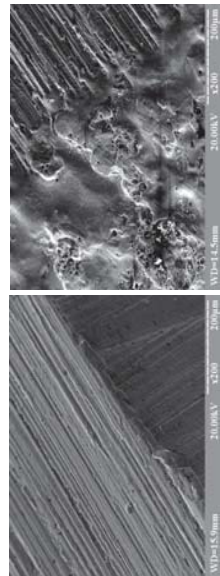


Рис. 2 – Мікроструктура свердла з покриттям після свердління ПКМ: а – покриття ТН, б – покриття ВК8 нанесене методом ЕЛД

**Висновок.** Випробування показали збільшення абразивної стійкості досліджуваних сталей з комбінованими покриттями у 1,4 рази, а стійкість свердла з покриттям нанесеним на свердло зі сталі Р6М5 іонно-плазмовим напленням та електроіскровим легуванням збільшилась у 1,5 та у 1,6 рази відповідно.

#### Список літератури

1. Костюк Г.І. *Нанотехнології: теорія, експеримент, техніка, перспективи*, [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. - К.: Изд-во Международной академии наук и инновационных технологий, 2012.- 648 с.
2. Костюк Г.І. *Еффеєктивне покриття і модифіковані покриття на режущих інструментах*, [Текст] / Г.И. Костюк. - К.: Изд-во Международной академии наук и инновационных технологий, 2012.- 728 с.
3. Лабунець В.Ф. *Формування зносостійкого покриття на різальному інструменті зі сталі Р6М5 / В.Ф. Лабунець, В.В. Загребельний // Матеріали МНТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта».* – 2016. – 253-255.
4. Костюк Г.І. *Фізико-технічні основи нанесення покриттів, іонної імплантаци и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий*, [Текст] / Г.И. Костюк.: в 2 кн. – К.: Изд-во АННУ, 2002. – 1030 с.
5. Киндрачук М. В. *Технологічні аспекти забезпечення працездатності інструменту з швидкорізальних сталей / М. В. Киндрачук, В. В. Загребельний, В. Г. Хляжяк, Н. А. Харченко // Проблеми тертя та зношування – К.: НАУ, 2016. – Вип. 1(70). – С. 67-78.*

УДК 621.9; 519.2

Ламнауер Н.Ю., к.т.н, доцент

Українська інженерно-педагогічна академія, м. Харків, Україна

### УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ЗА ПАРАМЕТРОМ ТОЧНОСТІ ЛІНІЙНОГО РОЗМІРУ ЙМОВІРНОСНО-СТАТИСТИЧНИМИ МЕТОДАМИ

**Проблема.** Підвищення точності отриманих розмірів деталей в результаті обробки є важливою задачею технології машинобудування. При вирішенні цієї проблеми технологія повинна забезпечити: вказану конструктором точність виготовлення та складання деталей машини при одночасному досягненні високої продуктивності і економічності їх виготовлення; необхідні засоби вимірювання і контролю фактичної точності обробки і складання; устаткування допусків технологічних міжопераційних розмірів і розмірів первинних заготовок та їх не виконання у ході технологічного процесу; дослідити фактичну точність встановлених технологічних процесів та проаналізувати причини виникнення похибок обробки та складання.

У процесі серійного виготовлення деталей при операціях механічної обробки виникають похибки, що викликані різними причинами. Деякі похибки повторюються систематично, інші – виникають випадково. Сумарна похибка будь-якого розміру деталі виникає в результаті дії постійних і змінних, систематичних та випадкових похибок. Оцінку сумарної похибки найбільш ефективно у виробничих умовах проводять статистичним методом, що базується на положеннях теорії ймовірностей та математичної статистики. Для цього на базі результатів вимірювання розміру будують криві щільності розподілу.

В [1] пропонується використання для різних квалітетів точності різні закони – нормального розподілу, рівномірний та Сімпсона. Але результати масових експериментів спростовують відповідність розподілів дійсних розмірів цим законам. Тому для більш ефективно оцінки та прогнозування якості технологічного процесу обробки стало актуальним побудова нової моделі розподілу розмірів деталей.

**Мета.** Застосування нової моделі розподілу розмірів деталей та знайдені оцінки її параметрів для створення методу управління якістю технологічного процесу обробки за параметром точності розмірів деталей.

**Результати досліджень.** В роботах [2,3,4] надано нову модель щільності розподілу випадкової величини  $X$  - розміру деталі

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \notin (b, c), \\ \frac{1+k}{c-b} \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^k \right] & \text{при } x \in [b, a], \\ \frac{1+k}{c-b} \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^k \right] & \text{при } x \in (a, c], \end{cases} \quad (1)$$

де  $a$  - модальне значення розподілу,  $b$  - нижня границя розміру,  $c$  - верхня границя розміру,  $k$  - параметр форми.

Також отримана функція розподілу випадкової величини  $X$ :

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq b \\ \left\{ x-b+k(x-a) \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{b-a} \right)^k \right] \right\} / (c-b) & \text{при } b < x \leq a \\ \left\{ x-b+k(x-a) \left[ 1 - \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^k \right] \right\} / (c-b) & \text{при } a < x \leq c \\ 1 & \text{при } x > c \end{cases} \quad (2)$$

Запропоновано оцінки параметрів нової моделі розподілу розмірів. За допомогою статистичного знайдено найкращий метод – з використанням початкових моментів порядкових статистик. Так оцінки параметрів  $k$  та  $q$  знаходяться з розв'язання системи:

$$\begin{cases} \bar{L}_1 = L1(k, q); \\ \bar{L}_2 = L2(k, q), \end{cases} \quad (3)$$

де  $\bar{L}_1$  та  $\bar{L}_2$  - емпіричні оцінки, що знаходяться за формулами:

$$\bar{L}_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} C_{i-1}^{n-1} x_{(i)} + \sum_{i=2}^{n-2} C_{n-i}^{n-2} x_{(i)} + \sum_{i=3}^{n-1} C_{n-i}^{n-1} x_{(i)}}{\sum_{i=1}^{n-1} (4+i-n) C_{i-1}^{n-1} x_{(i+1)} + \sum_{i=2}^{n-2} C_{n-i}^{n-2} x_{(i+2)} + \sum_{i=3}^{n-1} C_{n-i}^{n-1} x_{(i+3)}} \quad (4)$$

$$\bar{L}_2 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} C_{i-1}^{n-1} x_{(i)} + \sum_{i=2}^{n-1} (i-1)(i-n) x_{(i)} (n-1)}{2 \sum_{i=1}^{n-1} (i-n) x_{(i)} + n^2 \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 x_{(i)} + n \sum_{i=1}^{n-2} C_{n-i}^2 x_{(i)}} \quad (5)$$

Функції  $L1(k, q) = \frac{\mu_{5,5} - \mu_{4,5}}{\mu_{4,5} - \mu_{3,5}}$ ;  $L2(k, q) = \frac{\mu_{3,3} - \mu_{2,2}}{\mu_{4,2} - \mu_{3,2}}$ ;  $x_{(i)}$  - значення  $i$ -ої порядкової статистики.

При цьому система має єдине рішення, якщо:  $-\infty < k < -1 \cup 0 < k < \infty$ ; та  $0 < q < \infty$ .

Оцінка параметрів  $b$  і  $c$  визначається з розв'язання системи:  $\begin{cases} M(X) = \bar{x}; \\ D(X) = S^2, \end{cases}$  за знайденими параметрами  $k$  і  $q$ , при умові, що  $c > b$ , де вибіркове середнє:  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , виправленими параметрами  $k$  і  $q$ .

Оцінка параметра  $a$  за знайденими  $b, c, k$  і  $q$  за формулою:  $a = (b+cq)/(1+q)$ .

Оскільки сума абсолютних відхилень випадкової величини від медіани є мінімальна величина [5], то настроювання будь-якого станка потрібно проводити на медіанну величину  $x_{med}$ . Ця величина знаходиться з рішення рівняння:

$$\left\{ x_{med} - b + k \left( x_{med} - a \right) \left[ 1 - \left( \frac{x_{med} - a}{b-a} \right)^k \right] \right\} / (c-b) = 0,5 \text{ при } b < x_{med} \leq a \quad (6)$$

або

$$\left\{ x_{med} - b + k \left( x_{med} - a \right) \left[ 1 - \left( \frac{x_{med} - a}{c-a} \right)^k \right] \right\} / (c-b) = 0,5 \text{ при } a < x_{med} \leq c. \quad (7)$$

За отриманими результатами можна запропонувати методику налагодження верстату для запобігання виходу значень розміру за межі поля допуску:

1. Проводимо настройку на номінальний розмір деталі.
2. Виробляємо не менше п'яти виробів.
3. За результатами вимірювань, використовуємо запропоновані формули знаходимо оцінки параметрів моделі:  $b, c, a$ .
4. За формулами (6) або (7) знаходимо медіанне значення та проводимо настройку на нього і отримасмо знов не менше п'яти деталей. За отриманими результатами вимірювань знаходимо оцінки параметрів моделі:  $b, c, a$ .
5. Якщо оцінки  $b$  і  $c$  виходять за межі допуску, то далі настройку проводимо з урахуванням величини зсуву від медіанного значення.
6. Визначаємо величину зсуву  $- \Delta$ , між нижньою границею поля допуску і границею максимальної якості, що визначається за формулою:  $z_{max} = a - \frac{(a-b)T}{c-b}$ .
7. На зростаючу величину  $\Delta$  проводимо зсув від медіанного значення та визначимо величину, на яку необхідно налагоджувати верстат для отримання виробів максимальної якості при даній технології обробки.

На рис. 1 подана схема визначення величини зсуву від медіанного значення

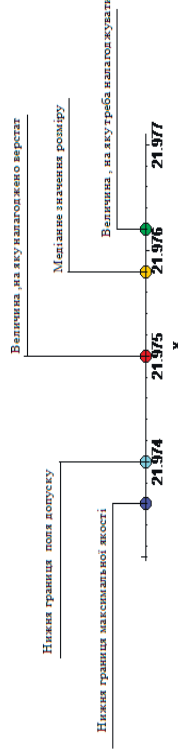


Рис. 1 - Схема визначення величини зсуву від медіанного значення

**Список літератури:**

1. *Маташани А.А. Технологія машиностроєння: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология, металлорежущие станки и инструменты»* [Текст] / А.А. Маташани. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. - 496с.
2. *Ламнауер Н.Ю. Распределение размеров изготовления изделий* [Текст] / Н.Ю. Ламнауер // Высokie технологии в машинобудованні: Збірник наукових праць. - Харків, НТУ «ХП», 2012. - Вип. 1(22). - С.177-181.
3. *Ламнауер Н.Ю. Методы распределения размеров изделий и ее применение для оценки точности обработки* [Текст] / Н.Ю. Ламнауер // Вестник Национального технического университета «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. - Харків: НТУ «ХП», 2012. - №27. - С. 98-107.
4. *Ламнауер Н.Ю. Задача модель розподілу лінійних розмірів деталей та її застосування для поліпшення якості виробів* [Текст] / Н.Ю. Ламнауер // Вестник Национального технического университета «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Математичне моделювання в техніці та технологіях. - Харків: НТУ «ХП», 2013. - №54(1027). - С.134-143.
5. *Елисеєва И.И. Общая теория статистики: учебник для вузов* [Текст] / И.И. Елисеєва, М.М. Юзбашев; под. ред. И.И. Елисеєвой. - М.: Финансы и статистика, 2009. - 656 с.



УДК 621.375.826

Лугай А.М., ст.викл., Ворон Р.В., студ.  
КІШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ЗМІЦНЕННЯ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ ЛАЗЕРНИМ ЛЕГУВАННЯМ ТА АЗОТУВАННЯМ

**Вступ.** Деталі помірно навантажених штамтів, що працюють при температурі  $t \leq 500 \dots 550^\circ\text{C}$  найчастіше виготовляють з сталей 5ХНМ та 5ХГМ, які зміцнюються в результаті мартенситного перетворення. Після стандартної термічної обробки (гартування з  $t=830 \dots 860^\circ\text{C}$  в маслі та відпуску при  $t=500 \dots 580^\circ\text{C}$ ) сталі мають твердість 38..45HRC. Штамті, що виготовлені з цих сталей виходять з ладу найчастіше по двох причинах – зминання (особливо в штампах зі складною правою) та появі сітки розпаду. Перше пов'язано з порівняно невеликою твердістю та граничною цією текучості ( $\sigma_T$ ) сталі. Збільшення  $\sigma_T$  пов'язано з включенням максимальної кількості механізмів зміцнення, а саме:

$$\sigma_T = \sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{тр.р.}} + \Delta\sigma_{\text{д.з.}} + \Delta\sigma_{\text{д.з.}} + \Delta\sigma_{\text{с}} + \Delta\sigma_{\text{д.з.}} \quad (1)$$

де  $\sigma_0$  – напруження тертя кристалічної решітки;  $\Delta\sigma_{\text{тр.р.}}$  – приріст граничної текучості за рахунок твердо розчинного зміцнення;  $\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$  – приріст граничної текучості за рахунок дислокаційного (деформаційного) зміцнення;  $\Delta\sigma_{\text{с}}$  – приріст граничної текучості за рахунок зерно границьного зміцнення;  $\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$  – приріст граничної текучості за рахунок субструктурного зміцнення;  $\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$  – приріст граничної текучості за рахунок дисперсійного зміцнення.

Поверхневі тріщини (сітка розпаду) виникають під дією додаткових тимчасових термічних напружень, які є результатом великого градієнту температур по нормалі к робочій поверхні штаму. Одним з шляхів запобігання їх появи – формування в поверхневому шарі значних по величині стискувальних залишкових напружень з тим, щоб результуючі напруження було знижено до значень менших граничної текучості сталі.

**Мета роботи** – визначити технологічні режими комбінованої обробки вказаних сталей, що забезпечують реалізацію максимальної кількості механізмів зміцнення та формування сприятливого напруженого стану.

**Методика дослідження.** Фазовий склад, структуру та величину залишкових напружень визначали методами рентгеноструктурного аналізу на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 в СтКі випромінюванні. Розрахунок значень залишкових напружень проводився по  $\sin^2 \psi$  – методу з реєстрацією відзеркалення (211). Мікротвердість вимірювалась на мікродомірі ПМТ-3 при навантаженні 100г

**Результати дослідження та їх обговорення.** Одностадійні технології поверхневого зміцнення не дозволяють задіяти всі приведені в (1) механізми зміцнення. Тому в даній роботі запропоновано комбіновану технологію поверхневої обробки сталі 5ХНМ, що складається з двох етапів

- Лазерне легування титаном та молібденом з обмазки.
- Іоно – плазмово азотування в атмосфері азоту (розрядження 650Па), при температурі  $t=520^\circ$ , напрузі  $U=480\text{В}$  та часу обробки  $t = 1$  та 2год

Як виходить з аналізу дифракційних спектрів кожний з етапів комбінованої технології суттєво змінює складові загального значення  $\sigma_T$  (1). А саме. Лазерне легування з подальшого високошвидкісного кристалізацією та охолодженням формує дрібнозернисту структуру реїконового мартенситу. Тобто перша фаза обробки дає приріст у перші три складові  $\sigma_T$ . Іоно – плазмово азотування суміщене зі старінням дещо зменшує складову  $\Delta\sigma_{\text{тр.р.}}$ , що обумовлено виділенням вуглецю з мартенситу. Але розчинення азоту у  $\alpha$  – фазі компенсує вказане зниження твердо розчинного зміцнення. Крім цього збільшуються складові  $\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$  за рахунок виділення дрібнозернистих, рівномірно розподілених карбідів, нітридів та інтерметалідів. По

кутових залежностях розширення інтерференційних максимумів встановлено, що процес ПА ініціює виникнення області когерентного розсіювання (ОКР) в зернах  $\alpha$  – фази на стадії формування нітридів титану та молібдену.

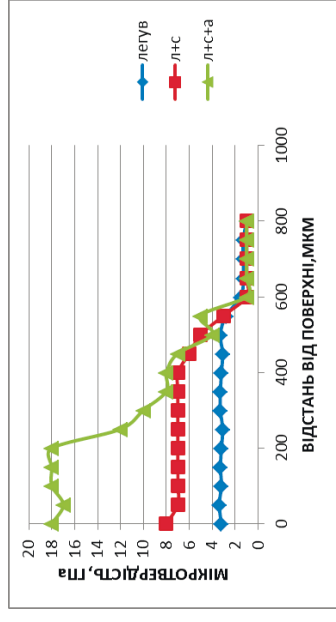


Рис.1. Залежність мікротвердості від відстані від поверхні сталі 5ХНМ

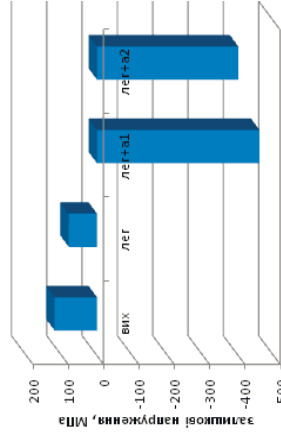


Рис.2. Величина залишкових напружень на поверхні сталі 5ХНМ після різних етапів обробки

Питома вага останніх більша питомої ваги  $\alpha$  – фази, що приводить до виникнення напружень. Величина останніх перевищує границю текучості  $\alpha$  – фази, що приводить до генерації дислокацій та формування мало куткових границь ОКР шляхом будівництва дислокаційних стінок. Пружна частина напружень фіксується як залишкові напруження. Тобто формування дисперсних нітридів має три наслідки для властивостей поверхневого шару сталі: значне збільшення твердості (рис.1) за рахунок бар'єрного механізму зміцнення; включення субструктурної складової росту  $\sigma_T$ ; формування високого рівня від'ємних залишкових напружень (рис.2).

**Висновки.** 1. Запропонована комбінована технологія обробки штампових сталей реалізує більшість з відомих механізмів зміцнення сплавів.

2. На сталі 5ХНМ одержано шари з мікротвердістю до 18ГПа, що повинно виключити зминання елементів штаму при експлуатації.

3. В поверхневих шарах формується високий рівень стискувальних напружень, що повинно значно збільшити розпалюємість штампів.

УДК 621.375.826:621

Головко Л.Ф. д.т.н., проф., Романенко В.В. к.т.н., доц., Блощини М.С., к.т.н., доц., Салій С.С.

КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### НОВІ ВИСОКОЕФЕКТИВНІ СПОСОБИ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ КОНЦЕНТРОВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Біметали застосовуються в багатьох галузях промисловості, зокрема в металургійному та гірничо-видобувальному виробництві.

В останній час інтенсивні роботи ведуться по використанню концентрованих потужних джерел енергії для отримання біметалів, що забезпечує надійне зчеплення між собою його складових пластин. В якості потужного джерела енергії можливе використання, наприклад, електричної дуги або лазерного випромінювання. При цьому виникає питання підводу енергії безпосередньо в місце контакту пластин біметалу для їх надійного зчеплення.

Авторами запропонована оригінальна схема підводу енергії потужного джерела в зону з'єднання через технологічні отвори в пластині основи біметалу. При цьому теоретичний розгляд на основі теорії теплопровідності можливостей з'єднання пластин біметалу дозволяє оцінити глибину проплавлення в робочій пластині. Таку величину  $z_{\max}$  можна знайти, враховуючи, що при стаціонарному режимі метал нагрівається круговим джерелом енергії діаметром  $D$ , рівним діаметру технологічного отвору, по формулі:

$$z_{\max} = \frac{D}{4} \left( \frac{T_{\text{оск}}}{T_{\text{пл}}} - \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{оск}}} \right), \quad (1)$$

де  $T_{\text{оск}}$  - температура на поверхні нагріву,  $T_{\text{пл}}$  - температура плавлення металу.

При цьому слід враховувати, що температура на поверхні нагріву джерелом енергії при застосуванні електродугового зварювання, наприклад, відповідає температурі на поверхні електроду і лежить в інтервалі 2500...2800 °С. Тоді розрахунки по формулі (1) показують, що  $z_{\max} = 0,25 \dots 0,35 D$ . Так при використанні технологічних отворів діаметром 8...10 мм глибина проварювання в робочій пластині складала б 2...3,5 мм, що забагато, так як для виготовлення біметалу використовуються робочі пластини товщиною 2...5 мм. Виникла б небезпека наскрізного проплавлення робочої пластини, що могло б призвести до ушкодження її зовнішньої поверхні. Для надійного зчеплення пластин біметалу достатньою є глибина проплавлення  $z_{\text{ном}} = 1 \dots 1,5$  мм. Проблему вирішує штучна перепона (або завужена частина технологічного отвору) товщиною  $h = z_{\max} - z_{\text{ном}}$ , між місцем дії потужного джерела енергії та робочою пластинною біметалу. Разом з тим, така перепона чи вузька частина не повинні перешкодити стіканню рідкого металу в зону зчеплення пластин біметалу.

Як результат теоретичного аналізу, нами запропонований новий підхід для отримання біметалів при з'єднанні його пластин потужним джерелом енергії, що включає формування зчеплення пластини основи та робочої пластини біметалу за рахунок ливарного процесу. Спосіб відрізняється тим, що в місцях з'єднання в пластині основи наскрізь свердлять технологічні отвори діаметром, що забезпечує підвід енергії до місця зчеплення пластин, та на краю цієї пластини, зі сторони контакту з робочою пластинною, поперець технологічних отворів вставляють штифти так, щоб вони міцно трималися в отворах, а енергію, що підводиться через технологічні отвори, спрямовують безпосередньо на штифти (рис. 1, а). Можливий і інший варіант, коли в технологічні отвори вставляють шайби з зовнішнім діаметром, що забезпечує їх міцне утримування в технологічних отворах, та внутрішнім, що дозволяє енергії потрапляти лише та безпосередньо на шайби (рис. 1, б).

Розроблені також ще два способи виготовлення біметалу по приведеній схемі. Перший з них полягає в тому, що в місцях з'єднання в пластині основи наскрізь свердлять ступінчаті технологічні отвори з більшим та меншим діаметрами, причому широка частина отвору розташована ззовні пластини основи, а вузька - зі сторони контакту з робочою пластинною, а енергію через широку частину технологічного отвору спрямовують безпосередньо на вузьку частину отвору (рис. 1, в). Інший передбачає виконання пластини основи збірною, яка набирається з тонких пластин, а в місцях з'єднання в тонких частинах основи наскрізь свердлять технологічні отвори з більшим та меншим діаметрами, причому тонкі пластини основи вставляють одна на одну так, щоб широка частина технологічного отвору була розташована ззовні пластини основи, а вузька - зі сторони контакту з робочою пластинною. При цьому енергію через широку частину технологічного отвору збірної пластини основи спрямовують безпосередньо на тонку пластину з вузьким отвором (рис. 1, г).

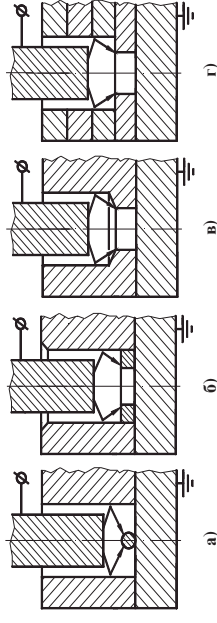


Рис. 1. Способи з'єднання пластин біметалу за допомогою вставленого штифта (а), шайби (б), ступінчатого отвору (в) та збірної пластини основи (г).

При використанні в якості джерела енергії електродугової сварки діаметр технологічного отвору підбирають декілька більшим діаметра зварювального електроду так, щоб останній вільно заходив в цей отвір. З іншої сторони, діаметр отвору не повинен бути дуже великим, щоб не надмірно витрачати електроди при подальшому зварюванні цього отвору.

Для здійснення зварювання електрод встановлюють в широку частину чергового технологічного отвору до контакту з встановленою перепорою (штифт чи шайба), або до контакту з вузькою частиною цього отвору. Відбувається утворення електричного розряду між електродом та перепорою чи вузькою частиною (рис. 1, а, б, в, г). В результаті плавлення електроду та перепони (чи вузької частини) розігрітій до високих температур рідкий метал стікає в напрямку поверхні робочої пластини. В результаті за рахунок ливарного процесу створюється ванна рідкого металу, яка частково підплавляє поверхню робочої пластини та бокових поверхонь технологічного отвору. Після заплавлення всього технологічного отвору та затвердіння рідкого металу отримуємо шов зчеплення робочої пластини та пластини основи біметалу, який надійно скріплює ці пластини. Режими зварювання підбирають такими, щоб зі сторони внутрішньої поверхні робоча пластина розплавилася не більше, ніж на половину своєї товщини. При цьому зовнішня поверхня цієї пластини не повинна псуватися. Можлива лише поява кольорів мінливості. В кінці бажано поверхню швів з'єднання проштифтувати урівень з поверхнею пластини основи.

В якості потужного джерела енергії можливе також використання лазерного випромінювання. Подача випромінювання в місце контакту пластин біметалу при цьому буде здійснюватися через технологічні отвори в пластині основи, а концентруватися випромінювання буде на поверхні перепони чи вузької частини технологічного отвору.

Таким чином, запропоновані способи забезпечують необхідну глибину  $z_{\text{ном}}$  проварювання робочої пластини біметалу та, як результат, потрібну міцність зчеплення пластин біметалу при відсутності псування поверхні робочої пластини.

УДК 621.375.826:621

Романенко В.В., к.т.н., доц.

КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ГАЗОЛАЗЕРНОЇ РІЗКИ МЕТАЛІВ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ДОДАТКОВОГО АБРАЗИВНОГО МАТЕРІАЛУ

Газолазерна різка (ГЛР) металічних матеріалів реалізується при подачі на поверхню листової заготовки сфокусованого лазерного променя і співвісного з променем струменю технологічного газу (найчастіше, кисню), що подається через конічне сопло, а пристрій перемищення забезпечує рух заготовки по заданій програмі.

Була поставлена задача вдосконалити технологію ГЛР, щоб, з однієї сторони, забезпечити інтенсифікацію процесу різки при стабільному його протіканні та, з іншої сторони, отримати високу якість виконаних різів.

Для вирішення поставленої проблеми був запропонований спосіб ГЛР металічних матеріалів, згідно якому в зону різки періодично подають електропровідний тугоплавкий абразивний матеріал за допомогою додаткового сопла, яке може бути концентричним першому. Це сопло забезпечує зовні котушкою індуктивності та дозатором. Дозатор подає у середину додаткового сопла електропровідний абразивний порошок, який в цьому соплі прискорюється імпульсним магнітним полем, створюючим котушкою індуктивності, і співвісно сфокусованому лазерному променю та газовому струменю виштовхується в порожнину різу, щоб з заданою періодичністю гасити процес горіння металу в струмені кисню та зчищати окисли металу з бокових поверхонь отриманого різу.

Спосіб реалізується таким чином. Лазерне випромінювання 1 концентрують за допомогою фокусуючої лінії 2 на верхній кромці заготовки 3, що розрізається. Спільно з лазерним випромінюванням 3 і співвісним йому в зону обробки піддувається струмінь робочого газу 4 (найчастіше при різці металів – кисень), що формується конічним соплом 5. Під час газолазерної різки металічних матеріалів на поверхні різки створюється шар розплавленого металу і його оксиди кінцевої товщини, який з часом трансформується на поверхні руйнування в краплевидну форму 6, що видаляється із зони різки уздовж напрямку руйнування 7 завдяки динамічній дії струменя газу 4.

Швидкість видалення продуктів руйнування визначає як глибину прорізання матеріалу (а значить і можливу товщину заготовок, що розрізаються), так і стабільність протікання процесу різки, що, в результаті, забезпечує необхідну якість отриманих різів. В нашому випадку більш успішне видалення продуктів руйнування та стабілізацію процесу різки забезпечує імпульсна подача електропровідного тугоплавкого абразивного порошку 8 (наприклад, карбід кременію чорного, легovanого алюмінієм) через додаткове сопло 9, яке може бути, наприклад, теж конічним. Абразив 8 таким чином в порожнину різу подається співвісно сфокусованому лазерному променю 1 та газовому струменю 4. Для введення абразивного порошку 8 в сопло 9 передбачений дозатор 10, який може здійснювати або порційну, або безперервну його подачу.

В додатковому соплі 9 електропровідний абразивний порошок 8 отримує прискорення за рахунок імпульсної дії магнітного поля, яке створюється котушкою індуктивності 11 (наприклад, котушкою Гауса), що розміщена ззовні сопла 9. Дійсно, якщо подати на соленоїд 11 постійний струм, то він створить електромагнітне поле, і кожна із частинок електропровідного абразивного порошку 8, що знаходиться в районі початку котушки індуктивності, починає розганятися. Це відбувається тому що котушка намагнічує порошок, а сама котушка із струмом в цей час теж є магнітом. Щоб абразив вилетів із соленоїда, потрібно прирати струм у той момент, коли намагнічений порошок досягне приблизно середини котушки. Тоді магніт-

не поле не заважатиме рухатися порошку далі за інерцією, і він отримає необхідне прискорення.

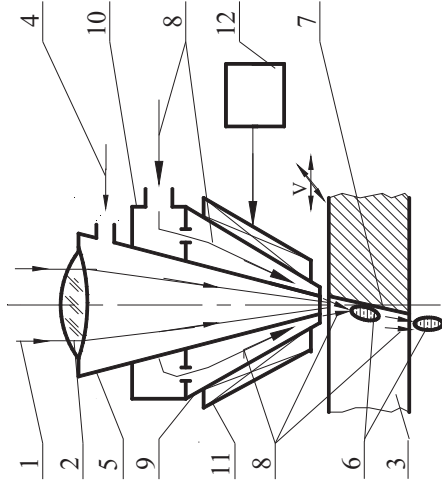


Рис. 1. Спосіб ГЛР металів при застосуванні електропровідного тугоплавкого абразивного порошку та імпульсного магнітного поля

Не зважаючи на те чи порційно, чи безперервно подається абразив 8 в сопло 9, на виході із нього (за рахунок імпульсної дії індукційних сил) отримуємо високошвидкісний порційний потік абразивного порошку, що подається в порожнину різу. Частота викиду абразиву регулюється частотою спрацювання котушки індуктивності 11, що, в свою чергу, задається джерелом струму 12 імпульсної дії. Імпульсна подача абразивного порошку, по-перше, перериває процес горіння металу в струмені кисню, по-друге, зчищає рідкий метал з поверхні руйнування, по-третє, тимчасово запобігає потраплянню лазерного випромінювання на поверхню руйнування 1, на кінець, зчищає окисли металу з бокових поверхонь отриманого різу. Сам же абразив, дякуючи своїй тугоплавкості, в порожнині різу не руйнується. Експериментально встановлено, що найкращий ефект дії абразиву на процес різки досягається при частоті спрацювання котушки індуктивності в 100 Гц. При цьому за час проходження сфокусованого лазерного променя відстані, рівної діаметру його фокальної плями, абразив встигає прочистити порожнину різу від 20 до 50 разів в залежності від швидкості різки.

Реалізація такої технології ГЛР забезпечує зростання товщини заготовок, що розрізаються, до 30 % та повністю очищає від окислів поверхню кромки вирізаних в такий спосіб деталей. Таким чином, на зазначену величину може бути підвищена продуктивність газолазерної різки матеріалів та забезпечена висока якість цього процесу.

Апробація ГЛР по запропонованій технології відбулася на лазерному устаткуванні потужністю в 1 кВт. Розрізанню піддавалися вуглецеві та нейтралюючі сталі товщиною від 1 до 7 мм. В якості тугоплавкого абразивного порошку використовувався карбід кременію чорного, легovanого алюмінієм. Для створення імпульсного магнітного поля була застосована котушка Гауса.

Було встановлено підвищення продуктивності ГЛР металічних матеріалів, що розрізаються, на 10...30 % при забезпеченні високої якості кромки отриманих деталей.

УДК 621.375.826:621

Головко Л.Ф. д.т.н., проф., Романенко В.В. к.т.н., доц., Блощинин М.С. к.т.н., доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ БІМЕТАЛІВ ЛИВАРНИМ МЕТОДОМ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЛАЗЕРНОЇ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ

В наш час біметали широко застосовуються в багатьох галузях промисловості. Такі матеріали, що виготовлені при надійному з'єднанні двох металів, поєднують можливості звичайних сталей (основи) з особливими властивостями матеріалу покриття (робочого шару). Зокрема, корозійностійкі біметали використовуються для виготовлення корпусів нафтохімічного і атомно-енергетичного устаткування, антифрикційні біметали — при виготовленні підшипників ковзання, біметали з різномірними особливими властивостями — при виготовленні вузлів ракетно-космічної техніки.

В останній час інтенсивні роботи ведуться при використанні ливарного методу отримання біметалів у поєднанні з використанням лазерної технології для попередньої підготовки поверхні основи біметалу для заливки робочим шаром.

Відомий спосіб ливарного виготовлення біметалів, що включає систему отримання біметалічного зливка зі зносостійким поверхневим шаром методом ливарного плакування при поданні розплавленого металічного матеріалу одного складу (наприклад, нержавіючої сталі) у виливницю, в якій встановлена плита із металічного матеріалу іншого складу (наприклад, сталі 10 або 20). Цей спосіб дозволяє отримувати біметал з корозійностійким шаром потрібної товщини без утворення кристалізаційних тріщин і інших дефектів як в самому плакуванні, так і на його поверхні. Проте при отриманні біметалічного зливка має місце мала глибина перехідного шару між основою та робочим металом, тому не досягається високий рівень міцності зчеплення шарів і виникає висока вірогідність виникнення відшарування робочого шару в процесі подальшого використання біметалу. Ось чому задача вдосконалення способу ливарного виготовлення біметалів, у якому забезпечується необхідна глибина перехідного шару між основою та робочим металом для забезпечення достатньо високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу є актуальною проблемою.

Поставлена задача вирішується тим, що в запропонованому новому способі ливарного виготовлення біметалів на поверхню основи, що підлягає заливці робочим шаром, заздалегідь наносяться необхідну фактуру потрібної структури та глибини, а розплавлений метал для отримання робочого шару перегрівають по відношенню до температури плавлення основи. При цьому величина перегріву цього розплаву залежить від виду та розмірів нанесеної фактури. Так за допомогою лазерного випромінювання або інших технологій на поверхні основи можна нанести спеціальну хвилясту фактуру у вигляді, наприклад, окремих «острівків» (рис. 1, а) чи смуг та борозен між ними (рис. 1, б), виходячи із наступних основних умов.

По-перше, ширина борозни  $X_2$  повинна бути достатньою, щоб в неї зміг затекти робочий розплав. Експериментальні дослідження показують, що борозни, шириною 0,5...1,0 мм, задовольняють цій умові. По-друге, глибина борозни  $H$  - достатньою, щоб товщини створеного перехідного шару між основою та робочим металом вистачало для їх надійного зчеплення. Експериментально встановлено, що при  $H = 0,2...0,7$  мм (не залежно від товщини основи та робочого шару) таке зчеплення має місце. І на кінець, ширина «острівку» чи смуги  $X_1$  вибирається із наступних міркувань: тепла розплавленого матеріалу, що заповнив борозну  $X_2$  повинно бути достатньо, щоб розплавити весь «острівок» чи смугу  $X_1$ . Для цього розплавлений матеріал повинен бути декілька перегрітий по відношенню до температури плавлення основи. Нескладні розрахунки показують, що при перегріві в 100°C (при температурі

плавлення  $\approx 1500^\circ\text{C}$ ) для «острівкової» структури масмо, що  $X_1 = 1/3 X_2$ , а для смугастої -  $X_1 = 1/6 X_2$ . При перегріві ж в 200°C для «острівкової» структури -  $X_1 = 1/2 X_2$ , та смугастої -  $X_1 = 1/4 X_2$ .

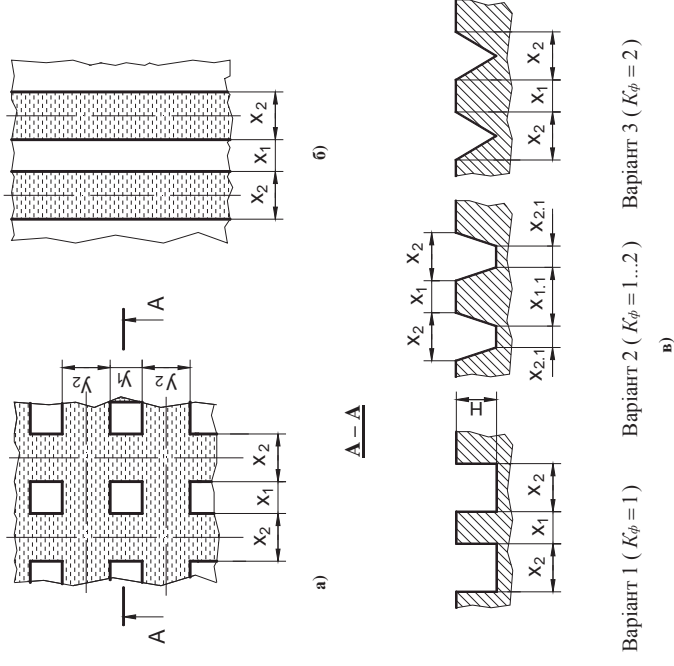


Рис. 1. Варіанти потрібної хвилястої фактури (вид зверху), нанесеної на пластині основи при реалізації «острівної» (а) та смугастої (б) структури та варіанти фактури по глибині (в).

Слід зазначити, що в залежності від методу отримання борозни, може бути умовно виконана її прямокутна, трапецієвидна чи трикутна форма (Рис. 1, в). Так, наприклад, прямокутна форма – при отриманні борозни фрезею чи шліфувальним кругом, трапецієвидна – токарним або стругальним різцем, а трикутна – лазерним променем. При цьому при розрахунках ширини «островку» чи смуги треба враховувати коефіцієнт форми  $K_\phi$ , значення якого приведено на рис. 1, в.

Завдяки вільній тепловій конвекції та перемішуванню робочого металу та розплаву основи, що створюється при плавленні «острівків» або смуг, і виникає перехідний сплав, який забезпечує високий рівень міцності зчеплення шарів біметалу.

Пропонований спосіб ливарного виготовлення біметалів істотно розширює можливості свого застосування за рахунок підвищення якості процесу в результаті забезпечення високого рівня міцності зчеплення шарів біметалу, що гарантує низьку вірогідність відокремлення робочого шару в процесі подальшого використання біметалу.

УДК 621.941

**Шевченко О.В.**, д.т.н., проф., **Манзюк С.А.**, аспірант  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАЛИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ВЕРСТАТІВ

У верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК) точність позиціонування за осми координат є однією з найважливіших технічних характеристик. Мінімальне одиничне переміщення на верстаті з ЧПК обмежується дискретністю його приводів, що є межею теоретично можливої точності обробки на верстаті, тому, чим менше дискретність, тим вище точність верстата. Малі переміщення в металорізальних верстатах використовують для компенсації похибок, які виникають в його технологічній оброблюваній системі внаслідок теплових та пружних деформацій, динамічних навантажень на холостних ходах та при різанні, зміни розмірного настроювання верстата та ін. При використанні систем автоматичного (адаптивного) керування з автоматичною компенсацією похибок обробки необхідно забезпечувати малі підрозділові цикли обробки, але і в межах самого робочого циклу, що значно підвищує точність та продуктивність обробки деталей. При цьому точність позиціонування в контрольному пункті може досягати частин мікрометра. Субмікронний діапазон похибок лінійного позиціонування і секунндний діапазон для куткових переміщень є характерними для сучасних ультраточних реалізацій металообробних верстатів, оптико-механічних приладів, роботів мікроманіпуляторів та ін. [1].

Спроби вирішення проблеми малих переміщень за допомогою традиційних електромеханічних систем нагрівають на ший ряд технічних труднощів. При створенні мікропереміщень і роботі на наднизьких швидкостях електромашинні виконавчі пристрої постійного і змінного струму працюють в нестійких (зарегульованих) режимах, що проявляється в нерегулярних коливаннях об'єкту позиціонування в напрямку руху. Крім того, істотний вплив мають нелінійності кінематичних передач (люфти, сухе тертя, зони нечутливості та ін.), нехтувати якими в цих умовах неможливо. Навіть у кращих шарико-гвинтових передачах повторюваність при позиціонуванні досягається з похибкою від десятих частин до одиниць мікрометрів. Таким чином, можна зробити висновок про те, що традиційні електромашинні виконавчі пристрої в цьому напрямку свої можливості вичерпали і потрібний перехід на інший технологічний рівень із застосуванням нових матеріалів, інших фізичних ефектів і конструктивних рішень, що долають вказані недоліки [2].

Виробники сучасних прецизійних верстатів стикаються з рядом важливих проблем, вирішення яких забезпечує необхідний рівень точності та якості обробки деталей:

- забезпечення термічної стабільності технологічної системи верстата, враховуючи, що похибки від теплових деформацій можуть складати до 50% всіх похибок обробки;
- вибір матеріалів несучих вузлів верстата, наприклад, заміна чавуну на полімербетон, що майже в 10 разів ефективніше гасить коливання та має нижчу на 50% теплопровідність;
- використання напрямних, що забезпечують точність позиціонування до  $0,3 \pm 0,5$  мкм, значні прискорення при допоміжних рухах повзунів з ефективним гасінням коливань, практичну відсутність зношення та тертя під час руху, наприклад, гідро- чи аеростатичні напрямних;
- використання оптичних лінійок з точністю вимірювання до 0,01 мкм.

Вирішення цих проблем виробниками призводить до суттєвого здорожечення верстатів та до високої вартості деталей, що обробляються на верстатах цього рівня. Разом з тим, використання спеціальних вузлів верстата з приводами для мікро(нано)позиціонування, як додаткового обладнання, може суттєво зменшити витрати на придбання верстатного обладнання, при забезпеченні необхідних для виробництва точності та якості обробки деталей.

Аналіз конструктивних особливостей відомих пристроїв з механізмами підналаджен-ня інструменту, технологічних можливостей високоточних токарних верстатів та типових деталей, що обробляються на них, дозволяє встановити основні вимоги до пристроїв малих переміщень, а саме: - діапазон малих переміщень не перевищує 0,3 мм, що для різального інструменту визначається критерієм зносу його різальних кромок; - точність позиціонування до  $0,3 \pm 0,5$  мкм; - повторюваність при позиціонуванні не гірше 0,5 мкм; - жорсткість за напрямками дії складових сили різання не нижче  $10 \pm 20$  Н/мкм; - лінійна залежність між переміщенням повзуну та відносно дією в приводі; - відсутність люфтів та мертвих ходів при реверсуванні [3].

Основною складністю забезпечення точного позиціонування робочого органу є отримання малих переміщень при забезпеченні необхідної жорсткості передачі. Для позиціонування в мікро- та нанометричному діапазонах в приводах верстатів доцільно додатково використовувати спеціальні пружні кінематичні пристрої, що виконують функції пружних напрямних чи пружних шарнірів та виключають вплив зовнішнього тертя в останній передачі приводу на точність позиціонування. Найбільше в якості пружних напрямних використовують конструкції, у яких пружні елементи мають форму тонких жорстких пластин, що з'єднують нерухому частину повзуну з рухомою частиною утворюючи рамну конструкцію. Статична жорсткість такої конструкції в основному визначається формою, розмірами та розміщенням пружних пластин відносно точки прикладання сили різання, а також податливістю та місцем розміщення виконавчого приводу малих переміщень рухомої частини.

В якості виконавчих приводів, що працюють в нанометричному діапазоні, використовують магнітостриктійні, п'єзоелектричні, електромагнітні та теплові перетворювачі. Найбільш поширеними серед них є п'єзоелектричні пристрої, що випереджають всі інші типи за такими показниками, як енергозбереження, мініатюризація та адаптивність до систем управління. Значна увага, що приділяється п'єзоматеріалам та елементам на їх основі, пояснюється рядом їх переваг, а саме: високою надійністю; малогабаритними показниками; стійкістю до впливу агресивного середовища; високою термостійкістю; можливістю використання без додаткових кінематичних зв'язків та ін. Завдяки жорсткій структурі п'єзоприводи є високоексплуативним інструментом для швидкого та точного настроювання верстата. Такі приводи створюють значні зусилля (до 5,0 – 10,0 кН), що є достатніми для деформації пружних напрямних в заданому діапазоні переміщень. Для збільшення діапазону позиціонування п'єзоелементи об'єднують у пакетні конструкції, які називають п'єзоелектричними актуаторами. Таким чином, комбінація пружних напрямних та п'єзоелектричного приводу (актуатора) для позиціонування повзуну дозволяє вирішити проблему малих переміщень в нанометричному діапазоні при необхідній жорсткості конструкції. Введення розмірного регулювання зменшує витрати на заробітну плату зниженням вимог до кваліфікації персоналу; - зменшення витрат на різальний інструмент за рахунок повного використання періоду його стійкості; - зменшення витрат на контрольні операції, так як контроль може здійснюватись в процесі обробки; - зменшення витрат на брак за рахунок зниження ймовірності його виникнення.

### Список літератури:

1. *Лучкин В.К., Клямов Д.Г. Привод микроперемещений и микроподат для станков с ЧПУ // Вопросы современной науки и практики / Университет им. В.И. Вернадского, Тамбов, №2(46), 2013. с. 287-291.*
2. *Бойцов А.А., Бойцов В.И., Быстров С.В., Григорьев В.И. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. Учебное пособие – С.-Петербург: ГУ ИТМО, 2011. – 131 с.*
3. *Шевченко О.В., Манзюк С.А. Высокоточная привода вано- та мікропереміщень при ультраточній обробці на верстатах // Вісник ЖДТУ, Житомир, № 4 (67) / Серія: Технічні науки - 2013. с. 42-48.*

УДК 621.923

Гейчук В.М., проф., д.т.н., Гаврушкевич А.Ю., к.т.н., старший викладач  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ РОТОРНОЇ ГОЛОВКИ ДЛЯ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ЗУБ'ЯВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

В [1] розроблено основні положення кінематики магнітно-абразивної обробки (МАО) циліндричних зубчастих коліс над кільцевою ванною. Але реалізація цього способу обробки зустрічає певні складнощі через відсутність обладнання та недосконалість методики його проектування. В склад верстатів роторного типу входить роторна головка [2]. Одним із важливих параметрів головки є потужності приводів, що входять до складу головки, і масово-інерційні характеристики, що, в свою чергу, залежать від потужності зазначених приводів. Саме тому при розробці роторної головки для реалізації МАО коліс над кільцевою ванною [1] у приводах додаткових подач використані кулачкові механізми.

Головка (рис. 1) складається із корпусу 1, який закріплено, наприклад на оправці 2 з ко- нусом 7-24. Оправка встановлюється і закріплюється в шпинделі. В корпусі 1 на підшипнику 3 з перекресними роликками встановлено корпус 4, що містить привод першої додаткової кругової подачі (коливального руху розвороту на кут  $\pm\alpha$ ) з електромеханічним приводом М3. В нижній частині корпусу 4 в дуговому пазу розміщені ролики 5, на яких встановлено корпус 6 з робочим шпинделем (валом) І, приводом кругової подачі з електромеханічним приводом М1 та приводом другої додаткової подачі (коливального руху нахилу на кут  $\pm\xi$ ) з електромеханічним приводом М2.

Робочий шпиндель І з оброблюваною заготовкою встановлений на постійній задній опорі 7 з двома підшипниками та передній відвідний опорі 8 з сферичними підшипниками 9. Стержень 10 слугує для підтримки опори при відведенні/підведенні. Шпиндель І з'єднано валом ІІ з приводом кругових подач М1 зубчато-пасовою передачею  $Z_{п1} = 20$ ,  $Z_{ш2} = 31$ ,  $Z_{п1} = 71$ .

На корпусі 6 встановлено електромеханічний привід М2 другої додаткової подачі, що валом ІІІ з'єднаний з кулачковим механізмом КМ1. Штовхач цього механізму з'єднаний з зубчатою рейкою ЗР1, яка з'єднана зубчастими секторами  $Z1=34$  та  $Z2=153$  (на двох бокових сторонах корпусу 6) з зубчастими секторами  $Z3=115$ , що закріплені на двох внутрішніх сторонах корпусу 4 співвісно дуговому пазу а. В пазу а встановлені ролики 5, осі яких закріплені на двох бокових сторонах корпусу 6. Вісь повороту сектора З3, корпусу 6 на роликах 5 по дугових пазах є віссю коливання заготовки, дотичною до зовнішнього циліндру зубів оброблюваного колеса в площині середній до торців вінця.

Електромеханічний привід М3 першої додаткової подачі встановлено в верхній частині корпусу 4. Привід М3 валом ІV, зубчато-пасовою передачею  $Z_{п3} = 17$ ,  $Z_{ш4} = 17$ ,  $Z_{п4} = 36$  з'єднаний з валом V, на якому встановлений кулачок кулачкового механізму КМ2. Коромис- ло кулачкового механізму КМ2 встановлено на валу VI. На його кінці, протилежному ролику, встановлено зубчастий сектор Z4, зчеплений з зубчастим сектором Z5, що нерухомо закріплено на корпусі 1. При цьому вісь зубчастого сектору Z5 співпадає з віссю повороту корпусу 4 в підшипнику 3 та проходить через центр коливань заготовки.

При обробці колеса повинні здійснювати наступні рухи:

- обертання ротора навколо осі кільцевої ванни (осі оправки 2) зі швидкістю  $\omega_p$  - головний рух різання;
- обертання колеса навколо власної осі (осі валу І) зі швидкістю  $\omega_s$  - рух кругової подачі;
- додатковий обертаний коливальний рух  $\omega_a$  навколо проєкції осі "кільцевої ванни" на

площину, дотичну до її середнього циліндра, (навколо осі валу VI) на кут  $\pm\alpha_{доп}$  - рух першої додаткової кругової подачі;

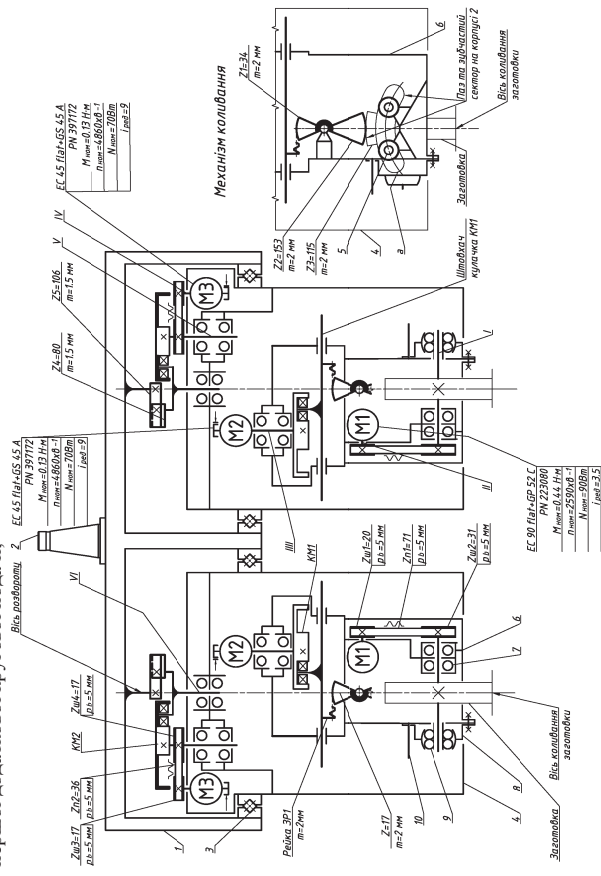


Рис.1. Кінематична схема роторної головки

- додатковий обертаний коливальний рух на кут  $\pm\xi_{доп}$  відносно положення, при якому вісь колеса є горизонтальною (паралельною торцю кільцевої ванни), зі швидкістю  $\omega_0$  в площині, дотичній до середнього циліндру кільцевої ванни - рух другої додаткової кругової подачі;
- переміщення  $T_z$  вздовж осі кільцевої ванни для занурення колеса у робочу зону зі швидкістю  $V_{вр}$  - рух врізання.

При цьому рухи додаткових кругових подач повинні виконуватись за залежностями:  $\xi(\varphi) = \xi_{доп} \cdot \sin(n_O \cdot \varphi)$  - в русі першої додаткової кругової подачі,  $\alpha(\varphi) = \alpha_{доп} \cdot \sin(n_A \cdot \varphi)$  - в русі другої додаткової кругової подачі. В цьому випадку швидкості додаткових кругових подач будуть визначатись за наступними виразами:

$$\omega_{az} = \frac{d\alpha(\varphi)}{dt} = \alpha_{доп} \cdot n_A \cdot \cos(n_A \cdot \varphi),$$

$$\omega_{O1} = \frac{d\xi(\varphi)}{dt} = \xi_{доп} \cdot n_k \cdot \cos(n_k \cdot \varphi),$$

де  $\alpha(\varphi) = \alpha_{доп} \cdot \sin(n_A \cdot \varphi)$  - кут повороту в русі першої додаткової кругової подачі, а  $n_A$  - кількість коливань за оберт колеса в русі кругової подачі;  $\xi(\varphi) = \xi_{доп} \cdot \sin(n_k \cdot \varphi)$  - кут повороту в русі другої додаткової кругової подачі, а  $n_O$  - кількість коливань за оберт колеса в русі кругової подачі.

Подальше проектування роторної головки виконується в наступному порядку.

1. Визначення навантажень на оброблювані поверхні заготовок на основі експериментальних залежностей дотичних напружень в парях "оброблювана поверхня - магнітно-

образивний інструмент (МАІ) "і МАІ-МАІ" від магнітної індукції, розмірів частинок порожку, швидкості різання і від нормальних напружень [3, 4]. Для визначення сили лобового опору на торці оброблюваного сектора зубчастого колеса використовуються результати досліджень руху тіл в МАІ [5]. При цьому втрачуються тільки нормальні складові від сил терміри врівноважуються завдяки характеру руху МАІ.

2. Визначення навантажень від магнітних сил за спрощеною формулою Максвелла. При цьому враховується змінний характер навантажень через зміну площі поверхні, на яку діє магнітна сила, завдяки рухам додаткових кругових подач. Змінними є також координати точки прикладення рівнодіючих магнітних сил, і, завдяки цьому, їх моменти.

3. Визначення рівнодіючих навантажень, моментів та потужності кожного із приводів головного руху та рухів подач.

4. Кулачкові механізми потрібно використовувати з геометричним замиканням, оскільки при рекомендованих значеннях допустимих кутів розвороту  $\alpha_{\text{дол}} = \pm 30^\circ$  та нахилу

$\xi_{\text{дол}} = \pm 25^\circ$  величини підйому профілів кулачків мають відносно значні величини. В зв'язку з цим використання силового замикання є досить проблематичним. Конструкції кулачків повинні бути збалансованими відносно осі обертання.

5. Для зменшення маси рухомих деталей потрібно застосувати матеріали із алюмінієвих та інших легких сплавів.

6. Визначити динамічні навантаження, що виникають під час обробки заготовки. Це можна зробити, наприклад, за допомогою модуля "Динамічне моделювання" CAD/CAE системи Autodesk Inventor Professional.

7. Виконати розрахунок напружено-деформованого стану роторної головки, наприклад за допомогою "Аналіз напружень" CAD/CAE системи Autodesk Inventor Professional.

8. Виконати аналіз результатів розрахунку напружено-деформованого стану роторної головки, виявити деталі з недостатнім коефіцієнту запаса міцності. Розробити заходи з забезпечення запаса міцності зазначених деталей. За допомогою інструмента "Генератор форм" Autodesk Inventor оптимізувати масово-нерійні параметри масивних деталей.

9. Застосувати до конструкції головки розроблені заходи. Повторно виконати динамічний аналіз та розрахунок напружено-деформованого стану головки. Повторно виконати аналіз результатів і за необхідності повернутись до пункту 6.

## Список літератури

1. Гаврушкевич А.Ю. Основи положення кінематики МАО шліндричних зубчастих коліс. Дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Гаврушкевич Андрій Юрійович. - Київ, - 2016. - 303 с.
2. Пат. 100013 Україна, В24В 31/12 (2006.01). Спосіб магнітно-образивної об'ємної обробки / В.М. Гейчук, В.С. Майборода, А.Ю. Гаврушкевич, О.О. Галицький; заявник та патентовласник "Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". - а 2014 09043; заявл. 11.08.2014; опубл. 10.07.2015; бюл. № 13.
3. Майборода В.С. Основи створення і використання порошкового магнітно-образивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01/Майборода Віктор Станіславович. Київ, 2001. - 404 с.
4. Майборода В.С. Вплив мащувально-охолоджуючих технологічних середовищ (ЗОТС) на трибтехнічні властивості порошкового магнітно-образивного інструменту/ В.С. Майборода, В.М. Гейчук, О.А. Івановський // Технологія і техніка друкарства. 36 наук.праць. Вип. 4(6). ВПН НТУУ "КПІ". К. - 2004. с. 56-67.
5. Ткачук І.В. Формування магнітно-образивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу. дис. ... канд. техн. наук: 5.03.01 / Ткачук Іванна Валентинівна. - Київ, 2015. - 164 с.

УДК 621.7.044

Свяцький В.В., к.т.н., доц., Скрипник О.В., к.т.н., доц.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ ГЛИБОКИХ ОТВОРІВ. ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ РОЗВ'ЯЗКУ ЗАВДАННЯ НАЙПРОСТІШИМИ ЗАСОБАМИ

Свердлення глибоких отворів є трудомісткою технологічною операцією, особливо при обробці в'язких матеріалів. В системі верстат – пристрій – інструмент – деталь (ВПІД) при глибокому свердлінні в найбільш важких умовах працює інструмент – свердло [1]. Замкнений об'єм обробки, різноманітні функції, виконання яких повинна забезпечувати конструкція інструменту, форсовані режими різання змушують працювати корпус свердла, його різучі і напірні елементи з високими напруженнями.

Рішення задач підвищення продуктивності обробки і збільшення граничної глибини свердлення [2] пов'язане з раціональним вибором параметрів свердла і умов його експлуатації. Алгоритм вирішення проблем глибокого свердління наведено на рис. 1.

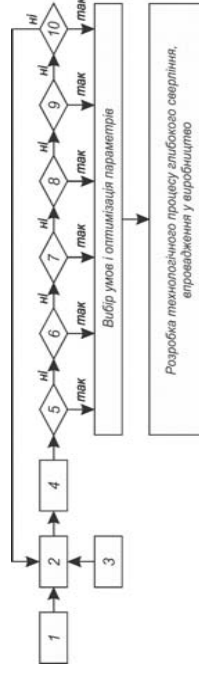


Рис. 1 – Алгоритм вирішення проблем глибокого свердління

Далі розглянуто приклади методів оптимізації способів обробки глибоких отворів спіральними свердлами, які підвищують ефективність процесу.

Підвищення ефективності глибокого свердління спіральними свердлами може здійснюватися двома шляхами: підвищенням жорсткості встановлення і закріплення свердла [3] або зміною положення свердла в просторі [4].

Структурні схеми приводу [5], отримані результати досліджень [6] і узагальнення робіт [1 – 6] склали основу створення ряду нових конструкцій механізмів зі змінною структурою, що працюють за методом перехоплення стебла інструмента по його довжині (див. рис. 2). Ці механізми забезпечують передачу крутного моменту осовою сили свердлу при мінімальному вильоті і здійснюють дискретну подачу. Конструктивною особливістю цих механізмів є наявність в осьовому напрямку рухливих затискачів, які по черзі включають, і механізму керування затискачами. Механізм затискачами забезпечує почергову фіксацію свердла в осьовому напрямку і дискретне його переміщення.

На рис. 2, а показана схема установки свердла з однією проміжною опорою, що поділяє відстань  $l$  на ділянки  $a$  і  $b$ . Застосування даної схеми дозволяє підвищити подовжню стійкість інструменту при глибокому свердлінні. Проте, у міру заглиблення свердла в заготовку

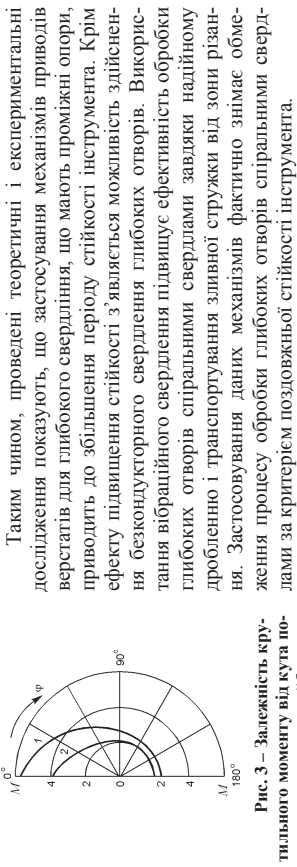


Рис. 3 – Залежність крутильного моменту від кута повороту планшайби

Приклади вирішення завдань свердлення іншими типами свердл і методів оптимізації їхнього використання відповідно до алгоритму (рис. 1) будуть розглянуті в подальших публікаціях.

Список літератури

1. *Пестунов В. М. Элементы системы СПИД, отрачивающие выходные характеристики процесса глубокого сверления* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Материалы IV Международной научно-практической конференции „Наукowym progress na rubieży tyśiącleci – 2008”*. – Przemysł : Nauka i studia, 2008. – Тум 14. *Techniczne nauki*. – Str. 53-55.
2. *Пестунов В. М. Решение проблем глубокого сверления в металлообработке* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Вестник НГТУ „КПИ”*. Машиностроение. – К.: НГТУ „КПИ”, 2006. – № 49. – С. 173-178.
3. *Пестунов В. М. Процесс глубокого сверления с управлением потоками стружки в кинематичных ланцюгах формування* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Материалы IV международной ве́дско-практической конференции „Nastoleni modeni vědi – 2008”*. – Praha : Publishing House „Education and science” s.r.o., 2008. – Dll. 9. *Technické vědy, Tělovýchova a sport*. – S. 31-33.
4. *Пестунов В. М. Увеличение производительности процесса глубокого сверления повышением жесткости установки сверла* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Материалы IV международной научно-практической конференции „Перспективные направления науки и техники – 2008”*. – Przemysł : Nauka i studia, 2008. – Тум 13. *Techniczne nauki*. – Str. 89-91.
5. *Пестунов В. М. Увеличение производительности процесса глубокого сверления изменением пространственного положения инструмента* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Материалы V международной ве́дско-практической конференции „Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2009”*. – Praha : Publishing House „Education and science” s.r.o., 2009. – Dll. 15. *Technické vědy, Vystavba a architektura*. – S. 14-16.
6. *Пестунов В. М. Разработка привода для глубокого сверления методом перехопления стебля инструмента по новому дознанню* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. – Кіровоград : КНТУ, 2008. – Вип. 20. – С. 169-172.
7. *Пестунов В. М. Підвищення ефективності процесу обробки глибоких отворів спіральними свердлами* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. – Кіровоград : КНТУ, 2009. – Вип. 22. – С. 335-340.
8. *Пестунов В. М. Підвищення продуктивності процесу глибокого свердління при нахиланні на інструмент осових кольянів* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Материалы V международной научно-практической конференции „Научова mysl infomatsynogo wieku – 2009”*. – Przemysł : Nauka i studia, 2009. – Volume 15. *Techniczne nauki, Budownictwo i architektura*. – Str. 33-35.
9. *Пестунов В. М. Використання методів вібраційного свердлення в сільськогосподарському машинобудуванні* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л. П. Свяцкая // *Конструювання, виробництво і експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Кіровоград : КНТУ, 2010. – Вип. 40. Част. 2. – С. 185-189.
10. *Пестунов В. М. Оптимізація процесу обробки глибоких отворів* / В. М. Пестунов, В. В. Свяцкий, С. В. Придворова // *36. наук. праць КНТУ: Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. – Кіровоград : КНТУ, 2012. – Вип. 25. Част. 1. – С. 200-210.

змінюється величина його вильоту і, відповідно, відношення  $a$  до  $b$ , як для отримання максимальної жорсткості інструменту під час процесу свердлення бажано зберігати постійним. Сказане призводить до ускладнення конструкції механізму. Завдання не вирішується і на схемі (див. рис. 2, б), не дивлячись на те, що технологічні можливості по допустимій глибині свердлення поліпшуються.

Схема (див. рис. 2, в) забезпечує рівномірну зміну відстані між опорами у міру заглиблення свердла в заготовку, проте наявність пружин і проміжних опор збільшує загальний виліт свердла порівняно з глибоким свердленням. Підвищення поздовжньої стійкості і жорсткості інструменту в процесі обробки отворів забезпечує схема (див. рис. 2, г). По цій схемі шток гідроприводу подає безпосередньо з'єднаний із свердлом. А оскільки жорсткість штока завжди вище за жорсткість свердла при рівних діаметрах, то схема (див. рис. 2, г) забезпечує підвищення жорсткості інструмента і, відповідно, підвищує ефективність процесу глибокого свердлення.

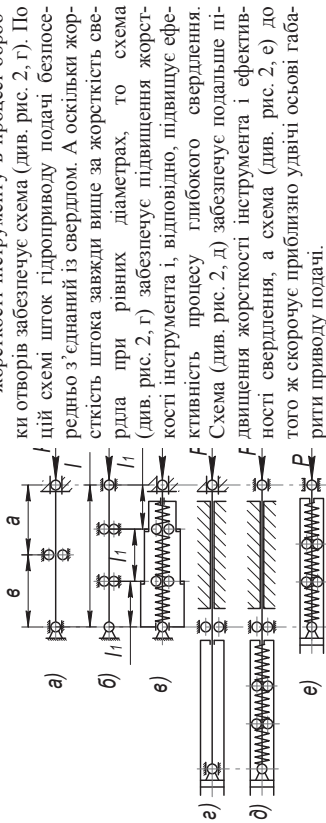


Рис. 2 – Схеми вирішення задачі підвищення поздовжньої стійкості свердл при глибокому свердленні [11]

Ефективність обробки глибоких отворів спіральними свердлами можна підвищити завдяки застосуванню вібраційного свердлення, що у порівнянні із традиційним свердленням забезпечує: зниження сил тертя по поверхні контакту інструмента із заготовкою, надійне дроблення і транспортування зливної стружки від зони різання, підвищення ефективності застосування мастильно-охолодженого технічного засобу (МОТЗ) тощо.

Для свердління отворів у діпазоні діаметрів від 3 до 9 мм зі співвідношенням  $L/D \geq 3$  розроблена конструкція кульового вібратора [8, 9]. Для вібраційного свердління за допомогою наведеного пристрою використовують стандартні спіральні свердла зі збільшенням заднім ходом.

Підвищити ефективність процесу глибокого свердлення можна зміною положення ріжучого інструменту в просторі [10]. Проведені дослідження процесу свердлення показали (див. рис. 3), що поворот планшайби від  $0^\circ$  до  $180^\circ$  (перехід від свердлення зверху до свердлення знизу) забезпечує зниження моменту крутильного навантаження на інструмент в три рази при обробці сталі (див. рис. 3, крива 1) і в два рази при обробці чавуну (рис. 3, крива 2) за однакових умов різання.

При переході від свердлення зверху до свердлення знизу спіральними свердлами виникає проблема підведення МОТЗ в зону обробки. Цю проблему вирішує конструкція [2], в якій система подачі МОТЗ під тиском сполучена з ріжучою частиною свердла. В процесі обробки система підведення МОТЗ забезпечує охолодження ріжучої частини свердла при будь-якому розташуванні інструмента в просторі, зменшуючи тим самим дію сил тертя і вививаючи стружку з отвору, що оброблюється.



## УДК 621.951.4

Дашенко А.Ф., д.т.н., проф., Лимаренко А.М., к.т.н., доц., Кравчук В.С., к.т.н., доц., Одеський національний політехнічний університет, г.Одесса, Україна

## РАЗРАБОТКА УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ВЕСОВЫХ УСТРОЙСТВ

Известно, что одним из недостатков эксплуатируемых весовых устройств является наличие специальных взвешивающих платформ. Установка таких платформ приводит к существенным затратам на монтаж, а при наезде на них вагонов возникает вибрация, которая негативно влияет на точность взвешивания. На сегодняшний день при рациональном способе автоматического взвешивания движущихся объектов стараются не использовать специальные взвешивающие платформы.

Стоит отметить, что независимо от конструкции весоизмерительного устройства, упругий элемент является его основной деталью определяющим область применения и отвечающим за чувствительность и точность измерения нагрузок.

Поэтому в работе рассматривается комплексный вопрос – создание упругого элемента одновременно являющимся весоизмерительным устройством.

В практике измерения веса грузов не являются новинкой устройства для взвешивания движущихся объектов, в которых продольные несущие элементы выполняются в виде рельса. В зоне нейтральной оси поперечного сечения рельса устанавливаются соосные кольцевые элементы с тензорезисторами наклеенными на их цилиндрические поверхности [1]. Следует отметить, что получаемый при взвешивании электрический сигнал невелик, потому как тензорезисторы устанавливаются в зоне с минимальными деформациями. В таких устройствах невозможно использовать винтовые тензорезисторы, поэтому при вибрации, вызванной неравномерным вращением колес вагонов, в клеевой прослойке наблюдается отклеивание тензорезисторов. Поэтому такие устройства не долговечны. Соответственно неизвестно точно время нормальной работы подобных устройств, и потому они не нашли широкого применения.

В работе представлена оригинальная форма упругого элемента для поосного способа взвешивания железнодорожных вагонов и составов. Такой упругий элемент может быть использован в весах для определения массы различных транспортных средств, как во время статического взвешивания, так и во время взвешивания в движении (рис. 1).

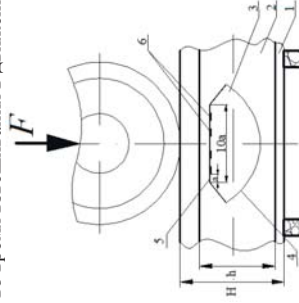


Рис. 1 – Принципиальная схема измерительного узла.

1 - весоизмерительный участок рельса, 2 - вертикальная стенка, отверстие, 4 - нижнее основание трапеции образцованное дугой, 5 - верхнее основание трапеции, 6 - тензорезисторы

Известны способы определения поосной нагрузки и суммарной массы железнодорожных вагонов в движении, когда усилие от колеса вагона, движущегося с определенной ско-

ростью, передается введенном в его вертикальную стенку силоизмерительное элемента с тензорезисторами который вырабатывает сигнал пропорциональный усилию что воспринимается и передает его к аппаратуре индикации и регистрации.

Недостатком такого способа является снижение надежности и точности измерения от искажения процесса силоведения, связанного с наличием прорезей для крепления силоизмерительных элементов, а также с отсутствием герметизации силоизмерительного узла.

Целью исследования альтернативной конструкции упругого элемента является повышение надежности в работе грузоприёмного устройства железнодорожных весов, который встраивается в действующее железнодорожное полотно без нарушения движения железнодорожных составов, повышение точности измерения, а также простоты установки.

В основу изобретения поставлена задача создания способа оперативного встраивания грузоприёмного устройства в действующее железнодорожное полотно без нарушения движения железнодорожных составов.

Поставленная задача решается тем, что в соответствии с предложенным способом, встраивания грузоприёмного устройства в действующее железнодорожное полотно, который включает наклеивание в оригинальном проеме гибкого элемента датчика.

Продольный силоизмерительный элемент, с помощью клея, устанавливаются параллельно основной оси симметрии сечения рельса, создают поперечное натяжение между всеми соединенными поверхностями устройства, участвующих в передаче усилия от колеса железнодорожного вагона на продольный силоизмерительный элемент, передают сигнал, который производит силоизмерительный элемент, пропорционально усилию, что воспринимается, к аппаратуре индикации и регистрации.

Техническим результатом способа является повышение надежности в работе грузоприёмного устройства железнодорожных весов, повышение точности измерения за счет деформации гибкого элемента.

Новизна способа заключается в создании отверстия оригинальной формы, который имеет малое количество зон концентрации напряжений, при этом практически не уменьшая срок использования железнодорожного полотна.

Анализ заявляемого технического решения по сравнению с другими известными из научно-технической литературы позволяет выявить признаки, которые отличают новые решения, от прототипа, что позволяет авторам сделать вывод о соответствии признаков, критерию "существенные отличия", которые определяют новизну изобретения. На рис. 2 представлена конечно-элементная модель рельса с отверстием, которое реализует способ.

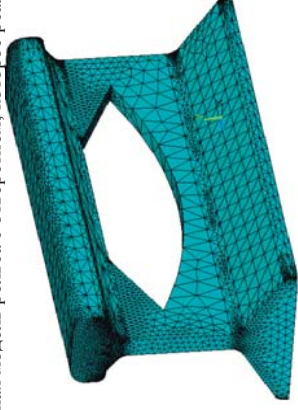


Рис. 2. Конечно-элементная модель упругого элемента

Для устранения больших погрешностей, отверстие выполнено в форме правильной трапеции, которая вписана в эллипс. Верхняя часть отверстия является меньшим основанием правильной трапеции, где два развернутых угла, являются зонами максимальных напряжений.

Меньшее основание трапеции, является участком для закрепления датчика. По отношению к нагрузке на рельс, больше деформируется меньшее основание, так как находится между разогнутыми углами (рис. 3).

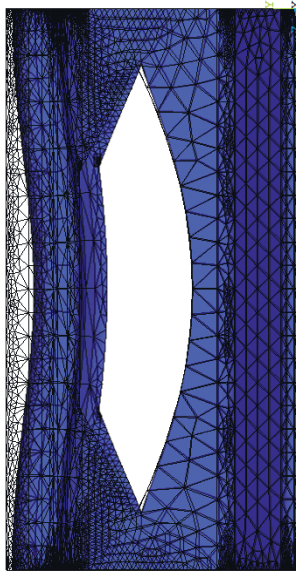


Рис. 2. Деформированная форма упругого элемента

Боковая и нижняя части отверстия имеют форму незаконченного эллипса. Это сделано для того, чтобы увеличить надежность и долговечность конструкции.

Оригинальность отверстия заключается в совокупности двух противоположных задач сопротивления материалов. Для создания отверстия такой формы были задействованы теория упругости и пластичности.

Способ грузоприемного устройства в действующее железнодорожное полотно, предусматривающий введение в вертикальную стенку рельсы упругого элемента датчика отличаются тем, что силовой измерительный элемент устанавливается в сечение оригинальной формы максимально отражающей деформацию при нагрузке в зоне передачи усилия от колеса железнодорожного вагона на продольный, силовой измерительный элемент, пропорциональный усилию, что воспринимается аппаратурой индикации и регистрации.

Таким образом, способ встраивания грузоприемного устройства в действующее железнодорожное полотно обеспечивает установку и стабильное горизонтальное положение продольного силовой измерительного элемента, который гарантирует оптимальный процесс силового введения, повышает точность измерения, надежность работы устройства.

Предложенная оригинальная конструкция упругого элемента и способ встраивания грузоприемного устройства в железнодорожное полотно выгодно отличается от существующих весовых устройств и уже нашел свое применение для поосного взвешивания железнодорожных вагонов и составов.

#### Список литературы:

1. Дашенко А.Ф. Анализ напряженно-деформированного состояния альтернативной конструкции фиксации переломов предельца. / А.Ф. Дашенко, А.М. Лимаренко, А.Д. Стаканов. XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», Одеса-Київ 2015 с. 185-190.
2. Limarenko A.M. The optimization of car engine piston-rod by numerical method. / A.M. Limarenko, V.V. Khamray, A.A. Druzhyun. Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури – 2015. ч.1 вип.51, с. 586-589.
3. Лимаренко А. М. Експериментальні методи дослідження в механіці: навч. посібник / А. М. Лимаренко, Г.О. Оборський, Н. Г. Сурьянінов. - О.: Астропринт, 2011. - 544 с.

УДК 621.873

Неженцев А.Б. к.т.н., доц.  
КПИ им. Игоря Сикорского, г. Клев, Украина

#### АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ПОДЪЕМЕ ГРУЗОВ МОСТОВЫМИ КРАНАМИ

Проблему повышения эффективности энергопотребления грузоподъемных кранов невозможно решить без совершенствования методов расчета потерь энергии. В работах по теории электропривода [1, 2 и др.] часто используют упрощенный подход, базирующийся на использовании одномассовой модели. Это не позволяет исследовать влияние свойств металлоконструкции крана, канатов, высоты подъема и др. факторов на потери энергии при подъеме грузов. Поэтому для исследования переходных процессов при подъеме грузов кранами необходимо использовать математические модели, наиболее полно учитывающие все основные факторы электромеханической системы «привод - металлоконструкция - груз» (см. рис. 1). Исследования [3, 4] показали, что проблема снижения потерь энергии в мостовых кранах должна решаться вместе с задачей снижения динамических нагрузок, поскольку улучшение одних показателей приводит к ухудшению других.

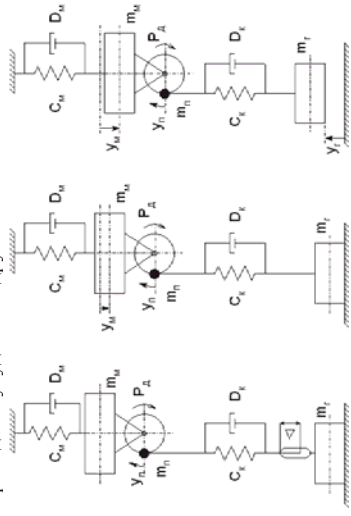


Рис. 1. Расчетная схема мостового крана при подъеме груза

Переходные процессы при подъеме груза «с подхватом» мостовым краном, представленным трехмассовой расчетной схемой, описываются следующей системой дифференциальных уравнений [3-5]:

$$1\text{-й этап (выбор зазоров в механизме и слабины канатов)} \\ m_{\text{п}} \cdot \ddot{y}_{\text{п}} - P_{\text{д}} = 0; \quad (1)$$

$$2\text{-й этап (изменение усилия в канатах от нуля до силы тяжести груза)} \\ \begin{cases} m_{\text{п}} \ddot{y}_{\text{п}} + D_{\text{к}}(\dot{y}_{\text{п}} - \dot{y}_{\text{м}}) + C_{\text{к}}(y_{\text{п}} - y_{\text{м}}) - P_{\text{д}} = 0; \\ m_{\text{м}} \ddot{y}_{\text{м}} - D_{\text{к}}(\dot{y}_{\text{п}} - \dot{y}_{\text{м}}) - C_{\text{к}}(y_{\text{п}} - y_{\text{м}}) + D_{\text{м}} \dot{y}_{\text{м}} + C_{\text{к}} y_{\text{м}} = 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$3\text{-й этап (после отрыва груза от основания)} \\ \begin{cases} m_{\text{п}} \ddot{y}_{\text{п}} + D_{\text{к}}(\dot{y}_{\text{п}} - \dot{y}_{\text{г}}) + C_{\text{к}}(y_{\text{п}} - y_{\text{г}}) = P_{\text{д}}; \\ m_{\text{м}} \ddot{y}_{\text{м}} - D_{\text{к}}(\dot{y}_{\text{п}} - \dot{y}_{\text{г}}) - C_{\text{к}}(y_{\text{п}} - y_{\text{г}}) + D_{\text{м}} \dot{y}_{\text{м}} + C_{\text{м}} y_{\text{м}} = 0; \\ m_{\text{г}} \ddot{y}_{\text{г}} - D_{\text{к}}(\dot{y}_{\text{п}} - \dot{y}_{\text{г}}) - C_{\text{к}}(y_{\text{п}} - y_{\text{г}}) + m_{\text{г}} g = 0 \end{cases} \quad (3)$$

где  $m_{\text{п}}$  - приведенная к канатам масса вращающихся частей механизма подъема груза;  $C_{\text{м}}$

и  $D_M$  - коэффициенты жесткости и затухания колебаний металлоконструкции крана;  $S_K$  и  $D_K$  - коэффициенты жесткости и затухания колебаний в канатах;  $U_P, U_M, U_T$  - пути, пройденные массами  $m_P, m_M, m_T$  от начала координат;  $P_D$  - приведенная к канатам нелинейная сила привода [6].

Потери мощности в асинхронном электродвигателе

$$\Delta N = \Delta N_C + \Delta N_V = \Delta N_C + \Delta N_{V1} + \Delta N_{V2} = \Delta N_C + P_D V_0 s (R_1 / R_2 + 1), \quad (4)$$

где  $\Delta N_C$  и  $\Delta N_V$  - постоянные и переменные потери;  $\Delta N_{V1}$  и  $\Delta N_{V2}$  - переменные потери соответственно в обмотке статора и в цепи ротора;  $V_0$  - скорость привода, соответствующая синхронной частоте вращения двигателя  $n_0$ ;  $s$  - скольжение;  $R_2' = R_p + R_d'$  - приведенное активное сопротивление фазы ротора.

Суммарные потери энергии в асинхронном приводе в общем виде

$$\Delta A = \Delta A_C + \Delta A_{V1} + \Delta A_{V2} = \int_0^{t_{III}} \Delta N_C dt + (1 + R_1 / R_2) \int_0^{t_{III}} P_D (V_0 - \dot{y}_P) dt, \quad (5)$$

где  $\Delta A_C$ ,  $\Delta A_{V1}$  и  $\Delta A_{V2}$  - потери энергии, обусловленные соответственно постоянными потерями, переменными потерями в статоре и роторе;  $t_{III}$  - время переходного процесса.

Суммарные потери энергии в двигателе на первом этапе

$$\Delta A^I = \Delta A_C^I + \Delta A_{V1}^I + \Delta A_{V2}^I = \int_0^{t_I} \Delta N_C^I dt + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) m_P \int_0^{t_I} \dot{y}_P (V_0 - \dot{y}_P) dt. \quad (6)$$

Суммарные потери энергии в двигателе на втором этапе

$$\begin{aligned} \Delta A^{II} = & \Delta A_C^{II} + \Delta A_{V1}^{II} + \Delta A_{V2}^{II} = \int_{t_I}^{t_{II}} \Delta N_C^{II} dt + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) (m_P V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_P dt + m_M V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_M dt + D_M V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_M dt + \\ & + C_M V_0 \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_M dt - m_P \int_{t_I}^{t_{II}} \ddot{y}_P \dot{y}_P dt - m_M \int_{t_I}^{t_{II}} \ddot{y}_M \dot{y}_P dt - D_M \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_M \dot{y}_P dt - C_M \int_{t_I}^{t_{II}} \dot{y}_M \dot{y}_P dt). \end{aligned} \quad (7)$$

Суммарные потери энергии в двигателе на третьем этапе

$$\begin{aligned} \Delta A^{III} = & \Delta A_C^{III} + \Delta A_{V1}^{III} + \Delta A_{V2}^{III} = \int_{t_{II}}^{t_{III}} \Delta N_C^{III} dt + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot \{m_P V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_P dt + m_M V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_M dt + D_M V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_M dt + \\ & + C_M V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_M dt + m_T V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} \ddot{y}_T dt - D_K V_0 \times \int_{t_{II}}^{t_{III}} (\dot{y}_P - \dot{y}_M - \dot{y}_T) dt - C_K V_0 \int_{t_{II}}^{t_{III}} (\dot{y}_P - \dot{y}_M - \dot{y}_T) dt - \\ & - m_T g \int_{t_{II}}^{t_{III}} (V_0 - \dot{y}_P) dt - m_P \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_P \dot{y}_P dt - m_M \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_M \dot{y}_P dt - D_M \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_M \dot{y}_P dt - C_M \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_M \dot{y}_P dt - \\ & - m_T \int_{t_{II}}^{t_{III}} \dot{y}_T \dot{y}_P dt + D_K \int_{t_{II}}^{t_{III}} (\dot{y}_P - \dot{y}_M - \dot{y}_T) dt + C_K \int_{t_{II}}^{t_{III}} (\dot{y}_P - \dot{y}_M - \dot{y}_T) dt\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Потери энергии за весь период подъема груза

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A^I + \Delta A^{II} + \Delta A^{III}. \quad (9)$$

Совместное интегрирование уравнений (1-3) и (6-9) численным методом с помощью компьютерной программы [5] позволяет с высокой точностью рассчитывать потери энергии, а также динамические нагрузки в металлоконструкции крана  $S_M$  и канатах  $S_K$  при подъеме груза (см. рис. 2).

Анализ графиков переходных процессов показывает, что переменные потери энергии

$\Delta A_V$  изменяются только в период разгона электропривода. В дальнейшем их величина остается неизменной. При этом суммарные переменные потери  $\Delta A_V$  определяются в основном потерями в цепи ротора  $\Delta A_{V2}$  (переменные потери в статоре  $\Delta A_{V1}$  не превышают 4-5% от  $\Delta A_V$ ). На рис. 2 видно, что постоянные потери энергии  $\Delta A_C$  изменяются прямо пропорционально времени подъема груза и составляют значительную часть в суммарных потерях. Так при подъеме груза массой 20т на высоту 0,5м постоянные потери энергии составляют 54%, а при подъеме того же груза на высоту 2м - превышают 81%.

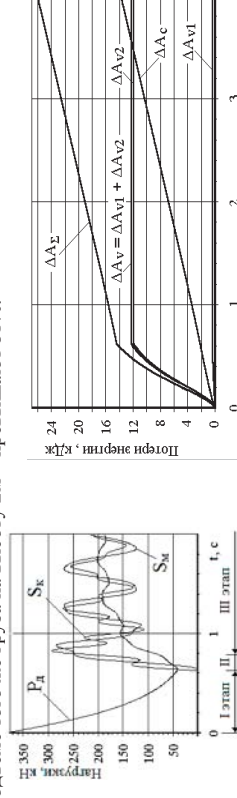


Рис. 2. Графики динамических нагрузок и потерь энергии при подъеме груза мостовым краном г/п 20 т

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- разработанные математические модели позволяют повысить точность расчета потерь энергии и динамических нагрузок при подъеме грузов мостовыми кранами на 13 – 25%;
- анализ влияния различных факторов на потери энергии при подъеме груза мостовыми кранами показал, что потери энергии в значительной степени зависят от высоты подъема, массы груза и механической характеристики привода. Потери энергии изменяются пропорционально высоте подъема груза, а их зависимость от массы груза имеет нелинейный характер. Например, при подъеме груза массой 5 т на высоту 8 м потери энергии оказались в 5,3 раза больше, чем при подъеме того же груза на высоту 2 м. При уменьшении массы поднимаемого груза, влияние высоты подъема на потери энергии также снижается;
- влияние массы груза на потери энергии наиболее сильно проявляется при подъеме по 1-й механической характеристике. При подъеме грузов по другим характеристикам эта зависимость уменьшается в разы. Например, при подъеме груза массой 5 т по 1-й характеристике потери энергии оказались в 4,6 раза больше, чем при подъеме пустой крюковой подвески. При подъеме тех же грузов по 3-й механической характеристике соотношения между потерями энергии составило 1,8 раза (т.е. в 2,5 раза меньше).

#### Список литературы:

1. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И. Ключев. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
2. Москаленко В.В. Электрический привод / В.В. Москаленко. – М.: Академия, 2007. – 360 с.
3. Неженцев А.Б. Потери энергии и динамические нагрузки кранов мостового типа при подъеме груза / А.Б. Неженцев, С.М. Аветисян. // Наукові праці ДонНТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – 2007. – №14. – С. 195–200.
4. Неженцев А.Б. Потери энергии в электроприводе подъема крана // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Наукова думка інформатичного віку - 2009», - Volume 15. Techniczne nauki. Budownictwo i architektura: Przemysł Nauka i studia – Str. 14–17.
5. Аветисян С.М. Програмное обеспечение для исследования переходных процессов грузоподъемных кранов (часть 2: при работе механизмов подъема грузов / С.М. Аветисян, А.Б. Неженцев // Підприємство і архітектура. № 1(9). - Дніпропетровськ, 2004. – с. 83-95.
6. Буйчиков Л.Я. К вопросу об учете движущей (горизонтальной) силы асинхронного электропривода в динамических моделях грузоподъемных кранов / Л.Я. Буйчиков, А.Б. Неженцев, Г.П. Фоменко // Вісник Східноукраїнського держав. ун-ту, №2(18), серія Промисловий транспорт. - Луганськ: Вид-во СДУ, 1999. - с.170-178.

УДК 621.762.55

Головко Л.Ф., д.т.н., проф., Кагляк О.Д., к.т.н., доц., Лутай А.М., ст. викл. КШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БАГАТОКРАТНОЇ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗІСТАРЕНОГО ДУРАЛЮМІНУ

#### Вступ

Дуралюмін Д16т після гартування та природного старіння має високий рівень питомої міцності і опору втомному руйнуванню. Завдяки цим якість авіаційних деталей широко використовується у виробництві найбільш відповідальних деталей авіаційної та космічної техніки. Досить велика їх кількість має форму тонкостінних листових конструкцій, що виготовляються з попередньо термічно зміцнених заготовок. У авіабудуванні це довгомірні панелі обшивки фюзеляжу, крила. Більшість виробів такого типу виготовляються в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва методом дробоударного формоутворення (ДУФ) [1]. На відміну від ДУФ деталі, що виготовлені методом лазерного формоутворення (ЛФ) не потребують додаткової обробки поверхні і практично не мають обмежень на радіус кривизни згинання оскільки лазерний промінь (ЛП) може бути сфокусований до десятків часток міліметра. Зокрема показано [2], що частина циліндричної поверхні радіусом 900мм, яка сформована з листа сплаву з розмірами  $450 \times 225 \times 0,8$ мм мала високу геометричну точність, гладкість поверхні і відтворюваність форми. Але підкреслюється, що вихідні властивості сплаву зберігаються у зоні термічного впливу (ЗТВ) при густині потужності лазерного випромінювання (W)  $CO_2$ -лазера  $W < 25$  Дж/мм<sup>2</sup>. При більш високих значеннях W, на думку авторів, у ЗТВ проходила рекристалізація твердого розчину, а при  $W \approx 133$  Дж/мм<sup>2</sup> спостерігалось його часткове підплавлення. Значимо, що навіть при  $W \leq 25$  Дж/мм<sup>2</sup> зафіксовані коливання рівня мікротвердості ( $H_{\mu}$ ) у ЗТВ. Дослідження структури та властивостей ЗТВ іншими дослідниками виявило значні розбіжності. Між тим відомо, що провідні літакобудівні підприємства (EADS, AIRBUS) припускають відхилення у властивостях матеріалу у зоні обробки відносної властивості базового сплаву не більше за 10%. Тобто першим етапом розроблення технології ЛФ виробів з матеріалів літакобудівних сплавів повинно бути всебічне дослідження властивостей ЗТВ після багаторазового проходження лазерного променя (ЛП).

**Мета роботи** – визначити області параметрів багаторазової лазерної обробки сплаву Д16тГФ в межах яких забезпечується стабільність його вихідних властивостей, виявити причини зниження міцнісних характеристик у ЗТВ при перевищенні критичних параметрів обробки.

**Матеріал та методи досліджень.** Зразки розміром 40x60 мм товщиною  $h=1,8$ мм вирізалися з листа сплаву Д16тГ з вихідною мікротвердістю  $H_{\mu} = 1030$ МПа. Лазерна обробка проводилася на технологічному комплексі «ROFIN DY 044» на основі Nd:YAG лазера з дюралюмінієм накачуванням. Діаметр фокальної плями (d) становив 6 мм. Обробка проводилася з часовим проміжком між проходами у 20 секунд при величинах поточної енергії  $E=20$  Дж/мм (P=600вт, V=30мм/с),  $E=40$  Дж/мм (P=600вт, V=15мм/с),  $E=60$  Дж/мм (P=600вт, V=7,5мм/с) та  $E=80$  Дж/мм (P=600вт, V=3,7мм/с). Вимірювання мікротвердості проводили на приладі ПМТ-3 при навантаженнях 10 – 100 г. Рентгеноструктурні дослідження здійснювалися на дифрактометрах ДРОН – 4 у Соцвипромінюванні та Rigaku Ultima IV у Соцвипромінюванні. Еквівалентна деформація ( $\epsilon_{св}$ ) визначалася з фізичного розширеного ліній 331 (β<sub>331</sub>). Температура (t) вимірювалася за допомогою хромель-алюмелевої термопары, яка закріплювалася по центру лазерної доріжки на поверхні протилежній опромінюваній. Наведені нижче значення t вимірювалися через 10 секунд після кожного проходу.

#### Результати роботи та їх обговорення.

При виборі оптимальних параметрів обробки необхідно знання критичних параметрів

обробки, які приводять до 10% зниження характеристик механічних властивостей матеріалу у будь-якої з субзон ЗТВ відносно їх вихідних значень. Зокрема у авіабудуванні контролюються границя текучості  $\sigma_b$ , границя міцності  $\sigma_{ms}$  та мікротвердості  $H_{\mu}$ . В роботі приводяться результати вимірювання останнього параметру. Але, оскільки для сплавів алюмінію виконуються пропорційність між величиною твердості та значеннями  $\sigma_T$  та  $\sigma_{ms}$ , всі подальші висновки, що стосуються змін  $H_{\mu}$ , слушні і для характеристик статичної міцності.

Обробка при  $E=20$  Дж/мм (P=600вт, V=30мм/с) та  $E=40$  Дж/мм (P=600вт, V=15мм/с) та витримка протягом 6 діб приводить до збільшення як  $H_{\mu}$ , так і  $\epsilon_{св}$  з зростанням кількості

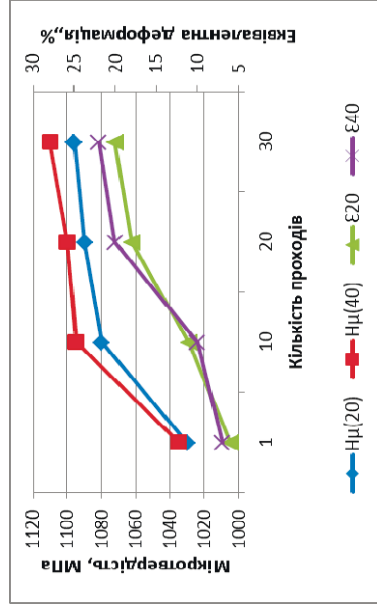


Рис.1. Залежності мікротвердості поверхні ЗТВ та еквівалентної деформації від кількості проходів ( $E=20$  Дж/мм;  $E=40$  Дж/мм)

проходів n (рис.1). Зі збільшення величини  $\epsilon_{св}$  виходить, що у поверхневому шарі на стадії нагрівання термічного циклу проходять процеси пластичного деформування внаслідок релаксації тимчасових термічних напружень. Причому по впливу на структуру вони еквівалентні прокатуванню із заданим ступенем обтіснення. Деформаційне зміцнення приводить до збільшення  $H_{\mu}$ , і є однією з причин зменшення кута згинання, що фіксувалося багатьма дослідниками [3]. Але якщо при великих n (20:30) збільшення  $H_{\mu}$  по величині корелює зі зростанням  $\epsilon_{св}$  ( $\approx 5\%$  зростання), то при n=10 ця величина майже на порядок вища. Для пояснення вказаної особливості була досліджена часова залежність  $H_{\mu}$  для даного п яка свідчила про те, що більша частина зростання  $H_{\mu}$  обумовлена процесом природного старіння. З результатів, які отримані при традиційній термічній обробці старіючих сплавів відомо, що навіть при значному перенасиченні твердого розчину, його розпад проходить при достатній кількості вакансій та дислокацій, оскільки виділення проміжних фаз проходить саме на дефектах кристалічної будови. Тобто зростання  $\epsilon_{св}$ , обумовлене збільшенням щільності дислокацій ініціює додатковий розпад вихідного твердого розчину, що й приводить до збільшення  $H_{\mu}$ . Збільшення поточної енергії суттєво змінює аналогічні залежності (рис.2).

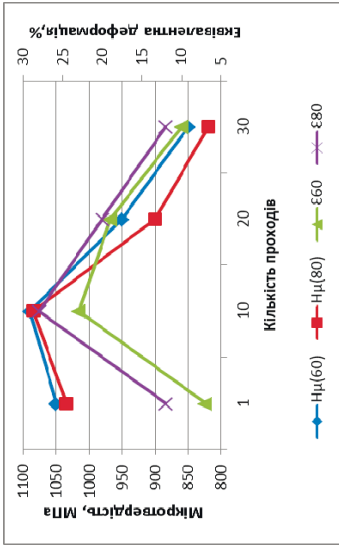


Рис.2. Залежності мікротвердості поверхні ЗТВ та еквівалентної деформації від кількості проходів (E=60Дж/мм; E = 80Дж/мм)

А саме - при  $p \geq 20$  зменшення  $H_v$  перевищує допустимі десяти відсоткові норми деградації властивостей відносно характеристик базового матеріалу. Як виходить з вимірювання температури її значення перевищує як температуру зони поверхня, так і температуру рекристалізації. Останнє пояснює значне зменшення  $\epsilon_{\text{екв}}$  приказаних значеннях  $p$ , що означає зняття приросту  $H_v$  обумовлену наклепом. Але значно більше зменшення  $H_v$  обумовлено іншою причиною. А саме. Відновлення вихідних властивостей після нагрівання до температури зони поверхня можливе при умові отримання перенасиченого твердого розчину у результаті охолодження. Тобто швидкість охолодження повинна перевищувати критичну швидкість газування сплаву Д16 (50...60°C/с) Виміряна швидкість охолодження зразка становила 10...15°C/с. В шарі розташованому на відстані 1мм від поверхні, що оброблювалася при  $E = 20$ Дж/мм  $H_v$  практично не залежить від  $p$ . При  $E = 40$ Дж/мм,  $H_v$  дещо знижується при великих значеннях  $p$ , але залишається у межах допустимої величини. Відсутність ефектів пов'язаних з пластичним деформуванням у результаті релаксації тимчасових термічних напружень свідчить про те, що їх рівень не перевищує границю текучості сплаву у вказаному шарі. Обробка при великих значеннях погонної енергії приводить до значного зниження  $H_v$  при  $p \geq 20$ . Пояснення аналогічне тому, що давалося раніше – швидкість охолодження зразка після кінцевої обробки недостатня для фіксації перенасиченого твердого розчину.

**Висновки.** 1. Багатофазна лазерна обробка сплаву Д16Т при  $E \leq 40$ Дж/мм та  $p \leq 30$  не змінює мікротвердості у ЗТВ, що означає придатність ЛФ при виготовленні листових конструкцій у літакобудівній промисловості. 2. Зниження мікротвердості ЗТВ при обробці при великих  $E$  можна запобігти охолодженням заготовки.

**Список використаних джерел:**

1.Лулкін Б.В. Формообразование дробью как метод обработки крупногабаритных деталей сложной кривизны в самолетостроении /Б.В. Лулкин, А.И. Лагутин // Авиационно- космическая техника и тех. - 2006. - № 2. - С. 17-20.  
 2.Joost R. Dufflon . Bending properties of locally laser heat treated AA2024-T3 aluminum alloy / Amirahmad Mohammadi, Hans Vanhove, Albert Van Bael, Joost R. Dufflon//Physica Scripta Volume 39, 2012, Pages 257.  
 3.Cheng, J. Microstructure Integrated Modeling of Multiscan Laser Forming/ J. Cheng, Y. Yao/Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124, pp. 379-387

УДК 621.941

Органи<sup>1</sup> А.А. д.т.н. проф., Творишук<sup>2</sup> И.М. аспирант,

1 - ОНПУ «Одеський національний політехнічний університет», г. Одеса, Україна,  
 2 - Одеський технічний коледж, г. Одеса, Україна.

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ТОНКОГО ТОЧЕНИЯ ТОРЦЕВ**

Развивая представления о распределении сил вдоль криволинейной режущей кромки расточного резца, используем для записи динамической характеристики резания при тонком растачивании понятие эффективного главного угла в плане [1].

$$\varphi_{эфф} = \arctg(P_x/P_y), \quad (1)$$

определяющего направление компоненты  $P_x$  силы резания. Угол  $\varphi_{эфф}$  зависит от геометрических характеристик резца и от режима резания. При тонком растачивании направление вектора  $P_y$  значительно отклоняется от нормали к проекции на основную плоскость прямойлинейной части главной режущей кромки. Лишь при снятии толстых стружек остроугоженными резцами, у которых угол наклона лезвия  $\lambda = 0$ , можно приближенно считать угол  $\varphi_{эфф}$  совпадающим с главным углом в плане  $\varphi$ .

Параметры динамической характеристики процесса резания можно определить по экспериментальной АФЧХ:  $T_p$  по  $\omega_{\text{min}}$ , а  $k_p$  и  $k_s$  по положению точек пересечения характеристики с действительной осью. Зная  $k_p$  и  $k_s$ , можно найти и величину сил трения на задней грани резца.

АФЧХ процесса тонкого точения стали и чугуна были получены на экспериментальном стенде, собранном на базе отделочно-расточного станка мод. 2А715. Выполнялась подрезка торцов образцов кольцевого сечения из стали 45 и чугуна СЧ 21 широко-лезвийным твердосплавным резцом ( $\alpha = 6^\circ, \gamma = 5^\circ, \lambda = 0^\circ$ ). Ширина среза задавалась толщиной стенки образца и изменялась в пределах от 0,5 до 2 мм. Скорость резания менялась от 50 до 150 м/мин, а средняя толщина среза (подача на 1 оборот) – от 0,01 до 0,04 мм. Колебания в системе возбуждались на частотах в диапазоне от 40 до 600 Гц.

Для исключения явления ретенерации следа обрабатываемая поверхность предварительно зачищалась, а система возбуждения колебаний включалась только на время одного оборота шпинделя. Проверка показала, что переходные процессы затухали за время, равное 0,2 – 0,3 длительности одного оборота шпинделя, и поэтому на осциллограммах удавалось получить участок устойчивых колебаний достаточной прогнженности.

Статистическая обработка осциллограмм (рис. 1) по 30 – 50 точкам позволяет выделить случайную составляющую силы резания, не зависящую от гармонического внешнего воздействия, и квазислучайную функцию времени, для которой определяются средние значения и дисперсия амплитуды силы и ее фазового сдвига относительно заданных перемещений резца.

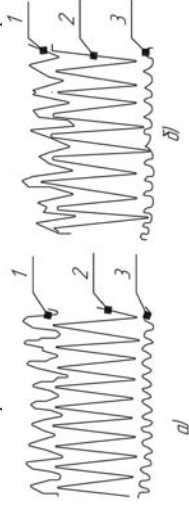


Рис. 1 - Осциллограммы реакции процесса резания на гармоническое воздействие: а – при обработке чугуна; б – изменения  $P_z$ ; 2 – заданные перемещения резца; 3 – отметки времени, 500 Гц

Эти данные изображаются в координатах  $\text{Im}W_p$ ,  $\text{Re}W_p$  и по ним строится кривая, аппроксимирующая АФЧХ процесса резания. В примере, показанном на рисунке 2,  $\omega_{\min} = 2000\text{с}^{-1}$ ;  $k_p k_{2p} = 0,65\text{Н/мкс}$ ;  $k_p k_{3p} / T_p = -0,15\text{Н/мкс}$ , откуда

$$T_p = 5 \cdot 10^{-4} \text{с}; k_p = 0,69\text{Н/мкс}; k_s = -2,2 \cdot 10^{-4} \text{Н} \cdot \text{с/мкс}$$

(при  $\varphi_u = 70^\circ$ ).

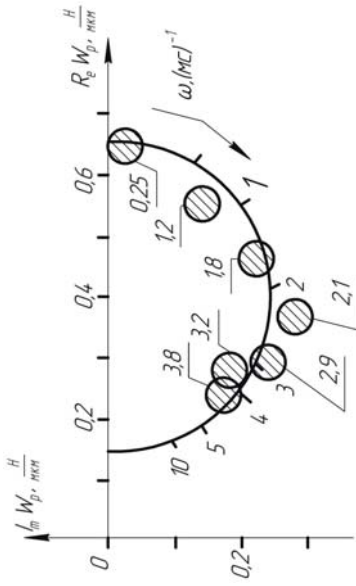


Рис. 2 - АФЧХ процесса точения стали 45 при  $b = 0,5 \text{ мм}$ ;  $s = 0,02 \text{ мм}$ ;  $v = 50 \text{ м/мин}$ ; кружки – данные эксперимента; линия – расчетная аппроксимация

Сопоставление данных, полученных при тонком точении стальных и чугуновых образцов, показывает подобие динамических характеристик процессов резания при обработке пластичного и хрупкого материалов. В этом проявляется присущее всем процессам обработки отставание во времени изменений сил от порождающих их перемещений [2]. Соответствие наблюдается, однако, лишь в среднем, так как интенсивные случайные изменения параметров процесса резания при обработке чугуна приводят к широкому рассеиванию значений амплитуды колебаний силы резания. Изменения режима обработки одинаковым образом влияют на частотные характеристики процессов тонкого точения стали и чугуна в соответствии с общими закономерностями:

- при увеличении скорости резания и толщины срезаемого слоя постоянная стружкообразования уменьшается;
- коэффициент резания  $k_p$  возрастает пропорционально ширине срезаемого слоя;
- при скоростях резания 100-150 м/мин скоростной коэффициент резания  $k_s$  принимает близкие к нулю значения, и становится применимой простейшая форма динамической характеристики процесса резания [1]

$$W_p = k_p k_{2p} / (1 + T_p p). \quad (2)$$

**Список литературы:**

1. Кудишов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Липецкий П.А., Якугуран Т.П., Оргиан А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – Киев: Техника, 2001. – 300 с.

УДК 621.952

Баланюк А. В аспирант, Минчев Р.М. аспирант, Оргиан Анд. аспирант ОНПУ «Одесский национальный политехнический университет», г. Одесса, Украина.

**ВОЗМУЩЕНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ТОНКОМ РАСТАЧИВАНИИ**

Возмущения процесса резания практически неустраняемы, так как они связаны с физико-механическими свойствами обрабатываемого материала и динамикой стружкообразования. С целью получения качественных и количественных характеристик возмущений процесса резания, необходимых для прогнозирования точности обработки и износа режущего инструмента, сравнивались колебания при обработке чугуна с колебаниями при обработке других материалов.

С целью уменьшения роли внешних воздействий на УДИС и повышения точности измерений борштанги закреплялись на жесткой стойке, установленной на столе станка, а образцы – в жестком патроне на фланце шпинделя расточного станка.

В первой серии опытов растачивались резцы с напаянным алмазом типа 2146-0003 и с пластинкой из твердого сплава ВКЗМ ( $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ, \gamma = 0^\circ, r = 0,5 \text{ мм}$ ). При одинаковых режимах обработки уровень колебаний алмазного реза ниже, чем твердосплавного. Однако уровень колебаний при переходе от твердосплавного реза к алмазному изменяется различно для двух исследованных материалов образцов: для бронзы он уменьшается в 20 раз, а для чугуна – всего лишь в 1,5 раза. Эти данные показывают значительную роль неоднородности обрабатываемого материала в формировании случайного возмущения, возникающего в зоне резания.

Во второй серии опытов были исследованы флуктуации силы резания при растачивании отверстия диаметром 80 мм в образцах из стали 45 и чугуна СЧ 21. Твердосплавный резец (точной резец ( $\varphi = 60^\circ, \varphi_1 = 20^\circ, \lambda = 6^\circ, \gamma = 5^\circ, \alpha = 6^\circ, r = 0,2 \text{ мм}$ )) опирался на встроенный в борштангу пьез датчик, от которого сигнал подавался на анализатор спектра. Спектры флуктуаций силы резания показаны на рисунке 1.

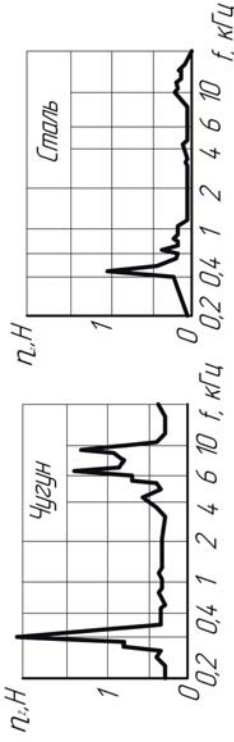


Рис. 1 - Спектры флуктуаций главной составляющей силы резания при тонком растачивании

Максимумы в спектрах расположены вблизи собственных частот колебаний борштанги (0,4 кГц) и реза (10 кГц). Форма спектров свидетельствует о широкополосном характере возмущений, действующих в зоне резания. Основная закономерность, установленная по данным эксперимента, состоит в том, что среднее значение спектральной плотности при обработке чугуна в 2-3 раза больше, чем для мягкой стали примерно той же твердости. Слабые изменения спектральной плотности вне резонансных областей позволяют рассматривать возмущения процесса резания как белый шум [1].

Различие в уровнях флуктуаций силы резания при обработке стали и чугуна связано прежде всего с различиями в процессах стружкообразования. Дискретность процесса струж-

кообразования при резанні чугуна несомненно является причиной увеличения уровня возмущений процесса резания. Источники недетерминированности процесса резания, по-видимому, могут быть обнаружены при исследовании процесса стружкообразования, в частности, размеров стружки. При визуальном анализе внешнего вида чугунной стружки, полученной при подрезке свободного торца, обнаруживается большой разброс размеров ее элементов. Крупные элементы имеют форму завитков, а с уменьшением размеров определенность формы исчезает. В качестве статистического метода наблюдения размеров было применено разделение чугунной стружки на фракции просеиванием через набор сит с уменьшающимся размером квадратного элемента сетки. Стороны  $b$  квадратов набора: 1; 0,8; 0,63; 0,56; 0,4; 0,32; 0,2; 0,15; 0,056 мм. Определялось отношение массы  $m_k$  каждой фракции к массе  $M$  всей стружки с точностью 0,5%. На рисунке 2 показано распределение чугунной стружки по фракциям при  $t = 0,1$  мм,  $s = 0,04$  мм/об,  $v = 110$  м/мин.



Рис. 2 – Относительные массы фракции чугунной стружки.

Обнаружено, что при изменении ширины срезаемого слоя от 0,5 до 2 мм, скорости резания от 20 до 160 м/мин и подачи от 0,01 до 0,07 мм/об отношения масс фракций могут заметно изменяться, однако распределение размеров элементов остается сплошным, что является одной из причин образования сплошного почти равномерного спектра возмущений силы резания при обработке чугуна. При широкотолстых случайных изменениях коэффициента резания представляется в виде  $k_p [1 + \eta(t)]$ , где  $k_p$  – среднее значение, а спектральная плотность  $S_{\eta}/2\pi$  случайной функции  $\eta(t)$  может быть определена по данным рисунка 1.

Полученные результаты позволяют рассчитать колебания в динамической системе УДС. Например, уравнения движения при возмущениях коэффициента резания

$$m \frac{d^2 u}{dt^2} + h \frac{du}{dt} + cu = k_1 P,$$

$$T_p \frac{dP}{dt} + P = k_p k_{2p} [1 + \eta(t)] (a - u).$$

с учетом соотношения  $|\eta| \ll |\eta|$  приводится к виду уравнений вынужденных колебаний при случайных внешних воздействиях [2].

**Список литературы:**

1. Личевский П.А., Джугурун Т.П., Ортин А.А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. – Киев: Техника, 2001. – 300 с.
2. Колелев Ю.Ф., Ортин А.А., Кобелев В.М. Параметрические колебания металлорежущих станков. Одесса: «Печатный дом», ОНПУ, 2007. – 352 с.

**УДК 621.9.048.4**

**Носулєнко В.І.** д.т.н., проф., **Шмельов В.М.** к.т.н., доц., **Юр'єв В.В.** аспірант  
 Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна  
**ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОДІВ-ІНСТРУМЕНТІВ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОГО КОНТУРУ**

Процес розмірної обробки електричною дугою (РОД) відрізняється високою економічною ефективністю і отримує помітне практичне застосування [1], зокрема для обробки листових деталей складного контуру.

За умов, обробки деталей складного контуру способом РОД не забезпечується рівномірність на течія робочої рідини в зоні обробки, утворюються застійні зони, де горять відомженні дуги. Як наслідок, не забезпечується відповідна якість обробки. Отже, за цих умов є необхідним забезпечити рівномірну течію робочої рідини по периметру обробки зокрема, за рахунок геометрії та виконавчих розмірів електродів-інструментів (ЕІ). Тому, рішення даної проблеми і обумовлює актуальність роботи.

В основу поставлена задача оптимізації процесу за рахунок вдосконалення ЕІ шляхом зміни геометрії та елементів робочої його кромки (рис.1), а саме: кути робочої кромки ЕІ, за умови, якщо їх розглядати в послідовності, що відповідає напрямку руху робочої рідини в міжелектродному зазорі, приймають в межах: передній кут  $\alpha \geq 0^{\circ}30'$ ; задній кут  $\beta = 3 \dots 5^{\circ}$ ; внутрішній кут  $\gamma = 1^{\circ}$ ; радіус закруглення робочої кромки  $R \geq 0,5$  мм.

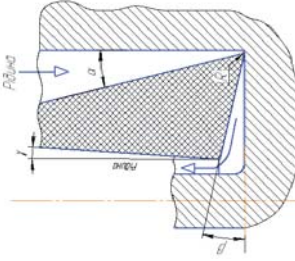


Рис. 1 - Элементы та геометрія робочої кромки ЕІ

Запропонований ЕІ забезпечує такі переваги.

Робоча рідина подається в напрямку від периферії ЕІ до його центру. Нахил бічної поверхні під кутом  $\alpha \geq 0^{\circ}30'$  забезпечує течію робочої рідини в звужуючу шліну, що стабілізує потік та забезпечує ламінарний рух робочої рідини. Для забезпечення стабільності потоку безпосередньо на робочій кромці ЕІ, передбачають радіус закруглення  $R = 0,5$  мм, який формує поверхню отвора за рахунок розмірного випаровування та плавлення. Радіус заокруглення попередує відрив потоку від стінки ЕІ і отже забезпечує стабільність процесу, відповідно якість обробленої поверхні, а саме шорсткість та регулювану зону термічного впливу. Щоб забезпечити рівномірну течію робочої рідини на торці ЕІ і отже забезпечити енергетично економічне плавлення метала видовженими дугами, передбачають нахил робочої кромки ЕІ в межах кута  $\beta = 3 \dots 5^{\circ}$ . Надалі на внутрішній бічній поверхні ЕІ передбачають технологічний отвір під кутом  $\gamma = 1^{\circ}$ , що забезпечить рівномірну течію робочої рідини.

Проте, за умов обробки деталей складного контуру [2], коли ЕІ має по периметру виступаючі елементи з розмірами 10...15 мм, поставлена задача вдосконалення ЕІ за рахунок того, що виступаючі назовні елементи робочої торцевої поверхні за умов обробки по внутрішньо-

му контуру та виступаючі всередину елементи робочої торцевої поверхні за умов обробки по зовнішньому контуру, зрізають під кутом  $30^\circ$ . Це забезпечить на початковій стадії процесу однаковий гідравлічний опір по периметру обробки, а отже і рівномірність течії робочої рідини, і відповідно оптимальне протікання процесу та задану шорсткість обробленої поверхні, а надалі це забезпечить достатню рівномірну течю робочої рідини і, відповідно, оптимальне протікання процесу.

Надалі варіанти вдосконалення ЕІ пояснюються кресленнями (рис. 2), на яких:

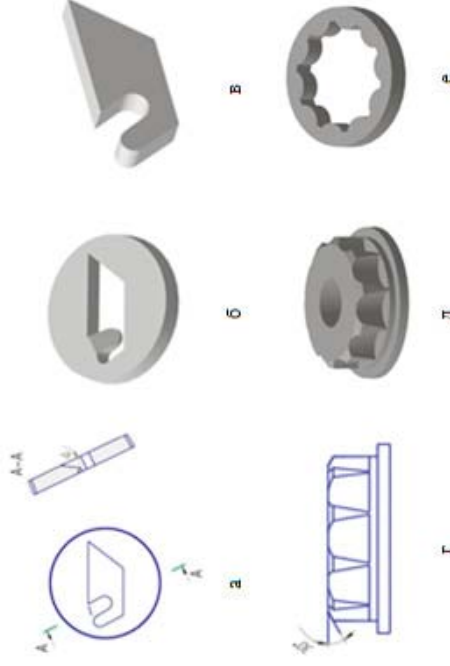


Рис. 2 – ЕІ для виготовлення деталей як по зовнішньому так і внутрішньому контурах:

а – креслення ЕІ для обробки деталей по зовнішньому контуру, б – ЕІ в ізометрії для обробки деталей по зовнішньому контуру, в – отримана цим ЕІ деталь в ізометрії, г – креслення ЕІ для обробки деталей по внутрішньому контуру, д – ЕІ в ізометрії для обробки деталей по внутрішньому контуру, е – отримана цим ЕІ деталь в ізометрії

ЕІ являє собою суцільне монолітне тіло (б,д) ЕІ складається з робочої поверхні і поверхні кріплення. Контур робочої поверхні будується по кресленню (в,е). Елементи робочої торцевої поверхні ЕІ, що виступають по периметру обробки всередину або на зовні (а,г) зрізають під кутом  $30^\circ$ . Поверхня кріплення являє собою буртик на ЕІ для обробки внутрішнього контуру, а на ЕІ для обробки зовнішнього контуру – конус.

Отже, запропоновано і описано ЕІ для РОД деталей складного контуру які відрізняються тим, що робоча кромка ЕІ утворюється кутами рис. 1, а саме: кути робочої кромки ЕІ, за умови, якщо їх розглядати в послідовності, що відповідає напрямку руху робочої рідини в міжелектродному зазорі, приймають в межах: передній кут  $\alpha \geq 0^\circ30'$ ; задній кут  $\beta = 3 \dots 5^\circ$ ; внутрішній кут  $\gamma = 1^\circ$ ; радіус закруглення робочої кромки  $R \geq 0,5 \text{ мм}$  та ЕІ для РОД, що мають виступаючі назвні елементи робочої торцевої поверхні за умов обробки по внутрішньому контуру та виступаючі всередину елементи робочої торцевої поверхні за умов обробки по зовнішньому контуру, зрізають під кутом  $30^\circ$ .

#### Список літератури.

1. Носулєнко В. І. Розмірна обробка електрично дугою отворів складного контуру // В. І. Носулєнко В. В. Юр'єв // Збірник наукових праць «КНТУ», – 2015. – № 28. – С 70 – 73.
2. Носулєнко В. І. Розмірна обробка електрично дугою складних за зовнішнім контуром деталей // В. І. Носулєнко, В. В. Юр'єв // Збірник наукових праць «КНТУ», – 2015. – № 45. – С 109 – 114.

УДК 678.5.05:004.925.8

Сівецький В.І., к.т.н., проф., Соколовський О.Л., к.т.н., доц., Колосов О.Є., д.т.н., с.н.с., Івницький І.І., к.т.н., Кураленко В.М.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### РОЗРОБЛЕННЯ ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОДЕРЖАННЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ВИРОБІВ З НИХ

У всьому світі протягом останнього десятиріччя спостерігається високий попит на інноваційні термопластичні полімерні композиційні матеріали (ТПКМ) та інтелектуальні вироби (ІВ) з них, у тому числі на матеріали зі спеціальними властивостями. Тому зараз багатьма науковцями проводяться інтенсивні наукові дослідження в напрямках створення технологій та устаткування для виробництва конструкційних ПКМ – як ТПКМ, так і реактопластичних ПКМ, зокрема, на базі експериментальних і чисельних методів та моделювання цих процесів.

Серед них – вчені зі США, Італії, Росії та Білорусії [1]. Вони насамперед вивчають спосіб отримання інформації від цих матеріалів та їх властивості, що у значній мірі досягається шляхом «інтелектуалізації» цих матеріалів. Адаже практичне розв'язання питань введення у полімерний матеріал різних типів інтелектуальних датчиків (ІД) та інших модифікаторів дозволяє не тільки значно розширити сферу застосування полімерних композицій, а й знайти нові сфери застосування таких матеріалів, зокрема, як інтелектуальних виробів (ІВ).

Слід відзначити, що різноманіття типів полімерів, використовуваних у виробництві традиційних ПКМ, зв'язаних (матриць), наповнювачів що складаються з ретовин різної природи, дисперсних – у вигляді волокон, і текстильних та нетканких форм, а також використовуваних методів їх фізичної модифікації, зокрема, ультразвуку (УЗ) [2 – 4], дозволяє направлено моделювати широкий спектр матеріалів з необхідним комплексом експлуатаційних властивостей.

Аналіз існуючих робіт вчених [1] свідчить про те, що незважаючи, наприклад, на різноманіття існуючих «інтелектуальних» компонентів, наприклад, з пам'яттю форми, сучасних волоконнооптичних та п'єзоелектронних датчиків, на цей час відсутні універсальні технології та устаткування введення ІД у термопластичний полімерний матеріал та його переробки у відповідальні деталі.

До того ж зараз висуваються підвищені вимоги до одержання вищезазначених ТПКМ при одночасному збільшенні продуктивності, зниженні енергоємності та досягненні ресурсозбереження процесів їх приготування, а також до оптимізації конструктивно-технологічних параметрів технологічного обладнання. Тому розроблення ефективних технічних засобів створення ІВ з ТПКМ та прогнозування їх напружено-деформованого стану (н.д.с.) є надзвичайно актуальним для вітчизняної науки і промисловості, що може поставити ці розробки в один ряд із зарубіжними аналогами.

Характерною особливістю вищезазначених досліджень [1] є те, що в них не розкриваються особливості використовуваних технологій та реалізуючих їх пристроїв для введення ІД у ПКМ, що є, очевидно, комерційною таємницею розробників і фінансується вищевказаним комплексом. Очікується, що реалізація результатів досліджень може поставити виконувани розробки в один ряд із зарубіжними аналогами та суттєво зменшити імпортозалежність країни від цих виробів внаслідок створення вітчизняної технологічної бази виготовлення ІВ. Це дозволить за окремими показниками перевищувати зарубіжні аналоги.

При реалізації досліджень буде використано інноваційний підхід, що полягатиме у розробленні конструкцій формулочно-устаткування, оснащеного додатковими інжекційними пристроями та маніпуляторами і технологічного регламенту процесу виготовлення ІВ з



ТПКМ у залежності від форми ІД та типів пристроїв для їх введення, а також від особливостей використовуваних способів переробки [5–7].

Предметом дослідження авторів є технологічні параметри та режими процесу приготування ТПКМ і формування ІВ за умов введення ІД у задані координати виробу, а також конструктивні параметри формуючого обладнання, модернізованого маніпуляторами та інжекційними пристроями. Також авторами розробки в процесі досліджень висунуто дві гіпотези, перша з яких полягає у можливості забезпечення введення мінімально необхідної кількості ІД і їх позиціонування безпосередньо на стадії автоматизованого формування виробів методами лиття, екструзії та пресування, у т.ч. з використанням УЗ, за рахунок додаткового оснащення формуючого інструменту інжекційними пристроями та маніпуляторами. Це дасть змогу здійснювати всеохоплюючий й безперервний онлайн моніторинг відповідальних виробів спеціальної призначення.

Сутність другої гіпотези передбачає диверсифікацію типів і форми датчиків та застосування способів їх введення у залежності від призначення та методів виготовлення ІВ спеціального призначення з ТПКМ, а також побудови використовуваної системи датчиків для безперервного моніторингу н.д.с. ІВ. Це передбачає використання різних способів введення ІД у залежності від їх типу і форми та технологічного процесу виготовлення ІВ з ТПКМ.

У залежності від форми ІД та від сутності технологічного процесу виготовлення виробів з ТПКМ використовуються різні способи та пристрої для їх введення. Якщо використовуються методи лиття під тиском та пресування, то найбільш доцільним є використання маніпуляторів, зокрема, 3D-маніпуляторів, а якщо застосовується метод екструзії, то для введення ІД найбільш доцільними є методи соекструзії, наприклад, для безперервних волокнистих ІД із застосуванням УЗ, або інжекції при введенні точкових ІД.

Окрім того, розроблення методів приготування ТПКМ і формування ІВ з них буде базуватися на застосуванні методів числового моделювання основних стадій їх формування та розробленні систем інформаційної підтримки життєвого циклу експлуатації конструкційного виробу. Для мінімізації кількості високошторисних ІД та спрощення системи обробки деталей з одночасним забезпеченням достовірності моніторингу н.д.с. відповідальних полімерних виробів необхідно буде розробити систему автоматизованої оцінки критичних зон навантаження виробів та прогнозування їх життєвого циклу в процесі експлуатації.

У залежності від конструктивних особливостей виробів та використаних полімерних матеріалів застосовуються різні технології виготовлення ІВ. Різноманіття технологій формування виробів зумовлює застосування різних способів та пристроїв для позиціонування введення необхідної кількості ІД без порушення структури та фізико-механічних властивостей виробів.

Тому необхідно проведення досліджень н.д.с. виробів в стаціонарних та експлуатаційних умовах з визначенням критеріїв настання критичного стану, встановлення залежності точності отримання інформації про н.д.с. від глибини залягання ІД, технологічних параметрів та режимів процесу приготування ТПКМ і формування ІВ із позиціонуванням введення ІД, а також конструктивних параметрів формуючого обладнання, модернізованого маніпуляторами та інжекційними пристроями.

Такий підхід дозволяє використовувати результати чисельного моделювання, експериментальних досліджень, наприклад, екструзійного формування профільних виробів, та конструктивних параметрів модернізованого формуючого обладнання, для забезпечення можливості реалізації технологій виготовлення ІВ.

А на базі розроблених авторським колективом удосконалених тривимірних моделей та алгоритмів теплових і гідродинамічних процесів переробки середовищ із змінними властивостями, які передбачається реалізувати в програмних комплексах “Fluent” і “Polyflow” для автоматизованого проектування хімічного та полімерного устаткування, передбачається створення комплексної методики чисельного розрахунку технологічних процесів підготовки та формування ІВ з ТПКМ з можливістю прогнозування ефектів розбухання, короблення виробів

бів, та на їх основі – проектування вдосконалених конструкцій формуючого устаткування, які дозволяють виготовляти конкурентоздатні вітчизняні відповідальні конструкційні вироби та деталі подвійного призначення.

Плануються розробити науково-практичні засади інноваційної вітчизняної технології та обладнання комплектування термопластичних полімерних композиційних матеріалів та формування ІВ з них методами лиття під тиском, пресування та екструзії.

Розроблені ІВ з ТПКМ в процесі їх експлуатації можуть надійно передавати достовірну інформацію за рахунок точного позиціонування обмеженої кількості ІД у заданих координатах об'єму виробів в автоматизованих технологічних процесах їх формування.

Передбачається розроблення інноваційної технології та обладнання для позиціонування введення детермінованої кількості ІД в ТПКМ на стадії формування ІВ для здійснення повільного моніторингу їх н.д.с. в процесі експлуатації, що може бути забезпечено за умов направлено введення детермінованої кількості ІД безпосередньо в процесі формування виробів методами лиття під тиском, інжекції та пресування, у наперед визначені методи досліджень н.д.с. координати виробу для забезпечення умов безаварійної експлуатації відповідальних ІВ.

Таким чином, в результаті виконання проекту буде розроблено ряд технологій та удосконалено конструкції формуючого обладнання для одержання ІВ з ТПКМ, в тому числі спеціального призначення, зі здатністю реагувати на зовнішні навантаження.

Прикладна значимість досліджень полягатиме у визначенні оптимальних технологічних режимів та конструктивних параметрів інжекційних пристроїв та маніпуляторів формуючого литтєвого, пресового та екструзійного обладнання, що використовуються для приготування ТПКМ, а також введення у задану координату виробу обрнуваної кількості ІД. Це дасть змогу контролю стану виробу за рахунок безперервного моніторингу н.д.с. в процесі експлуатації.

#### Список літератури

1. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы [текст] / Ю. А. Михайлин. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 660 с.
2. Колосов О.С. Технологія одержання багатокислотних епоксиполімерів із застосуванням направленої фізико-хімічної модифікації / О.С.Колосов, В.І.Сивецький, С.М. Панов. — К.: НТУУ “КІП”, 2010. — 220 с.
3. Kolosov, A. E. Effective hardware for connection and repair of polyethylene pipelines using ultrasonic modification and heat shrinkage. Part 2. Production bases for molding of epoxy repair couplings with shape memory / A. E. Kolosov, O. S. Sakharov, V. I. Sivetskiy, D. E. Sidorov, S. O. Pristailov // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. – Vol. 47, Issue 3-4. – P. 210-215.
4. Sakharov, A. S. Modeling of Polymer Melting Processes in Screw Extruder Channels / A. S. Sakharov, A. E. Kolosov, V. I. Sivetskiy, A. L. Sokol'skiy // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – Vol. 49, Issue 5-6. – P. 357-363.
5. Івницький І. І. Моделювання введення інтелектуальних датчиків у розплав полімерного композиційного матеріалу / І. І. Івницький, О. Л. Сокольський, В. М. Куриленко // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. — №3/3(31). — С. 22—26.
6. Сивецький В. І. Методи та пристрої для виготовлення виробів з інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів / В. І. Сивецький, І. І. Івницький, О. С. Колосов, В. М. Куриленко // Вісник НТУ «ХПІ». Механіко-технологічні системи та комплекси. — 2016. — №4. — С. 95—101.
7. Івницький І. І. Технологія густаткування для формування виробів з традиційних та інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів [текст] / В.І.Сивецький, О.С. Колосов, О.Л. Сокольський, І.І. Івницький. — К.: ВПІ ВІК «Політехніка», 2017. — 120 с.

УДК 514.18 : 678.5.05

Колосов О.С., д.т.н., с.н.с., Колосова О.П., к.т.н.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м.Київ, Україна

### ПІДХОДИ ДО РОЗРОБЛЕННЯ КОНКУРЕНТОЗДАТНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОВІВ ОДЕРЖАННЯ ТРАДИЦІЙНИХ І НАНОМОДИФІКОВАНИХ РЕАКТОПЛАСТИЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Традиційні і наномодифіковані (НМ) реактопластичні полімерні композиційні матеріали (ПКМ) широко використовуються у багатьох галузях промисловості як конструкційні високовідповідальні вироби, що експлуатуються в умовах складного напружено-деформованого стану. На основі просочених і попередньо висушених тканих матеріалів (препрегів) і наномодифікованих пластиків різними методами переробки одержують ПКМ і вироби самої різної форми в автомобільній, авіаційній, космічній, атомній промисловості, у трубопровідному транспорті тощо.

Завдяки унікальним фізико-механічним властивостями за малої щільності і високої в'язкості, яка перевершує в 2-3 рази в'язкість металевих сплавів, ПКМ знайшли широке застосування в планерах літаків (Іл-96, Ту-204, Ту-214, Бе-200, Ан-124, Ан-70 і ін.), де вони використовуються як обшивальні матеріали елементів управління, крил і хвостового оперення, а також для зміцнення деталей внутрішнього силового набору.

У світовому науковому середовищі зараз проводяться інтенсивні дослідження в напрямках удосконалення існуючих й створення новітніх «проривних» технологій та устаткування для виробництва ПКМ, зокрема, нанотехнологій для одержання НМПКМ. Так, наприклад, у ВІАМ (Москва, РФ) розроблена дослідна технологія формування виробів з конструкційних НМПКМ, що використовуються для виготовлення лонжеронів вертольотів, які повинні працювати в умовах змінних силових навантажень, підвищеної вологості і при значних перепадах температур. Проте особливості цієї технології зберігаються як наукове та комерційне ноу-хау.

У ряді робіт зарубіжних вчених вказується на перспективність застосування УЗ як інтенсифікуючого методу при формуванні насаперед традиційних ПКМ. Тому є доцільним продовження досліджень у цьому напрямі для НМПКМ. При цьому застосування низькочастотного УЗ є практично єдиною можливістю досягнення рівномірного диспергування нанонаповнювача у рідкій полімерній матриці. Адаже потрібно мати рівномірний (гомогенний) розподіл наночастинок в епоксидному олігомері (ЕО), а також мінімальне пошкодження наночастинок і структури молекул ЕО.

Проте в існуючих роботах не розкривається послідовність технологічних стадій, а також ефективні УЗ-режими та їх параметри, що, очевидно, є науковою та комерційною таємницею (ноу-хау) розробників.

Також наголошується на ефективності використання саме вуглецевих наномодифікаторів для виготовлення високоміцних конструкційних елементів з НМПКМ. Проте наявні дані свідчать про велику розбіжність оптимального вмісту цього показника у залежності від використаної полімерної матриці та виду нанонаповнювача, а також про наявність ефекту седиментації (осідання). Тому є актуальним вирішення й цієї проблеми.

Аналіз наукових публікацій свідчить, зокрема, про те, що саме нанотехнології мають велику перспективу використання при виготовленні різноманітних високоміцних та корозійностійких корпусних і конструктивних елементів на основі армованих ПКМ, зокрема, препрегів і наномодифікованих вуглепластиків. Так, наприклад, використання наноструктурованих вуглепластиків для виготовлення ненеосучих деталей автокузовів може привести до зниження ваги автомобілів на 10% і більше, й до відповідного зниження загальної дії забруднення від викидів автомобільних двигунів в атмосферу.

Науковцями КПШ ім. Ігоря Сікорського було розроблено сучасну теорію комплексного застосування низькочастотного ультразвуку (УЗ) за режимів кавітації та досліджено широке коло наукових проблем, що стосуються розвитку основ моделювання (математичного, експериментально-статистичного, структурно-параметричного) енергощадних та високоєфективних базових процесів та обладнання для одержання виробів подвійного використання з традиційних ПКМ на базі існуючих макронаповнювачів (скло- і органіластиків) [1–4].

Також було започатковано засади створення інноваційних НМПКМ на базі наноструктурованих (на основі вуглецевих нанотрубок – ВНТ) композицій, що також передбачає обов'язкове застосування УЗ як домінуючого методу при одержанні НМПКМ. Адаже така дія є досить ефективною, так як сприяє деагломерації ВНТ та їх подальшому якісному диспергуванню у рідкій полімерній матриці, а також покращенню її властивостей [5].

Не менш перспективним є розроблення технологій та устаткування для формування виробів з «інтелектуальних» ПКМ, що дає змогу контролю стану виробу за рахунок безперервного моніторингу його напружено-деформованого стану в процесі експлуатації [6].

Розроблюваний науковцями КПШ ім. Ігоря Сікорського методологічний підхід дозволяє здійснювати увесь цикл моделювання і автоматизованого проектування конструкційних виробів з них та проектування формуючого УЗ-обладнання.

Слід відзначити, що виконанню досліджень передувало ряд ідей. *Перша ідея* базується на ефективності використання армованих реактопластів, зокрема, з наноструктурованих волокон, для виготовлення високоміцних і бездефектних конструкційних елементів з ПКМ. Відомо, що наномодифікатори у вигляді ВНТ є катализаторами процесів затвердіння з функціональних груп олігомерів, а також утворення зшивання. А їх введення за оптимального вмісту в рідку полімерну матрицю приводить до підвищення міцних показників (в середньому на 50-150%) і сприяє повнішому протіканню процесів затвердіння.

*Друга ідея* полягає в експериментально установленій ефективності використання УЗ-кавітації у низькочастотному діапазоні при приготуванні рідких полімерних зв'язуючих (ПЗ) – як традиційних, так і наномодифікованих. Попередньо було встановлено, що при здійсненні УЗ-обробки рідких полімерних середовищ зростає інтенсивність озвучування і скорочується час УЗ-обробки в порівнянні з традиційною технологією, а також покращується гомогенізація озвучуваного ПЗ. Тестові експерименти показали доцільність використання УЗ для деагломерації і диспергування ВНТ як у розчиннику, так і у рідкій полімерній матриці.

*Третя ідея* полягає в застосуванні УЗ не тільки для обробки рідких ПЗ, у тому числі наномодифікованих, а й для активації поверхні і структури ТВН для поліпшення його змочуваності зв'язуючим, дегазації структури ТВН безпосередньо перед просочуванням, а також для збільшення продуктивності протягування ТВН при одночасному покращенні властивостей кінцевого ПКМ. Це дає базу для обґрунтування засад енергощадності при розробленні процесів одержання виробів подвійного використання з ПКМ на основі препрегів при застосуванні УЗ.

*Четверта ідея* полягає в застосуванні математичних методів оптимізації, що дозволяє істотно скоротити спектр і кількість необхідних експериментів, суттєво зменшити фінансові і часові витрати на їх проведення, прогнозувати конструктивно-технологічні і режимні параметри виготовлення та кінцеві властивості одержуваних тканих ПКМ і НМПКМ.

В рамках запланованого досліджень передбачається застосування комплексний підхід до розроблення технічних засобів у вигляді інноваційної конкурентоздатної технології та реалізованого її обладнання для одержання як традиційних ПКМ на основі тканих волокнистих наповнювачів (ТВН) і (ПЗ), так і наномодифікованих (НМ) ПКМ, що використовуються для формування високонадійливих конструкційних виробів на їх основі.

Цей комплексний підхід, зокрема, базується на методах досліджень, що використовуються в: 1) технології ПКМ; 2) в хімічній технології (процеси та обладнання); 3) в полімерному матеріалознавстві; 4) в теорії моделювання.

- Для реалізації поставленої мети передбачається вирішення наступних задач:
1. аналіз проблемних ситуацій при формуванні традиційних і наномодифікованих терморезистивних полімерних композицій для одержання високоміцних і бездефектних конструкційних композиційних матеріалів на їх основі, вибір базових методів їх одержання;
  2. обґрунтування доцільності застосування технологій подвійного використання на прикладі термопластичної смоли і сфери зберігання озброєнь, а саме для одержання склобазальтопластикової тари для пакування і зберігання боєприпасів;
  3. встановлення експериментальним шляхом для досліджуваного полімерного композиційного наномодифікованого композиційного матеріалу на їх основі оптимального вмісту наномодифікатора у вигляді ВНТ;
  4. дослідження режимних параметрів одержання ПКМ на базі скло-, і базальтопластиків, для виготовлення конструктивних елементів;
  5. дослідження ефективних режимних параметрів при застосуванні методу кавітаційної УЗ-обробки в технологічному процесі дозованого нанесення для одержання високоміцних і бездефектних пререпрегів на основі ТВН та ПЗ;
  6. розроблення удосконаленої методики й вибір ефективних конструктивно-технологічних параметрів обладнання для попереднього озвучування, просочування й дозованого нанесення при одержанні пререпрегів з реактопластів поліпшеної якості;
  7. підготовка до впровадження виконання розробки у хімічному і спеціальному машинобудуванні, зокрема, для одержання склобазальтопластикової тари для пакування і зберігання боєприпасів.
- Регулювання параметрів УЗ-впливу, таких як частота, амплітуда, потужність випромінювання, а також температура і час озвучування, дозволяє підібрати ефективні режими диспергування і гомогенізації для олигомера і різних наномодифікаторів.
- Розв'язання досліджуваних завдань забезпечить суттєве підвищення продуктивності процесів одержання виробів з НМПКМ і ПКМ – скло- і базальтопластиків, що забезпечить значну економію енергоресурсів, а також поліпшить екологічну обстановку при їх одержанні.

#### Список літератури

1. Колосов О.С. Технологія одержання багатокомпонентних епоксиполімерів із застосуванням направленої фізико-хімічної модифікації / О.С.Колосов, В.І.Свєцький, С.М. Панов. — К.: НТУУ "КПІ", 2010. — 220 с.
2. Колосов О.С. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультрависокої монографія / О.С.Колосов, В.І.Свєцький, О.П. Колосова. — К.: ВПК «Політехніка», 2015. — 295 с.
3. Колосова О.П. Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів [монографія] / О.П. Колосова, В. В. Ванін, Г. А. Вірченко, О. С. Колосов. — К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. — 164 с.
4. Колосова О.П. Моделювання процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних матеріалів: монографія / О.П. Колосова, В. В. Ванін, О.С. Колосов, В.І. Свєцький, — К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — 235 с.
5. Колосов О.С. Одержання високоміцних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: монографія / О.С. Колосов. — К.: ВПК «Політехніка», 2015. — 227 с.
6. Свєцький В.І. Технологія і устаткування для формування виробів з традиційних та інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів [Текст] / В.І.Свєцький, О.С. Колосов, О.П. Колосовський, П.І. Івльський. — К.: ВПК «Політехніка», 2017. — 120 с.

УДК 623.746: 629.7.083.003.13 (045)

Радько<sup>1</sup> О.В., к.т.н., доц., Скуратовський<sup>2</sup> А.К., к.т.н., доц.

1 - Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

2 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

#### ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ АБРАЗИВНОЇ ТА КОРОЗИЙНОЇ СТІЙКОСТІ СТАЛІ 20X13

Одним із пріоритетних завдань сучасного машинобудування є розробка та впровадження у виробництво енергозберігаючих технологій поверхневого зміцнення деталей, які дозволяють одночасно підвищити декілька їх експлуатаційних властивостей.

У роботі приведені результати дослідження абразивної та корозійної стійкості сталі 20X13 після її модифікування за допомогою імпульсного газотермоциклічного іонного азотування (ГТЦ ІА) [1]. Для формування дифузійних шарів використовували установку «ВПА-1». Параметри технологічного процесу: температура—500...600°С; тривалість дифузійного насичення — 2,5...5 год.; співвідношення реакційних газів—50...80% Ar + 50...20%N<sub>2</sub>. Частина зразків перед зміцненням підлягала попередній термообробці.

Оцінку абразивної стійкості проводили за методикою [2] на машині тертя [3]. Зразки піддавалися зношуванню шляхом тертя про шліфувальній шкурці зернистістю 160. Питоме навантаження на зразок складало 1 МПа при довжині шляху тертя 40 метрів і швидкості тертя 0,15 м/с. Оцінку корозійної стійкості проводили за питомим збільшенням маси зразків шляхом 10-годинного їх витримування в алюодових тиглях на спокійному повітрі при температурі 973К. Перед початком дослідів та через кожні 2 години витримування на поверхню зразків наносили сольову обмывку з Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> та NaCl у співвідношенні 3:1.

В результаті дослідження встановлено підвищення абразивної та корозійної стійкостей модифікованих імпульсним ГТЦ ІА поверхонь зразків зі сталі 20X13 у 1,6...1,8 та у 2,2...2,7 рази відповідно. Найбільшу абразивну стійкість виявлено у попередньо термооброблених зразків, які мають у своїх поверхневих дифузійних шарах більшу кількість ε-фази (текстаурального карбонітриду Fe<sub>2-3</sub>(NC)).

Виходячи з отриманих даних можна зробити висновок про перспективність та доцільність використання імпульсного ГТЦ ІА для поліфункціонального модифікування конструкційних елементів зі сталі 20X13 під час їх виробництва або відновлення, що забезпечить комплексне підвищення експлуатаційних властивостей зміцнених деталей та, відповідно, призведе до збільшення їх термінів служби й ресурсу, а також зменшення витрат на обслуговування і ремонт сучасної техніки. Перспективою подальших досліджень вважається розширення номенклатури матеріалів для зміцнення імпульсним ГТЦ ІА.

#### Список літератури

1. Пат. 10014 Україна, МПК (2006) C23C 8/06. Спосіб поверхневого зміцнення сталевих деталей іонно-плазмовим азотуванням у пульсуючому тліючому розряді / Ляшенко Б. А., Рутковский А. В., Мірненко В. І., Радько О. В.; заявник та патентовласник Національна академія оборони України. — № 19782; заявл. 19.09.06; опубл. 15.12.06, бюл. № 12.
2. Скуратовський А. К. Абразивна стійкість сталі 38Х2МЮА після іонноазотуючої обробки / А. К. Скуратовський, О. В. Радько // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Машинобудування. — 2010. — № 59. — С. 158-160.
3. Пат. 24695 Україна МПК (2006) G01N3/56. Машинна тертя / Скуратовський А. К.; заявник та патентовласник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". — №2007 02330; заявл. 03.03.2007; оп. 10.07.2007, бюл. № 10.

## УДК 621.921.34

Клименко<sup>1</sup> С.А., д.т.н., проф., Манохин<sup>1</sup> А.С., к.т.н., Білоусова<sup>2</sup> Н.М.,Колмаков<sup>3</sup> О.Г., д.т.н., проф., чл.-кор. РАН, Насакіна<sup>3</sup> О.О., к.т.н., с.н.с.

1 – Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна

2 – Житомирський державний технологічний університет, м. Житомир, Україна

3 – Інститут металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН, м. Москва, Росія

СКЛЕРОМЕТРУВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ІНСТРУМЕНТІВ  
З НАДТВЕРДИХ КОМПЗИТІВ НА ОСНОВІ cBN ГРУПИ ВЛ

Для обробки виробів з Fe-C-сплавів високої твердості ефективно використовуються різальні інструменти, оснащені полікристалічними надтвердими композитами на основі кубічного нітриду бору (cBN). У відповідності до кількості вмісту cBN композити мають суттєво відмінні фізико-механічні властивості та виготовляються за двома групами – ВН (вміст cBN 70–95%) і ВЛ (вміст cBN 40–65%) (стандарт ISO 513-2012).

Області застосування композитів багато в чому обумовлені здатністю поверхневого шару робочих ділянок виготовлених з них інструментів чинити опір дії термобаричних навантажень від процесу різання.

Для оцінки механічних властивостей матеріалу поверхневого шару композитів ефективним є застосування методу склерометрування (Scratch Test), при якому досліджуваний поверхневий шар сканується навантаженням індентором. Вибір нормального навантаження  $P$  на індентор, розмір області, що деформується на досліджуваному зразку, може бути приблизний до такої, що відповідає деформації в процесі його експлуатації. Таким чином, склерометрування являє собою також метод моделювання параметрів контактного навантаження на інструмент в зоні різання.

В даній роботі з метою оцінки впливу термобаричного навантаження в зоні різання на фізико-механічні властивості поверхневого шару композитів проводилося склерометрування експериментальних зразків надтвердих інструментальних матеріалів. Для вимірювань використовувався прилад «Мікрон-гамма», розроблений в Національному авіаційному університеті. Даний мікро/наноіндентометр має широкі діапазони заданих зусиль (від 0,01 до 10 Н) і ресторованої глибини індентування (від 10 нм до 200 мкм).

Досліджувані зразки інструментів з полікристалічних надтвердих композитів на основі cBN групи ВЛ. Сканування проводилося по передній поверхні інструменту в радіальному напрямі від центру різальних пластин до різальної крайки. Вимірювання проводилося при навантаженні на індентор 100 сН, довжина траси сканування складала 270 мкм, швидкість сканування 22 мкм/с.

На рис. 1–3 представлені величини тангенційної складової опору матеріалу зразків руйнуванню: сили третья-мікрорізання та глибини занурення при повздовжньому переміщенні індентора. Ділянки входу та виходу індентора відсічені і враховано тренд нахилу діаграм. Значення сили  $F_t$  приведені в сантиметьонах, глибини занурення – в мкм.

Аналіз даних табл. 1 та рис. 1–3 дозволяє оцінити характер залежності між параметрами, що характеризують процес мікроруйнування поверхневих шарів композитів – глибиною занурення індентора склерометра та тангенціальним зусиллям на інденторі (силою третья-мікрорізання).

Сила третья-мікрорізання практично не залежить від типу експериментального композиту №№ 22, 24, 27.

Табл. 1 – Характеристики механічних властивостей поверхневого шару композитів

№ зразка	Тип композиту	Навантаження, сН	$M/h$ , мкм	$\sigma/h$ , мкм	$M[F_t]$ , сН	$\sigma[F_t]$ , сН	$F_t$ , Н/мм
21	cBN(KM 3/2) – TaN (1–30 мкм, 55–45)%	30	-1,00	0,18	17,02	3,21	–
		100	-1,91	0,16	27,66	3,61	
22	cBN(KM 3/2) – TiN (1–2 мкм, 55–45)%	30	-1,36	0,13	17,69	2,30	132,8
		50	-2,20	0,18	30,78	3,00	
24	cBN(KM 3/2) – TiC (≤ 4,5–7 мкм, 55–45)%	100	-4,53	0,30	56,59	4,21	188,5
		30	-1,58	0,22	17,53	2,06	
27	cBN(KM 3/2) – TiC (≤ 4,5–7 мкм, 75–25)%	50	-2,17	0,16	30,61	2,96	108,0
		100	-4,19	0,13	56,45	4,41	
		30	-1,08	0,11	15,45	1,81	
		50	-1,75	0,14	27,95	2,58	
		100	-3,85	0,16	55,13	4,76	

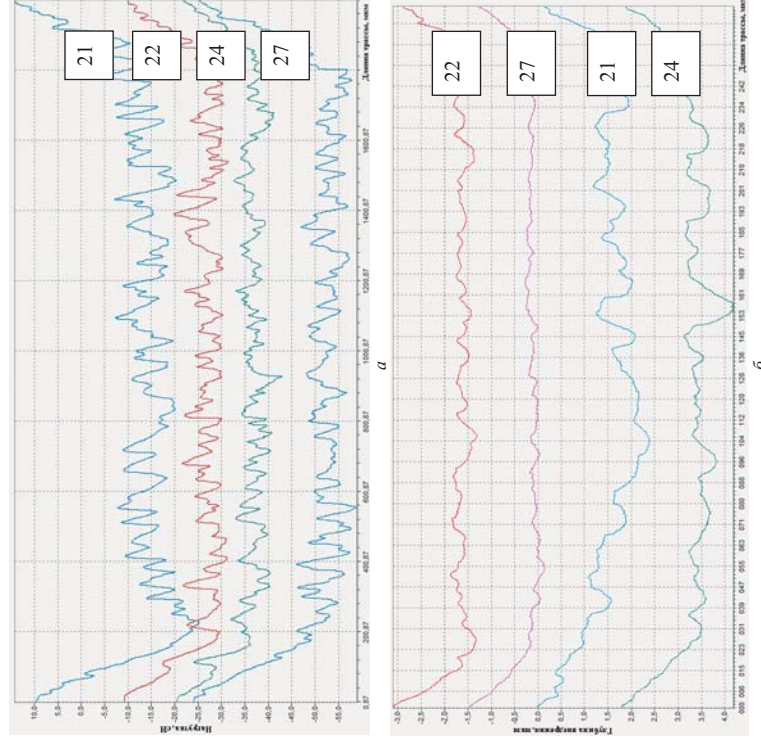


Рис. 1 – Залежність сили третья (а) та глибини занурення індентора (б) від координати при скануванні зразків 21–24

Величина даного параметру для зразка № 21 значно нижча, що свідчить про те, що за сукупністю механічних властивостей цей зразок значно (на 14%) поступається іншим типам композицій. В цілому, значення середньоквадратичного відхилення та математичне очікування сили тertia-мікрорізання не дозволяє визначити найбільш ефективний тип композиції при вимірюванні сили тertia-мікрорізання взаюючи лише тільки на принципову працездатність нових матеріалів.

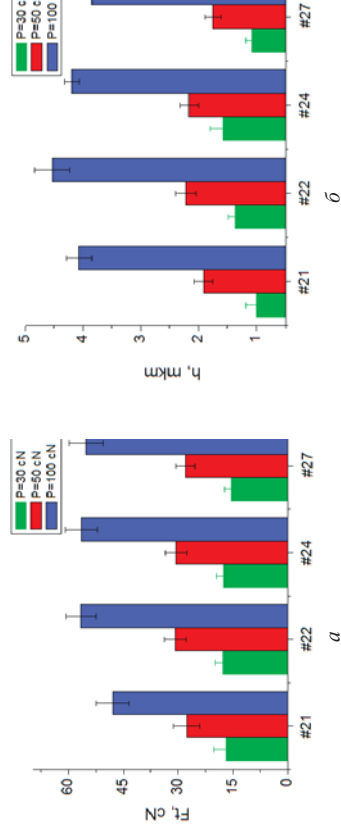


Рис. 2 – Залежність математичного очікування сили тertia-мікрорізання від номера зразка та нормального навантаження на індентор (а), та залежність математичного очікування глибини занурення індентора при скануванні від номера зразка та нормального навантаження на індентор (б)

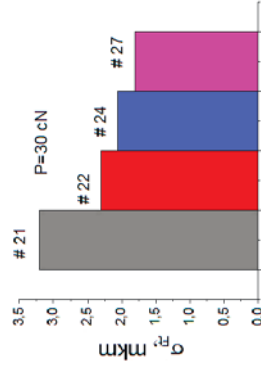


Рис. 3 – Розмір середньоквадратичних значень сили тertia при скануванні зразків

Графіки на рис. 1 демонструють залежності сили тertia та глибини занурення індентора від координати при скануванні зразків № 21, 22, 23, 27 при навантаженні 30 сН (для зручності аналізу графіки рознесено відносно нуля). Якщо діаграма, яка характеризує глибину занурення індентора при скануванні (див. рис. 1, а), не дозволяє охарактеризувати однорідність механічних властивостей випробуваних матеріалів, то характеристики сили тertia-мікрорізання (див. рис. 1, б) надають можливість визначити, що найбільшою однорідністю характеризується зразок № 27. Користуючись результатами розрахунків, наведеними в табл. 1 побудована діаграма ранжування зразків за параметром середньоквадратичного відхилення сили тertia-мікрорізання при скануванні зразків з нормальним навантаженням 30 сН (див. рис. 3).

Наведені результати досліджень свідчать про перспективність використання у різальних інструментах композиту на основі cBN групи ВL – cBN(KM 3/2) – TiC (≤ 4,5–7 мкм, 75–25%). Поверхневий шар виготовлених з нього різальних інструментів є найбільш однорідним за механічними показниками та характеризується найбільшою міцністю.

УДК 621.9.048

Кондрашев П.В., к.т.н., доцент  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ МІКРОСТРУКТУРИ СПЛАВЛЕНИХ ФРАГМЕНТІВ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ «RAPID PROTOTYPING»

**Вступ.** В сучасному світі стрімкого розвитку розвитку науково-інноваційних технологій неможливо уявити жодну галузь індустрії ведучих країн світу без застосування лазерної технології. Такий універсальний інструмент, як лазер може виконувати безліч технологічних операцій, та застосовується багатьма сучасними технологіями, однією з таких є технологія «Rapid Prototyping», яка використовує у якості інструменту сфокусований лазерний промінь та широко застосовується високорозвиненими країнами у всьому світі, для безпосереднього виготовлення (наприклад, штампів, пресформ та ін.). Враховуючи високу складність протипання фізичних процесів, пов'язаних з реалізацією технології «Rapid Prototyping» добре рекомендувала себе активна стратегія проведення експерименту, яка дає можливість отримати більш точні результати експериментальних досліджень в порівнянні з пасивною стратегією. Аналіз літературних джерел дозволив встановити технологічні фактори, які безпосередньо впливають на якісні показники сплавлених фрагментів [1-5]. Зміна положення підкладки відносно пристрою подачі порошкового матеріалу впливає на такі показники сплавленого компонента як, морфологічні властивості, внутрішня мікроструктура (порожні фрагменти, раковини, мікротріщини). Масова витрата порошкового матеріалу безпосередньо впливає на внутрішню мікроструктуру сплавлених фрагментів, але має кореляцію з фактором потужності лазерного випромінювання. Термодинамічні властивості порошкового матеріалу, такі як температура плавлення, залежать від потужності лазерного випромінювання, чим вище температура плавлення порошкового матеріалу, тим більша потужність необхідна для його сплавлення. Серед базових, порошкових матеріалів, які використовуються для технології лазерного сплавлення порошкової композиції, широке застосування отримали порошки на основі нікелю, титану, кобальту [6]. Найбільш поширеним з цієї групи порошок ПГSR-3 базовою складовою якого є нікель, який має найвищу температуру плавлення 1453° С [7], в порівнянні з титаном і кобальтом. Одним з головних факторів впливу на якісні показники сплавлених фрагментів є конфігурація пристрою подачі порошкового матеріалу (сопла різних конструкцій) [8, 9].

**Дослідження внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів методом математичної статистики.** Аналіз літературних джерел показав, що покращення якісних показників виробів отриманих за допомогою технології «Rapid Prototyping» є одним з пріоритетних напрямків наукових досліджень. Для реалізації даної задачі була обрана методика повного факторного експерименту з використанням не композиційного плану Бокса-Бенкена [10], який повністю відповідає вимогам експерименту, та має вигляд рівняння регресії другого порядку, для 4-х факторів впливу. з трьома рівняннями варіювання для кожної незалежної змінної (1).

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

де  $k$ -кількість технологічних факторів;  $b_0$ ,  $b_i$ ,  $b_{ij}$ ,  $b_{ii}$ -коефіцієнти рівняння регресії;  $i, j$ -індекси.

Для оцінки дисперсії дослідів  $S_y^2$  при моделюванні процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПГSR-3, проводили рівномірне повторення дослідів  $n_i=3$ . Однорідність ряду строккових дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена, визначення генеральної дисперсії експериментальних досліджень, проводили за відповідною методикою [11]. Для аналізу внутрішньої мікроструктури сплавленого фрагмента в якості функції відлику була викорис-

тана суцільність (загальна кількість пустих фрагментів, раковин, мікротріщин виражених у відсотковій формі  $W$ ). Коefіцієнти рівняння регресії  $b_0, b_1, b_{ij}, b_{ij}$  моделі (1) розраховувались за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення з використанням математичного апарата лінійної алгебри [12, 13]. Формування матриці умов експерименту  $X$  відбувалося з використанням збалансованої блок-схеми для 4-ох незалежних змінних ( $x_1, x_2, x_3, x_4$ ), яка складається з 6-ти блоків (повно факторний експеримент 2<sup>2</sup>) [14], варіювання факторів впливу на процес лазерного сплавлення порошкової композиції проводилося на трьох рівнях (мінімум, центр, максимум). Розрахунок коefіцієнтів рівняння регресії (1) не композиційного плану другого порядку Бокса-Бенкена [11] для 4-ох технологічних факторів впливу на процес лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПП СР-3 з рівномірним повторенням дослідів, дисперсій оцінок коefіцієнтів рівняння регресії, інтервалів довіряння проводився за загальною методикою [11]. Перевірка гіпотези стосовно адекватності отриманих математичних моделей процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу проводилася за використанням методик [11], за критерієм Фішера  $F$ , що дозволило отримати достовірність результатів експерименту з мінімальною похибкою у межах 5% (2).

$$F_{\text{розр}} \leq F_{\text{табл.}}$$
 (2)  
де  $F_{\text{розр}}$  - розрахункове значення критерію Фішера [11];  $F_{\text{табл.}}$  - табличне значення критерію Фішера [11].

Проведена статистична обробка результатів експериментальних досліджень показала, що всі коefіцієнти рівняння регресії виявились статистично значимі, завдяки виконанню умови [11]. За допомогою отриманої моделі суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів були визначені розрахункові значення функції відступу ( $W$ ). Для більш детального аналізу про ступінь статистичної значимості кожного з технологічних факторів на функцію відступу суцільності ( $W$ ) була побудована рангова діаграма (рис. 1, а).

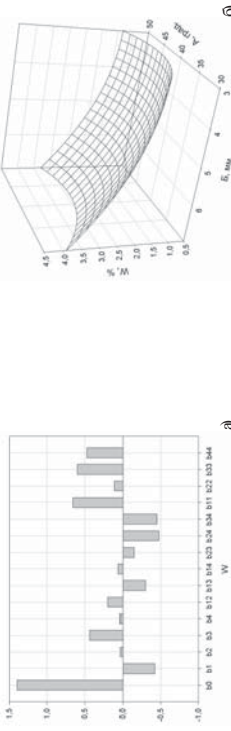


Рис. 1. Рангова діаграма ступеню статистичної значимості технологічних факторів на функцію відступу ( $W$ ) (а) та залежність суцільності сплавленого фрагмента ( $W$ ) від геометрії кутів утворюючих сошла (А) для різних положень підкладки (Б) з масовою витратою порошкової композиції 0,2 г/с та швидкістю переміщення підкладки 1 мм/с.

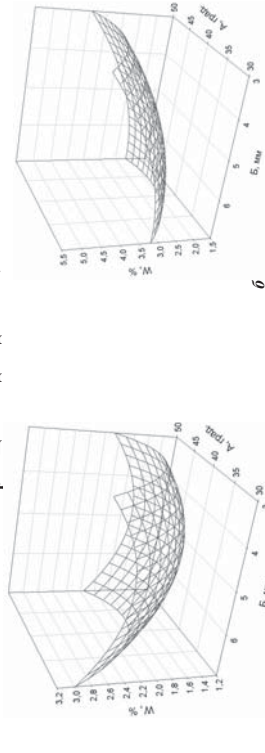


Рис. 2. Залежність суцільності ( $W$ ) від геометрії кутів утворюючих сошла (А) для різних положень підкладки (Б): а)-масова витрата порошкової композиції 0,3 г/с, швидкість переміщення підкладки 2 мм/с, б)- масова витрата порошкової композиції 0,4 г/с, швидкість переміщення підкладки 3 мм/с.

Найкращі показники суцільності близько 1,2% спостерігаються при кутах геометрії утворюючих 40° для швидкості переміщення підкладки 2 мм/с, масової витрати порошкового матеріалу 0,3 г/с, та відстані від зрізу сошла 5 мм (рис. 2, б), головний чинник формування порожнистих фрагментів з близькою до ідеальної мікроструктури сплавленого фрагмента є збігання положення підкладки з положенням «фокусу» газопорошкового струменя, за рахунок чого вплив лазерного випромінювання відбувається у площині з максимальною поперечною концентрацією дисперсної фази у потоці газу, внаслідок чого формується щільний газопорошковий струмінь з високим вмістом дисперсної фази у зоні обробки, саме ці умови призводять до формування фрагментів з щільною суцільною мікроструктурою. Аналогічні показники суцільності приблизно 4% (рис. 2, б), такі як у випадку (рис. 1, б) спостерігаються для кутів геометрії 30°, швидкості переміщення підкладки 3 мм/с, масової витрати порошкового матеріалу 0,4 г/с, та положення підкладки від зрізу сошла 3 мм (рис. 1, б), не пояснюється головним чинником невеликого відстанню підкладки від зрізу сошла 3 мм вище за положення «фокусу» газопорошкового струменя, та високим показником швидкості переміщення підкладки 3 мм/с, що призводить до формування газопорошкового струменя з великою площею поперечного перерізу та низькою концентрацією дисперсної фази у потоці газу, за рахунок чого формуються фрагменти сплавленої порошкової композиції з достатньо великим вмістом порожнистих ділянок.

**Висновки**

1. Встановлені оптимальні режими процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПП СР-3, які забезпечують максимальну суцільність внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів  $W=1,2\%$  (відсоткове значення порожнистих фрагментів, раковин, мікротріщин).
2. Отримана математична модель суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів, яка в подальшому може бути використана в якості розрахунку керування впливом спрямованих на підтримку постійного рівня якості майбутніх виробів.
3. Підтверджена адекватність теоретичних розрахунків о можливості використання тематичних моделей процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу для подальшого використання їх при реалізації технології «Rapid Prototyping».

**Список літератури:**

1. Lagan A. The Effects of Steel Composition on the Laser Cut Edge Quality of Carbon and C-Mn Steels / A. Lagan, P.A. Hilton and D.W. Taylor.-Proceedings of International Congress "SCALEO2002", Scottsdale, USA, Oct. 2002.-[Електронний ресурс].- LIA; 1 електрон. орг. диск (CD-ROM); 12 см.-
2. С.Р. Paul. REPAIR OF CEMENTED CARBIDE TOOLS USING LASER CLADDING / Christ P Paul, Hamidreza Alemohammad, Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Stephen Corbin.-Proceedings of International Congress "SCALEO2006", Scottsdale, USA, Oct. 2006.-[Електронний ресурс].- LIA; 1 електрон. орг. диск (CD-ROM); 12 см.
3. F. Lusquicos, R. Comesaña, A. Riveiro, F. Quintero, J. del Val, J. Pou.-Proceedings of International Congress "SCALEO2007", Orlando, USA, Oct. 2007.-[Електронний ресурс].- LIA; 1 електрон. орг. диск (CD-ROM); 12 см.-
4. Castello A. Optimization of Laser Powder Deposition for 316 L Stainless Steel / A.Castello, J.Sears.-Proceedings of International Congress "SCALEO2003", Jacksonville, USA, Oct. 2003.-[Електронний ресурс].- LIA; 1 електрон. орг. диск (CD-ROM); 12 см.-
5. M. Kutsuna. Clack Behavior and microstructure of Clad Layer in laser cladding of stellite 6 and WC powder / Munaharu KUTSUNA.-Proceedings of International Congress "SCALEO2004", Oct. 4-7, 2004, San Francisco, California, USA.-[Електронний ресурс].- LIA; 1 електрон. орг. диск (CD-ROM); 12 см.-
6. Powell J. Laser Cladding With Preplaced Powder. Analysis of thermal cycling and dilutions effects / J.Powell.-Surface Engineering.-1988.-Vol. 4-N. 2-P. pp. 141-149.
7. Г.В. Самсонов. Физико-химические свойства элементов [Текст] / Г.В. Самсонов, А.Л. Бурыкина, Ю.М. Горячев и др. -Изд-во Научкова думка, К., 1965 -806 с.
8. J Mei. Finite Element Analysis of the Thermal Behaviour and Its Implications to the Microstructure of Direct Laser Fabricated Samples (905) / J Mei, L. Qian, [at al.]-Proceedings of International Congress "SCALEO2003", Jacksonville, USA, Oct. 2003.-[Електронний ресурс].- LIA; 1 електрон. орг. диск (CD-ROM); 12 см.-
9. A.J. Pinkerton. A VERIFIED MODEL OF LASER DIRECT METAL DEPOSITION USING AN ANALYTICAL ENTHALPY BALANCE METHOD / A.J. Pinkerton, Richard Moot, Kamran Shah, Lin Li, Michael

Preuss, P.J. Withers. -Proceedings of International Congress "ICALEO2007", Orlando, USA, Oct. 2007.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опр. диск (CD-ROM); 12 см.-  
10. Box G. Some new three level designs for study of quantitative variables / Box G., Venken D. -Technometrics, 1960, v. 2, N. 4, pp. 455-475.

11. Новик Ф.С. Оптимізація процесів технології металів методами планування експериментів / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов.-М.: Наука, 1980.-304 с.

12. Бахвалов Н.С. Численные методы [Текст] / Г. Корн, Т. Корн, Т. Корн.- М.: Наука, 1984.-833 с.

13. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн.- М.: Наука, 1984.-833 с.

14. Маркова Е.В. Неполноблочные планы / Е.В. Маркова.-Препринт №15, М.: Изд-во МГУ, 1970.-318 с.

#### УДК 620.172.25

**Гузенко Ю.М., к.т.н., доц.**

КПШ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

### МОДЕРНІЗАЦІЯ ПРИБОРУ ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ ЗРАЗКІВ НА РОЗТЯГУВАННЯ

Для здійснення випробування зразків на розтягування широко використовують пристрої, які містять корпус з двома співвісними отворами, розташованими в них захвати зразка [1]. Проведення в корпусі гвинтовий засіб для передачі навантаження на вказані захвати зразка [1]. Проте такі пристрої не забезпечують достатньо великої швидкості навантаження зразків при випробуваннях на розтягування із-за використання для цього повільнодіючих гвинтових засобів. Відомий також пристрій для випробування зразків на розтягування, який для забезпечення можливості використання швидкодіючих, наприклад, гідравлических або пневматичних систем навантаження зразків містить корпус з двома співвісними отворами, розташованими в них захвати зразка і встановлений в прямокутному отворі корпусу клиновий засіб для передачі навантаження на вказані захвати зразка [2]. Але використання такого пристрою не забезпечує можливості здійснювати декілька законів розтягування зразків, оскільки клиновий засіб виконаний тільки з двома протилежно розміщеними робочими гранями.

Виконання в пристрої для випробування зразків на розтягування клинового засобу у вигляді зрізаної піраміди з парною кількістю своїх бокових граней і сполученими з ними торцевими пазами для розташування по черзі робочої частини зразка, а також утворення протилежно розміщеними робочими гранями зазначеної піраміди поверхонь різних профілів дозволяють збільшити кількість пар протилежно розміщених робочих поверхонь клинового засобу [3]. Використання зрізаної піраміди з двома парами поверхонь різних профілів відповідно забезпечує можливість здійснення по черзі двох законів розтягування зразків.

При випробуваннях зразків на розтягування до клинового засобу прикладають необхідні навантаження і забезпечують його переміщення в сторону середньої робочої частини зразка. В результаті взаємодії зазначеного клинового засобу з двома вибраною парою своїх бокових робочих граней із закрутленими робочими поверхнями захватів зразка відбувається поступове його розтягування і досягнення повного розриву. Після встановлення в пристрій другого зразка здійснюється його випробування з можливою зміною закону розтягування.

#### Список літератури.

1. Прикладная механика. Лабораторный практикум: Учебное пособие для студентов технических вузов /В.Ф. Мальцев, И.Ф. Сорока, В.И. Крулеский и др. – Киев-Одесса: Вища школа, 1988. – 175 с.
2. А. с. СССР № 530222, МПК G 01 N 3/08. Устройство для испытания образцов на растяжение /В.Г. Кононенко, Д.А. Райман, С.Г. Кушнарченко и др.: заявитель ХАИ. – Опубл. 30.09.1976. Бюл. № 36.
3. Патент України на корисну модель № 97275, МПК G 01 N 3/08. Пристрій для випробування зразків на розтягування /Ю.М. Гузенко, власник НТУУ «КПШ». – Опубл. 10.03.2015. Бюл. № 5.

#### УДК 621.951.4

**Гнатюк А.П., к.т.н., доц., Лимаренко А.М., к.т.н., доц.**

Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина

### РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ РЕЖУЩЕГО ЭЛЕМЕНТА РУЖЕЙНЫХ СВЕРЛ

В современном машиностроении наблюдается тенденция к увеличению деталей, имеющих глубокие точные отверстия. Это связано с повышением жесткости и виброустойчивости машин, агрегатов, узлов (уменьшением количества стыков и плотностей разреза). Для обработки вышеуказанных отверстий преимущественно используют инструменты одноостровонного резания и, в том числе, ружейные сверла (РС).

Часть отечественных предприятий, нуждающихся в РС приобретают их за рубежом. Эти РС конструктивно изготовлены с рабочей частью в виде цельнотвердосплавной головки 1 (рис.1). Другая часть предприятий изготавливает данные сверла самостоятельно. Этот инструмент отличается от зарубежного тем, что режущий элемент 1 как и направляющие элементы 2 (рис.2) выполнены из отдельных твердосплавных пластин (ТП), которые припаиваются к борштанге сверла.

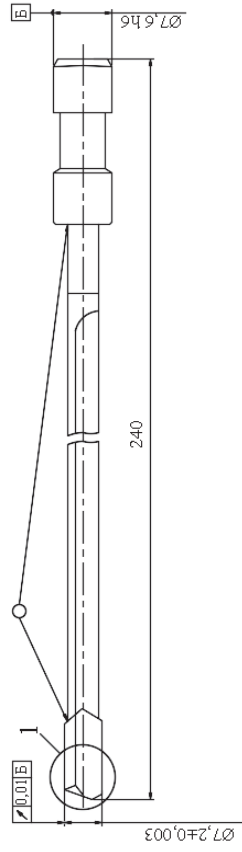


Рис. 1 – Ружейное сверло с цельнотвердосплавной головкой

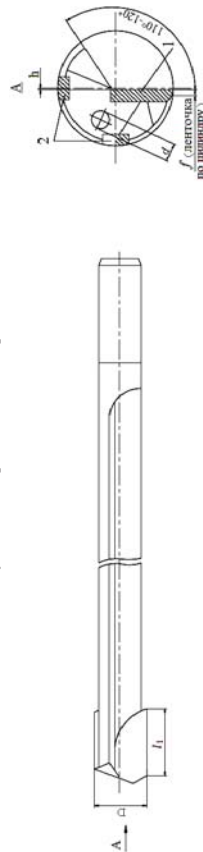


Рис. 2 – Ружейное сверло с припаянными режущей и направляющими элементами

Из наиболее значимых габаритных параметров режущей ТП является ее толщина, которая в большинстве случаев выбирается из условия «чем толще, тем прочнее». Однако, чрезмерно завышенная по толщине пластина это:

1. Неоправданный расход твердого сплава, а значит и неоправданные материальные затраты;
2. Чем больше значение толщины режущей ТП, тем меньше диаметр  $d$  канала для подачи смазывающе-охлаждающей технологической среды в зону обработки, что в конечном счете снижает стойкость инструмента.

В связи с вышеизложенным было предложено, для оптимизации толщины режущей ТП РС применить программный комплекс ANSYS, математической основой которого является метод конечных элементов.

В качестве объекта для расчетов была взята конструкция РС диаметром  $D=20,0$  мм с режущей ТП толщиной  $b = 3,5$  мм, изготовленной из инструментального материала Т15К6; обрабатываемый материал – конструкционная сталь 40Х. Обобщение сил, действующих на режущую ТП в процессе резания, позволило принять следующую расчетную схему (рис.3).

Для аппроксимации, созданной в ANSYS модели, был использован конечный элемент Solid 45 (рис.4), который является стандартным элементом в библиотеке программы ANSYS.

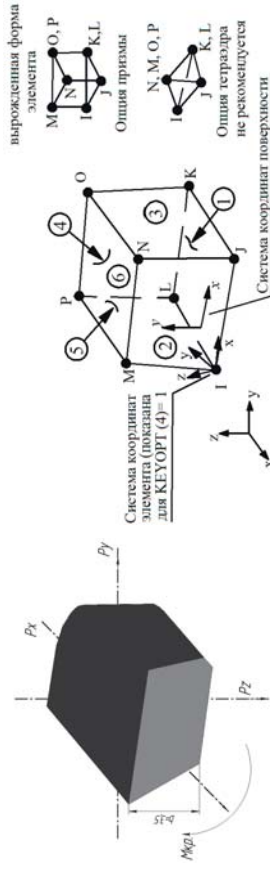


Рис. 3 – Расчетная схема режущего элемента

Рис.4 – Геометрия конечного элемента Solid45

Сгенерированная программой конечно-элементная модель режущей ТП насчитывает 12084 узлов и 61011 элементов.

В результате проведенных расчетов было определено, что минимально допустимое значение толщины режущей ТП составляет  $b=2,5$  мм. (табл.1)

Таблица 1

Результаты расчетов	Модель		
	Модель 1	Модель 2	Модель 3
Модель и толщина пластины	3,5 мм	3,0 мм	2,5 мм
Расчетываемые параметры			
Эквивалентные напряжения, $\sigma$ (МПа)	616,675	858,669	1046
Коэффициент запаса	2,35	1,69	1,38
Вывод по критерию прочности	Эксплуатация возможна	Эксплуатация возможна	Эксплуатация не возможна

Лабораторно-производственные испытания РС с напаянными режущими ТП толщиной 2,5 мм подтвердили теоретические расчеты, т.е. стойкость инструментов соответствовала нормативным данным, изложенных в [3].

Очевидно, что проведенные численные исследования являются только первым шагом для расширения круга решения более сложных инженерных задач, чем и занимаются авторы данной публикации.

**Список литературы:**

1. Лимаренко А. М. Оптимизация шатуна автомобильного двигателя / А. М. Лимаренко, А. А. Романов, М. А. Алексеев // Труды ОНПУ. – 2012. – вып. 2 (39). – С. 98 – 100.
2. Дашченко О. Ф. Розрахунок напружено-деформованого стану станини гідропресу / О. Ф. Дашченко, В. Д. Ковальов, О. М. Лимаренко // Праці ОНПУ. – 2012. – вып. 2 (39). – С. 35 – 43.
3. Общепринятые нормативные режимы резания, нормы износа и расхода инструмента для любого сверления и растачивания / Локтев А.Д., Кирич Н.Н., Гарибов В.Р. [и др.]. – М.: НИИМаш, 1994. – 80 с.

УДК 621 (075.8)

Кореньков В.Н. к.т.н., доц., Tkach I.I. асп., КПП ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

**ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНИХ АЛГОРИТМІВ В ЗАДАЧАХ СИНТЕЗУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ**

Однією з найбільш важливих проблем машинобудування є задача автоматичного проектування технологічного процесу обробки деталі. На сучасному етапі розвитку машинобудування виникає проблема використання на виробничих ділянках автоматизованих систем, які здатні реалізувати різні технологічні операції та в свою чергу повинні забезпечувати виконання всієї можливої номенклатури технологічних операцій у найкоротший термін та швидко змінювати завантаження обладнання на ділянці в залежності від потреб виробництва. Нині більшість методик календарного планування розроблено на спрощених моделях, а в деяких випадках задається в ручному режимі, що на сьогоднішній день є неприпустимим. Також більшість систем не мають змогу оперативного підналагодуватися до змін виробництва, що негативно впливає на здійснення виробничих планів.

Для вирішення даної проблеми одним з найперспективніших підходів є використання мультиагентних алгоритмів, які являються досить ефективними хоча і засновані на механізмах, що використовуються в природі (наприклад, генетичні алгоритми, нейронні мережі, робітовий інтелект та ін.). В даній роботі ми розглянемо мультиагентний алгоритм Ant Colony Optimization [2], його перевагою є те що він не вимагає побудови структурної моделі безпосередньо самої виробничої ділянки.

Ідея мультиагентного алгоритму - моделювання поведінки агентів, пов'язаних з їх здатністю швидко знаходити найкоротший шлях від початкової до кінцевої точки у просторі рішень і адаптуватися до умов, що змінюються, знаходячи новий найкоротший шлях. При своєму русі агент залишає на пройденому шляху відмітку, тобто помічає пройдений шлях. З цих відміток складається інтенсивність руху агентів на певній ділянці, і ця інформація використовується іншими агентами для вибору шляху – апостеріорна інформація для корегування алгоритму на подальших кроках ітерації. Це елементарне правило поведінки і визначає здатність агентів знаходити новий шлях, якщо старий виявляється недоступним.

Очевидно позитивний зворотний зв'язок швидко призведе до того, що найкоротший шлях стане єдиним маршрутом руху більшості агентів. Моделювання швидкості зникання інтенсивності - негативного зворотного зв'язку - гарантує нам, що знайдене локально-оптимальне рішення не буде єдиним, а агенти будуть шукати і інші шляхи. Якщо ми можемо процес такої поведінки на деякому графі, ребра якого являються собою можливі шляхи переміщення агентів, протягом певного часу, то найбільш інтенсивний шлях по ребрах цього графа і буде рішенням завдання, отриманим за допомогою мультиагентного алгоритму.

Узагальнена схема роботи алгоритму зводиться до наступного:

Для даного алгоритму ймовірність переходу з  $i$ -ї вершини в  $j$ -у вершину визначається наступним чином

$$P_{ij}^k = \begin{cases} (\mu_{ij})^\alpha \cdot (\tau_{ij})^\beta \\ \sum_{k \in N_i^k} (\mu_{ik})^\alpha \cdot (\tau_{ik})^\beta, j \in N_i^k, j \notin N_i^k \end{cases}$$

де:

$\tau_{ij}$  - представляє апостеріорну ефективність переходу з вершини  $i$  в  $j$ .



$\mu_{ij}$  - представляє апріорну ефективність переходу з вершини  $i$  в  $j$  на основі деякої евристики;

$N_{ij}^*$  - множини, що визначає набір допустимих вершин для переходу  $k \rightarrow o$  агента, пов'язаних з  $i$ -ю вершиною графа.

При обчисленні ймовірності переходу  $P_{ij}^k$ , баланс впливу апостеріорної ефективності  $\tau_{ij}$  (відображає історію успішних дій) і евристичної інформації  $\mu_{ij}$  досягається шляхом підбору коефіцієнтів  $\alpha$  і  $\beta$  (у випадку  $\beta = 0$ , результатом попереднього пошуку ( $k-l$ )-м агентом нехтують і алгоритм вироджується в «жадібний»). При вирішенні задачі мінімізації, в якій розрахункової функції приймають величину, обернено пропорційну значенню ватова-коєфіцієнта  $\mu_i = 1/d_{ij}$  (як буде показано нижче, в кожному конкретному випадку дане значення набуває шуканий фізичний зміст).

Оновлення інтенсивності складається з двох етапів: імітації зникання інтенсивності і оновлення інтенсивності в залежності від якості одержуваного рішення. Імітація зникання інтенсивності проводиться за наступною формулою:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sigma,$$

де:  $\rho$  - швидкість зменшення інтенсивності;

$\sigma$  - параметр, який гарантує мінімальне значення інтенсивності на ребрі.

Для дуги  $(i,j)$  і маршруту  $T_k$  значення інтенсивності задається у вигляді:

$$\Delta\tau_{ijk} = \begin{cases} \sigma_k \cdot (i,j) \in T_k \\ 0, (i,j) \notin T_k \end{cases},$$

де  $\sigma$  - параметр, має значення порядку оптимальної довжини всіх маршрутів, тоді для ребра  $(i,j)$  загальна кількість інтенсивності визначається за формулою:

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=0}^m \Delta\tau_{ijk}$$

де  $m$  — кількість типів агентів.

Таким чином, за сумою двох етапів кількість інтенсивності задається формулою:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \sigma + \Delta\tau_{ij}$$

В роботі розглянута актуальна задача прискорення роботи за допомогою мультиагентного алгоритму. Даний метод дозволяє успішно вирішувати завдання календарного планування. Особливістю даного алгоритму є те, що він оперує лише поняттям ймовірності переходу від вершини до вершини графа альтернатив, що саме по собі дає можливість звести все до єдиної метрики і тим самим замінити вихідну багатопараметричну задачу однопараметричною на кожному кроці пошуку. Даний підхід суттєво спростило пошук екстремумів і дозволить для їх визначення використовувати надійні і ефективні методи однопараметричної оптимізації.

#### Список літератури:

1. Скоблов Ю.А. Основы эволюционных вычислений: учебное пособие /Ю.А. Скоблов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 326 с.
2. Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization // Reader for CEU Summer University Course «Complex Systems». – Budapest, Central European University, 2001. – P. 1–38.
3. Штоба С. Д. Муравьиные алгоритмы. Математика в приложениях, 2003. №4
4. Micheli, Giovanni De (1994). Synthesis and optimization of digital circuits. New York: McGraw-Hill. ISBN 978-0070163331.

#### УДК 621. 791. 3.

Максимова С.В., д.т.н., с.н.с., Воронов В.В., к.т.н., Ковальчук П.В.  
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев, Украина

#### ВЛИЯНИЕ ЦИРКОНИЯ НА ДЛИТЕЛЬНОУ ПРОЧНОСТЬ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖС6У

Жаропрочные никелевые сплавы находят широкое применение в энергетической и авиационной промышленности при изготовлении деталей и узлов горячего тракта газотурбинных двигателей. Они представляют собой сложные многокомпонентные металлические системы, в которых реализовано твёрдорастворное, карбидное и интерметаллидное упрочнение [1, 2]. Изделия, изготовленные из этих сплавов, эксплуатируются в условиях циклически изменяющейся температуры, центробежных нагрузок, воздействия продуктов сгорания газотурбинного топлива, что приводит к термоусталостному и коррозионному разрушению. Для продления ресурса этих дорогостоящих деталей применяют ремонтные технологии, например пайку [3-7]. Поскольку данные сплавы относятся к трудносвариваемым в связи с возникновением горячих трещин в зоне термического влияния и сварном шве при кристаллизации или последующей термической обработке, то во многих случаях пайка является единственным возможным способом соединения [8, 9]. Применение оптимального температурного режима пайки и соответствующего химического состава припоя с приемлемой температурой пайки позволяет сохранить структуру основного металла и обеспечить необходимые свойства паяным соединениям.

Известные никелевые припои, которые применяют для пайки жаропрочных сплавов, содержат в качестве депрессантов кремний и бор. При пайке бор диффундирует в основной металл и образует бориды и легкоплавкие эвтектики, которые выделяются по границам зерен, а также в центральной зоне паяных швов, что отрицательно влияет на длительную прочность соединений. Проведение длительной термической обработки не всегда позволяет полностью избавиться от боридов и легкоплавких эвтектик в паяных соединениях [10].

Использование в качестве депрессанта циркония тоже позволяет снизить температуру плавления никелевого припоя. Цирконий ограничено растворяется в никеле и при 13 масс. % Zr образуется эвтектика (при температуре 1170 С°) состоящая из твердого раствора на основе никеля и интерметаллидной фазы Ni<sub>2</sub>Zr [11]. Следует отметить, что цирконий не диффундирует в паяемый металл и, таким образом, обеспечивает его структурную целостность при температуре пайки. Однако с увеличением концентрации циркония наблюдается увеличение количества эвтектики в паяном шве.

В данной работе рассмотрена возможность повысить длительную прочность паяных соединений жаропрочного никелевого сплава ЖС6У с использованием высокотемпературной вакуумной пайки и припоев на базе системы Ni-Co-Cr-Zr-(Me), содержащих разное количество циркония.

Для проведения экспериментов в качестве основного металла использовали литые пластины высоколегированного жаропрочного никелевого литейного сплава ЖС6У (Ni-(8-9,5)Cr-(9-10,5)Co-(9,5-11,0)W-(5,1-6,0)Al-(2-2,9)Ti-(1,2-2,4)Mo-(0,8-1,2)Nb-Fe-(0,13-0,02)C). Многокомпонентные никелевые припои плавляли дуговым методом на холодной подложке в атмосфере аргона. Высокотемпературную пайку образцов (при температуре ликвидуса жидкого припоя) проводили в вакуумной печи СВВ 2,4-2/1,5-ИЗ (разрежение рабочего пространства 1,33·10<sup>-3</sup>Па). Скорость нагрева составляла ~12°С/мин, выдержка при температуре пайки - 5 мин.

Для проведения испытаний на длительную прочность паяли стыковые плоские заготовки, которые подвергали термической обработке по режиму: 1220°С, τ=4 часа с целью гомогенизации структуры паяных швов. В дальнейшем из паяных заготовок вырезали специальные

образці (рис. 1), которые испытывали на длительную прочность при повышенной температуре 975°C и постоянном напряжении 140 МПа.

Полученные паяные соединения характеризуются формированием полных галтелейных участков, плотным металлом шва, отсутствием пористости.

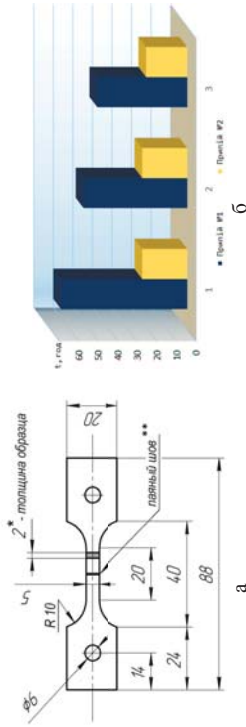


Рис. 1. Эскиз паяного образца для испытаний на длительную прочность (а), результаты испытаний на длительную прочность (б) паяных соединений, полученных с использованием припоев, содержащих цирконий в количестве 2 (№1) и 1 % (№2)

Результаты механических испытаний показали, что снижение концентрации циркония до 1 % в припоях системы Ni-Co-Cr-Zr-(Me), позволяет существенно повысить длительную прочность паяных соединений (рис. 1 б). Время эксплуатации в данных условиях увеличилось в 2-3 раза по сравнению с испытываемым предыдущим припоем, содержащим большее количество циркония. Паяные образцы не разрушались после выдержки при температуре 975°C и напряжении 140 МПа (в течении 41, 48, 60 часов) и были сняты с испытаний с сохранением конструктивной целостности.

#### Литература

1. *Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления* / Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Клишкин и др. — Киев: Наук. думка, 1967. — 256 с.
2. *Литейные жаропрочные сплавы* // Эффект С. Т. Клишкина. Науч.-техн. сб. / Под ред. Е. Н. Каблова. — М.: Наука, 2006. - 272 с.
3. *В. Ф. Хорюков, С. В. Максимова, В. Г. Иванченко. Разработка припоев для пайки жаропрочных сплавов на основе никеля и титана. Автоматическая сварка. — 2004. - № 9. - С. 27-32.*
4. *Г.В. Сромолаев Паяния материалов / Г.В. Сромолаев, В.В. Квасиницкий, В.Ф. Квасиницкий, С.В. и др. — Микополь, НУК, 2015-340 с.*
5. *Максимова С.В. Аморфные припои для пайки нержавеющей стали и титана и структура паяных соединений. // Максимова С.В. Адвезия расплавов и пайка материалов. - 2007. -№40. - С.70-81.*
6. *Khoronov V.F., Maksymova S.V. Advanced in brazing. Science, technology and applications. UK: Cambridge Woodhead Publishing Limited. — 2013. — P. 85-120.*
7. *V. Khoronov Brazing filler metal containing Zr and Hf as depressants. V. Khoronov, S. Maksymova, S. Samokhin, V. Ivanchenko // Proc. of the Third intern. conf. «High temperature sintering» (HTC-2000), Kurashiki, Japan 2000. Osaka. - 2001. P. 419-424.*
8. *Маланченко И.С. Крайнеповышенная прочность и микроструктура паяных соединений сплава ВЖЛ12У, полученных с использованием боросодержащего припоя с присадкой кремния/ И.С. Маланченко, В.В. Куренкова, А.Ф. Велянин, В.В. Трохимченко/ Современ. электрометаллургия. — 2006. — №4. — С.26-42.*
9. *Rabinik A. Advances in brazing science, technology and applications. UK: Cambridge Woodhead Publishing Limited. - 2013. - P. 121-159.*
10. *Р. С. Курочки. Сварка и пайка жаропрочных материалов горячего тракта ГТД// Авиационная промышленность. — 1982. № 8. Электронный ресурс: Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/1982/1982-198570.pdf> (дата звернення 19.04.2017).*
11. *Massalski T.V. Binary Alloy Phase Diagrams, American Society for metals. (Ohio: Metals Park: ASM International: 1990, CD).*

УДК 621.791.3.

Максимова С. В., д-т.н., с.н.с., М'ясоїд В.В.

Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

### ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАЛАДСЬКИХ ПРИПОїв

Метод мікромеханічних випробувань (індентування) широко застосовується для визначення комплексу механічних характеристик (міцності, модуля Юнга, пластичності, мікротвердості, межі плинності) різних матеріалів, покриттів. Даний метод розширює можливості вивчення механічних характеристик різних сплавів і матеріалів шляхом застосування тригранного індентора Берковича [1].

В представлений роботі приведені результати дослідження фізико-механічних властивостей високотемпературних припоїв системи Pd-Ni-Cr, що визначені методом наніндентування з реєстрацією процесу вдавлювання індентора і записом діаграми „навантаження на індентор Р та глибини відбитку h, [1, 2].

Для експериментів застосовували базовий припій системи Pd-Ni-Cr, який легували іншими елементами (кобальтом і германієм). Дослідні припої використовували після проведення високотемпературного диференційного термічного аналізу. Швидкість охолодження при проведенні експериментів була однаковою для всіх зразків і становила 40 °С/хв.

Для проведення мікромеханічних випробувань готували мікрошліфи за стандартною методикою. Тестування зразків припоїв (табл. 1) проводили тригранною алмазною пірамідкою Берковича з застосуванням вимірювального приладу «Мікрон-гама» при навантаженні 30 г з кроком 50 мкм.

Таблиця 1

Дослідні припої системи Pd-Ni-Cr, легувані Co та Ge

№ зразка	Система	Інтервал плавлення, °С		Коефіцієнт пластичності
		Ts	Tl	
1	Pd-Ni-Cr	1258	1280	0,938
2	Pd-Ni-Cr-3Co	1253	1281	0,934
3	Pd-Ni-Cr-3Co-1,5Ge	1217	1260	0,930

За результатами наніндентування було визначено: мікротвердість по Мейеру; коефіцієнт пластичності; модуль Юнга. З отриманих даних видно, що додавання кобальту зменшує пластичність сплавів системи Pd-Ni-Cr, збільшує мікротвердість, і, як наслідок, міцніші характеристики припою. Мікротвердість зростає (рис.1, а) в більшій мірі за рахунок додавання германію, який застосовується в якості депресанту (для зниження температури плавлення) в даній системі

За літературними даними до пластичних матеріалів відносяться: мідь, алюміній, золото, нікель, коефіцієнт пластичності яких лежить в межах 0,97...0,99, менш пластичними металлами виявляються: кобальт, рений, титан та інші 0,95...0,97. Сплави на основі інтерметалідів титану мають пластичність в інтервалі 0,76...0,87.

Пластичність багатоконпонентних сплавів залежить від конкретного вмісту кожного хімічного елементу і в нашому випадку вона має нижчі значення в порівнянні з чистими елементами. Так як пластичність припоїв більша за пластичність основного металу на основі Ni<sub>3</sub>Al (0,82...0,86), то такі припої (теоретично) можуть забезпечити кращі пластичні характеристики паяним з'єднанням жароміцних нікелевих сплавів.

УДК 62.231

Струтинський В.Б., д.т.н., проф., Юрчишин О.Я., к.т.н., доц., Гуржій А.А., к.т.н.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ВИКОРИСТАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ ПРИ ОБРОБЦІ ДЕТАЛЕЙ НА ВЕРСТАТАХ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ КІНЕМАТИЧНИМИ СТРУКТУРАМИ

Верстати з паралельними кінематичними структурами є ефективним металообробним обладнанням, яке має високу продуктивність і широкі функціональні можливості. Тому дані верстати доцільно застосовувати для обробки об'єктів у польових умовах. Потенційні переваги такого устаткування настільки великі, що вдала конструкція верстата з паралельними кінематичними структурами здатна істотно перевершити конкурента традиційної схеми за масогабаритними показниками, енергетичною ефективністю та динамічними характеристиками. Перевага таких верстатів в тому, що всі похибки при механообробці як конструктивні, так і кінематичні можна компенсувати програмним забезпеченням. Дослідження особливостей обробки деталей на верстатах з паралельними кінематичними структурами являє собою важливу науково-технічну проблему.

Траєкторія руху інструмента може мати різноманітний вигляд і вибирається із умови забезпечення найбільшої продуктивності та якості обробки. Для компенсації статичних і динамічних похибок програмним комп'ютерним забезпеченням необхідна інформація про характер і величину похибок, що мають місце при обробці типових, зокрема контурних поверхонь. Особливістю верстатів з паралельними кінематичними структурами є відсутність абсолютної системи декартових прямокутних координат пов'язаної із напрямними або іншими точними поверхнями верстата.

Використовуючи спеціально спроектовану і виготовлену заготовку, вводиться абсолютна система координат. Базові поверхні заготовки власне і визначають абсолютну систему координат.

Перед обробкою проводяться попередні виміри базових поверхонь заготовки, які використовуються для підвищення точності визначення координатних площин та всієї координат. За результатами вимірів геометричного розташування оброблених на верстаті поверхонь відносно введеної абсолютної системи координат, визначається точність верстата з паралельними кінематичними структурами. Для цього оброблено ряд ділянок плоских поверхонь заготовки, номінальне положення яких перпендикулярне базовій площині і паралельне відносно всім координат  $x$  і  $y$ , плоскі поверхні, які утворюють визначені кути відносно цих осей, циліндричні поверхні, концентричні базовій циліндричній.

Відхилення абсолютної системи координат верстата від абсолютної системи заготовки встановлюються в результаті вимірів непаралельності та неперпендикулярності поверхонь, які отримані після обробки заготовки. Визначаються попереочно-кутові відхилення всієї двох систем координат. Плоско-паралельне зміщення всієї встановлюється по вимірах розташування пар оброблених плоских ділянок деталі відносно введених осей координат заготовки.

Для визначення інтегральних параметрів точності проведення виміри відхилень від круглості та від циліндричності поверхонь, оброблених на верстаті. Встановлені тенденції формування похибок поверхонь. Характерним видом похибок є овальність циліндричних поверхонь. Доведено, що напрямки розташування більшого і меншого діаметрів овальної поверхні відповідають головним всім еліпсосоїда жорсткості пружної системи верстата з паралельними кінематичними структурами.

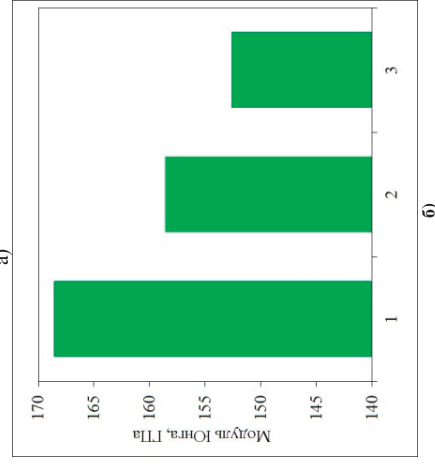
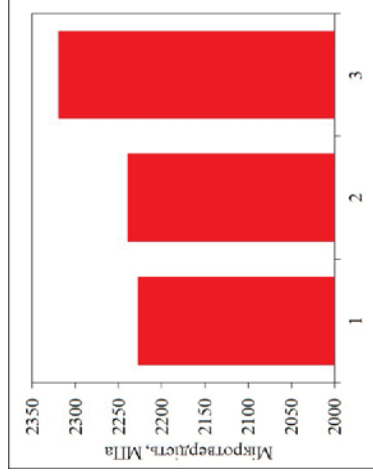


Рис. 1. Мікротвердість (а) і модуль Юнга (б) припоїв системи Pd-Ni-Cr (1), що легують Co (2) та Ge (3)

Таким чином отримані результати досліджень показують, що легування високотемпературних припоїв на основі системи Pd-Ni-Cr кобальтом і германієм призводить до зниження їх пластичності і підвищення мікротвердості. Такі особливості фізико-механічних властивостей припоїв можуть позитивно впливати на механічні властивості паяних з'єднань.

#### Література

1. Мильман Ю.В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования. Мильман Ю.В., Чулунова С.И., Гончарова И.В. // Вопросы атомной науки и техники. 2011. №4. С.182-187
2. Бульчев С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / Бульчев С.И., Алексин В.П. - М.: Машиностроение. 1990. С. 224.

УДК 62.231

Струтинський В.Б., д.т.н., проф., Дашів Р.І., Варченко Т.І.  
КІП ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧНИХ ФОРМ ВИСОКОТОЧНИХ КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ

В прогресивних конструкціях деталей машин використовуються точні кулі, виготовлені із нітрида бора, карбїду бора і інших матеріалів методом шліфування із доводкою на спеціальній пристрої. Точні керамічні кулі дають можливість створити вузли деталей машин із підвищеними показниками працездатності. Це стосується підшипників кочення де застосовуються керамічні кулі дозволяє створити підшипники працездатні при відсутності змащення та високих температурах. Такі підшипники потрібні для розробки військової техніки з підвищеними тактико-технічними даними. Наприклад застосування підшипників із керамічними кулями в гелікоптерах значно підвищує живучість останніх. Доцільним є використання таких підшипників у військових транспортних засобах та в інших машинах.

Точні керамічні кулі мають відхилення від сферичності порядка 1 мкм при діаметрах 20...60 мм. Контроль розмірів кулі необхідно проводити з точністю не нижче 0,1 мкм. Для контролю розмірів кулі необхідно спеціальне обладнання та метод, який дозволяє встановити реальну геометричну форму поверхні кулі, характер похибок та загальне відхилення поверхні від сферичності. Доцільним є встановлення особливостей геометрії поверхні кулі, зміни розміру між контактуючими поверхнями при коченні кулі в підшипнику, та мінімальні розміри отиняльних поверхонь кулі сферичного та циліндричного виду. Встановлено, що визначення реальної геометрії та контроль розмірів керамічних куль являє собою важливу науково-технічну проблему яка має важливе значення для машинобудування.

Система контролю розміру кулі в 25 точках включена в себе точну призму із канавкою утвореною двома площинами, розташованими під кутом 90°, в яку поміщається керамічна куля. Плита, нахилена під малим кутом по довжині канавки, встановлюється над канавкою. Площини призми та площина плити утворюють трикутний отвір з перетином у вигляді прямокутного трикутника, гіпотенуза якого відповідає поверхні плити. При цьому висота трикутника опущена із верхньої прямого кута змінюється по довжині отвору з укладом 1:1000. Кут нахилу плити регулюється мікрометричними гвинтами, а величина кута контролюється з використанням точних куль з відомими діаметрами.

Методика вимірів відхилення форми кулі від сферичності передбачає розміщення керованої кулі в трикутний отвір до контакту в трьох точках, одна із яких знаходиться на верхній плиті, а дві другі точки – на площинах призми. Використовується спеціальний пристрій маніпулювання, призначений для періодичного повороту кулі на кут 45°. По зміні радіуса вписаного в трикутник кола визначається відхилення радіуса кулі в діаметральному перетині. Точкові виміри розміру кулі в 25 точках є основою для побудови математичної моделі реальної поверхні кулі.

Побудована математична модель реальної форми кулі, описана рядами, що включають сферичні гармоніки, основними складовими яких є прислані функції Лежандра першого роду. Коефіцієнти рядів знаходяться по виміряним значенням фактичних радіусів кулі визначених в ряді точок. Похибки форми кулі визначені у вигляді хвильовості в меридіональному та в зональному напрямках у вигляді набору гармонік, що залежать від двох окремих взятих координат введеної сферичної системи. На поверхні кулі також виділяються ділянки випуклостей і впадин відповідні тессеральним сферичним гармонікам. Набір окремих гармонік подано у вигляді двовимірного спектра коефіцієнтів рядів. Розроблений метод апробовано при вимірах розмірів партії керамічних куль.

УДК 621.231

Філатов Ю.Д., д.т.н., проф., Сідорко В.І., д.т.н., доц., Ковальов В.А., к.т.н., доц.  
І - Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна  
2 - КІП ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ВЗАЄМОДІЯ ЧАСТИНОК ШЛАМУ З ЧАСТИНКАМИ ЗНОСУ ПОЛІРУВАЛЬНОГО ПОРОШКУ В ПРОЦЕСІ ПОЛІРУВАННЯ ОПТОЕЛЕКТРОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ НІТРИДУ АЛЮМІНІУ

До теперішнього часу процеси взаємодії частинок шламу і частинок зносу полірувальної порошки в зоні контакту обробленої поверхні та інструменту в середній полірувальної суспензії під час полірування елементів оптоелектронної техніки з кераміки та напівпровідникових кристалів вивчені недостатньо, насамперед, не з'ясовані причини виникнення нальоту продуктів зносу на поверхні інструменту.

Елементи з кераміки на основі нітриду алюмінію (AlN), густина – 3,26 г/см<sup>3</sup>, енергія зв'язку – 6,2 еВ, коефіцієнт теплопровідності – 200 Вт/(м·К), статична діелектрична проникність – 8,5, частота власних коливань молекулярних фрагментів AlN – 248,6; 611,0; 657,4; 670,8; 890,0 і 912,0 см<sup>-1</sup> полірували за допомогою суспензії порошків нітриду бору KM 0,5/0 (сBN, густина – 2,18 г/см<sup>3</sup>, статична діелектрична проникність – 2,5, частота власних коливань молекулярних фрагментів – 1055; 1125 і 1305 см<sup>-1</sup>) на шліфуально-полірувальному верстаті мод. 2ШП-200М за наступних режимів: частота обертання інструменту з пінопоретану діаметром 100 мм – 90 об/хв., зусилля притискання деталі діаметром 60 мм до полірувальної – 50,5 Н, середня температура в зоні контакту 300 К, змощення 30 мм, довжина 50 мм та несиметрія штриха 39 мм, час полірування 30 хв. При поліруванні цих елементів утворюються частинки шламу оброблюваного матеріалу, їх найбільш ймовірний розмір – 2,3 мкм. Концентрація частинки шламу на площі контакту за одиницю часу складає 1,83·10<sup>5</sup> м<sup>-2</sup>. Середнє значення об'єму частинки шламу – 2,4 нм<sup>3</sup>, кількість фрагментів AlN в частинці шламу 57. Середній розмір частинки зносу полірувального порошку – 1,8 нм, кількість фрагментів BN в частинці зносу 74. В процесі полірування в зоні контакту об'ємом 1,39 мм<sup>3</sup> утворюються частинки шламу та зносу загальним об'ємом 9·10<sup>-3</sup> мм<sup>3</sup>, тобто об'єм усіх утворених частинок менше об'єму контактної зони в 500 разів. На одну частинку шламу припадає об'єм 760 нм<sup>3</sup>, а середня відстань між ними складає l ≈ 9 нм. Кількість таких комірок (кількість шарів) складає приблизно 60.

Аналіз взаємодії частинки шламу з частинками зносу полірувального порошку та між собою на основі динаміки молекулярних зіткнень та класичної теорії розсіювання показав, що ефективний переріз розсіювання частинки шламу на частинках шламу складає 0,4–1,8 Тб (1 барн = 10<sup>-24</sup> см<sup>2</sup>), частинки шламу на частинках зносу – 0,4–1,0 Тб, а частинки зносу полірувального порошку на частинках зносу – 0,4 Тб. Частинки шламу та частинки зносу рухаються всередині суспензії, де вони рівномірно розподілені в комірках об'ємом V<sup>3</sup>, з постійною швидкістю, що дорівнює середній швидкості відносного переміщення елементу та інструменту. Методом Монте-Карло розраховувались кути, на які відхилялась частинка при розсіюванні на частинці шламу або на частинці зносу. За допомогою генератора чисел у відповідності до розподілу Пуассона випадковим чином визначався кут розсіювання, на який відхилялась частинка після кожного зіткнення. Таким чином, визначалися траєкторії руху частинки шламу та частинки зносу полірувального порошку всередині суспензії під час полірування. В результаті розрахунків встановлено, що частинки шламу та частинки зносу полірувального порошку «перекочуються» вздовж обробленої поверхні, не досягаючи поверхні інструменту, оскільки траєкторії їх руху являють собою кільця, зовнішній діаметр яких складає від 30 до 180 нм, розташовані поблизу обробленої поверхні.

УДК 621 (075)

Шатнюк М. Р., Кіжасв С. О. к.т.н., доцент  
ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, Україна

### ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ ФРЕЗЕРНОЇ ОБРОБКИ КОРПУСУ ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСУ

На багатьох машинобудівних підприємствах України спостерігається поступове оновлення і модернізація обладнання та технологій виготовлення продукції. В зв'язку з цим, актуальною проблемою є забезпечення верстатного парку більш сучасними програмними продуктами.

Значну долю ринку САПР займають такі провідні продукти як Siemens NX, SolidWorks, Auto CAD, та інші.

Для механічної обробки деталей, почали широко використовувати верстати з ЧПК, які потребують більш потужного програмного забезпечення. Програма верхнього рівня Siemens NX пропонує САПР, що вміщує в собі CAD, CAM та CAE системи, що дає змогу вирішувати найскладніші проблеми технології виготовлення виробів в машинобудування та ін. галузях.

При розробці технології виготовлення корпусу плунжерного насосу нами використана Siemens NX\_11, як інструмент для проектування оптимальної керуючої програми обробки деталей. Ця програма також включає в себе створення керуючої програми для верстату з ЧПК.

В даній роботі в якості характерної для фрезерної обробки та задовільної за складністю була вибрана поверхня, що зафарбована зеленим кольором (рис. 1).

Для отримання оптимальної траєкторії фрезерування [2] цієї поверхні потрібно врахувати такі особливості деталі як: матеріал (Al-5), мінімальний радіус ( $R_{\min}=8$  мм), глибину обробленої поверхні ( $a_{e, \max}=28$  мм).

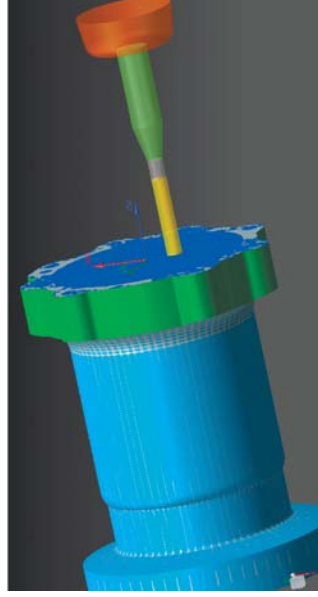


Рис. 1 - 3D зображення оброблюваної поверхні

Важливими показниками при обробці деталей є: час обробки та якість отриманої поверхні. Таким чином, метою даної роботи є оптимізація часу обробки при дотриманні заданої якості поверхні деталі.

В загальному випадку для створення керуючої програми необхідно виконати:

- Побудову 3D моделі деталі та заготовки;
- Креслення деталі та заготовки;
- Створення технологічної документації;
- Об'єднання створених моделей в модуль NX CAM\_11;
- Вибрати параметри оброблюваної геометрії, P1 (різучого інструменту) та операцію (стратегію обробки);
- Згенерувати траєкторію та керуючу програму.

Для вирішення даної задачі, на основі операції PLANAR\_MILL [1, ст. +67], порівняємо декілька шаблонів руху фрези. Генеруючи траєкторії отримуємо рис. 2:

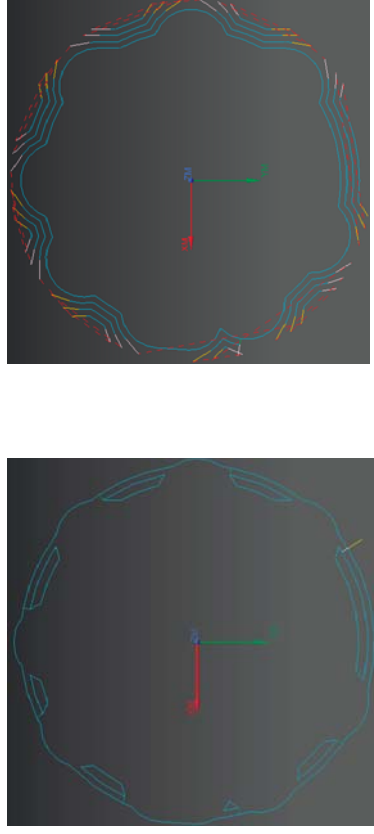


Рис. 2 - Траєкторії руху фрези: а) вздовж периферії; б) вздовж деталі.

Проаналізуємо послідовність руху інструменту:

- У траєкторії «вздовж периферії» (рис. 2, а) фреза не піднімається на безпечну висоту (рис. 2 б, штрихова лінія червоного кольору), а виконує холості проходи в тієї-же площині (рис. 2, а) на робочій подачі (при низькій швидкості різання така траєкторія значно збільшує час обробки), оскільки швидкість різання алюмінію досить висока, це дає змогу значно скоротити час холостих переміщень. Також ми можемо бачити, що інструмент не проходить повністю по контуру при цьому він залишає невеликі необроблені відрізки на обробку яких буде потрібен ще один прохід по контуру (рис. 3).

- У траєкторії «вздовж деталі» (рис. 2, б) фреза, між проходами, піднімається на безпечну висоту та переміщується в необхідну точку на максимальній швидкості (при незначній глибині та довгих робочих проходах можна отримати значне скорочення часу на холості переміщення у порівнянні з переміщеннями в робочій площині на робочій подачі). Також ми можемо бачити що останнім проходом фреза повністю описує контур деталі, що дає можливість отримати необхідну поверхню без тонкої чистої обробки.

Проаналізувавши використані шаблони різання (рис. 2) ми бачимо, що траєкторія «вздовж деталі» в даному випадку виконує багато зайвих (холостих) рухів та триває 6,24 хв., а траєкторія «вздовж периферії» практично не має холостих переміщень та займає 3,41 хв. Але слід враховувати і те, що траєкторія вздовж деталі не потребує тонкої чистої обробки яка може бути виконана з використанням шаблону «профіль» (рис. 3), та триває 1,57 хв..

Враховуючи отримані дані введемо загальний час фрезерної обробки заданого контуру для кожного з варіантів:

- Вздовж периферії  $3,41+1,57=5,49$  хв.;
- Вздовж деталі 6,24 хв..

На основі отриманих траєкторій згенеруємо керуючу програму. Проаналізувавши їх ми можемо бачити, що траєкторія «вздовж деталі» має такі особливості: значну кількість холостих рухів (швидке переміщення – G00), як наслідок більший час обробки (6 хв. 24 сек.) та останнім проходом проходить по контуру, що дає можливість не виконувати (при умові не високих вимог до шорсткості поверхні) додаткову чистову обробку. На відміну від неї траєкторія «вздовж периферії» має такі переваги: менший загальний шлях переміщення фрези, менший загальний час обробки, та незначні недоліки: залишає невеликі необроблені відрізки, як наслідок потребує додаткової чистої обробки (що дасть меншу шорсткість обробленої поверхні).

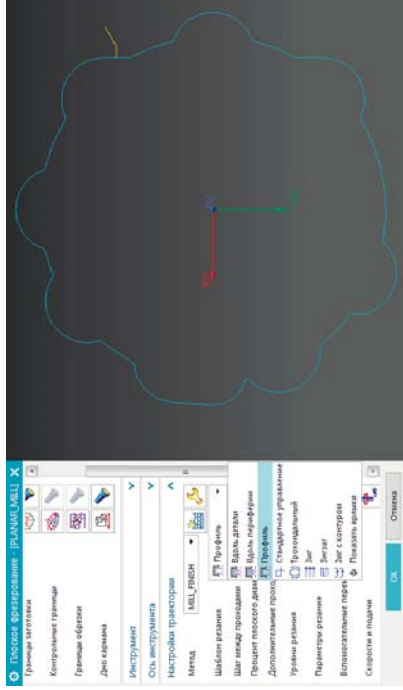


Рис. 3 - Траєкторія руху фрези при використанні шаблону різання «профіль»

На основі цього вибираємо шаблон траєкторії «вздовж периферії» який дає змогу отримати крашу за якістю поверхню при менших витратах часу та як наслідок кращим економічним ефектом.

#### Список літератури:

1. *Ведмидь, П.А. Программуванняе обработки в NX CAM / П.А. Ведмидь, А.В. Сулинов – М.: ДМК Пресс, 2014. – 304 с.*
2. *Фещенко, В. Н. Обработка на токарно-револьверных станках: Учеб. для ПТУ / В. Н. Фещенко. – М.: Высш. шк., 1989. — 256 с.*

УДК 621.833

Ліщенко Н. В. к.т.н., доц.

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса, Україна

#### ВИЗНАЧЕННЯ ПРИПУСКУ НА ЗУБОШЛІФУВАННЯ

Зубошліфування профільним кругом методом копіювання широко використовується в промисловості при виготовленні зубчастих коліс (ЗК) для авіаційного й транспортного машинобудування. Припуск на операцію зубошліфування повинен бути мінімальним, але достатнім для компенсації всіх похибок, що виникли на попередніх операціях технологічного процесу виготовлення зубчастого колеса. Припуски на операцію зубошліфування циліндричних ЗК обчислюють у нормальньому напрямку стосовно бічної поверхні зуба на одну або на дві його сторони. У виробництві, як правило, використовують табличний метод визначення припуску, відповідно до якого величину припуску визначають за довідковими таблицями [1]. Однак табличний метод не враховує індивідуальні особливості ЗК. Як правило, табличні припуски бувають завищеними й містять резерви для збільшення продуктивності і підвищення якості виготовлення ЗК. Для серійного налагодженого виробництва табличні припуски на зубошліфування не перевищують 0,4 мм. Розрахунково-аналітичний метод проф. В.М. Кована заснований на кількісному аналізі факторів попередньої і виконаної операції [2]. Цей метод є розрахунково-аналітичним тільки за структурою, але фактично оперує з табличними параметрами, отриманими при статистичній обробці експериментальних даних. Ре-

зультатом розрахунково-аналітичного методу визначення припуску на зубошліфування є рекомендації з вибору припуску, які носять приватний і експериментальний характер.

Операцію профільного зубошліфування на верстаті з ЧПК можна розділити на два види роботи: вимір припуску на етапі налагодження верстата і зубошліфування на етапі обробки. Вимірювання виконують профільним шліфувальним кругом або спеціальним вимірювальним щупом, наприклад, компанії Renishaw. У першому випадку (шліфувальним кругом) вимірювання виконують на заготовках ЗК із незадовільною якістю поверхні (після загартовування ЗК): чорнота, нерівності поверхні. Використовується сигнал акустичної емісії, що виникає в момент торкання бічних сторін профілю круга і западини ЗК. Інтенсивність цього сигналу при попереминому торканні правої й лівої сторони профілю западини ЗК повинна бути однаковою. У другому випадку (спеціальним вимірювальним щупом) вимірювання виконують по відносно чистій поверхні перед зубошліфуванням, а також після його закінчення (контроль після обробки).

Але вимірювання припуску на ЗК із значним числом зубів забирає значний час, що сумірно з часом обробки. Тому скорочення числа вимірів без істотної втрати інформації є актуальною задачею у технології автоматизованого зубошліфування. Експериментальні дослідження показали, що скорочення числа вимірів супроводжується втраченою точністю визначення максимального припуску, тобто з'являється помилка в оцінюванні максимального припуску на обробку. Для компенсації цієї помилки шліфувальний круг відводять від заготовки ЗК для усунення можливості попередбаченого врізання. Причому, чим менше зубів охоплено вимірюванням, тим більше повинна бути величина зазначеного відводу шліфувального круга. У свою чергу відвід круга призводить до збільшення часу обробки. Тому з ростом числа вимірів проявляються дві тенденції. Одна – збільшення часу обробки через збільшення часу виміру, інша – зменшення часу обробки у зв'язку зі зменшенням величини відводу шліфувального круга. Виникає задача оптимізації числа вимірів припуску, при якому час обробки буде найменшим [3]. Інша задача – встановити зв'язок числа вимірів припуску з невизначеністю його величини, наприклад, максимальної величини припуску при його синусоїдальному розподілі по периферії зубчастого колеса.

Пропонується два підходи для визначення максимального припуску на зубошліфування за результатами його вимірювання на окремих зубах ЗК: статистичний і детермінований.

Статистичний підхід припускає представлення максимального припуску  $z_{\max}$  у вигляді двох складових: постійної  $z_0$  і змінної  $\Delta z$ , тобто

$$z_{\max} = z_0 + \Delta z. \quad (1)$$

У свою чергу

$$\Delta z = \Delta z_{\text{сист}} + \Delta z_{\text{случ}}; \quad \Delta z_{\text{сист}} = \frac{A}{2}; \quad \Delta z_{\text{случ}} = \varepsilon, \quad (2)$$

де  $A$  – амплітуда відхилення окружного кроку;  $\varepsilon$  – однобічний довірчий інтервал.

Причому

$$\varepsilon = t_{\gamma} \delta_{\bar{x}}, \quad (3)$$

де  $t_{\gamma}$  – коефіцієнт довіри (однобічний безрозмірний довірчий інтервал);

$$\delta_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{N}} - \text{середньоквадратичне відхилення результату, мм,}$$

$$s = \frac{1}{\sqrt{N-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} - \text{вибіркове середнє квадратичне відхилення (вибірковий стандарт), мм;}$$

$x_i, \bar{x}$  – точне відхилення окружного кроку від номінального і середнє значення цього параметра.

Детермінований підхід припускає подання максимального припуску  $z_{\max}$  у вигляді

$$z_{\max}^R = z_{\max}^L(N) + 2z^R(N) \cdot A, \quad (4)$$

де  $z_{\max}^L(N)$  – максимальна величина припуску із двох максимальних величин  $z_{\max}^L$  і  $z_{\max}^R$  за обмеженим числом вимірів  $N$  після вирівнювання мінімальних значень припуску, тобто при  $z_{\min}^L = z_{\min}^R$ .

$2z^R(N)$  – відносна помилка у визначенні положення максимального і мінімального припуску;  $A$  – амплітуда синусоїди, отриманої методом найменших квадратів для одного з розподілів припуску по лівій  $z^L(n)$  або по правій  $z^R(n)$  стороні закладин, залежно від того, на якій бічній стороні зафіксований припуск  $z_{\max}^L(N)$ .

Розроблені за зазначеними підходами методики апробовані на основі результатів вибіркового вимірювання припуску в заводських умовах (таблиця).

Таблиця

**Результати розрахунку максимального припуску для статистичного підходу**

$N$	2	3	4	8	10	20	40
$A$ , мм	0,047	0,175	0,128	0,146	0,147	0,147	0,147
$z_0$ , мм	0,2335	0,2603	0,2523	0,2573	0,2587	0,2614	0,2617
$\Delta z_{\text{сист.}}$ , мм	0,0235	0,0875	0,064	0,073	0,0735	0,0735	0,0735
$\Delta z_{\text{супр.}}$ , мм	0,5876	0,3655	0,1732	0,098	0,0822	0,052	0,0354
$z_{\max}^R$ , мм	0,8446	0,7112	0,4895	0,4283	0,4144	0,3869	0,3706

Примітка: заготовка ЗК ДТМВ.478.БЭ.40.005

Видно, що зі збільшенням числа вимірів  $N$  величина припуску  $z_{\max}^R$  зменшується. Оптимальний спосіб визначення величини максимального припуску в закладах ЗК із урахуванням результатів вибіркового вимірювання дозволяє істотно зменшити число необхідних вимірів для виявлення максимального розрахункового припуску, що підлягає видаленню при зубошліфуванні. Показано, що загальний час операції зубошліфування, який складається із часу налагодження (вимірювання припуску) і часу обробки (зубошліфування), зменшується.

### Висновки

1. Розроблено алгоритм перерахування невизначеності припуску в його додаткову величину (добавку до припуску), яку можна реалізувати шляхом відводу шліфувального круга від заготовки зубчастого колеса перед зубошліфуванням. Це дозволяє за рахунок невеликого збільшення часу зубошліфування усунути можливість появи шліфувальних дефектів, викликаних попереднім збільшенням фактичного припуску, у тому випадку, коли закладина з максимальним припуском була пропущена при вимірюванні припуску на етапі налагодження зубошліфувального верстака.

2. Отримано розрахункові формули для визначення припуску на зубошліфування залежно від числа його вимірів на етапі налагодження верстака з ЧПК, що (число) може змінюватися від двох до максимального значення, рівного числу закладин на заготовці зубчастого колеса.

### Список літератури

1. Производство зубчатых колес: Справочник / С.Н. Калашников, А.С. Калашников, Г.И. Кован и др.; Под общ. ред. Б.А. Тайца. – 3-е изд. перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.
2. Калашников П.А. Повышение эффективности изготовления шлицевых зубчатых передач за счет применения процесса непрерывного обкатного зубошлифования с радиально-диагональным движением подачи: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 "Технология машиностроения" / П.А. Калашников. – М., 2009. – 23 с.
3. Лищенко Н.В. Оптимизация числа измерений припусков по выданному зубчатого колеса / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин. – Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта / Матеріали конф. 21-24 червня 2016 р.: Одеса-Київ, 2016. – С. 229-230.

UDC 621.923.4

Larshin V.P., Doctor of Science, professor, Lishchenko N.V., PhD, associate professor

1 - Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

2 - Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

### GRINDING SYSTEM MODELLING TO SIMPLIFY DECISION MAKING

In accordance with the Systems Engineering (theory of technical systems) one of the important initial stages of a system development is an adequate representation of the system from the concept stage to the running one. The system design includes its description, modelling and simulation, which may be represented in the respective formats: verbal description (text) in ordinary languages, graphical representations (e.g., block diagram, graphs, timing diagram), special signs systems (e.g., programming languages), mathematical model, the combined method, etc. Selecting an appropriate way of the system representation depends on the purpose both of the study and design. If the purpose is to create conditions to ensure the desired course of a process, when the process is the developing system, then it should be said of the system operation and control algorithms. In this case the technical system is being developed in the form of a control system model. In this modelling versus simulation the system is a mathematical abstraction that is taken as a model of a dynamic phenomenon which represents this phenomenon in terms of mathematical relations [1]. According to H. Freeman such a system is characterized by the input  $u$ , state  $x$  and output  $y$  (Fig.1, a).

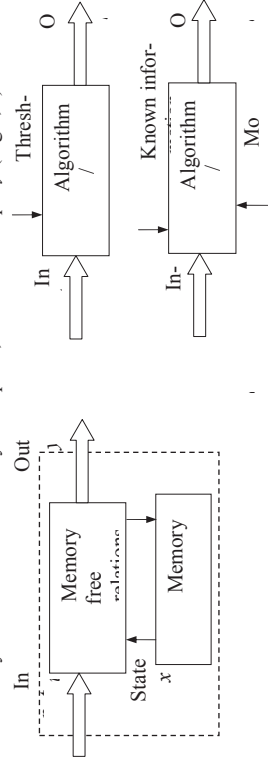


Fig.1 – Representation of the grinding system based on "input-state-output" model (a) [1], and those for decision making both without (b) and with (c) a model [2]

The input  $u$  in the form of a set of time functions (e.g., in time domain) is the external forces (input variables) which are acting upon the grinding process that represents the dynamic phenomenon mentioned. The state  $x$  is a form of the system state-space representation, which with the input affects the output  $y$ . The output  $y$  in similar form is the measures of the grinding process result, i.e. output quantities belonging to the ground part (part accuracy, surface finish and surface integrity). The question has always been of the transient function that is equal to  $y$  divided by  $u$ , i.e.,  $y/u$ , and about of the origin and the nature of this function. Dependence between  $u$  and  $y$  may be not only strong or weak but also deterministic or probabilistic. That's why two scientific approaches are used to find the answer to this question: both theoretico-probabilistic and frequency ones.

A basic characteristic of any dynamic phenomenon is its behavior at any time and whether or not the behavior is traceable not only to the presently applied forces but also to those applied in the past. A dynamic phenomenon (process) may or may not possess a memory depending on whether or not the effect of past applied forces is stored. In this connection the state  $x$  of the system is a vector function of time (i.e., in time domain) as well as both the input  $u$  and output  $y$ . In grinding it may be corresponding signals like those of grinding forces  $F$  (e.g., normal, vertical) in Newtons (Fig.2).

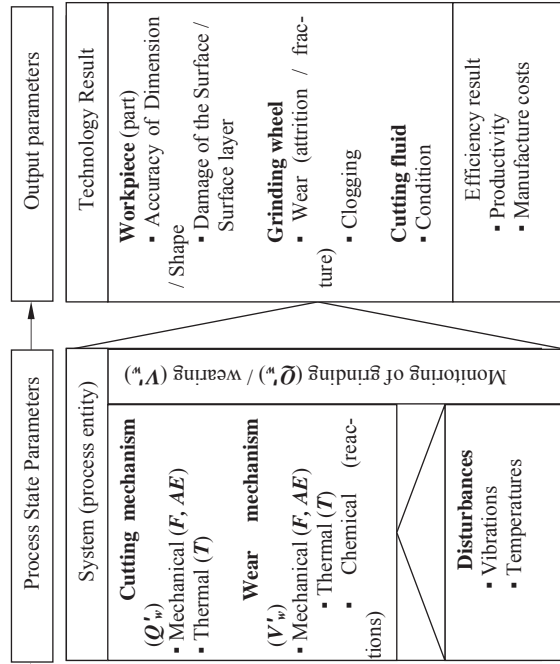
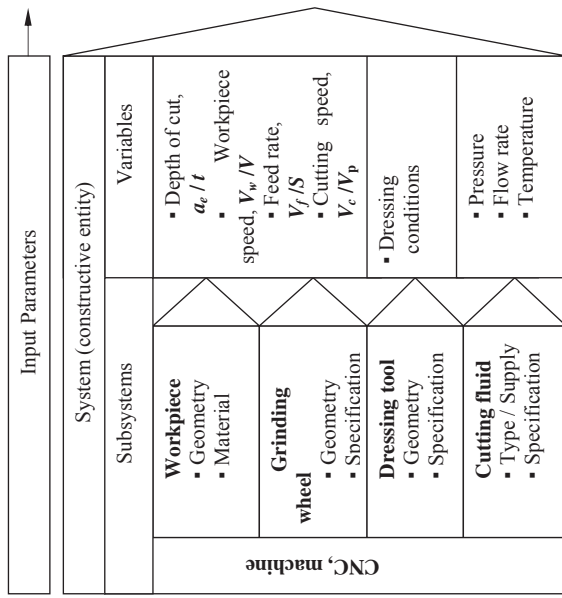


Fig.2 – Grinding system model (in fractional notations the input variables are listed in overseas [3] and domestic designations)

Besides it may be temperature  $T$  in Celsius and acoustic emission  $AE$  in RMS quantities. In general, knowledge of the state  $x$  at any time  $t_0$  with knowledge of the forces subsequently applied are sufficient to determine the output  $y$  and state  $x$  of the system at any time  $t > t_0$ , i.e. beginning from the moment  $t_0$ . The  $u$ ,  $x$  and  $y$  are vector time functions with some distinctive or certain dimensions which have to be fixed during a grinding system identification. The dependence of these functions from the time suggests a possibility to use the frequency approach mentioned and study the system.

Similarly, the system approach have been taken by H.K. Tönshoff et al [2] to explain a strategy of decision making while interpreting a process monitoring in grinding without (Fig.1, *b*) and with (Fig.1, *c*) a process model. There are two approaches for the decision making in this case. Firstly, the distinctive values of the processed signals are to be compared with a predetermined threshold in order to identify the status of the grinding process by means of preparing a process database (memory stored). This approach is the preferred choice for sensor signals used to interpret output quantities. Secondly, a model based identification approach may be when various kinds of physical or empirical models are employed, and which utilize known relationships (Fig.1, *c*). As a result, the calculated value is compared with a threshold in order to evaluate the process. This approach is the preferred choice for the sensor signals used to monitor the process quantities which are equal to the system state ones. Because of its complexity and significance, the model based identification approach involves understanding the process model (don't confuse with the grinding system model). In this connection the methods for process modelling are of great importance as they are in decision making.

Methods for process modelling discussed further. Besides the model definition mentioned above another term to explain 'model' may be as follows: a model is the abstract representation of a manufacturing process which serves to link causes and effects [2]. That is why the correlation description for different quantities of a real system to correspond to a modeled system is the dominant task of the process models. In grinding, the dependences of settings on process quantities such as grinding forces  $F$ , temperature  $T$ , and acoustic emission  $AE$  as well as on output quantities such as surface roughness and surface integrity (surface layer like grinding burns and residual stresses) may be mapped too on the basis of F. Klocke' representation [3]. Taking into account this representation, a technological grinding system model can be represented as follows (Fig. 2). The model consists of the following state parameters:  $Q_w^*$ ,  $V_w^*$ ,  $F$ ,  $T$ ,  $AE$ , where  $Q_w^*$  is the specific material removal rate in  $mm^3 / (s \cdot mm)$ ,  $V_w^*$  is the specific material removal in  $mm^3/mm$ .

Modeling and simulation are two scientific methods to describe a real system in static and dynamic, respectively, but the two ones are based on a system concept. Both modelling and simulations are applications which represent a real world or imaginary system. A model can be considered as a static and a simulation can be considered as dynamic as the variables of a simulation get always changed [4].

Because of its great influence on the ground part surface integrity, a thermal grinding aspect is considered in detail subsequently, and a comparative analysis of analytical temperature field models is given in detail on the bases of the system approach, mentioned. The research was carried out on the basis of the phenomenological approach proposed by prof. A. V. Yakimov [5].

**References**

1. Freeman Herbert. *Discrete-time systems: an introduction to the theory* / Herbert Freeman. – New York: J. Wiley, 1965. – 241 p.
2. Tönshoff, H.K. *Process monitoring in grinding* / H.K. Tönshoff, T. Friemuth, J.C. Becker. – CIRP Annals – Manufacturing Technology. – Volume 51, Issue 2, – 2002. – P.551-571.
3. Klocke Fritz. *Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping* / Fritz Klocke. – Berlin: Springer, 2009. – 433 c.
4. *Difference between Modelling and Simulation*. (Posted on July 5, 2011 by admin). Retrieved from <http://www.differencebetween.com/difference-between-modelling-and-vs-simulation/>.
5. Якимов А.В. *Оптимизация процесса шлифования* / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.



## УДК 621.9

Дмитрів Д.О. д.т.н., проф., Рулакова Г.В. д.т.н., проф., Русанов С.А. к.т.н., доц., Рачинський В.В. ст.викл., асп.  
Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

### АНАЛІЗ ТИПОВИХ СТРАТЕГІЙ ПРОГРАМНО-КЕРОВАНОЇ ОБРОБКИ ПИСКОМ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ МЕХАНІЗМАМИ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Традиційні технології фінішної обробки поверхневим пластичним деформуванням (ППД) поверхонь обертання передачають використання універсального верстатного обладнання, наприклад, більшість деталей типу стрижнів оброблюють шляхом вгладжування або обкатування роликком на токарних верстатах із закріпленням в центрах із застосуванням лонгетів (рис. 1) [1]. Однак весь процес обробки супроводжується не властивими для даних верстатів умовами, а саме, співвідношення навантажувальних зусиль не відповідає технічним характеристикам системи пристосування-інструмент-деталь (ПІД). Зміна положення вектору сили притискання уздовж напрямку подачі викликає зміни значень пружних відтискань.

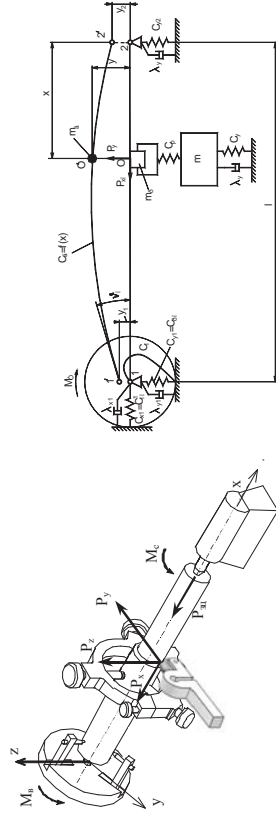


Рис. 1 – Обкатуванням роликком на токарних верстатах з розрахунковою схемою

За таких умов технологічне забезпечення сталих параметрів якості оброблених деталей, таких як значення шорсткості, ступінь зміцнення, відхилення від круглості і ін. не можуть бути віднесені до розмірної обробки. Тому постає технічна задача виконання контролюваної в сенсі забезпечення розмірних параметрів обробки ПІД. В даній роботі пропонується на основі попереднього математично-програмного моделювання локацій жорсткості верстатної системи забезпечити необхідні технологічні умови програмно-керованої обробки ПІД із застосуванням механізмів паралельної структури (МПС) [2].

Відомо, що в роботі МПС реалізуються складні просторові значення жорсткості, як залежності не тільки від радіусу-вектору положення інструменту, але й напрямку дії відтискних навантажень, що еквівалентно формуванню тензорного поля жорсткостей в робочій зоні обробки. При цьому діапазон значень жорсткості навіть в рамках єдиного сценарію обробки може бути досить широкий – від екстремально низьких значень, до достатніх для проведення обробки ПІД. Таким чином до генерування стратегії обробки відносяться завдання пошуку оптимальних в сенсі несучої спроможності траєкторій та взаємних конфігурацій розташування системи «інструмент-деталь». На рис. 2 та рис. 3 вказані два варіанти реалізації процесу обкатування роликком циліндричної деталі за допомогою МПС. В першому варіанті траєкторія реалізується як множина напрямних кіл циліндричної поверхні, у другому – як мно-

Для реалізації стратегії в роботі використовувалась лінійка програмних продуктів Tools Glide [3], Tools Response та Tools Apps [4], що розроблені на кафедрі транспортних систем та технічного сервісу Херсонського національного технічного університету. Вказана лінійка призначена для генерування кінематики та аналізу статичного та динамічного відкликів глайд-обладнання без обмежень на форму зовнішніх навантажень, що можуть бути задані як довільні функції часу та внутрішніх параметрів системи з підтримкою зворотного зв'язку.

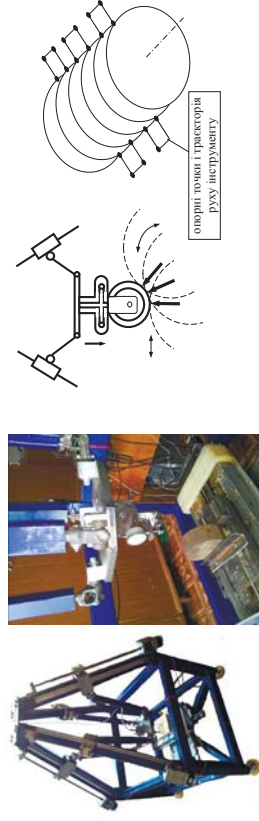


Рис. 2 – Загальний вигляд верстату з МПС і жорстке кріплення оброблюваного циліндру (а) та варіант обробки з траєкторіями у вигляді множини напрямних кіл циліндричної поверхні (б)

Для аналізу відклику конструкції на робочі зовнішні навантаження в усьому діапазоні технологічного процесу обробки система відокремлює статичні та динамічні навантаження – проходить наскрізний обмін даними між відповідними модулями: кінематика (пряма або зворотна задача) – статичний відклик (формування тензорів коефіцієнтів жорсткості) – динамічний відклик [5-7]. Бібліотека скінченних елементів пристосована для задач такого типу, з підтримкою можливості з'єднання компонентів шарнірами різних типів, бібліотеки останніх можуть бути поповнені додатковими об'єктами.

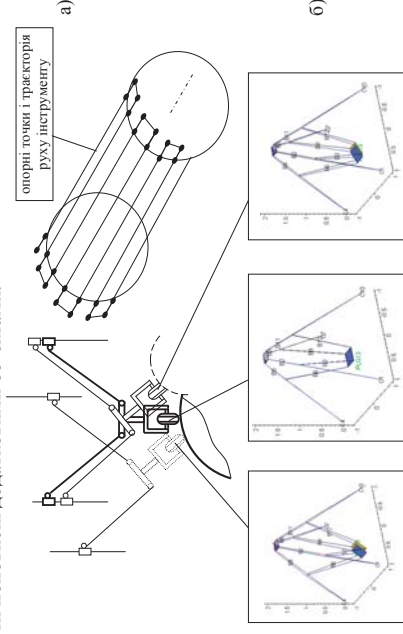


Рис. 3 – Варіанти обробки ПІД з траєкторіями у вигляді множини твірних циліндричної поверхні (а) та відклик обладнання на дану стратегію (Tools Response, б)

Як вхідні дані, окрім геометрії конструкції, імпортується MPN-файл, що являє собою список з координат точок контакту інструменту та деталей, напрям інструменту, вектор нормалі до оброблюваної поверхні тощо. На рис. 3, (б) показано відсік найвної конструкції на відповідний варіант стратегії обробки.

Розрахунок еліпсоїдів податливості для кожної точки траєкторії дозволяють провести оцінку спроможності ланки стратегії обробки та компоновки каркасного обладнання в цілому до реалізації обробки ППД. Додаткові приклади стратегії обробки (рухливий циліндр та обробка конусу) показані на рис. 4.

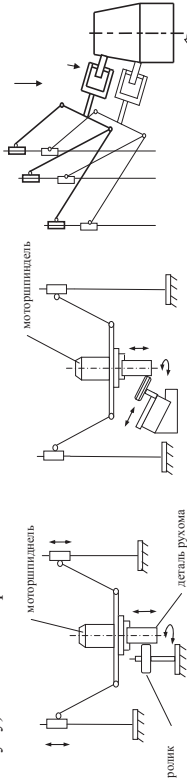


Рис. 4 – Приклади компоновальних схем обробки (рухливий циліндр та обробка конусу)

Висновки. На основі розгляду кінематичних схем програмно-керованої обробки ППД тіл обертання і відповідних до них компоновок верстатів каркасної компоновки із аналізом напружено-деформованого стану системи виконано аналіз найбільш придатних до фінішної розмірної обробки тиском технологічних режимів і умов. Проведено порівняння типових стратегій обробки (рухів обробного інструменту) і базування деталі в найбільш розповсюджених каркасних компоновках верстатів з МПС. Розвинуто область застосування верстатів з МПС до процесів обробки тиском ППД і науково обґрунтовано їх здатність виконувати дану обробку із відповідним рівнем якості.

#### Список літератури

1. Ткачук А.А. *Технологічні основи зміниально-виглядажувального оброблення поверхонь обертання* / А.А. Ткачук. – Луцьк: СПД Галяк Жанна Володимирівна друкарня «Волинськийграф», 2014. – 196 с.
2. Кузнецов Ю.М. *Композовки верстатів з механізмами паралельної структури*. Монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрів, Т.Ю. Днівнич, під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
3. *Композовка програма "ToolsGLIDE"*. Свідчення про реєстрацію авторського права на твір №57913. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрів, П.В. Кеба, Ю.М. Кузнецов. □ Заявл. 03.11.2016; Опубл. 29.12.2016.
4. *Композовка програма "ToolsApp"*. Свідчення про реєстрацію авторського права на твір №57913. / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрів, М.І. Подольський, Ю.М. Кузнецов. □ Заявл. 03.11.2014; Опубл. 29.12.2014.
5. *Русанов С.А. Комплексний аналіз механізмів паралельної структури засобами цільових систем автоматизованого моделювання* / С.А. Русанов, Д.О. Дмитрів // Тези доповідей VII міжнародної науково-технічної конференції «Георегіоні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», Київ – Херсон, 2016, с. 152-155.
6. *Дмитрів Д.О. Зовнішні модулі для прогнозування та управління складними рухами ланок механізмів паралельної структури* / Д.О. Дмитрів, С.А. Русанов, П.В. Кеба, С.М. Півень // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯПТС – 2016): матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Чернівці: ЧНТУ, 2016. – С. 44-47
7. *Русанов С.А. Просторовий аналіз шарнірно-стрижневих механізмів для механічної обробки поведеним зміцненням складно профільних деталей* / С.А. Русанов, В.В. Рачинський, Д.О. Дмитрів // Матеріали II-ї всеукраїнської конференції «Приладобудування і метрологія. Сучасні проблеми, тенденції розвитку». Луцьк: ЛНТУ, 2016, С. 81-83.

#### УДК 621.9

Кузнецов<sup>1</sup> Ю.М. д.т.н., проф., Лебененко<sup>2</sup> Ю.О. к.т.н., доц., Омельчук<sup>2</sup> А.А. к.т.н., ас., Березкін<sup>2</sup> І.С. учень МАН

1 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

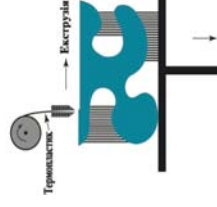
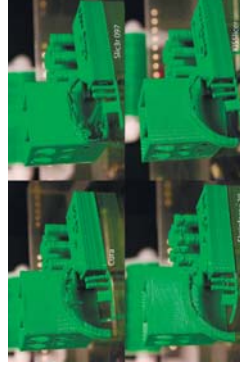
2 - Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна

### УДОСКОНАЛЕННЯ ФУНКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ШВИДКОГО ПРОТОТИПУВАННЯ СКЛАДНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ВИРОБІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ

Перспективний спосіб використання геометричної моделі у виробництві – це швидке прототипування. Існують різні процеси швидкого прототипування, однак всіх їх об'єднує те, що прототип виготовляється шляхом пошарового накладення композитного матеріалу. Головна перевага швидкого прототипування полягає у тому, що прототип створюється за один захід, а початковими даними для нього служать безпосередньо геометрична модель деталі.

Загальною відомою, що процеси швидкого прототипування і виготовлення складаються з трьох етапів: формування поперечних перерізів об'єкта, пошарове накладення цих перерізів і комбінування шарів. Таким чином, щоб створити фізичний об'єкт, цим процесам потрібні дані лише о поперечних перерізах [1].

Програмні недоліки традиційних машин для 3d друку у сукупності з обмеженістю рухів робочого органу через конструкцію приладу провокують утворення ступінчастих поверхонь та видимого розшарування моделей (рис. 1, а, б). Продуктом роботи програмно-построювача («Слайсера») є файл, який містить у собі команди безпосереднього керування приладом, так званий G-код (рис. 1, в). Складнощі програмного процесу генерації G-коду нерідко позначаються на якості кінцевих виробів. Відоконання траєкторії руху екструдера можливе за рахунок орієнтації сопла до нормалі складних поверхонь. Згідно з визначеною траєкторією сопла екструдера відбувається моделювання переміщення рухомого органу та відповідно вирішення зворотної задачі кінематики [2, 3].



2260 G1 F1800 E84.81274  
2270 G0 F4200 Z07.710 V111.425  
2271 G1 F1800 E87.81274  
2272 G1 F1800 E87.81274  
2273 G1 F1800 Z07.124 V111.444  
2274 G1 X95.245 Y110.912 E87.83  
2275 G1 X95.245 Y110.912 E87.85  
2276 G1 X96.629 Y110.338 E87.85  
2277 G1 X96.629 Y110.338 E87.85  
2278 G1 X96.629 Y110.338 E87.85  
2279 G1 X96.629 Y110.338 E87.85  
2280 G1 X96.629 Y110.338 E87.85  
2281 G1 X96.629 Y110.338 E87.85  
2282 G1 X96.629 Y110.338 E87.85  
2283 G1 X95.114 Y106.537 E87.94

Рис. 1 – Приклади розшарування моделей (а), необхідності створення підтримуючих елементів (б) і фрагмент коду програми (в), що згенеровано построювачем («Слайсером»)

На основі проведених досліджень було розроблено обладнання для швидкого прототипування методом наплавлення з розширеними можливостями робочого органу (рис. 2, а). За основу приладу взята кінематична структура типу «Дельта», переміщення якої було синхронізовано з роботою блока керування екструдером на базі платформи Arduino UNO (рис. 2, б). Для забезпечення точного позиціонування робочого органу, будуть використані розроблені методи керування складними електромеханічними системами [4].



Рис. 2 – Виготовлений верстат з паралельною кінематикою і змонтований пристрій 3d друку на рухомій платформі, що має додатковий поворотні координати (кафедра транспортних систем і технічного сервісу ХНТУ)

Окрім плати Arduino, блок керування системою має у своєму складі драйвери крокових двигунів DRV8825, та одноканальний релейний модуль для управління нагрівальним елементом екструдера. Для оцінки поточного положення робочого органу установки застосовується індуктивний датчик, який здатен ідентифікувати наближення до металевих поверхні робочого столу.

**Висновки.** У роботі запропоновано практична та перспективна технологія FDM-друку методом наплавлення, яка передбачає програмно-керовані повороти робочого органу для усунення дефектів, що утворюються в складних виробках. Спроектовано та побудовано дослідний зразок FDM установки та апаратна частина системи керування з розширеними можливостями підходу екструдера до робочої поверхні.

#### Список літератури

1. Ли К. *Основи САПР (CAD/CAM/CAE)* / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
2. Кузнецов Ю.М. *Комп'ютерні верстатів з механізмами паралельної структури*: Монографія / Ю.М. Кузнецов, Д.О. Дмитрів, Г.Ю. Діневич; під ред. Ю.М. Кузнецова. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2009. – 456 с.
3. Дмитрів Д.О. *Зовнішні модулі для прогнозування та управління складними рухами ланок механізмів паралельної структури* / Д.О. Дмитрів, С.А. Русанов, П.В. Кеба, С.М. Пивень. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯПСС – 2016): матеріали тез доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів: ЧНТУ, 2016. – С. 44-47
4. Омельчук А.А. *Проблеми устаткованого керування складною електромеханічною системою* / А.А. Омельчук, Ю.О. Лебеденко, Г.В. Рукавова. // Наукові праці Національного університету харківських технологій. – К.: НУХТ, 2013. – №49. – С. 19 – 23.

УДК 004.6:624

Тігарєв В.М., к.т.н., доц., Якімов О.О., д.т.н., проф., Прусс Д.О., Зайцев П.В.  
Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна

## РОЗРОБКА БАЗИ ДАНИХ МЕТАЛЕВИХ ПРОФІЛІВ ЗГІДНО ВИБРАННОГО СТАНДАРТУ

Актуальність теми створення бази даних металевих профілів полягає у тому, що сфери застосування металоконострукцій постійно розширюються. Завдяки своїй універсальності і високій технологічності металоконострукції стали застосовуватися практично у всіх областях. Без металевих елементів важко уявити такий процес, як зведення будівель або складних спеціалізованих споруд. У сільському господарстві застосовуються такі металоконострукції, як теплиці, ангари, ремонтні цехи. Варто відзначити, що виготовлення металоконострукцій необхідно і для суцільної сфери – з металу виготовляють сходи, віконні решітки, огорожних будівель. Така галузь як будівництво розвивається з кожним днем, а металоконострукції з кожним днем стають все більш потрібними. Виготовляють сталеві елементи зі стандартних профілів: куточка, швелера, двотавра і тавра, а також з прокатних елементів. База даних металевих профілів розроблена у вигляді бібліотеки.

**Бібліотека компонентів створена завдяки** однієї з найбільш поширених по всьому світу систем автоматичного проектування – AutoCAD. Це спеціальне програмне забезпечення для автоматизованого проектування і креслення в форматі 2D і 3D. Розробником цієї програми є американська компанія Autodesk – найбільшій у світі поставальник і безпосередньо розробник. Особливність створеної бібліотеки у тому, що вона може бути використана у багатьох програмах з ядром AutoCAD. Використання бібліотек компонентів позбавляє користувача від численного створення одних і тих же елементів що підвищує швидкість проектування.

Проведено наповнення бази даних параметризованими блоками металевих профілів для різних стандартів (ГОСТ, ДСТУ, DIN, ANSI).

Структура програми – показує послідовність виконання операторів. Представлена у вигляді блок-схеми. Блок-схема – поширений тип схем (графічних моделей), що описують алгоритми або процеси, в яких окремі кроки зображуються у вигляді блоків різної форми, з'єднаних між собою лініями.

Створено блоки конфігурації профілів, використовуючи стандартні команди AutoCAD, та об'єднано їх у поліліно. Елементи блоків є параметризованими, що дозволяє створювати параметричні

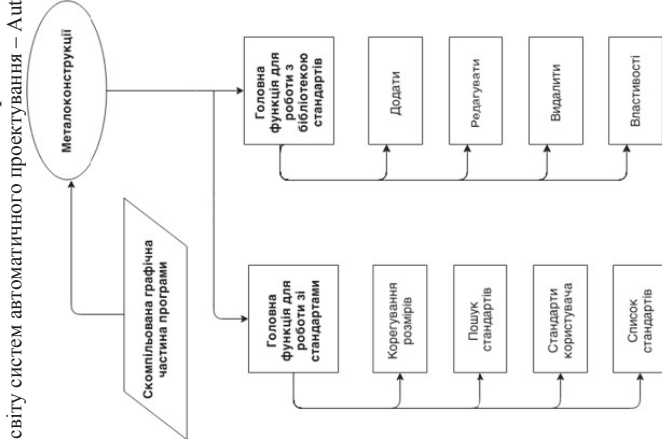


Рис.1- Блок-схема структури програми для створення бібліотеки металевих профілів

ряди профілів. Розроблено інтерфейс для користувача.

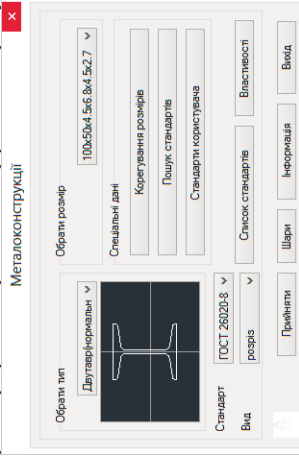


Рис.2- Інтерфейс користувача

вищі OpenDCL.

Об'єктом дослідження є металеві конострукції, які використовують при будівництві будівель і споруд, сільському господарстві, у суспільних сферах життєдіяльності.

Для зручності створення профілів була розроблена програма для формування бібліотеки металевих профілів згідно стандартам, яка полегшить і прискорить роботу.

Структура представлена у вигляді блок-схеми, яка показує порядок дії програми. Структура програмного модулю включена в себе елементи інтерфейсу, а також функціонал для створення, редагування та видалення стандартів, форми пошуку по розмірам, та розрахунку ваги та довжини металевого профілю. Розроблено зручний віконний інтерфейс. Стандарти створюються та розміщуються у створеній бібліотеці. Базу даних металевих профілів планується використовувати для створення металоконострукцій при зведенні будівель або складних спеціалізованих споруд, ангарів, ремонтних цехів, при виконанні сходів, виконаних решіток, огорож та ін.

Програма частина була розроблена в середовищі VisualLISP. У програмі OpenDel був розроблений кнопковий інтерфейс, стилізований під класичний AutoCAD, і опрацьований інтерфейс діалогових вікон. Інтерфейс повністю відповідає всім вимогам, таким як простота, функціональність, інтуїтивність. У програмі OpenDCL були створені діалогові вікна для «роботи зі стандартами», для «пошуку стандартів», «корегування розмірів», «перегляду властивостей стандартів». Інтерфейс адаптований під класичний AutoCAD.

Були розроблені алгоритми для створення бібліотеки стандартів, її редагування, оновлення, видалення. Є можливість розрахунку ваги металевого профілю, в залежності від його довжини.

Особливість створеної бібліотеки у тому, що вона може бути використана у багатьох програмах з ядром AutoCAD, таких як AutoCAD Architecture, AutoCAD MEP, AutoCAD Civil 3D, AutoCAD Structural Detailing, AutoCAD Mechanical.

Розроблена база даних яка є основою для створення програми побудови металевих конострукцій у 2D і 3D з розрахунком необхідних параметрів, таких як вибір матеріалу, довжина, вага.

#### Список літератури:

1. Васильченко В.Т. Довідник конструктора сталевих конострукцій / Васильченко В.Т. // Вид. Дніпропетровського заводу металоконострукцій ім. І.В. Бабуршкіна, 1971 - с.204.
2. Кудрявцев Е.М. AutoLISP. Програмування в AutoCAD 14 / Кудрявцев Е.М. // М.: «ДМК», 1999 - 368 с.
3. Полещук Н.М. AutoLISP и Visual LISP в середовищі AutoCAD / Полещук Н.М., Лоскутов П.В. // СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 960с.
4. Ван Тассел Д. Сталь, розробка, ефективність, налагоження й випробування програм / Ван Тассел Д // М.: Світ, 1985 - 332 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-75:2008 Конструкції металеві будівельні.

УДК 621.822.1 (043.3)

Заболотський В.Ю., к.т.н., доц. Пристуна С.О., к.т.н., доц. Лапченко Ю.С., к.т.н., доц., Дахнюк О.П. Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

### ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

В процесі обробки металів різанням між інструментом і оброблюваною деталлю виникає сила взаємодії, яку називають силою різання. Ця сила є результатом пластичної деформаци металу, яка затрачується на формоутворення деталі та стружки, а також тертя між інструментом і оброблюваною деталлю. Сила різання є основним інтегрованим параметром, який характеризує процес різання.

Сила різання визначають не тільки навантаження системи верстат-присосувача-інструмент-деталь, але і температуру в зоні різання, стійкість різального інструмента, точність обробки, продуктивність і необхідну потужність обладнання. Сила різання є основним параметром під час діагностування процесу обробки в адаптивних системах керування і системах захисту обладнання від зіткнення рухомих частин в гнучких виробничих системах. Однак, процес різання характеризується не лише силовими параметрами, але й орієнтацією вектора сили різання відносно верстата, інструмента і оброблюваної деталі. Також значний вплив на напрям сили різання спричиняє геометрія різальної частини інструмента і співвідношення між глибиною різання та подачею.

Інформація щодо значення величини сили різання та її складових є необхідною у багатьох випадках. Зокрема, під час проектування металорізальних верстатів і систем керування, у процесі конструювання пристроїв, а також для розробки конструкцій різального інструмента. В цих випадках сила різання визначає геометричні розміри робочих елементів обладнання та інструмента з умови забезпечення заданої міцності і жорсткості. За даними про силу різання під час проектування вибираються потужність і робочі зусилля приводів верстатів та пристроїв. Сила різання є одним із параметрів оптимізації при визначенні геометрії різальної частини металорізального інструмента. Сила різання є вихідною величиною при визначенні похибок обробки, пов'язаних із деформаціями заготовки, інструмента і відповідних вузлів верстата. Отже, в більшості досліджень процесу різання, вимірювання сили різання є необхідною умовою, проте виникає проблема вибору технічних засобів вимірювання.

Сучасний рівень наукових досліджень, який базується на існуючих інформаційних технологіях, зобов'язує дослідників використовувати для цього комп'ютеризовані інформаційно-вимірювальні системи різного призначення і конфігурації. У зв'язку з цим розробка елементів таких систем є актуальною задачею. Суть технології виготовлення деталей машин полягає в послідовному використанні різноманітних технологічних методів з метою надати оброблюваній заготовці задану форму і розміри. Один з таких способів — механічне оброблення різанням, який полягає в здійсненні інструментом визначених рухів відносно оброблюваної заготовки. В результаті цих рухів інструмент ріжучими крайками знімає певні шари металу у вигляді стружки. Процес різання в сучасному розумінні являється складним комплексом фізико-хімічних явищ (механічних, теплових, електричних, дифузійних, адгезійних, та ін.), які супроводжуються взаємодією інструменту з оброблюваним металом в умовах високих контактних тисків і температур. Слід відзначити, що процес різання - це процес домінуючого пластичного деформування. Від пластичної деформації залежать тепловий режим і контакти навантаження на робочих поверхнях інструменту, та інтенсивність його зношування. Від характеру перебігу пластичної деформації і механізму деформативного зміщення залежать точність, шорсткість і якість поверхневого шару оброблюваної деталі.

Об'єктом теоретичних і експериментальних досліджень в роботі є чорнове і напівчорнове точніння заготовок виготовлених з конструкційних сталей.

Використаний в роботі підхід до моделювання процесу механічного оброблення враховує такі фактори механообробної операції: елементи режиму різання (швидкість різання  $v$ , подана  $S$  і глибина різання  $t$ ); фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу (опір під час розтягу  $\sigma_b$ , відносне видовження  $\delta$ , твердість за Брінеллем  $H_B$ , теплопровідність  $\lambda$  при тому об'ємній теплоємності  $cp$ ) та інструментального матеріалу (марка, термостійкість  $\Theta_m$ , теплопровідність  $\lambda_p$ , питомі об'ємна теплоємність ( $cp$ )); геометричні розміри оброблюваної поверхні (діаметр  $D$  і довжина  $L$ ); складові сили різання  $P_x$ ,  $P_y$ , і  $P_z$ , температуру різання  $\Theta_m$ , стійкість ріжучого інструменту. Дані фактори враховуються як опосередковано, так і безпосередньо через безрозмірні коефіцієнти.

Для випробувань обрано конструкційну підшипникову сталь ШХ15 (ГОСТ 2590-2006, ГОСТ 2591-2006). Сталь ШХ15 використовується для виготовлення деталей, до яких ставляться вимоги щодо високої твердості, зносостійкості та контактної міцності.

Для проведення експериментів використовувались зразки суцільного перерізу діаметром 50 мм, довжиною 100 мм.

Механічне оброблення досліджуваних зразків проводилось на автоматизованому дослідницькому комплексі на основі токарно-гвинторізного верстата моделі 1М62П (рис. 1).

Закріплення заготовки виконувалося в грьохуланковому самоцентруючому патроні 71100-0065А ГОСТ 2675-80. В якості ріжучого інструменту використовувались різці токарні 21100-0037-01 з механічним кріпленням пластинки SNMG 120412.

Для вимірювання складових сил різання, що виникають в процесі токарного оброблення нами було розроблено і виготовлено конструкцію пристосування (рис.2), що виконана у вигляді набору чотирьох пружинних елементів, які дають змогу фіксувати деформації, що виникають внаслідок впливу складових сил оброблення у вузлових точках пружинних елементів.



Рис. 1.- Автоматизований дослідний комплекс на основі токарно-гвинторізного верстата моделі 1М62П

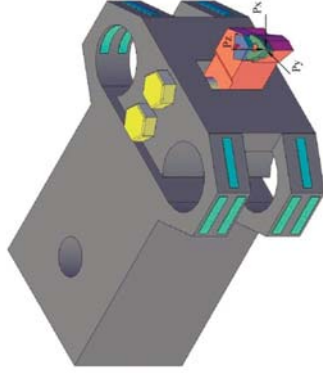


Рис. 2.- Багатокомпонентний динамометр для вимірювання складових сил оброблення

Пристрій виконаний у вигляді пристосування, яке встановлюється на посадочне місце різцетримача токарно-гвинторізного верстата, різець закріплюється за допомогою гвинтів у посадочному отворі. Частина пристосування, в якій закріплюється різець, з'єднана з масивним корпусом на чотирьох пружинних елементах у вигляді півкільць, що мають грані на зовнішній стороні. На цих гранях і на внутрішній циліндричній поверхні у вузлових точках кожного пружинного елемента розміщуються тензодатчики.

Вимірювання відбувається наступним чином: під час виконання механообробної операції сила різання сприймається через інструмент силовою ланкою, де відбувається ресекстрація складових сил оброблення (рис. 3).

Радіальна складова сили різання  $P_y$  сприймається пружинними елементами, які ослаб-

лені подовжніми перерізами з метою підвищення чутливості системи. Стискаючи всі чотири пружинні ланки, вона надає давачам, розміщеним зовні, деформацію розтягу, а давачам, розміщеним зсередини деформацію стиску.

Вертикальна складова  $P_z$  створює згинальний момент, в результаті чого верхній пояс пружинних елементів буде розтягуватися, а нижній — стискатися. Давачі, що сприймають силу  $P_z$ , наклеюються на тих самих гранях, що і датчики сили  $P_y$  причому давачі нижнього поясу отримують деформацію, однакову за знаком із сусідніми давачами, а давачі верхнього поясу сприймають деформацію зворотного знаку.

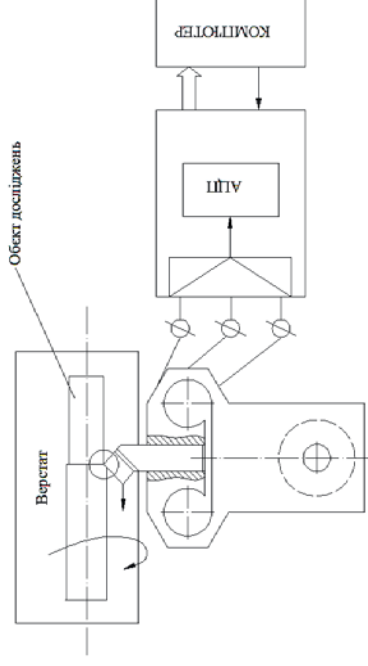


Рис. - 3. Структура схеми вимірювальної установки

Третя складова  $P_x$  по відношенню до інших ланок динамометра є тангенціальною силою. Для її ресекстрації використовується зсув максимумів у вузлових точках епюри напружень в кільцевому пружинному елементі під дією тангенціальної сили. Відповідні давачі наклеюються на похиліх гранях чутливих елементів симетрично щодо точок максимуму. Сила  $P_x$  викликає розтяг давачів і стиснення давачів.

Вузлові точки епюри напружень під час впливу осьової складової будуть збігатися з середніми давачі невимірних складових. Тому одна половина кожного з них вийвиться розтягнутою, а інша – в такій же мірі стиснутою. У підсумку опір давача не зміниться. Давачі складових  $P_z$ , і  $P_y$  на силу  $P_x$  реагувати не будуть за будь-якої її величини. Цілковито аналогічно автоматично усувається вплив головної і радіальної складових.

Таким чином, за отриманими даними, що можуть бути представлені у вигляді профілографу, проводиться аналіз складових сил різання, як для виявлення особливостей впливу окремої складової на формування так і з метою встановлення оптимальних режимів обробки окремих деталей залежно від фізико-механічних характеристик матеріалу та особливостей різального інструменту.

#### Список літератури:

1. Ткачук А.А. Технологічні основи змішано-виглядувального оброблення поверхонь, обертання. Монографія. – Луцьк: СІД Галук. Жовтня Володимирівна друкарня «Волиньоліграф»™, 2014. – 196с.
2. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296с.
3. V. Zablotskyi, O. Dabynuk, S. Prystupa, A. Tkachuk. Formation of Physical and Mechanical Properties of Surface Layer of Machine Parts. Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Vol 8., March 2017 doi:10.2412/1mmse.99.57.43.
4. Патент на корисну модель №94828, Україна. МПК В23Q 17/00 (2014.01). Багатокомпонентний динамометр для вимірювання складових сил різання / Приступа С.О., Ткачук А.А., Заблотицький В.Ю., Терлецький Т.В., Дакнюк О.П. Заявлено 20.03.2014; опубл. 10.12.2014; Бюл. №23. – 4 с.

УДК 621. 923

Денисюк В.Ю. к.т.н., доц., Симонок В.П. к.т.н., доц., Пташенчук В.В. к.т.н., ст. викл.  
Львівський національний технічний університет, м. Львів, Україна

### ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ДЕФОРМАЦІЙ НА ЯКІСТЬ ПІДШИПНИКІВ ПРИ ШЛІФУВАННІ

Одне з провідних місць при обробленні матеріалів різанням займають технологічні процеси фінішних операцій із застосуванням абразивних шліфувальних кругів, які дозволяють обробляти практично всі існуючі і нові конструкційні матеріали та остаточно формують поверхневий шар, що визначає їхні експлуатаційні властивості. Актуальною в даний час є проблема забезпечення заданої якості і високої продуктивності шліфування заготовок з підшипникових сталей (ШХ4, ШХ15), які характеризуються високою твердістю (55-64 НРС) та схильні до виникнення теплових дефектів. Недоліками традиційних методів шліфування при обробленні таких матеріалів є складність одержання поверхонь необхідної точності за геометричними та якості за фізико-механічними характеристиками: непаралельність, неплоскість торцевих поверхонь в межах допуску 8-12 мкм, нестійкість ширини кільця в межах допуску 25 мкм; шорсткість торців не повинна перевищувати 1,25 мкм; виникнення прищів поверхневих шарів, зниження твердості та поява мікротріщин не допускається.

При роботі на двосторонніх торцешліфувальних автоматах задана точність розмірів та форми деталей залежить не лише від технологічних факторів (глибини та швидкості різання, характеристики абразиву тощо) але і від взаємного розташування шліфувальних кругів в горизонтальній і вертикальній площинах [1]. В працях [2, 3] розглядається лише вплив сил різання на взаємне розташування кругів. Однак, як показує досвід, початкове положення абразиву одного відносно іншого та базових поверхонь верстата змінюється також під впливом теплових деформацій, що впливає на точність оброблюваних деталей.

Так, наприклад, підвищення температури ЗОР на 1°C при шліфуванні підшипникових кілець 702/01 Ø90 мм призводить до збільшення непаралельності торців на 0,61 мкм [4]. Значить зростає на 14-18 °С залежно від режимів оброблення.

Для виключення похибок оброблюваних деталей, викликаних тепловими деформаціями вузлів верстата внаслідок підвищення температури ЗОР, необхідно враховувати при налагодженні верстатів зміну положення шліфувальних кругів, а при проєктуванні верстатів мінімізувати вплив джерел виділення тепла на точність базування різального інструменту. Однак, теплові деформації носять схоластичний характер. Ступінь їх впливу залежать від часу роботи верстата та технологічних режимів процесу формування поверхонь деталей та потребують експериментальних досліджень.

Встановлено, що на торцешліфувальному верстаті найвагомими внутрішніми джерелами тепла є підшипники опори і зона різання. Зона різання розглядається як умовне внутрішнє джерело, оскільки при шліфуванні виділяється частина тепла і ЗОР нагрівається, що в свою чергу викликає теплові деформації вузлів верстата. Вплив на верстат зовнішніх джерел тепла не розглядається, так як перепад температури в приміщенні незначний ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).

Для визначення впливу кожного джерела тепла на положення шліфувальних кругів використано 2 схеми теплового навантаження верстата:

-обертання шпинделя на холостому ході (при цьому визначали зміну положення кругів у горизонтальній та вертикальній площині під дією тепла, яке виділяється внаслідок тертя в підшипниках кочення);

-нагрівання ЗОР за допомогою електронагрівача з одночасним обертанням шпинделя (при цьому визначали зміну положення шліфувальних кругів зумовлену підвищенням температури ЗОР).

За іншою схемою теплового навантаження процес різання змодельований як процес теплоутворення, при якому швидкість нагрівання ЗОР електронагрівачем відповідає швидкості її нагрівання на робочому верстаті.

Для експериментальних досліджень було вибрано верстат, у якого швидкість нагрівання шпиндельних опор наближена до середнього значення, отриманого при статистичному обробленні результатів вимірювання температури на 4 верстатах даної моделі. Для зручності проведення досліджень заміряли положення фланців шпинделя, яке визначає положення шліфувальних кругів (останні були зняті). Досліді повторювали не менше 3-х разів при попередньому нагріванні верстата в кожному з них на прогріз 5 годин.

Характерні точки зміни температури попередньо визначали за допомогою інфрачервоного оптичного термометра Ridgid MicroRay IR-100. Для вимірювання температури в процесі дослідження використовували мідно-константанові термопару, прикріплені до верстата у визначених точках (рис. 1). Покази термопар ресетрували за допомогою мікроамперметра, температуру фланця шпинделя заміряли термометром Ridgid MicroRay IR-100.

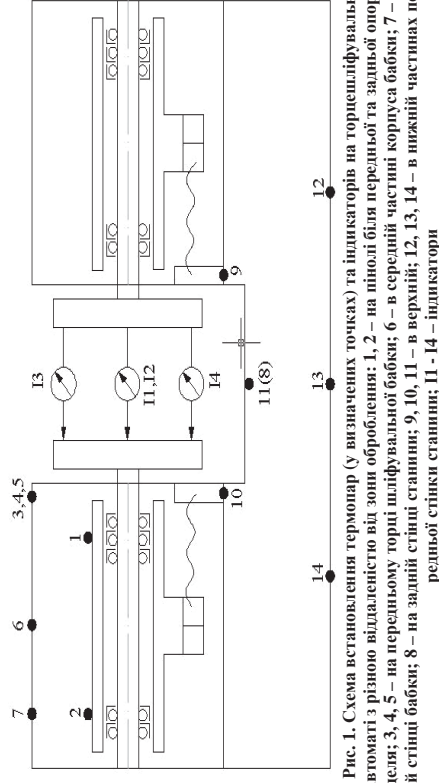


Рис. 1. Схема встановлення термопар (у визначених точках) та індикаторів на торцешліфувальному автоматі з різною віддаленістю від зони оброблення: 1, 2 – на пінолі біля передньої та задньої опори шпинделя; 3, 4, 5 – на передньому торці шліфувальної бабки; 6 – в середній частині корпусу бабки; 7 – на задній стінці бабки; 8 – на задній стінці станини; 9, 10, 11 – в верхній; 12, 13, 14 – в нижній частині передньої стінки станини; 11, 14 – індикатори

В якості базового для вимірювання положення досліджуваного шпинделя був прийнятий нерухомий протилежний шпиндель, на фланці якого на відстані 450 мм один від одного кріпились оправи з індикатором типу ПМ -1 з діною поділки 0,001 мм. Індикатори 11, 12 розміщували в горизонтальній, а індикатори 13, 14 – в вертикальній площинах.

Зміна температури вузлів верстата залежно від тривалості нагрівання представлено на рис. 2. Температура пінолі в зоні розташування передньої опори шпинделя (точка 1) складала 52°C, фланця шпинделя – 47°C (рис. 2). Швидкість нарощування температури фланця шпинделя є меншою ніж опори, внаслідок того, що він більш віддалений від зони тепловиділення. Температура пінолі в зоні розташування задньої опори (точка 2) шпинделя складала 31°C за умов меншого натягу в підшипниках та більшої віддаленості від зони різання. Температура корпусу шпиндельної бабки в точках 3, 4, 5 визначається надлишковою температурою зони розташування передньої опори, в точці 7 – надлишковою температурою зони розташування задньої опори шпинделя. Температура станини при цій схемі теплового навантаження залишається постійною.

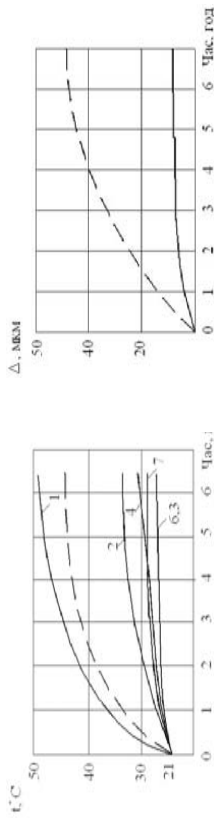


Рис. 4. Зміна температури шпінделів та банок верстата: номери кривих відповідають номерам точок на вимірній схемі рис. 1

Рис. 3. Зміна положення фланця шпінделя в вертикальній площині залежно від часу роботи верстата

Положення фланців шпінделів у вертикальній площині змінюється в сторону зростання відстані між ними, вимірної індикатором П1. За 5 годин обертання шпінделя змінна відстані становить 10 мкм, при цьому положення фланців шпінделів в горизонтальній площині залишається незмінним.

За іншою схемою теплового навантаження надлишкову температуру мас станина, причому після 5 годин її нагріву температура розподіляється наступним чином:  $t_2 = t_3 = t_{14} = t_{\text{нес}} = 21^\circ\text{C}$ ;  $t_4 = t_5 = t_{10} = 24,5^\circ\text{C}$ ;  $t_{11} = 34^\circ\text{C}$ . Це свідчить про локальне прогрівання станини, яке спостерігається лише у верхній частині під дією тепла ЗОР.

Зміна положення фланців шпінделів за 5 годин нагрівання складо у вертикальній площині 39 мкм, в горизонтальній – 10 мкм. При цьому температура ЗОР підвищилась на  $16^\circ\text{C}$  (з 23 до  $39^\circ\text{C}$ ). Можна припустити, що при сумарному впливі двох зон нагрівання на прогрізі 5 годин  $\Delta = 39 + 10 = 49$  мкм при обертанні двох шпінделів,  $\Delta = 39 + 10 = 49$  мкм – при обертанні одного шпінделя. Для перевірки цього припущення був проведений експеримент з обертанням одного шпінделя і підгрівом ЗОР. Зміна положення фланців шпінделя в вертикальній площині складо 50 мкм, в горизонтальній площині – 10 мкм (рис. 3). Результати вимірювань показують співпадіння розрахункових і експериментальних даних.

Результати експериментальних досліджень підтверджують, що під дією теплових деформацій вузлів верстата шліфувальні круги змінюють своє положення у вертикальній та горизонтальній площинах. Стабілізація положення шліфувальних кругів настає в різні проміжки часу залежно від джерела нагріву. Деформації, що виникають внаслідок підвищення температури в підшипникових вузлах верстата, мають незначний вплив на точність оброблюваних деталей. Тому, для підвищення якості кілець підшипників на шліфувальних автоматах є мінімізація теплових деформацій вузлів верстата.

#### Список літератури

1. Андришова І.Л. Влияние тепловых деформаций на положение шлифовальных кругов торцевально-го станка // И.Л. Андришова, С.С. Шахновский // Станки и инструменты, 1982. – № 9. – С. 6 – 7.
2. Козлов В.А. Исследование сил резания при двустороннем торцевально-шлифовании // Станки и инструменты, 1973. – № 7.
3. Капаянц Э.Ф. и др. Точность обработки при шлифовании // Э.Ф. Капаянц. – Минск: Наука и техника, 1987. – 152 с.
4. Пташечук В.В. Підвищення ефективності оброблення торців кілець роликопідшипників методом переривчастого шліфування: монографія // В.В. Пташечук, В.Ю. Денисюк, В.Ю. Заблоцький, Д.А. Захарчук. – Луцьк: Вежа-Друк, 2017. – 127 с.

УДК 621.91.01:621.92

Петраков Ю.В., д-т.н., проф., Шульцов Д.К.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

#### АДАПТИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ПРИ ВІРТУАЛЬНОМУ БАЗУВАННІ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

**Вступ.** В сучасному машинобудівному виробництві, особливо в авіабудуванні, все ширше застосовуються методи адаптивного оброблення, коли в силу великих габаритів деталей, або особливостей технології їх виготовлення неможливо застосовувати традиційні прийоми базування деталей на верстат [1]. При цьому під адаптацією розуміють пристосування попередньо спроектованих траєкторій формуютьоруючих рухів до фактичного розташування заготовки на верстаті так, щоб максимальний припуск був мінімальним. Таким чином, вирішення такої науково-технічної проблеми передбачає по-перше вимірювання фактичного розташування заготовки на столі верстата і по-друге трансформацію спроектованої раніше управляючої програми до фактичного положення заготовки.

Оскільки управляюча програма розробляється в САМ-системі при визначеному положенні заготовки, яке тепер буде відрізнятися від фактичного її положення на столі верстата, постає задача визначення корекції управляючої програми для рівномірного розподілу припуску.

**Мета роботи.** Розробити методику і алгоритм трансформації управляючої програми за результатами вимірів фактичного розташування заготовки на столі верстату при оптимальному розподілі припуску для адаптивної обробки кінцевим контурним фрезеруванням.

**Основна частина.** Програмування більшості операцій механічної обробки вимагає урахування трьох факторів: положення заготовки на верстаті (технологічного установу), початкової форми заготовки та її закритої форми, яка має бути досягнута в кінці операції механообробки. На кафедрі технології машинобудування розроблена методика і алгоритм, що вирішують поставлену задачу для випадку контурного 2,5D фрезерування на верстаті з ЧПК.

На рис.1 показано положення заготовки 1 і деталі 2 в системі координат верстата при проектуванні управляючої програми в САМ-системі. Для прив'язки заготовки за традиційною технологією вона виставляється відносно напрямних верстата за допомогою пристрою, наприклад, лещат. В цьому випадку для визначення фактичного положення заготовки (і прив'язки управляючої програми) достатньо двох вимірів: точка 3 і 4. Якщо ж заготовка встановлена на верстаті без орієнтації її положення в спеціальному пристрої (віртуальне базування, як для унікальних або великогабаритних деталей), то може виявитися що її фактичне положення 5 не забезпечує можливості фрезерування контуру.

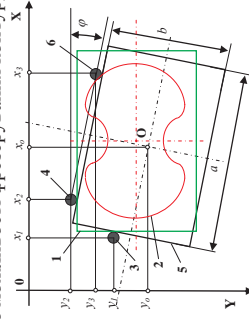
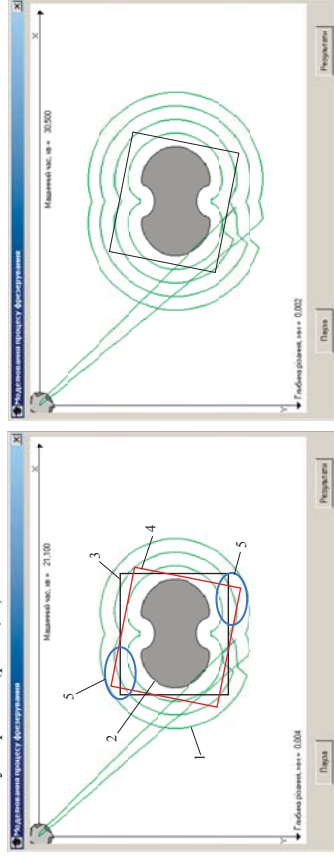


Рис. 1. Розрахункова схема для корекції управляючої програми

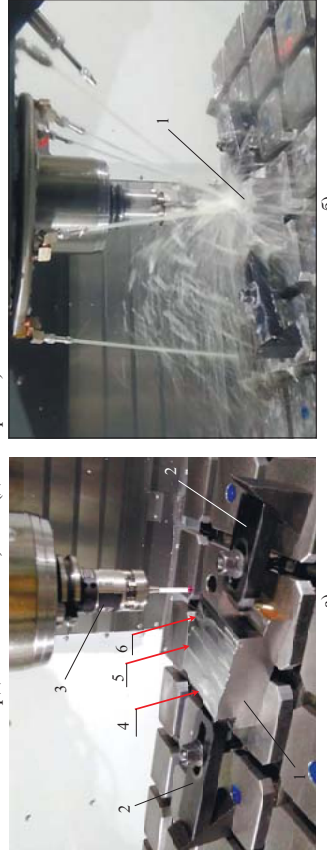
Визначена проблема проілюстрована за допомогою прикладної програми моделювання, розробленої на кафедрі технології машинобудування. На рис.2, а представлений траєкторії центру фрези (ліній 1), спроектовані для обробки контуру 2 деталі при орієнтації заготовки 3

відносно осей координат. Якщо ж фактично розташування заготовки відрізняється від заданого в САМ-системі (положення позначене лінією 4), то при використанні спроектованої програми в деяких місцях (позначено лініями 5) відбувається перевищення заданої глибини різання, що може привести до зламу інструменту. Перепрограмування управляючої програми в САМ-системі з урахуванням фактичного положення заготовки без зміни розташування осей прив'язки приводить до збільшення кількості проходів і відповідно збільшення машинного часу обробки (рис.2, б).



а) б)  
Рис.2. Результати моделювання фрезерування контуру

Тому за розробленою методикою, яка була апробована на верстаті VF3 HAAS, спочатку виконується вимірювання фактичного положення заготовки, для визначення якого достатньою координат трьох точок. На рис.3, а заготовка 1 прямокутної форми встановлена доволі глибоким і закріплена за допомогою прихватів 2. Для визначення фактичного положення заготовки вимірювання виконуються за допомогою щупу 3 фірми Renishaw. При вимірюваннях визначалися координати точок 4, 5 і 6 (дивись рис.1).



а) б)  
Рис.3. Виртуальне базування заготовки

Для визначення корекції управляючої програми по відношенню до фактичного положення заготовки використовувалася спеціально розроблена прикладна програма, де використовується автоматичний пошук оптимального розташування контуру деталі при русі за трьома координатами у відповідності до методу пошуку екстремуму Гауса-Зейделя. В результаті на інтерфейсі з'являються величини необхідної корекції управляючої програми, які забезпечують виконання адаптивної обробки.

За результатами розрахунків на стійкій верстаті в CNC програмі виконується поворот траєкторії обробки за допомогою командної строки (G68 G17 X0 Y0 R-11.), де G68 – функція повороту, G17 – площа повороту, X0, Y0 – координати центру повороту, R-11. – кут повороту за годинниковою стрілкою у градусах. На рис. 3, б представлена сцена оброблення контуру 1 деталі на верстаті VF3 HAAS.

### Висновки

1. Розроблено методику розрахунку корекції управляючої програми на верстаті з ЧПК при віртуальному базуванні заготовки, яке однозначно визначається координатами трьох її точок. Розроблено алгоритм автоматичного пошуку корекції управляючої CNC програми для виконання принципу адаптивної обробки рішенням завдання мінімакса.
2. Створена прикладна програма і розроблена методика пройшли апробацію при фрезеруванні 2D контуру і довели свою ефективність.

### Список літератури.

1. Обработка лопатки турбины - YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=k7Jiv8T19u0>
2. К. Евченко. Новые решения DeLcam для механообработки и для людей. САПР и графика, №7, 2007 <http://sapr.ru/article/17844>
3. Применение технологии OMV и адаптивной механообработки при производстве изделий из композиционных материалов / Умногое производство, вып.36 от 12.16 [http://www.umnoгое.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=163&group\\_id\\_4=74](http://www.umnoгое.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=163&group_id_4=74)

УДК 621.375.826:621

Блощинин М.С. к.т.н., доц., Гой Р.С., Хорощуля М.В., Сяляр А.В., Холявко М.О., Свічкар І.В., КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ПОЛІРУВАННЯ МІДНИХ СПЛАВІВ ЕЛЕКТРОЛІТНОЮ ПЛАЗМОЮ

Процеси на активному аноді в електролітичному осередку залежно від прикладеної напруги (при певних параметрах електричного ланцюга) можна підрозділити на п'ять режимів [1]: 1) низьковольтного електролізу (класична електрохімія) - 0÷20 В; 2) комутаційний (перевик Викельста) - 20÷80 В; 3) режим нагріву - 80÷270 В; 4) електрогідродинамічний - 270 - 330 В; 5) режим контактних електричних розрядів - понад 330 В. Кожен з цих режимів в тому або іншому ступені можна використати для обробки та полірування металевих виробів. Низьковольтний електроліз призводить до анодного розчинення поверхні металів і сплавів під дією електричного струму. Закономірності обробки підкоряються законам Фарадея. Вихід по струму в цьому режимі залежно від виду металу або сплаву змінюється від 15-20% (для вольфраму) до 95-98% (для міді).

У комутаційному режимі спостерігається інтенсивне розчинення активного електроду під дією імпульсних електричних розрядів і інтенсивних хімічних реакцій, що протікають в паразитній оболонці [2]. При дії електролітної плазми на поверхню активного електроду в режимі нагріву і електрогідродинамічному режимі специфічна ерозія анода може бути значною [3]. При цьому існують вузькі області напруги з максимальною швидкістю розчинення, де умовний вихід по струму збільшується в 5-10 разів в порівнянні з низьковольтним електролізом. Якщо в електрохімії розрізняють нерозчинні (інертні: з платини, графіту, іридію) і розчинні (активні) електроди, то при утворенні оболонки з електролітної плазми це розмежування не діє. Особливості дії електролітної плазми на поверхню активного електроду дозволяють обробляти метали в таких електролітах, в яких при звичайному електролізі вони не розчиняються і вихід по струму дуже малий.



Слід мати на увазі, що електрофізичні і електрохімічні процеси, що протікають в паровій оболонці між металевим анодом і електролітичним катодом, не завжди супроводжуються електрохімічною ерозією і електролітичним розчиненням. В деяких випадках [5], залежно від матеріалу анода і складу електроліту, ці процеси призводять до утворення покриттів різної товщини на аноді як в режимі нагріву, так і в електрогідродинамічному режимі. Зокрема, цей ефект знайшов широке застосування для мікродугового окиснення (МДО) деталей з алюмінію, титану і інших металів [6, 7] у електрогідродинамічному режимі. Представляє інтерес вивчення можливості здійснення синхронного полірування в електролітній плазмі металевого анода в електрогідродинамічному режимі.

При реалізації способу полірувки в електролітній плазмі використовують в основному водні розчини солей, при необхідності (залежно від матеріалу активного електроду) - водні розчини кислот і лугів. У разі полірування виробів з міді або мідних сплавів [9] використовують водний розчин амонійних солей, що містять фтористий амоній і амоній лимоннокислий одно-, двух-, тризаміщений і інші складні при температурі електроліту 60-90°С.

У режимах нагрівання і електрогідродинамічному режимі електричний струм у прианодній області протікає від анода до електролітного катода через складну систему. Коли поверхневий шар на аноді відсутній, існує перехід: метал-газ-електроліт. Коли ж поверхневий шар суцільний і твердий і може бути провідником або напівпровідником, перехід буде наступним: метал-напівпровідник-газ-електроліт або метал-газ-електроліт. Провідність в цих випадках змінюється від електронної до змішаної: електронною і іонною і далі до іонної. При цьому разом із стаціонарними електричними розрядами, що протікають між поверхневим шаром і електролітом, відбувається те, що розглядають електроліту з утворенням мікрокапель, що електризувалися. Останні зменшують величину парового шару, що може привести до виникнення і протікання імпульсних розрядів. Ці розряди можуть також виникати і безпосередньо між анодом і електролітом на ділянках, де товщина оболонки стає досить малою. З огляду на те, що режим нагріву в електролітній плазмі використовується в основному для термічної і хіміко-термічної обробки сталевих деталей, синхронне утворення поверхневого шару в цьому режимі на катоді не представляє особливого інтересу.

У результаті електролітно-плазмового полірування з поверхні видаляється кілька мікрометрів найбільш багатого сторонніми включеннями і загязованого шару металу, зникає спрямована анізотропія, придана в процесі механічної обробки. Видаляється з поверхні в процесі обробки тонкий шар металу перетворюється в нерозчинний гідроксид і може бути легко відділений і утилізовано. Після електролітно-плазмового полірування обробки виробів досить однієї промивної ванни з теплою водою, яка не містить важких металів і інших речовин в концентраціях, що перевищують гранично допустиму. Відпрацьований електроліт також легко утилізується, причому цей процес не вимагає наявності спеціального обладнання, тоді як для промивання деталей, оброблених хімічними і електрохімічними методами в розчинах кислот, необхідно кілька промивних ванн (з наступною нейтралізацією цих кислотних розчинів).

Метод електролітно-плазмового полірування легко піддається механізації і автоматизації в умовах будь-якого виробництва при практично необмежених ресурсах роботи обладнання. Електролітно-плазмового полірування дозволяє обробляти тонкостінні і складні по геометрії поверхні на порівняно простому обладнанні. Повна автоматизація процесу дозволяє включити його в єдину технологічну лінію при виготовленні виробів і використовувати робочий персонал невисокої кваліфікації. Електролітно-плазмового полірування є багатостадійним технологічним процесом, при якому одночасно відбувається очищення поверхні практично від усіх видів забруднень. Таким чином, електролітно-плазмового полірування можна віднести до перспективних, екологічно чистих технологій обробки.

#### Список використаних джерел:

1. Дурдажи В.Н. Особливості устанавлення електрогідродинамічного режиму, використовуемого для полірування металів в електролітній плазмі. / Дурдажи В.Н. // Металлообробка. – 2013. – №3. – С. 35–40.

2. Лазаренко Б.Р. Комутація току на границі метал-електроліт. / Лазаренко Б.Р., Фурсов С.П., Факторович А.А., Галанна Е.К., Дурдажи В.Н. // Кішинев: Штінна, 1971. 74 с.

3. Дурдажи В.Н. Исследование эрозии анода при воздействии на него электролитной плазмы / Дурдажи В.Н., Брянец И.В., Товарков А.К. // ЭОМ. 1978, (5), 13–17.

4. Куликов И.С. Особенности электроимпульсного полирования металлов в электролитной плазме / Куликов И.С., Ващенко С.В., Василевский В.И. // Вестн. АН Белоруссии. Серия физико-технических наук. 1995, (4), 18–21.

5. Дурдажи В.Н. Нагрев металлов в электролитной плазме / Дурдажи В.Н., Парсадяна А.С. // Кішинев: Штінна, 1988. 216 с.

6. Николаев А.В. Новое явление в электролизе / Николаев А.В., Марков Г.А., Пешевичкий Б.И. // Известия СО АН СССР. Сер. хим. наук. 1977, (5), 32–33.

7. Слежка Л.А. Импульсный режим для получения сплкатных покрытий в искровом разряде / Слежка Л.А., Бескровный Ю.М., Невкратый В.И., Черненко В.И. // Защита металлов. 1980, 16(3), 365–367.

8. Горбатков С.А. Управление технологическим процессом электролітно-плазменного удаления покрытия / Горбатков С.А., Парфенов Е.В., Невьянцева Р.Р. // Вестник УГАТУ. 2003, 4(1), 145–152.

9. Куликов И.С. Электролітно-плазменная обработка материалов / Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.А. // Минск: Белорусская наука, 2010. 232 с.

#### УДК 621.785

Чернега С. М. д-т.н., проф., Красовский М.А. к.х.н., Гриненко К.М. к.т.н., доц., Майоров М.С. студент

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

### ФОРМИРОВАНИЕ ДИФУЗИОННЫХ БОРИДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ НАСЫЩЕНИИ СТАЛЕЙ

Досліджено інтенсифікації процесу хіміко-термічної обробки металів і сплавів із застосування зовнішнього магнітного поля (ЗМП), що дозволяє пришвидшити процес дифузії та утворення дифузійних шарів присвячена дана робота. Змінити структуру та властивості дифузійних боридних шарів можна комплексним насиченням різними елементами разом із бором в одному технологічному циклі. Зазначені дослідження дадуть можливість отримувати комплексні зносостійкі покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками, які представляють значний інтерес для промисловості, зокрема для таких галузей, як машинобудування, суднобудування, інструментальне виробництво.

В роботі досліджено структуру і фазовий склад боридних покриттів отриманих після комплексного насичення вуглецевих сталей бором та міддю із застосування зовнішнього магнітного поля (ЗМП). Даний метод нанесення боридних покриттів дозволяє 1,5 – 2 рази зменшити тривалість насичення деталей та отримати покриття з високою твердістю, зносостійкістю, корозійною стійкістю. При застосуванні ЗМП змінюється морфологія боридних шарів, голчастість зерен різко зменшується, зникають окремо пророслі в матрицю зерна боридів. Голчасті зерна боридних фаз щільно прилягають один до одного та формуються суцільний, однорідний боридний шар, товщина якого в 2 рази вища, ніж при боруванні без ЗМП (див. рис. 1.).

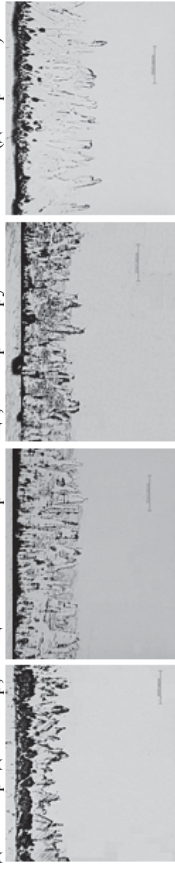


Рис. 1. Мікроструктури комплексних боридних покриттів на сталі 20 отриманих в різних фізико – хімічних умовах: а – борування, тривалість насичення 4 год, х100; б – борування в ЗМП, 2 год, х100; в – бороміщення в ЗМП, 2 год, х100.

Встановлено, що після дифузійного насичення в борувальній суміші протягом 4 годин без ЗМП отримуємо покриття, товщина яких складає 150 мкм, тоді, як при накладанні ЗМП формуються покриття товщиною 200 мкм за 2 години, при боромідненні протягом 4 годин без ЗМП – 175 мкм, тоді, як при боромідненні в умовах дії ЗМП за 2 години дифузійного насичення виростають боридні фази товщиною 230 мкм.

Дифрактограми зняті з поверхні боридних покриттів на сталі 20 після борування без ЗМП показали, що в поверхневому шарі до 15 мкм формується фаза FeV, а при боромідненні – фази FeV і Cu. При застосуванні ЗМП в боридних шарах спостерігається зменшення об'єму фази FeV і на дифрактограмах поверхневих шарів боридних покриттів фіксується наявність фаз FeV та Fe<sub>2</sub>V, а після бороміднення, – фази FeV, Fe<sub>2</sub>V та Cu.

Встановлено, що бороміднення забезпечує оптимальний комплекс характеристик боридних фаз при зношуванні завдяки достатній мікротвердості – 15,5 МПа, низькій пористості, збільшенню в'язкості шарів, оскільки тріщиностійкість бороміднених покриттів K<sub>1с</sub> досягає рівня 2,1 МПа · м<sup>0,5</sup> порівняно із 1,2 МПа · м<sup>0,5</sup> без комплексного насичення.

Застосування ЗМП при дифузійному боруванні та боромідненні вуглецевих сталей сприяє підвищенню зносостійкості боридних шарів в 2,2 – 2,6 рази порівняно із 1,4 – 1,5 рази без застосування ЗМП, що пов'язано із різним фазовим складом поверхні боридних шарів (FeV та Cu при застосуванні ЗМП), зростаючим мікротвердостю на 1,5 – 2 ГПа, формуванням більш досконалої структури із меншою кількістю пор, більш високими тріщиностійкістю та напруженнями сколювання, які зростають до 345 МПа порівняно із 180 МПа для дифузійних боридних шарів отриманих на сталі 20. Встановлено, що при накладанні ЗМП в боридних шарах спостерігається перерозподіл кількісного співвідношення боридних фаз, зміна періодів кристалічної ґратки і морфології боридних шарів, зменшення тривалості насичення та підвищення тріщиностійкості. Більш висока зносостійкість бороміднених покриттів пов'язана із формуванням окремих вкраплень міді в поверхневому шарі до 30 мкм фази FeV (рис.2).

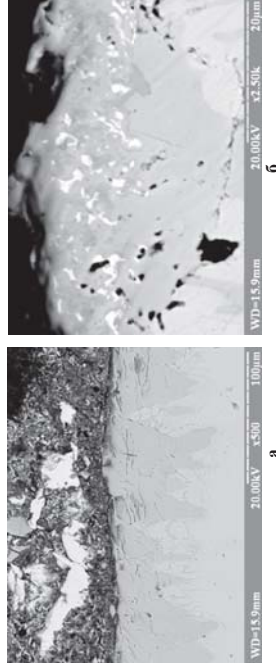


Рис. 2. Мікроструктура бороміднених покриттів на сталі 45, отриманих при введенні в насичуюче середовище порошків міднонікельних сполук; а – x500 (світлі вclusions – Cu; вид з поверхні под кутом 10°); б – x2500 (поперечний шліф)

Рентгеноспектральним аналізом встановлено дискретний розподіл міді в боридних покриттях. Окремі вclusions міді мають неправильну багатогранну витягнуту в напрямку дифузійного потоку форму. Розміри мідних вclusions досягають в поперечному перерізі 1 – 1,5 мкм, а в повздовжньому, що співпадає із напрямком переважного росту боридних зерен гончатої форми, досягають до 2 мкм. Також спостерігається виділення і концентрація мідних вclusions в боридному шарі біля пор, що мають дифузійну природу.

За ростом зносостійкості боридні покриття, отримані в різних насичуючих міднонікельних середовищах можна впорядкувати наступним чином: FeV, Fe<sub>2</sub>V (насичуюче середовище: V<sub>4</sub>C) → (Fe, Cu)<sub>2</sub>V (насичуюче середовище: V<sub>4</sub>C + порошок Cu) → (Fe, Cu)<sub>2</sub>V (Fe, Cu)<sub>2</sub>V (насичуюче середовище: V<sub>4</sub>C + порошок Cu<sub>3</sub>P) → (Fe, Cu)<sub>2</sub>V, (Fe, Cu)<sub>2</sub>V (насичуюче середовище: V<sub>4</sub>C + порошок Cu<sub>2</sub>O).

УДК 539.375

Тариков Г.П., д-т.н., професор, Акулова Е.М.

Белоруський державний університет транспорту, г.Гомель, Беларусь

Гомельський державний технічний університет імені П.О.Сухого, г.Гомель, Беларусь

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЛЬСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАГРУЗКИ НА ОСЬ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В связи с ростом грузонапряженности на железных дорогах резко увеличился выход из строя рельсов по наиболее опасному дефекту — контактно-усталостному повреждению головки рельса.

Как известно, рельс и колесо подвергаются действию нагрузок, изменяющихся во времени. Под действием переменных нагрузок в рельсе накапливаются усталостные повреждения, которые через некоторый промежуток времени могут достигнуть предельного уровня и вследствие этого привести к выходу его из строя.

Поэтому задача о накоплении усталостных повреждений в системе «рельс – колесо» является актуальной. При решении этой задачи следует в первую очередь обратить внимание на вопросы долговечности рельса. Существует несколько моделей накопления усталостных повреждений и определения долговечности элементов конструкций. Однако эти методы не могут быть применены к системе «рельс – колесо», так как они не учитывают контактный характер взаимодействия рельса и колеса.

Решается задача об определении долговечности рельса в системе «рельс – колесо». Предлагается новый способ определения долговечности рельса, учитывающий контактный характер взаимодействия рельса и колеса, основанный на совместном использовании теории контактных задач, механики разрушения и вопросов усталостного разрушения. Исследуется изменение величины контактного давления, распределенного по поверхности эллиптической площадки контакта и ее размера, при различных нагрузках на колесную пару. Определяются нормальные напряжения на оси, проходящей через центр площадки контакта и направленной перпендикулярно к ней, для различных случаев нагружения. Используя третью теорию прочности, определены координаты наиболее напряженной точки и получены значения главных напряжений в этой точке. Определяется долговечность рельса с применением эмпирической формулы Мэнсона. По каждому этапу решения задачи рассмотрены числовые примеры.

При рассмотрении числовых примеров значения механических характеристик материалов для колеса и рельса приняты одинаковыми и соответствующими значениям для стали М76.

В рассматриваемом случае имеет место контакт поверхностей вращения с осями, расположенными накрест при внешнем соприкосновении рельса и колеса.

В соответствии с ГОСТ Р 51685-2000 радиус головки рельса R65 равен 500 мм. Однако это значение относится только к точкам, находящимся на расстоянии до 10 мм от оси симметрии поперечного сечения рельса. Точка контакта колеса с рельсом не обязательно находится в этих пределах. Радиус головки рельса изменяется и в точках, находящихся на расстоянии 24,55 мм от оси симметрии, равен 80 мм. В связи с этим при рассмотрении конкретных примеров для определенности был принят радиус 300 мм.

Математическая обработка результатов экспериментов позволила получить эмпирические формулы, позволяющие определять долговечность рельсов в зависимости от нагрузки на ось колесной пары.

УДК 621.375.826:621

Блощини М.С. к.т.н., доц., Гой Р.С., Скляр А.В., Холяк М.О., Свічкар І.В.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**ОСОБЛИВОСТІ ПЛАЗМОВОГО ТА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ КОМБІНОВАНИЙ НАПЛАВЦІ**

Використання різних джерел енергії виключно на підгрівання порошку до заданої температури без оплавлення частинок дозволяє істотно збільшити продуктивність наплавлення без суттєвого підвищення собівартості процесу наплавлення при комбінованому процесі наплавлення.

Метою даного дослідження є порівняння нагрівання порошкового матеріалу у плазмово-зерно-індукційного наплавлення при реалізації комбінованих процесів лазерно-плазмового або лазерно-індукційного наплавлення

Для нагрівання порошку до визначеної температури, при заданій витраті дозуючого пристрою, необхідно знайти ефективну довжину плазмового струменя та його енергетичні характеристики, що забезпечують нагрівання частинок порошкового матеріалу, що пролітають вздовж струменя. Для цього було використано відповідні математичні моделі, за яких було розраховано ефективність нагрівання дисперсних матеріалів у відповідних нагрівачах. Для моделювання процесу нагрівання частинки було прийнято наступні умови: частинка має ідеальну сферичну форму; частинка є однорідним, ізотропним тілом; внутрішні джерела відсутні, порошковий матеріал нагрівається весь, без втрат на розпалювання.

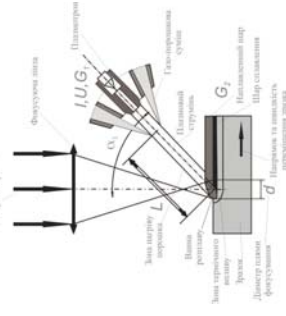


Рис.1- Схема лазерно-плазмового наплавлення  
Рівняння теплопроводності:

$$\rho_p \cdot C_{p,об} \cdot \frac{dT_{об}}{dt} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( r^2 \cdot \lambda_{об} \cdot \frac{\partial T_{об}}{\partial r} \right) = 0 \tag{1}$$

Перший член рівняння теплопроводності характеризує тепловий потік, що йшов на нагрів частинки, другий член - тепловий потік всередині частинки.

Променевий потік тепла з поверхні частинки врахований у граничній умові:

$$\lambda_{об} \cdot \frac{dT_{об}}{dt} \Big|_{r=R} - \alpha \cdot \left( \frac{H_p - T_{об}}{C_{p,об}} \right) + \epsilon \cdot \sigma \cdot T_{об}^4 = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial T_{об}}{\partial t} = k_a \cdot (T_p - T_{об}), \quad k_a = \frac{6 \cdot \alpha}{\rho_{ch} \cdot d \cdot C_{ch}}$$

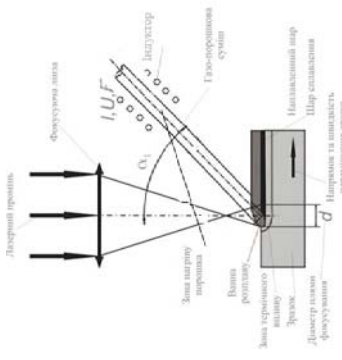


Рис.2- Схема лазерно-індукційного наплавлення

Рівняння теплопроводності з внутрішнім тепловиділенням в циліндричних координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{c \gamma} W(r, z, t) \tag{3}$$

початкові та граничні умови:

$$T(r, z, 0) = T_0(r, z)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = a [T_c - T(r, 0, t)] + \epsilon \sigma_0 [T_c^4 - T^4(r, 0, t)]$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = a [T_c - T(R, z, t)] + \epsilon \sigma_0 [T_c^4 - T^4(R, z, t)]$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z} = a [T_c - T(r, z, t)] + \epsilon \sigma_0 [T_c^4 - T^4(r, z, t)]$$

Особливостями нагрівання в плазмовому потоці є конвективний теплообмін між плазмовим струменем й потоком порошкового матеріалу. Особливостями нагрівання в індукторі є використання виділення тепла у порошкових частинках по закону Джоуля-Ленца, що виникає за рахунок протікання вихрових (замкнуті всередині тіл) струмів під дією електро рушійної сили індукції в тілах. Порошковий матеріал направляємо у електромагнітне поле індукції індукуються вторинні зміни струми той же частоти, які розподіляються в поверхневому шарі металу та нагрівають цей шар. Чим вища частота струму, тим тонший шар, що нагрівається. Для сталевих деталей переважає нагрівання струмами високої частоти поверхневих шарів металу зберігається до точки Кюрі (768 °С). Після нагрівання металу вище точки Кюрі, глибина проникнення індуктованих струмів збільшується у 10...20 разів (в залежності від частоти), завдяки чому розподіл температури у металі, що нагрівається стає більш рівномірним.

При порівнянні двох процесів нагрівання порошкового матеріалу було виявлено: при нагріванні плазмовим струменем можливе перегрівання матеріалу основи від дії плазмового струменя (вище 230 °С) та низький коефіцієнт використання порошкового матеріалу, складність реалізації процесу; при нагріванні за рахунок індукції можливо контролювати глибину нагрівання при зміні частоти струму, не можливо переріти метал вище температури плавлення – при нагріванні зникають феромагнітні властивості металів.

**Список літератури:**

1. Ткачев В.Н. *Индукционная наливка твердых сплавов* / Ткачев В.Н., Филштейн Б.М., Казинцев Н.В., Алдырев Д.А. // Машиностроение, 1970, стр 183.

УДК 621.941

Литвин О.В., к.т.н., доц., Гаврушкевич Н.В., Алексейчук Д.А.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ ЗАТИСКНОГО ПАТРОНА НА СИНТЕЗ ЙОГО СТРУКТУР

Підвищення ефективності застосування затискних патронів (далі ЗП) нових конструкцій ґальмується через відсутність методичної основи в прийнятті рішень щодо конструювання та формування комплексів затискної оснащення.

При створенні нових конструкцій ЗП необхідно знати умови (функції) взаємодії затискних елементів з об'єктом закріплення, умови передачі енергії і сили та напруження в елементах патрона, схеми виникнення пружних відтискань та похиток в системі патрон - об'єкт закріплення.

До методів пошуку нових технічних рішень на ранніх стадіях технологічної підготовки виробництва відносяться уніфікаційний синтез, метод комбінаторного синтезу елементів різних модулівних систем, структурно-параметричний аналіз. Можливі різні постановки завдань проєктування і відповідні їм види дій з описом (інформаційною моделлю) об'єкта.

Пропонується використовувати принципи системного аналізу для розв'язання винахідницьких завдань при розробці технічних пристроїв. Безліч технічних рішень об'єкта розробки представляють у вигляді наочної деревовидної структури, гілки якої складаються з елементів (ознак) технічних рішень, з'єднаних дугами графів, що відображають їх підпорядкованість та порядок застосування.

Завдання синтезу компонування ЗП - різноманітна оптимізаційна задача. При розробці технологічного компонування можуть бути сформовані конкурентні варіанти просторового розташування і базування заготовки в системі затискний патрон-верстат. При конструкторському проєктуванні ЗП можуть бути сформовані конкурентні варіанти компонування схем з різним сполученням і просторовим розташуванням силового механізму і вузла затискача. Критерієм оцінки варіантів компонування схем ЗП доцільно прийняти компактність конструкції і її відповідність технічному завданню.

Функціональний аналіз - це найбільш загальний і універсальний підхід до вирішення різних завдань. Моделі функціонально-структурного аналізу: ієрархічна, потокова функціональна схема, конструктивна функціональна схема. Створення нового ЗП починається з аналізу потреб і формулювання функцій, які він повинен виконати, щоб задовольнити ці потреби. Оскільки метою створення ЗП є виконання головної корисної функції, то функціональні компоненти потрібно виділяти по відношенню їх до неї.

Ієрархічна модель (рис.1) дозволяє виявити основні, допоміжні і додаткові функції, які необхідно передбачити для того, щоб виконувалася головна корисна функція.

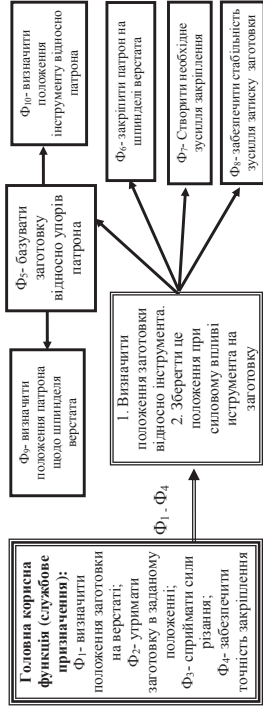


Рис.1. Взаємозв'язок функцій, виконуваних ЗП (ієрархічна модель)

УДК 621.9.06.

Данильченко Ю.М., д.т.н., проф.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРУЖНИХ ЗМІЩЕНЬ ІНСТРУМЕНТА І ЗАГОТОВКИ В ЗАМКНЕНІЙ ДИНАМІЧНІЙ СИСТЕМІ ВЕРСТАТА

Точність обробки на металорізальних верстатах визначається взаємним положенням інструмента і заготовки в процесі різання і в першу чергу залежить від величини їх пружних зміщень. Тому питання, пов'язані з визначенням пружних зміщень інструмента і заготовки в зоні різання, зокрема і шляхом їх моделювання, є актуальними.

Взаємодія підсистем інструмента і заготовки пружної системи верстака з процесом різання в динамічних моделях звичайно описується за замкненою схемою. Для процесу різання на підсистемі пружної системи верстака подається у вигляді зовнішньої силової дії  $P_p$  без врахування фактичного контакту інструмента із заготовкою. При цьому власні частоти системи інструмент-заготовка визначаються власними частотами підсистем пружної системи і вважаються постійними, хоча результати експериментальних досліджень частот власних коливань з врахуванням фактичного контакту інструмента із заготовкою доводять протилежне [1].

В роботах [1] і [2] запропоновано в динамічній моделі пружної системи «інструмент-заготовка» враховувати процес різання у вигляді додаткової пружної зв'язки в місці контакту інструменту і заготовки, і таким чином враховувати фактичну заміненість пружної системи при обчисленні її власних частот. Але питання обчислення пружних зміщень інструмента і заготовки від дії сили різання лишилось відкритим.

Пропонується представити математичну модель пружних зміщень інструмента і заготовки в замкненій динамічній системі верстака у вигляді сукупності взаємопов'язаних динамічних моделей підсистем заготовки і інструменту, що знаходяться під гармонічним силовим навантаженням  $P_p$ . Відповідно до вимог [3] в підсистемі заготовки входять: власне заготовка (індекс  $s=1$ ); шпиндель (індекс  $s=2$ ) і корпус шпинделя (індекс  $s=3$ ), пружно закріплені на станині верстака (рис. 1).

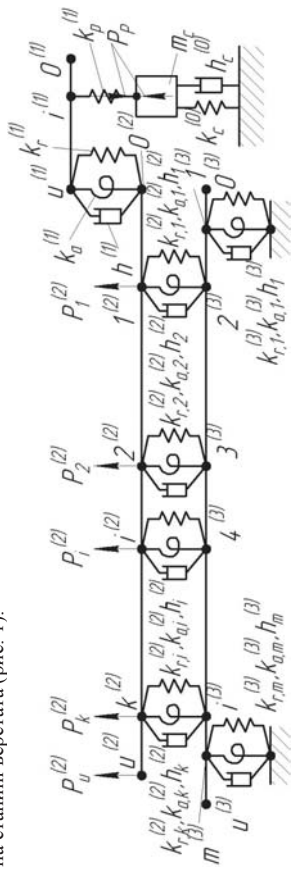


Рис. 1 – Розрахункова схема моделі пружних зміщень інструмента і заготовки в замкненій динамічній системі верстака

Зв'язками складових підсистем заготовки є з'єднання заготовки 1 з шпинделем 2 і підшипники опору для з'єднання шпинделя 2 з корпусом 3. Всі зв'язки володіють пружними ( $k_{r,i}^{(s)}$  і  $k_{c,i}^{(s)}$ ) і дисипативними ( $h_{r,i}^{(s)}$ ) властивостями.

В процесі обробки підсистема заготовки взаємодіє з підсистемою 0 інструмента (індекс s=0). В моделі (рис. 1) ця взаємодія враховується додатковим попередньо навантаженим пружним зв'язком з жорсткістю  $k_p^{(0)}$ , в місці з'єднання якого із підсистемою 0 інструмента прикладається нормальна складова сили різання  $P_p$ .

Для обчислення пружних змінень заготовки і інструмента пропонується провести декомпозицію пружної системи на окремі підсистеми (рис. 2) із записом системи рівнянь сумісності деформацій в точках їх відокремлення [4].

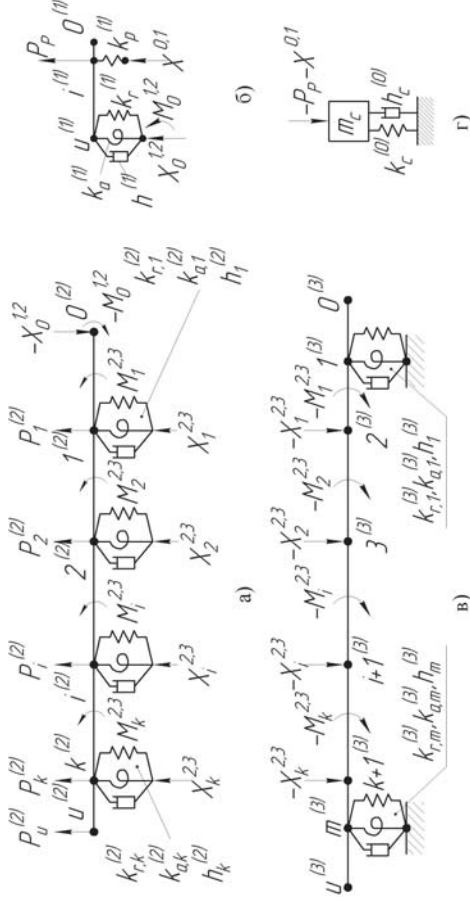


Рис. 2 – Розрахункові схеми підсистем: а) підсистема шпінделя (індекс s=2); б) підсистема заготовки (індекс s=3); в) підсистема корпусу інструменту (індекс s=0)

Для складання рівнянь рівноваги в точках відокремлення підсистем використовується метод динамічних податливостей. Гармонічні коефіцієнти впливу, що входять в рівняння рівноваги визначаються окремо для кожної з підсистем із використанням методу перехідних матриць (методу початкових параметрів в матричному формулюванні).

В точках  $0^{(2)}$  (рис. 2а) і  $0^{(3)}$  (рис. 2б) відокремлення шпінделя 2 і заготовки 1 рівняння сумісності деформацій мають вигляд:

$$\begin{cases} \alpha_{mm}^{(1,2)} \cdot X^{1,2} - \gamma_{m0}^{(1)} \cdot M^{1,2} + \alpha_{pp}^{(0)} \cdot X^{0,1} - \gamma_{p0}^{(2)} \cdot X^{2,3} + \sum_{j=1}^k \alpha_{0j}^{(2)} \cdot X_j^{2,3} + \sum_{j=1}^k \gamma_{0j}^{(2)} \cdot M_j^{2,3} \\ \beta_{mm}^{(0)} \cdot X^{1,2} + \gamma_{mm}^{(0)} \cdot M^{1,2} + \beta_{pp}^{(0)} \cdot X^{0,1} - \gamma_{p0}^{(2)} \cdot X^{2,3} - \sum_{j=1}^k \beta_{0j}^{(2)} \cdot X_j^{2,3} + \sum_{j=1}^k \gamma_{0j}^{(2)} \cdot M_j^{2,3} \end{cases} \quad (1)$$

де  $X^{1,2}$ ,  $X_j^{2,3}$ ,  $M^{1,2}$ ,  $M_j^{2,3}$  - амплітуди реакцій відкритих зв'язків (сили і моменти);  $\alpha_{0j}^{(2)}$ ,  $\beta_{0j}^{(2)}$ ,  $\gamma_{0j}^{(2)}$ ,  $\Phi_{0j}^{(2)}$  - гармонічні коефіцієнти впливу підсистем s, а саме:  $\alpha_{0j}^{(2)}$  і  $\beta_{0j}^{(2)}$  - амплітуди переміщення і кута повороту в  $i$ -ій точці від одниничної гармонічної сили, прикладеної в  $j$ -ій точці;  $\gamma_{0j}^{(2)}$  і  $\Phi_{0j}^{(2)}$  - амплітуди переміщення і кута повороту в  $i$ -ій точці від одниничного гармонічного моменту, прикладеного в  $j$ -ій точці;  $\alpha_{mm}^{(1,2)}$  і  $\Phi_{mm}^{(1,2)}$  - гармонічні коефіцієнти впливу в точках роз'єднання шпінделя і заготовки;  $\alpha_{pp}^{(0)}$  і  $\beta_{pp}^{(0)}$  - амплітуди узагальнених переміщень (лі-

нійних і куткових) в  $i$ -ій точці заготовки від гармонічних силових навантажень від процесу різання ( $P_p$ ), приводу ( $P_p^{(2)}$ ), підшипників опор шпінделя ( $P_p^{(2)}$ ),  $i = 1 \div k$ ).

Умови сумісності деформацій шпінделя 2 (рис. 2, а) і корпусу 3 (рис. 2, в) в  $i$ -ій точці відокремлення мають вигляд:

$$\begin{cases} -\alpha_{00}^{(2)} \cdot X^{1,2} - \gamma_{00}^{(2)} \cdot M^{1,2} + \sum_{j=1}^k \alpha_{0j}^{(2)} \cdot X_j^{2,3} + (\alpha_{00}^{(2)} + \frac{1}{k_{00}^{(2)}}) \cdot X^{2,3} + \sum_{j=1}^k \alpha_{0j}^{(2)} \cdot M_j^{2,3} = -\sum_{j=1}^k \alpha_{0j}^{(3)} \cdot X_j^{2,3} - \sum_{j=1}^k \gamma_{0j}^{(3)} \cdot M_j^{2,3} \\ -\beta_{00}^{(2)} \cdot X^{1,2} - \gamma_{00}^{(2)} \cdot M^{1,2} + \sum_{j=1}^k \beta_{0j}^{(2)} \cdot X_j^{2,3} + (\beta_{00}^{(2)} + \frac{1}{k_{00}^{(2)}}) \cdot M^{2,3} = -\sum_{j=1}^k \beta_{0j}^{(3)} \cdot X_j^{2,3} - \sum_{j=1}^k \gamma_{0j}^{(3)} \cdot M_j^{2,3} \end{cases} \quad (2)$$

де  $k_{00}^{(2)}$  і  $k_{00}^{(3)}$  - радіальна і кутова жорсткості  $i$ -ої опори шпінделя.

Умови сумісності деформацій заготовки 1 (рис. 2, б) і інструмента 0 (рис. 2, в) точці відокремлення мають вигляд:

$$\begin{cases} (\alpha_{00}^{(1)} + \frac{1}{k_p^{(0)}}) \cdot X^{0,1} + \alpha_{00}^{(1)} \cdot P_p + \alpha_{00}^{(1)} \cdot X^{1,2} + \gamma_{00}^{(1)} \cdot M^{1,2} = -\alpha_c^{(0)} \cdot (X^{0,1} + P_p), \\ (\alpha_{00}^{(1)} + \frac{1}{k_p^{(0)}}) \cdot X^{0,1} + \alpha_{00}^{(1)} \cdot P_p + \alpha_{00}^{(1)} \cdot X^{1,2} + \gamma_{00}^{(1)} \cdot M^{1,2} = -\alpha_c^{(0)} \cdot (X^{0,1} + P_p), \end{cases} \quad (3)$$

де  $\alpha_c^{(0)}$  - гармонічний коефіцієнт впливу підсистеми інструменту.

В результаті розв'язку систем рівнянь (1), (2) і (3) визначають амплітуди реакцій відкритих зв'язків, а потім і амплітуди пружних змінень заготовки  $q_i^{(1)}$  і інструмента  $q^{(0)}$  в зоні різання:

$$q_i^{(0)} = \alpha_{0i}^{(1)} \cdot (X^{0,1} + P_p) + \alpha_{0i}^{(1)} \cdot X^{1,2} + \gamma_{0i}^{(1)} \cdot M^{1,2} \quad \text{і} \quad q^{(0)} = -\alpha_c^{(0)} \cdot (X^{0,1} + P_p).$$

Відносне зміщення заготовки і інструменту визначається залежністю  $q_{\text{внм}} = q_i^{(1)} - q^{(0)}$ , а частота характеристика пружної системи «інструмент-заготовка» залежністю:

$$W = \frac{q_{\text{внм}}}{P_p} = \frac{\alpha_{0i}^{(1)} + \alpha_c^{(0)}}{(\alpha_{0i}^{(1)} + \alpha_c^{(0)}) \cdot (X^{0,1} + P_p) + \alpha_{0i}^{(1)} \cdot X^{1,2} + \gamma_{0i}^{(1)} \cdot M^{1,2}}$$

В подальшому запропонована математична модель буде використана для дослідження стійкості динамічної системи верстата при різанні.

**Список літератури**

1. Данильченко М.А. Исследование влияния контактного взаимодействия заготовки и инструмента на динамические характеристики токарного станка // Данильченко М.А., Петришин А.И. // Вестник НТУУ «КПІ», серія Машинобудування. - 2016. - №77 - С. 140-146.
2. Данильченко М.А. Учет процесса резания в динамических моделях шпиндельных узлов металлорежущих станков // Надійшло в редакцію та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. - Краматорськ. - 2016. - №38. - С. 99-104.
3. Lin C.-W. Dynamic models and design of spindle-bearing systems of machine tools: A review // Lin C.-W., Lin Y.-K., and Chu C.-H. // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 14(3), 2013 - pp. 513-521.
4. Данильченко Ю.М. Исследование динамических характеристик механической системы «шпиндельный узел» // Данильченко Ю.М., Дорожко А.О., Петришин А.И. // Вестник МГТУ «Станки» № 1 (28), 2014. - С. 81-91.

УДК 621.9.06.

Данильченко М.А., Петришин А.І., к.т.н.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ЧАСТОТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА З УРАХУВАННЯМ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗАГОТОВКИ З ІНСТРУМЕНТОМ

Точність обробки на металорізальних верстатах значною мірою залежить від динамічних властивостей їх механічної системи і умов обробки, які можуть супроводжуватись виникненням інтенсивних вібрацій. Одним з методів виявлення підвищеної віброактивності механічної системи верстата є її дослідження на відповідних математичних моделях при умові достатньої точності відтворення в них динамічної поведінки верстата при різанні. Тому завдання адекватного представлення фактично діючих процесів в динамічних моделях верстатів є актуальним.

В динамічних моделях металорізальних верстатів механічна система представляється у вигляді пружної системи, що складається з підсистем інструмента і заготовки, навантажених силою різання. При цьому наявність фактичного контакту між інструментом і заготовкою в процесі різання звичайно не враховується.

Результати попередніх експериментальних досліджень динамічних характеристик токарного верстату [1] довели суттєвий вплив контактної взаємодії інструменту і заготовки на частоті власних коливань пружної системи верстату. На підставі цього було розроблено динамічну модель шпиндельного вузла із закріпленою в патроні і підтиснутою різцем заготовкою і проведено моделювання частоти власних коливань.

Метою цієї роботи є розширення можливостей вище згаданої динамічної моделі для моделювання частотних характеристик динамічної системи токарного верстата.

Динамічна модель пружної системи токарного верстата представлена у вигляді замкненої механічної колійної системи, що складається з підсистем заготовки 1 (індекс  $s=1$ ), шпинделя 2 з патроном (індекс  $s=2$ ) і супорта 3 з інструментом (індекс  $s=3$ ). Розрахункова схема цієї системи і схема її декомпозиції подані на рис. 1.

Основою математичної моделі динаміки пружної системи верстата є система рівнянь сумісності деформацій в точках відокремлення підсистем [1]:

$$\left\{ \begin{aligned} & \alpha_{21}^{(j)} \cdot X_0 + (\alpha_{22}^{(j)} + \frac{1}{k_{\text{впр1}}}) \cdot X_1 + \alpha_{23}^{(j)} \cdot X_2 = -\alpha_{06}^{(j)} \cdot X_1 - \alpha_{01}^{(j)} \cdot X_2 \\ & \alpha_{31}^{(j)} \cdot X_0 + \alpha_{32}^{(j)} \cdot X_1 + (\alpha_{33}^{(j)} + \frac{1}{k_{\text{впр2}}}) \cdot X_2 = -\alpha_{10}^{(j)} \cdot X_1 - \alpha_{11}^{(j)} \cdot X_2 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & (\alpha_{11}^{(j)} + \frac{1}{k_0}) \cdot X_0 + \alpha_{11}^{(j)} \cdot P_0 + \alpha_{12}^{(j)} \cdot X_1 + \alpha_{13}^{(j)} \cdot X_2 = -\alpha_c^{(j)} \cdot (X_0 + P_0), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

- для підсистем 1 і 3;

де  $X_j$  - амплітуда реакції відкритих зв'язків,  $j=0,1,2$ ;  $P_0$  - амплітуда гармонічної складової сили різання;  $\alpha_{ij}^{(j)}$  - гармонічні коефіцієнти впливу підсистем  $s$ , а саме амплітуди переміщення в  $i$ -ій точці від одиничної гармонічної сили, прикладеної в  $j$ -ій точці;  $k_{\text{впр1}}$ ,  $k_{\text{впр2}}$  - жорсткості закріплення заготовки в патроні;  $k_p$  - жорсткість різання;  $\alpha_n^{(j)}$  - динамічна податливість підсистем інструменту.

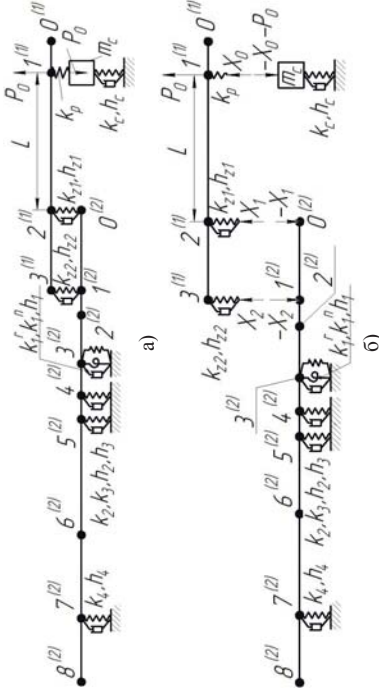


Рис. 1. Динамічна модель пружної системи токарного верстата: а) розрахункова схема замкненої системи; б) схема декомпозиції

В результаті розв'язку систем рівнянь (1) і (2) визначають амплітуди реакцій відкритих зв'язків, а потім і амплітуди пружних зміщень заготовки  $q_1^{(j)}$ , інструмента  $q_2^{(j)}$  в зоні різання:

$$q_1^{(j)} = \alpha_{11}^{(j)} \cdot (X_0 + P_0) + \alpha_{12}^{(j)} \cdot X_1 + \alpha_{13}^{(j)} \cdot X_2, \quad (3)$$

$$q_2^{(j)} = -\alpha_n^{(j)} \cdot (X_0 + P_0). \quad (4)$$

Частотні характеристики отримуються за відносним зміщенням заготовки і інструменту, що визначається за залежністю:

$$q_{\text{від}}^{(j)} = q_1^{(j)} - q_2^{(j)} = (\alpha_{11}^{(j)} + \alpha_n^{(j)}) \cdot (X_0 + P_0) + \alpha_{12}^{(j)} \cdot X_1 + \alpha_{13}^{(j)} \cdot X_2, \quad (5)$$

Результати моделювання динамічних податливостей пружної системи верстата при зміні вильоту розміщення різця  $L$  подано на рис. 2.

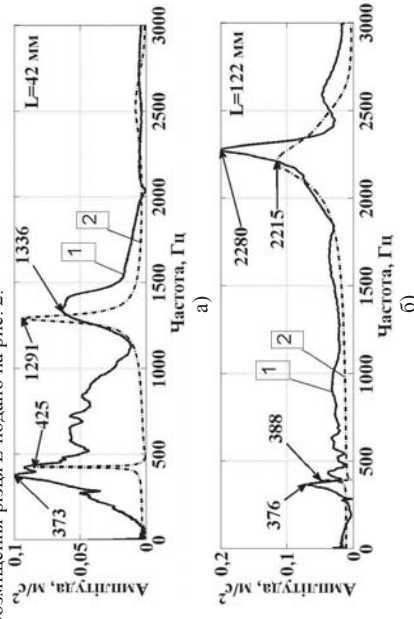


Рис. 2. Динамічні податливості пружної системи верстата при зміні вильоту розміщення різця  $L$ : 1 - експеримент [1]; 2 - моделювання

### Список літератури

1. Данильченко М.А. Исследование влияния контактного взаимодействия заготовки и инструмента на динамические характеристики токарного станка / Данильченко М.А., Петришин А.И. // Вісник НТУУ "КПШ", серія Машинобудування. - 2016. - №77 - С. 140-146.

УДК 621.375.826:621

Котляров В.П., д.т.н. проф., Ворончак Г.П.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ОПЕРАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ГАРТУВАННЯ**

**Матеріалізація штучної нейронної мережі.**

Для мотивовано обрано раніше [1] архітектуру ШНМ – перцептронна із синтаксисом  $Net = \text{neff}(\min \max(X), [P, S, Q], \{\log \text{sig}, \log \text{sig}, \log \text{sig}\})$  було виконано його насичення детермінованими величинами сигналів вхідного шару  $\bar{X}^{(0)}$  та їх синапсичних зв'язків  $\bar{W}^{(0)}$ , а також ваговими коефіцієнтами  $A, B, C$  для одержаних аксонів вхідного шару  $\bar{X}^{(2)}$  прихованого шару, які складають масив синапсів для прихованого шару.

Зважаючи на вимоги до умов функціонування нейронних мереж, зокрема, до синапсів  $\bar{X}^{(0)}$  та їх синапсичних зв'язків потрібно визначити взаємонезалежні джерела нестабільностей учасників ТОС та їх ваги  $\bar{W}^{(0)}$ . Як слідує з роботи [2], наявність сумарної похибки операцій лазерного гартування (ЛГ) визначається коливанням інтенсивності випромінювання в зоні проміння  $\Delta P$ , до якої також додаються похибки, що вносяться нестабільністю процесів, відповідних за створення зон термічного впливу (ЗТВ) в матеріалі заготовки.

**Нестабільність рівня інтенсивності визначається:**

- варіацією довжини хвилі випромінювання  $\lambda$  під час обробки;
- величиною коливання імпульсної енергії  $\Delta E$  ( $\Delta P$ ) і тривалості дії  $\Delta t = \Delta t$ ;
- нестабільністю просторово-кутових і розмірних характеристик променя: його діаметру та кута розбіжності  $\Delta D, \Delta \theta$ ;
- флукутацією просторової (модової) структури променя;
- похибками технологічних прийомів та обладнання, на якому вони виконуються, що впливають на:
  - стабільність форми і розмірів каустики перетвореного в інструмент променя  $\sigma \Delta F$ ;
  - положення в ній заготовки  $\Delta F$ ;
  - стабільність швидкості робочої подачі  $\Delta V$ .

Нестабільності процесу формування ЗТВ в матеріалі заготовки також додають нестабільності параметрів заготовки  $\Delta z_{ag}$  (за незмінного рівня умов обробки):

- нестабільність в межах поверхні, що обробляється, та в партії заготовок її оптичних властивостей, за якою варіюється густина потужності теплового джерела  $\Delta I/P$  та результати його дії;
- нестабільності теплофізичних властивостей матеріалу заготовки ( $\rho, k, c$  та  $a$ ), які відповідают за відведення та використання енергії теплового джерела;
- нестабільність теплових процесів в матеріалі заготовки, зокрема швидкості його нагрівання, призводить до невизначеності рівнів критичних температур  $T_{кр}$ , перевищення яких потрібні для забезпечення обраних структурних перетворень в матеріалі, тобто до коливання форми та розмірів ЗТВ.

**Математичне моделювання сумарної похибки операції.**

В якості моделі, яка описує залежність сумарної похибки операції ЛГ від стану учасників ТОС і може прогнозувати очікувану точність обробки, прийнято лінеаризовану імовірнісну функцію у вигляді ряду Тейлора:

$$\Delta b(\Delta d); \Delta z = \sum_{i=1}^m a_i x_i + \sum_{j=1}^n b_j y_j + \sum_{l=1}^k c_l z_l \quad (1)$$

де  $\bar{X}^{(2)}(x_1, \dots, x_m, \dots, x_n)$ ,  $\bar{Y}^{(2)}(y_1, \dots, y_n)$ ,  $\bar{Z}^{(2)}(z_1, \dots, z_k, \dots, z_n)$  вхідні змінні на синапсах прихованого шару ШНМ, тобто аксони першого шару, які оцінюють вклад неоліній інструменту, технологічних прийомів та заготовок в партії в сумарну похибку. Використані в моделі синапсичні коефіцієнти прихованого шару, для побудови якої використано нейронну мережу (рис. 1), яка відповідає синтаксису та коментарям із [1], причому в результаті її дії дані прогнозу представляються у вигляді:  $\Delta b(\Delta d); \Delta z = OUT = F(NEF)$ , де:  $F$  – активційна функція (найчастіше сігмоїдна  $F = 1 / (1 + e^{-NEF})$  для підвищення чутливості мережі.

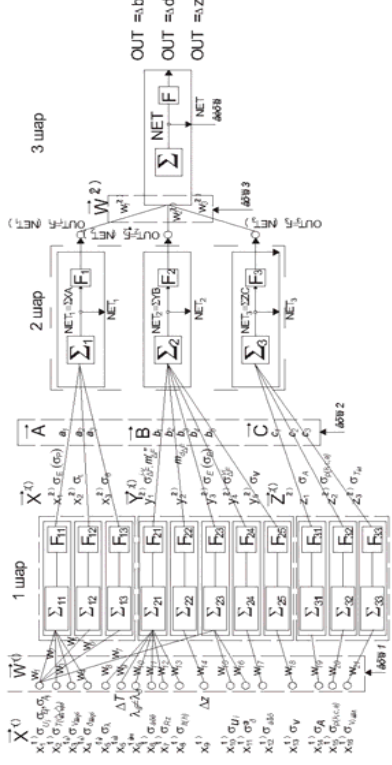


Рис. 1. – Схема асинхронної ШНМ: перший шар – вхідний з одиннадцятьма нейронами; другий шар – прихований з трьома нейронами; третій шар – вихідний з одним нейроном

Джерела початкових нестабільностей були встановлено в результаті досліджень особливостей роботи лазерного технологічного устаткування, специфіки побудови технологічних операцій лазерної поверхневої зміночної обробки та звичайних для заготовки властивостей, включаючи її матеріал (табл. 1). Відповідні синапсичні коефіцієнти можна знайти в табл. 2 [3].

**Прогнозування точності операції лазерного гартування.**

Використовуючи схему формування сумарної похибки та структуру створеної ШНМ (рис. 1), включаючи розроблену систему початкових нестабільностей ТОС, тобто вхідних синапсів мережі, для визначення та випробування режимів технологічної операції (табл. 3 [3]), запропоновано складові та сумарну похибку операції лазерної поверхневої гартуючої обробки (рис. 2а – імпульсне, рис. 2б – безперервне опромінення).

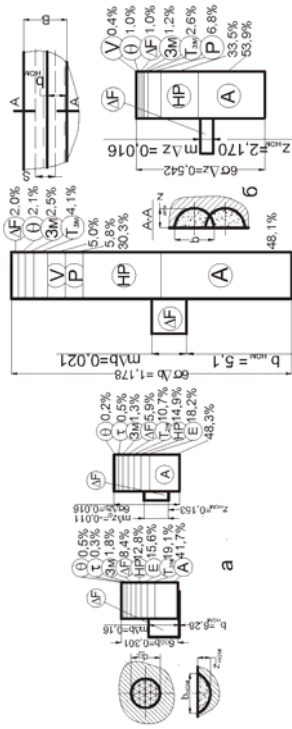


Рис. 2. – Схема формування зон гартування та структура сумарних похибок ширини та глибини ЗТВ при імпульсному (а) та безперервному (б) опроміненні

Таблиця 1. Параметри синансів першого шару ШНМ

$\bar{X}^{(1)}$	Початкові нестабільності	$\bar{W}^{(1)}$	Синангічні коефіцієнти	Примітки
<b>Нестабільності характеристик інструменту (лазерного променю)</b>				
$x_1^{(1)}$	$\sigma_{U_n} = m \times \bar{U}_{in} / 600$	$w_1^{(1)}$	$2E_{in}(U_n \sigma_{U_n} + 3\sigma_{U_n}^2) / [U_n^2 (n_E - 1)]$	імпульсні твердо тіпні лазер
$x_2^{(1)}$	$\sigma_T = \Delta T / 6$	$w_2^{(1)}$	$2\bar{E}_n [\bar{T}_n (n_T^2 - 1)]$	
$x_3^{(1)}$	$\sigma_{E_n} = \delta_{E_n} \times \bar{E}_{in} / 600$	$w_3^{(1)}$	$\{[(\varepsilon/p_o) h_p] \eta_{so} / [(\varepsilon/p_o) h_p + U_n + U_o]\}$	імпульсні колективні газові лазер на CO <sub>2</sub>
$x_4^{(1)}$	$\sigma_{T_{ac}} = \Delta T_{ac} / 6$	$w_4^{(1)}$	$[-c_{opt} \rho_{opt} V_{TRK} \eta_{so}]$	
$x_5^{(1)}$	$\sigma_{V_{opt}} = \Delta V_{opt} / 6$	$w_5^{(1)}$	$[(T_{opt} - T_{ac}) c_{opt} \rho_{opt} h L_d \tau \eta_{so}]$	
$x_6^{(1)}$	$\sigma_p = \Delta p / 6$	$w_6^{(1)}$	$\{[(T_{opt} - T_{ac}) c_{opt} h_p L_d V_{opt} \tau \eta_{so}] / RT_{opt}\}$	
$x_7^{(1)}$	$\sigma_{P_n} = \delta_{P_n} \times \bar{P}_{in} / 600$	$w_7^{(1)}$	$\{[(\varepsilon/p_o) h_p] \eta_{so} / [(\varepsilon/p_o) h_p + U_n + U_o]\}$	безперервні колективні газові лазер на CO <sub>2</sub>
$x_8^{(1)}$	$\sigma_{T_{ac}} = \Delta T_{ac} / 6$	$w_8^{(1)}$	$[-c_{opt} \rho_{opt} V_{TRK} \eta_{so}]$	
$x_9^{(1)}$	$\sigma_{P_{opt}} = \Delta V_{opt} / 6$	$w_9^{(1)}$	$[(T_{opt} - T_{ac}) c_{opt} \rho_{opt} h L_d \tau \eta_{so}]$	
$x_{10}^{(1)}$	$\sigma_p = \Delta p / 6$	$w_{10}^{(1)}$	$\{[(T_{opt} - T_{ac}) c_{opt} h_p L_d V_{opt} \tau \eta_{so}] / RT_{opt}\}$	
$x_{11}^{(1)}$	$\sigma_{U_n} = m \times \bar{U}_{in} / 600$	$w_{11}^{(1)}$	$[2\bar{E}_n \tau_u / (\bar{U}_n n_{E,n})]$	імп. твердо тіпні лазер
$x_{12}^{(1)}$	$\sigma_{E_n} = \delta_{E_n} \times \bar{E}_{in} / 600$	$w_{12}^{(1)}$	$[2\gamma / \{P_{opt} / \ln[1 / (1 - \varpi - \xi)]\}]$	імп. газовий лазер
$x_{13}^{(1)}$	$\sigma_{P_n} = \delta_{P_n} \times \bar{P}_{in} / 600$	$w_{13}^{(1)}$	$\{4\sqrt{\lambda} / L_{opt} P_{opt} [P_n^4 (P_n - P_{opt})^2]^{1/3}\}$	твердотіпні та газові лазер
<b>Нестабільності технологічних прийомів при виконанні операції</b>				
$x_{14}^{(1)}$	$\sigma_\lambda = \Delta \lambda / 6$	$w_{14}^{(1)}$	$\{F_n (n_{E,n} - 1) / [(\eta_{E,n} - 1) - (\eta_{E,n} - 1)]\}$	
$x_{15}^{(1)}$	$\bar{m}_{Kp} = w_{15}^{(1)} x_5^{(1)} = \bar{P}_0 \beta \theta \beta d_n (F^2 - Z \Delta F) (1 + 2 \ln[D_n / w_2]) \sqrt{F w_2 (w_0 \Delta F^2 + (\Delta F^2 - \theta Z \Delta F)^2)} k$	$w_{15}^{(1)}$	$\{F_n (n_{E,n} - 1) / [(\eta_{E,n} - 1) - (\eta_{E,n} - 1)]\}$	
$x_{16}^{(1)}$	$m_{\Delta F} = w_{16}^{(1)} x_5^{(1)} = \{1 - [n_{2,p} (n_{2,p} - 1)^2] / [n_{2,p} (n_{2,p} - 1)^2] F_{2,p}\}$	$w_{16}^{(1)}$	$[n_{2,p} (n_{2,p} - 1)^2] F_{2,p}$	
$x_{17}^{(1)}$	$\sigma_{\Delta F} = \sigma_{ac} = T_{ac} / 6 = 42 / I^2 + 1,80 AT + 1,1 \cdot 24000 A^2$	$w_{17}^{(1)}$	1	
$x_{18}^{(1)}$	$\sigma_{\Delta F} = R_z (R_z) / 6$	$w_{18}^{(1)}$	1	
$x_{19}^{(1)}$	$\sigma_{\Delta F} = It(h) / 6$	$w_{19}^{(1)}$	1	
$x_{20}^{(1)}$	$\bar{m}_{Kp} = w_{20}^{(1)} x_5^{(1)} = \frac{\theta}{2F} \left[ \frac{2w_0 \Delta F^2}{F} + \left( \frac{\theta Z}{F} \Delta F \right)^2 \right] \left( \frac{\theta Z}{F} \Delta F \right) \Delta Z + A_1 F^2 \left[ 1 + \left( \frac{2Z + \Delta Z}{L_k} \right)^2 \right] - \left[ \frac{2Z}{L_k} \right]^2$	$w_{20}^{(1)}$	$\left[ \frac{\theta Z}{F} \Delta F \right] \Delta Z + A_1 F^2 \left[ 1 + \left( \frac{2Z + \Delta Z}{L_k} \right)^2 \right] - \left[ \frac{2Z}{L_k} \right]^2$	
$x_{21}^{(1)}$	$\sigma_{\Delta F} = \Delta U / 6 = (0,5 L H_0 + \Delta L_{opt} + m \bar{L}) / 6$	$w_{21}^{(1)}$	1	
$x_{22}^{(1)}$	$\sigma_{\Delta F} = \Delta I / 6 = (0,5 L H_0 + \Delta L_{opt} + m \bar{L}) / 6$	$w_{22}^{(1)}$	1	
$x_{23}^{(1)}$	$\sigma_{\Delta F} = \delta_{\Delta F} \times L / 600$	$w_{23}^{(1)}$	1	

$x_{24}^{(0)}$	$\sigma_{\gamma} = \delta_{\gamma} \times \bar{\gamma} / 600$	$w_{24}^{(0)}$	1
<b>Нестабільності властивостей загівки</b>			
$x_{25}^{(0)}$	$\sigma_{\gamma} = (A_{acc} - A_{um}) / 6 = \Delta A / 6$	$w_{25}^{(0)}$	1
$x_{26}^{(0)}$	$\sigma_{T_n} = 4A \sqrt{(4\pi)^3} e^{-2} [4\pi / kd_0^2] \sigma_{T_n}$	$w_{26}^{(0)}$	$\left[ \frac{1}{3} (3k^2 a_0^2 / 4D V_{II}^2)^{1/2} \right]$
$x_{27}^{(0)}$	$\sigma_{T_n} = 4A \sqrt{a_0 / \pi^3} [t / kd_0^2] \sigma_{T_n}$	$w_{27}^{(0)}$	

**Висновки та рекомендації.**

1. Як для імпульсного, так і для безперервного режиму опромінення ширина зони зміцнення б більш чутлива до нестабільностей вхідних параметрів процесу  $\bar{X}^{(2)}$ , чим глибина z (рис 2 а та б).
2. Очікуваний зворотній зв'язок між виходом переспетрона NET або його складових шарів NET<sub>1</sub>, NET<sub>2</sub>, NET<sub>3</sub> (рис 1) та відповідних синангічних зв'язків (вхід 1, вхід 2 та вхід 3), який можна використати для мінімізації середньоквадратичної похибки між виходом мережі та встановленим критерієм  $E = 0,5(OUT - [OUT])^2$ , в складних переспетронах не використовується тому, що при впливі на рівень синангічних коефіцієнтів зміниться технологічний регламент, тобто режим виконання операції та розміри її результати  $V_{вож}$  та  $Z_{вож}$  (рис 2 та 3).
3. Наведений аргумент свідчить, що для обраної цілі використання ШНМ - прогнозування результату операції - оптимізація її внутрішніх параметрів підналагодженням (навчанням) під конкретну задачу неможлива, але за допомогою функції помилок можна оцінити якість роботи нейронної мережі за аналізом рівня суми квадратів помилок.

**Список літератури:**

1. Котляров В.П. Оцінка можливості використання шпунтих нейронних мереж при проектуванні операцій лазерної обробки. В.П. Котляров, Т.П. Ворончак // Матеріали конференції молодих вчених та студентів «Інновації моделювання-машинобудування» Секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології», Київ: НТУУ «КПІ», - 2016. - С.3-7
2. Котляров В.П. Нестабільність розмірів шару лазерного змінивання деталей гірничих машин. В.П. Котляров та ін. // Вісник КПІ (серія "Трибуна"), - 2000. - № 2. - С. 81-86
3. Котляров В.П. Застосування шпунтих нейронних мереж для прогнозування якісних показників операцій лазерної обробки. В.П. Котляров, В.Л. Дубнюк, Т.П. Ворончак // Вісник НТУУ «КПІ» серія «Машинобудування» - 2015. - №.3 (75) С. 104-114

УДК 621.375.826:621

**Котляров В.П., д.т.н. проф., Кияченко О.М.**  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**СПРОЩЕНИЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТУВАННЯ ОПЕРАЦІЙ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ**

Традиційний алгоритм впровадження операцій лазерної обробки [1], як і операцій іншого виду, включає етапи їх технологічної підготовки щодо забезпечення технологічним регламентом і оснащенням, і базується на аналітичному або експериментальному дослідженні процесів, відповідальних за досягнення технологічних результатів. Чим складніша технологічна задача (при збільшенні кількості показників, за якими оцінюється результат обробки), тим більше потрібно знань, компетенцій та зусиль для реалізації цих етапів. Для операцій із



обмеженим набором фізичних явищ, які відповідають за технологічний результат, наприклад нагрівання матеріалу до визначеної температури при термічному впливі на його структуру в зоні обробки (операції загартування, відпау, нормалізації) без порушення вихідних меж тіла заготовки або при їх тимчасовому руйнуванні шляхом розплавлення з тієї ж метою, а також для формування зон загального розплавлення та затвердіння матеріалу декількох заготовок (операції зв'язування), можна використовувати методи приближеного аналітичного або числового рішення рівняння теплопровідності твердих тіл [1] для прогнозування розмірних результатів опромінення лазерним променем поверхонь заготовки або визначення режимів їх отримання. Операції з лазерним опроміненням заготовки, при реалізації яких крім нагрівання матеріалу в зоні обробки до змінення вихідного стану виконується переміщення або виділення суттєвої його маси для створення технологічного ефекту (формування розмірного елементу: отвору, лунки, пазу, щілини або розрізання заготовки на складові), теж можуть бути режимне забезпеченіми внаслідок аналізу теплового балансу в зоні обробки або ще більш спрощеними та обмеженими рішеннями рівняння теплопровідності [2].

Збільшення кількості та рівня вимог до результатів операції, особливо якісного характеру (точності розмірів та форми оброблювального елемента заготовки, шорсткості його поверхонь), які не можуть бути описані аналітичними рівняннями будь-якого рівня спрощення фізичних моделей процесу, ускладнюють процедуру проектування операції внаслідок потреби в експериментальних досліджень процесів створення технологічного ефекту. Причому у випадку обмеження рівня декількох показників якості операції задача проектування потребує додаткових компетенцій (знання та уміння), які торкаються не тільки методики моделювання процесу відносно усіх критеріальних показників, а і шляхів перетворення багатокритеріальної задачі в однокритеріальну.

Загальною особливістю використання лазерної технології як в державному, так і в приватному секторі сучасної економіки України є відсутність систематизованих знань, умінь та навичок технологів для режимного та матеріального оснащення операцій тому, що ними працюють випадкові особи, які не мають спеціальної професійної підготовки, тобто інженерне супроводження технологічної операції відсутнє. Але це не зменшує потреби в ефективних методах формування виробів, особливо із сучасних матеріалів [3], тому актуальним є завдання створення спрощеної, але ефективної методики проектування операцій лазерної обробки та їх технологічного оснащення.

Внаслідок того, що розмірні показники в різній мірі, але для всіх типів технологічних операцій враховуються в аналітичних методиках визначення технологічного регламенту цей етап проектування можна використовувати в незмінній формі. Якщо для операцій, які базуються лише на нагріванні зони опромінення до плавлення матеріалу заготовки, реалізація визначеного технологічного регламенту не викликає труднощів, то операції прецизійної обробки (отворів, лунк, пазів тощо) проектується з умовою використання стабілізованого енергетично і в часі імпульсного режиму опромінення, створення якого потребує нестандартних рішень, в тому числі, інструментальних. На цій підставі розглянемо етап режимного забезпечення лише для операцій, реалізація якого вимагає матеріальної підтримки.

#### 1. Операції прецизійної обробки мікро отворів, лунк, пазів та різів.

У використанні методики визначення режимів опромінення [2] передбачено використання імпульсного опромінення у вигляді серії (пачки) мікро імпульсів (пічків) тривалістю від декількох мікросекунд до наносекунд, такий режим створюється при імпульсному або безперервному збудженні активного середовища та періодичній модуляції добротності резонатора випромінювача. Нами запропоновано дві конструкції модуляторів (рис 1), застосування яких забезпечує 100% модуляцію інтенсивності імпульсів вільної генерації та безперервного випромінювання в одномодовому або багатомодовому режимах. Для обробки прецизійних отворів за схемою трепанції (а), формування пазів (б, в) та різів (б, г) використовуються багато імпульсний режим опромінення з перекриттям окремих зон обробки (рис 2).

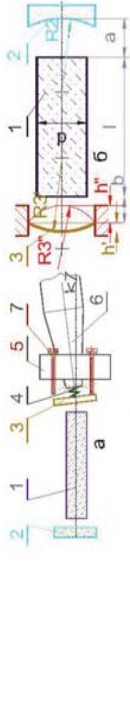


Рис 1.- Схеми модуляторів добротності резонатора з плоских (а) та сферичних (б) дзеркал: 1-активний елемент, 2,3-дзеркала резонатора, 4-пружина зв'язки, 5-вузол юстирувальних гвинтів 7, 6-ультразвукова головка.

Щоб досягти заданої якості крайки оброблювального елемента ( $R_{\Sigma}$ ) або точності розмірних показників (похибки діаметра отвору  $d$  або ширини пазу, різ  $[\Delta b]$ ) необхідно у обраних режимах підготити деякі з них ( $V$ -швидкість подачі інструменту,  $d_0$ -діаметр променю на поверхні заготовки та частоту надходження  $f$  імпульсів (пічків)):

$$V \leq f \cdot d_0 \left[ 1 - \left( \frac{R_{\Sigma}}{d_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$\Delta b = b \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{V}{\eta f b} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq [\Delta b] \quad (2)$$

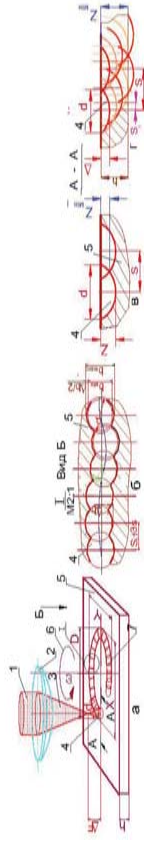


Рис 2. - Схема конугурної лазерної обробки: 1-лазерний промінь, 2-лінза, 3-каустика променю в лінії 2, 4-зона опромінення, 5-заготовка, 6-крутосеканування

Для додаткового підвищення точності розмірів оброблювальних елементів, особливо в заготовках із теплопровідних металів необхідно обмежити розтання тепла із зони руйнування. Для сплавів, здатних до структурних перетворень у твердому стані (залізовуглецеві сплави, деякі види латуні) рекомендовано лазерну обробку виконувати після термічної, а в разі відсутності останньої в технологічному процесі виготовлення виробу – створювати зміщені та подрібнені структури в зоні розташування оброблювального елемента [4]. В заготовках із інших матеріалів можна зменшити розтання тепла із зони руйнування формуванням теплового зав'язу навколо зони опромінення рис 3 [5]. Її створює периферійна частина променю, яка за допомогою двох лінз (з рідинні під час обертання стакану 3 та його дна – лінзи 2. Змінюючи значення куткової швидкості  $\omega$  можна пристосовувати об'єкти до різних завдань обробки.

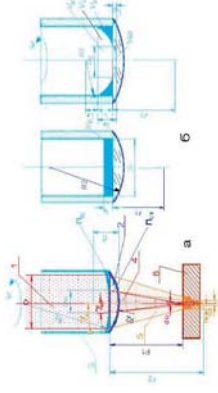


Рис 3.- Об'єкти для обробки отворів (лунк) в заготовках із теплопровідних матеріалів: 1-промінь, 2-лінза, 3-стакан, 4-центральна частина променя, 5-його периферія, 6-заготовка

## 2. Операції з низьким рівнем інтенсивності в зоні опромінення.

Стабільність результатів таких операцій, як поверхневого гартування, зварювання, наплавлення матеріалу, залежить від стабільності обраних рівнів технологічних параметрів інструменту і гарантується станом лазера, але суттєво впливають на результати обробки також умови опромінення та властивості заготовки, які впливають на формування теплового джерела при опроміненні. Останнє має особливу вагу в разі неретуглярності її поверхні та при низькому рівні інтенсивності в технологічній операції. Відомі методи підвищення поглинальної здатності поверхні заготовки не гарантують стабільного рівня перетворення променистої енергії в теплову. Пропонується методика та пристрій для опромінення заготовки з підтримуваним кількістю енергії (потужності) випромінювання, яку поглинає заготовка, на постійному рівні, визначеному технологічним регламентом. Методика базується на оперативному визначенні рівня реальної поглинальної здатності її поверхні безпосередньо в зоні опромінення та вздовж напрямку відносного пересування променя  $S$  шляхом активного контролю рівня відбитої від поверхні енергії (потужності) фотоприймачами 8 та залежним змінням швидкості  $S$  (рис.4).

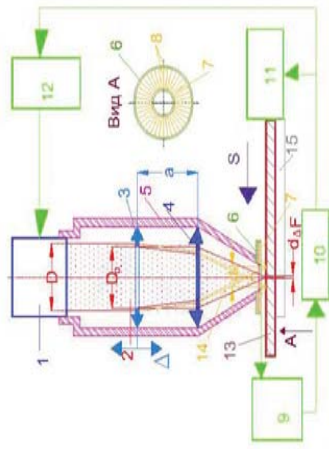


Рис. 4. - Пристрій для опромінення поверхні заготовки з оптимізацією рівня поглинання енергії: 1-лазер, 2-промінь, 3-світлова ліназа, 4-об'єктив, 5-корпус, 6-вимірювач, 7-набір фотоприймачів, 8-два приймачі за холдом подачі, 9-П-прилади

## Список літератури:

1. Котлярів В.П. Алгоритм проектування та технологічне забезпечення операцій лазерного поверхневого гартування ріжучих інструментів. В.Л.Дубноук, В.П. Котлярів // Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування. - №3 (72), 2014. - С.161 – 167.
2. Steffen J. *Prozessoptimierung* blakus materialabtragenden bearbeitungs problemen ar Laserstrahlung. // Teinverktech. un messtechn., 1979, v.87, №7, P. 309-320
3. Kotlyarov V. *Special Features of Laser Processing of Layered Materials*. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2013, Vol. 49, No. 2, pp. 152–160. © Allerton Press Inc., 2013. (USA)
4. Патент 42516 України МПК<sup>7</sup> B23K 26/06. *Спосіб лазерної обробки отворів в металевих заготовках по заявці* - № п 2009 00916 від 06.02.2009, оп. 10.07.2009 б. №13
5. Патент 74855 України МПК<sup>7</sup> B23K 26/00. *Об'єкти для лазерної обробки*. по заявці - № п 2012 05710 від 10.05.2012, оп. 12.11.2012, б. №21.

## УДК 621.375.826:621

Кривцун І.В., проф., Головко Л.Ф. проф., Шевченко С.Б., аспірант, Слободянюк В.П., інж. КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ДРОТУ

Мідне покриття має значну кількість дефектів та не може у певній мірі забезпечити своє функціональне призначення. Дефекти покриття обумовлені двома основними причинами – недостатньо якісною обробкою поверхні дроту перед нанесенням покриття та великою кількістю неметалевих включень у заготовці дроту. Висока концентрація оксидів заліза на верхній дроту кінцевого діаметру обумовлена їх послідовним виходом на поверхню при проходженні волок. Полірування дроту суттєво не впливає на вміст оксидів у поверхневому шарі.

Для підвищення однорідності мідного покриття вперше запропоновано перед гальванікою застосовувати обробку поверхні проволочки лазерним випромінюванням з довжиною хвилі  $\lambda=10,6$  мкм, що добре поглинається діелектриками (оксидами й ін.).

Математичним моделюванням визначені умови лазерного опромінювання, при яких відбувається повне випаровування та руйнування оксидних включень і не змінюються механічні властивості дроту.

Лазерне опромінювання практично повністю видаляє оксиди, що містяться в поверхневих дефектах зварювального дроту і які не завальцовані його металом. Звільнені від оксидів об'єми при наступному нанесенні покриття заповнюються міддю. Механізм видалення оксидів – різке збільшення об'єму оксиду, його крихке руйнування й наступне часткове випаровування внаслідок надшвидкісного лазерного нагрівання.

Для підвищення якості очистки зварювального дроту від оксидів вперше запропоновано спеціальна система фокусування, яка включає комплекс плоских, конічних і тороїдальних дзеркал, що послідовно перетворюють й формують кільцевий пучок, який на завершальному етапі фокусується, охоплюючи поверхню дроту. Для стабілізації положення дроту відносно тороїдального фокусувального дзеркала й осі променя запропоновано спеціальні оригінальні механічні пристрої.

У цілому лазерний комплекс включає колоду, на якій розміщені система перетворення й корегування лазерного випромінювання, дві системи роликів напрямних, призначених для корегування положення зварювального дроту точно відносно вісі системи фокусування та сприйняття механічного навантаження з її боку. Для завдання точного положення осі дроту відносно блоку роликів напрямних входять дві пари підшипників, які попарно забезпечують його фіксацію у вертикальному та горизонтальному напрямках. Один з кожної пари роликів має можливість зміщуватись на величину  $\pm 1$  мм відносно іншого. Підтягання дроту відбувається пружинами розтягнення, що встановлені на осі підшипників. На колоні також розташовано вузол додаткового поворотного дзеркала з механізмами юстирувальних переміщень.

Запропонована система лазерної очистки зварювального дроту від оксидів призначена для вбудови в існуючу автоматизовану лінію його виготовлення.

## УДК 621.9

Клочко<sup>1</sup> А.А., д.т.н., проф., Рябченко<sup>2</sup> С.В., к.т.н., ст.науч.сотр., Анциферова<sup>1</sup> О.А., асп.,  
Перминов<sup>1</sup> Е.В., магистр.

1 - Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина  
2 - ИСМ им. В.Н.Бакуля НАН Украины, г. Клев, Украина

### ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ КОМБИНИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Зубчатые колеса являются, в настоящее время, основными элементами многих приводных механизмов, в которых требуется осуществлять передачу при определенных скоростных и силовых условиях. Непрерывно повышаются требования по обеспечению качества обработки зубчатых колес. Кроме высокой надежности, долговечности и точности высокие требования предъявляются к свойствам и характеристикам поверхностного слоя зубьев зубчатых колес, формирующимся на окончательных этапах их изготовления [1, 2].

Разрабатываются новые методы обработки зубчатых венцов, совершенствуются уже существующие методы, а также внедряются в производство новое оборудование и материалы с тем, чтобы в результате обработки получить соответственно сформированное состояние поверхностного слоя зубчатых колес в зависимости от эксплуатационных нагрузок. Поэтому значительно повышается интерес к окончательной обработке зубчатых колес, в том числе, особенно к шлифованию зубьев. Однако, к сожалению, необходимо учитывать тот факт, что значительная часть исследований по формированию поверхностного слоя зубьев зубчатых колес во время серьезной проблемы в формировании поверхностного слоя зубьев зубчатых колес во время реализации технологического процесса является недостаточность исследований, характерных изменений этого состояния в различных процессах обработки, особенно на окончательных ее этапах. В связи с этим, понятным является факт целесообразности проведения таких исследований, тем более что на формирование поверхностного слоя, например, во время шлифования, влияет значительное количество факторов, а состояние этого слоя подвергается постоянным изменениям. Поэтому трудно определить обобщающую характеристику поверхностного слоя для данного материала в зависимости от вида обработки, инструмента, условий обработки и т.п. [3, 4, 5].

С одной стороны, проводятся исследования по формированию конкретного слоя после различных технологических процессов, способов обработки и изготовления, с другой же стороны, возникает вопрос, в какой мере проведенные до настоящего времени исследования позволяют рассчитывать на получение требуемых свойств и характеристик состояния поверхностного слоя. Проблема получения (обеспечения) требуемого качества поверхности, которое определяется состоянием поверхностного слоя, является сложной, так как формирующийся в технологическом процессе указанный слой не изменяется сознательно, целенаправленно (управляемо) главным образом потому, что этот процесс имеет случайный характер, а кроме этого, является динамичным. Не всегда также известно влияние многочисленных факторов, влияющих на формирование этого слоя. Кроме того, исследуемые свойства не всегда соответствуют тем, которые требуются по условиям эксплуатации и отличаются от свойств, ожидаемых потребителем. Не совсем также ясно, какими характеристиками качества должен обладать поверхностный слой, чтобы его стабильность во время контакта совместно работающих элементов была постоянной и оптимальной.

Шлифование позволяет достигать заданную конструкцию точность зубьев зубчатого колеса, гарантируя одновременно высокое качество зубчатого венца, что не означает, что этот процесс также одновременно способствует достижению требуемого состояния поверхностного слоя. Это связано с наличием во время реализации процесса шлифования многочисленных факторов, оказывающих влияние на формирование свойств и характеристик по-

верхностного слоя. Следует отметить, что речь идет, прежде всего, о таких зубчатых колесах, которые подвергались термической или термохимической обработке, и имели твердость свыше 30HRC. Поэтому процесс шлифования должен осуществляться таким образом, чтобы не произошло, прежде всего, отпуск шлифованных поверхностей, отсутствовали прижоги, сохранялась высокая микротвердость поверхностного слоя и т.п. Следует заметить, это изменение состояния поверхностного слоя в процессе любого технологического воздействия зависит не только от условий осуществления самого процесса, но и от конструктивных особенностей детали (зубчатого колеса), которые совместно с последующей обработкой определяют формирование состояния поверхностного слоя готовой детали. Поэтому предпосылки исследования новых направлений комбинированного формообразования поверхностного слоя зубчатых колес определяются прежде всего в локализации температуры в зоне контактирования абразивного шлифовального круга и эвольвентной поверхности зубчатого колеса за счет придания процессу скорости поверхностного зубофрезерования. Исследование процесса комбинированного формообразования поверхностного слоя зубчатых колес наряду с повышением производительности зубошлифования обеспечивает стабилизацию поверхностного слоя зуба зубчатого колеса в направлении уменьшения температуры в зоне обработки, повышению стойкости шлифовального круга, уменьшению числа правок, уменьшению засаливания кругов.

Процесс формирования требуемого, по условиям эксплуатации, состояния поверхностного слоя зуба зубчатого колеса рассматривается в аспекте комплексного воздействия конструкторских и технологических факторов, определяющих, в конечном счете, долговечность высокоскоростных, высокоточных цилиндрических зубчатых колес 5-6 степени точности по ГОСТ 1643-81.

#### Список литературы:

1. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механооборочного производства / А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с. – ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN-9783659691720;
2. Методология разработки модели управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. Мирошенко, А. А. Клочко // Сборник научных трудов «Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении: сборник научных трудов [Текст] / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Краматорск: ДТМА, Ирбит: ЗАО «ОНИКС», Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). 2014. – С. 96–117.;
3. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах. Т. 2: учебное пособие / А.В. Беловол, А.А. Клочко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой. – под редакцией А.Н. Шелковой // Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – 323 с. □;
4. Мирошенко Е. В., Создание современной инфраструктуры оснащения станков с ЧПУ сборным модульным инструментом / Е. В. Мирошенко, А. А. Клочко //Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку матеріалів IV Міжнар. наук.-техн. конф., 5–8 червня 2006 р. / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДТМА, 2006. – С. 72.;
5. Мирошенко Е. В. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров агрегатно-модульных резцов на прочность и износоустойчивость / Е. В. Мирошенко, А. А. Клочко, О. Я. Белицкая //Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск: ДТМА, 2004. – Вып. 16. – С. 13–17.,

## УДК 621.9

Пермяков<sup>1</sup> А.А., д.т.н., проф., Шелковий<sup>1</sup> А.Н., д.т.н., проф., Ключко<sup>1</sup> А.А., д.т.н., проф., Охрименко<sup>2</sup> А.А., д.т.н.

1 - Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина  
2 – КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Зубчатые колеса являются, в настоящее время, основными элементами многих приводных механизмов, в которых требуется осуществить передачу при определенных скоростях и силовых условиях. Непрерывно повышаются требования по обеспечению качества обработки зубчатых колес. Кроме высокой надежности, долговечности и точности высокие требования предъявляются к свойствам и характеристикам поверхностного слоя зубьев зубчатых колес, формирующимся на окончательных этапах их изготовления.

С целью повышения нагрузочной способности и износостойкости цилиндрических зубчатых колес предложен термодиффузионный способ насыщения рабочих поверхностей зубчатых колес дисульфидом молибдена с дальнейшей обработкой в среде жидкого азота. При этом используется эффект совместного воздействия механической энергии и химических процессов в различном их сочетании.

Термодиффузионный способ насыщения рабочих поверхностей зубчатых колес дисульфидом молибдена с дальнейшей обработкой в среде жидкого азота обеспечивает изменение физико-химических свойств поверхностных слоев обрабатываемых деталей.

Публикации о применении дисульфидов, селенидов, теллуридов, молибдена, дисульфидов вольфрама, тантала, титана и других металлов в качестве твердых смазок появились давно. Однако вопросы применения дисульфидов молибдена ( $MoS_2$ ) до сих пор вызывают наибольший интерес [1, 2].

Рассмотрены свойства дисульфида молибдена и возможности его применения в качестве основы самосмазывающего средства при формировании покрытий. По классификации, предложенной Кемпбелом, дисульфид молибдена как и графит, слюда, тальк, нитрид бора, старгар-цинк относятся к группе твердых смазок, кристаллическая решетка которых имеет слоистую структуру. Атомы каждого слоя связаны между собой прочными химическими связями, отдельные слои связаны между собой слабыми молекулярными силами, что обеспечивает легкость скольжения по плоскости спайности. Толщина одного элементарного слоя  $MoS_2$  равна 6,25 А. Пленка дисульфида молибдена толщиной 0,025 мкм состоит из 40 слоев с 38 плоскостями скольжения между ними. Высокая адгезия дисульфида молибдена к металлам обусловлена прочными молекулярными связями, образующимися атомами серы с металлом; строение кристаллической решетки обеспечивает наличие для смазочной слоистой решетку в форме призматического шестигранника.

Дисульфид молибдена устойчив к температуре от минус 80 до плюс 450<sup>0</sup>С, температура плавления – 1185<sup>0</sup>С. Допустимая динамическая нагрузка более 1500 кг/см<sup>2</sup>, а статическая – свыше 30 000 кг/см<sup>2</sup>. Пленка дисульфида молибдена толщиной 1 мкм содержит 1631 скользкую поверхность. Наличие слоев двух различных атомов в структуре дисульфида молибдена создает условия легкого скольжения пластинок [2]. Кристаллы дисульфида молибдена, жирные на ощупь, имеют голубовато-серый цвет, металлический блеск.

Коэффициент трения уменьшается при увеличении нагрузки, что связано с увеличением параллельности слоев. После обработки коэффициент трения стабилизируется. Соединение между атомами молибдена и серы очень прочное, чем объясняется повышенная устойчивость этого соединения к деформации и его исключительная химическая и термиче-

ская стабильность. Дисульфид молибдена устойчив почти против всех растворителей. Также он обладает антикоррозионными свойствами, препятствует окислению деталей под воздействием влаги, паров, газов.

При термодиффузионном способе насыщения рабочих поверхностей зубчатых колес с последующим зацементированием в жидком азоте эвольвентная поверхность сначала покрывается слоем дисульфида молибдена, затем вещество диффундирует внутрь, и постепенно с сохранением формы получается слоистое фуллереноподобное или нанотубулярное образование.

Нанотубулярные дисульфиды молибдена в этом отношении обладают еще более перспективными характеристиками. Внедрение наноразмерных структур термодиффузионным способом насыщения рабочих поверхностей зубчатых колес с последующим зацементированием в жидком азоте показало, что с уменьшением размера зерна от 1 мкм до 2 мкм объемная доля межзеренного вещества увеличивается до 88%, это позволяет получать покрытия с уникальными свойствами. Например, их микротвердость в 2-7 раз выше, чем твердость крупнозернистых покрытий, прочность в 1,5-2 раза выше, а при уменьшении размера зерна от 10 мкм до 10 нм скорость износа покрытия уменьшается в 10 раз.

С целью повышения стойкости колес после диффузионного насыщения было предложено перед обработкой зубчатых колес производить его нагрев с выдержкой при температуре 240...260<sup>0</sup>С в печи, а после обработки производить выдержку в целочной ванне при температуре 165...170<sup>0</sup>С.

Последовательность насыщения зубчатых колес из цементуемой стали дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в среде жидкого азота показана на рис. 1.

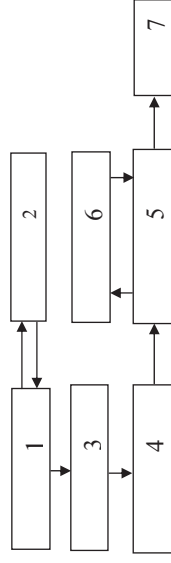


Рис. 1 - Схема насыщения зубчатых колес дисульфидом молибдена термодиффузионным способом с последующей обработкой в жидком азоте: 1 - обезжиривание инструмента, промывка в холодной ( $T=20^{\circ}C$ ) и горячей воде ( $T=40...60^{\circ}C$ ), сушка в потоке нагретого воздуха в специальных шкафах; 2 - травление инструмента с целью удаления дефектных покрытий; 3 - диффузионное насыщение в глицирине при  $T=180...200^{\circ}C$  добавляется 50...60 г дисульфида молибдена на 1000 г глицирина, выдержив в растворе 2 ч при  $T=200+10^{\circ}C$ ; 4 - термическая обработка в печи при  $T=240...260^{\circ}C$ ; 5 - целочная обработка с последующей промывкой в холодной и горячей воде; 6 - обработка в среде жидкого азота; 7 - консервация

При нагреве зубчатого колеса из цементуемой стали в слабо окислительной среде образуется поверхностный слой, прочно связанный с металлом, который заменяет процесс насыщения дисульфидом молибдена механическим натиранием. В этом случае прочный поверхностный слой, обладающий повышенной адгезией осаденного слоя с металлом образуется за счет полного разложения глицирина и взаимодействия продуктов его разложения с дисульфидом молибдена [3, 4, 5].

При выборе температуры нагрева учитывались свойства глицирина. Как известно, температура разложения глицирина 260<sup>0</sup>С. При его разложении образуются различные виды производных: глицириновый альдегид и диоксацетон, что в данных условиях термообработки способствует появлению смолистых веществ, которые в процессе спекания и коксования образуют прочно связанные с металлом защитные пленки. Защитные пленки с дисульфидом молибдена увеличивают стойкость зубчатых колес.

Последующая обработка изделий в щелочной ванне позволяет удалить нестойкие частицы поверхностного слоя, размягчить его, что устраняет разрушение поверхностной пленки при обработке в среде жидкого азота и образует твердую оболочку, повышающую прочность сцепления покрытия с поверхностью инструмента при возникновении сверхвысоких давлений в среде жидкого азота. В процессе проведения экспериментов были опробованы различные составы и режимы работы щелочной ванны.

Полученные результаты показали значительное повышение износостойкости зубчатых колес от 2 до 4 раз в зависимости от условий эксплуатации. Покрытия на основе дисульфид молибдена с внедренными наноразмерными структурами термодиффузионным способом насыщения рабочих поверхностей зубчатых колес с последующим зацементированием в жидком азоте открывают уникальные возможности для получения нового уровня свойств: высокой прочности, твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, достаточно высокой пластичности, сохранения при этом высокие эксплуатационные свойства высокоточных слоистых цилиндрических зубчатых колес.

#### Список литературы:

1. Стабілізація трибологічного контактування у зубчастих передачах великомодульних методиками / О. О. Ключко, М. І. Гасанов, С. В. Басова, Д. О. Кравченко // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні. Тези доп. V-ої Всеукраїнської науково-технічної конф., 8-12 лютого 2016 р. – НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – С. 50–51.
2. Пугина Л.И. Дисульфид молибдена / Л.И. Пугина, М.Д. Сивявская, И.М. Максимчук. – Киев: «Наукова думка», 1968.
3. Вибір і призначення систем параметрів поверхневого шару циліндричних великомодульних зубчастих колес, що визначають їх експлуатаційні властивості / Е. В. Мироненко, О. М. Шелковий, О. О. Ключко, О. М. Кравцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». : зб. наук. пр. : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. – 2013. – №772. – С. 207–213.
4. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А.А. Ключко, Е.В. Мироненко, О.А. Анциферова, Л.А. Макарова., В.Е. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – Вып. 37. – С. 105–112.
5. Технологічне забезпечення експлуатаційних параметрів циліндричних зубчастих передач при апроксимативному рішенні контактної-гідродинамічних задач смазки // В.Д. Ковалев, Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковий, А.А. Ключко, Д.А. Кравченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2015. – №4 (1113). – С. 11–19.

УДК 621.9

**Равская<sup>1</sup> Н.С., д.т.н., проф., Охрименко<sup>1</sup> А.А., д.т.н., Ключко<sup>2</sup> А.А., д.т.н., проф., Гасанов<sup>2</sup> М.И., к.т.н., проф.**

<sup>1</sup> - КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина  
<sup>2</sup> - Национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина

#### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ВЫБОРА И НАЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПРИ СКОРОСТНОМ ЛЕЗВИЙНОМ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ

Технологические основы выбора и назначения параметров лезвийной обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя закаленных зубчатых колес устанавливает оптимальные условия резания, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска при зубофрезеровании всех зубьев фрезы [1, 2, 3, 4]. Технологические параметры выбора и назначения параметров обработки распространяется

для зубофрезерования цилиндрических зубчатых колес улучшенных с твердостью 220...320HB и закаленных HRC46...63.

Регламент устанавливает геометрические параметры червячных модульных и специальных скоростных модульных дисковых фрез (рис. 1) во взаимосвязи с технологическими режимами резания и параметрами поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес.

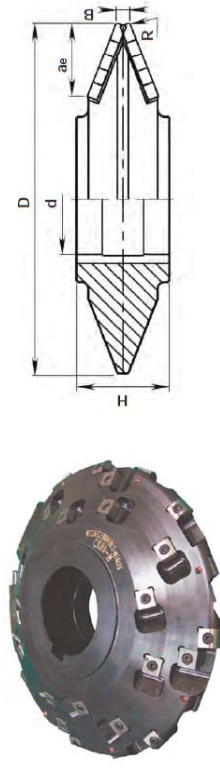


Рис. 1 - Специальные скоростные сборные модульные дисковые фрезы

Цель разработки технологического регламента выбора и назначения параметров лезвийной обработки при зубофрезеровании закаленных цилиндрических зубчатых колес является:

1. Обеспечение высокой производительности при максимальной стойкости инструмента;
2. Технологическое обеспечение параметров поверхностного слоя цилиндрических зубчатых колес при максимальной обрабатываемости;
3. Гарантирование высокой технологической стабильности зубообрабатывающего оборудования, дорогостоящего инструмента при обработке цилиндрических зубчатых колес;
4. Програмное обеспечение по выбору и назначению технологического регламента параметров обработки при зубофрезеровании.

Научные основы технологического регламента выбора и назначения параметров обработки при зубофрезеровании базируются на основополагающих теоретических положениях теории о трении, технологии машиностроения и теории резания.

Процесс зубофрезерования (рис. 2) при врезании первого зуба фрезы скольжении зуба фрезы 1 температура в зоне резания резко возрастает, что является одной из причин повышенного износа фрез по задним поверхностям. По достижении определенной толщины слоя  $a_1$  на угле скольжения  $\psi_c$  процесс пластической деформации переходит в резание.

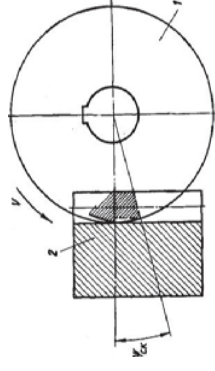


Рис. 2 - Схема зубофрезерования зубчатых колес

В процессе снятия стружки деформация слоев обрабатываемого материала возникает не только в области плоскости скалывания стружки, но и впереди зуба фрезы и под плоскостью резания (рис. 3).

Металл, подминаемый режущим лезвием, в стружку не переходит. Деформированный слой после прохождения режущего лезвия определяет глубину налета ( $H_{нр}$ ).

Трение поверхностных слоев трущихся материалов имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Трение обусловлено объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей, возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей.

Если рассматривать внедрившийся элемент - индентор, который, перемещаясь в тангенциальном направлении, деформирует нижележащий материал как режущее лезвие с радиусом  $\rho$ , а глубину внедрения как  $a_i$ , то глубина относительно внедрения может быть представлена в виде  $\frac{a_i}{\rho}$  [5, 6, 7].

Угол скольжения  $\psi_{ск}$  соответствует пластическому отгесенению (передформированию) материала, когда материал обтекает индентор (инструмент) без отгесенения от основной массы.

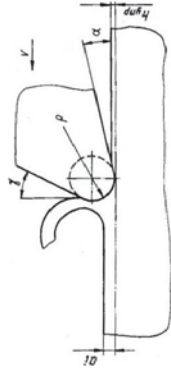


Рис. 3– Схема врезания зуба фрезы при зубофрезеровании зубчатых колес

Учитывая, что начальная толщина срезаемого слоя при формообразовании зубьев зубчатых изделий определяется как

$$a_i = S_z \cdot \sin \psi_{sk} \cdot \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $S_z$  – подачка на зуб;  $\psi_{ск}$  - угол скольжения при котором начинается резание;  $\varphi$  - угол профиля фрезы в рассматриваемой точке

Таким образом, начало резания при смазке начинается при  $a_i > 0.3/r$ . Тогда, задаваясь значением  $S_{zmin}$ , определяется угол скольжения  $\psi_{ск}$ .

Скольжение происходит на определенном угле скольжения  $\psi_{ск}$  до тех пор, пока пластические деформации не перейдут к микрорезанию непосредственно к резанию, т.е. когда толщина среза не достигнет определенного значения глубины, относительно внедрения режущим инструментом, имеющим радиус округления режущей кромки  $\rho$ .

Использование разработанного технологического регламента по выбору и назначению параметров обработки при зубофрезеровании с учетом обеспечения требуемых параметров поверхностного слоя зубчатых колес устанавливает оптимальные условия резания, при которых обеспечивается полное участие в съеме припуска всех зубьев фрезы.

Определение минимальных углов скольжения при обработке зубчатых крупномодульных колес методом фрезерования, исходя из физико-химических процессов механического трения, позволяет значительно повысить эффективность процесса формообразования зубьев и эксплуатационные свойства их поверхностей.

#### Список литературы:

1. Методология разработки модели управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Сборник научных трудов «Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении: сборник научных трудов [Текст] / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Краматорск: ДГМА, Ирбит: ЗАО «ОНИКС», Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю. М. Соломенцев. 2014. – С. 96–117. ISBN 978-5-906703-03-3.
2. Шелковой А. Н. Анализ технологических методов, обеспечивающих эксплуатационные свойства контактирующих поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой,

Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2014. – Вип. 151. – С. 207–214.

3. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 479 с. ISBN 978-966-379-667-3.

4. Шелковой А. Н. Усовершенствование конструкции зубчатых передач / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Н. С. Равская, С. Воробьев, С. Ю. Палаших // Качество, стандартизация, контроль, теория и практика: Материалы 14-й Международной научно-практической конференции, 23–26 сентября 2014 г., г. Одесса. – Киев : АТМ Украины, 2014. – С. 137.

5. Исследование влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Шелковой, А. А. Ярошенко, С. Ю. Палаших // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – Вып. 34. – С. 19–25.

6. Анализ схем резания и технологические оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Крайнов // Вісник Національного технічного університету «Харківської політехнічної інститути». Збірник наукових праць. Серія : Технологія в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», – 2014. – № 42(1085). – С. 7–19.

7. Анализ параметров поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Крайнов // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів III-ї Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2-6 лютого 2015 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – С. 103.

#### УДК 621.9.048

Ключников Ю. В., к.ф.-м.н., Блощицын М.С., к.т.н., Складар А.В.  
КПШ імені Ігоря Сікорського, Київ, Україна

#### ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РОЗМІРНОЇ ОБРОБКИ ДУГОЮ В РІДИНІ

Розмірна обробка дугою в рідині [1] полягає в тому, що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить між електродом-інструментом (ЕІ) і електродом-заготовкою (ЕЗ) в поперечному потоці рідини при динамічному тиску потоку не менше 1...2 кПа. Отриманий таким чином дуговий розряд має високі енергетичні характеристики, достатні для локального руйнування металу за рахунок випаровування і краплинного викиду розплаву, і переміщається по поверхні електродів, колюючи, таким чином, на заготовці профіль ЕІ, а потім рідинні відливає метал із зони обробки. Розмірна обробка дугою застосовується для обробки різноманітних фасонних порожнин кувальних штампів, прес-форм, для прошивки різноманітних глухих і наскрізних, круглих і фасонних отворів; для обробки листових деталей будь якої товщини з будь яких металів і таке інше.

З метою підвищення точності і зменшення шорсткості, в роботі запропоновано проводити розмірну обробку дугою в чистовому режимі з накладанням ультразвукових коливань. Так, якщо припустити, що обробка проводиться при певному оптимальному зазорі, мають місце деякі відхилення в обидва боки: збільшення і зменшення зазору. Тоді, накладання ультразвукових коливань в інтервалі між оптимальним і максимальним зазором дозволить проводити цю обробку на більш м'яких режимах (без стрибків струму). Це призведе до зменшення шорсткості, збільшення точності і до деякого зниження продуктивності. Для забезпечення коливань електрода запропоновано використовувати ультразвуковий і'зоелектричний перетворювач (рис.1), розрахунок якого проводиться відповідно до методики [2]. Розмір накладок  $l_1$  визначається із співвідношення (1)

$$c \lg \frac{2\pi f_0 l}{c} = \rho_1 c_1 S_1 \lg \frac{2\pi f_0 l_1}{c} \quad (1)$$

де  $\rho_1, \rho_2, c_1, c_2, S_1, S_2$  - густина, швидкість звуку, площа пластин відповідно кераміки та накладок.

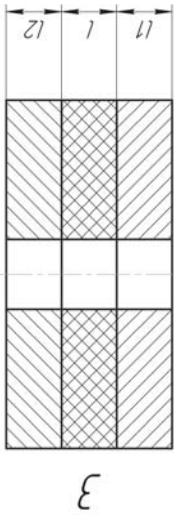


Рис. 1. - Схематичний вид п'єзокерамічного перетворювача ( $I_T=I_2$ ).

Запропоновано модернізацію верстату для розмірної обробки дугою в рідині (РОД) до складу якого входить ультразвуковий перетворювач (Рис.2), що складається з п'єзокерамічних пластин, двох сталевих накладок, болта, який стягує всю конструкцію, а також фторопластової ізоляції. Функцією провідника когорта виконує латунний болт, з'єднаний з електродотримачем і електродотримачем. Функцію анода виконує деталь, яка встановлена на робочому столі. Ультразвук підводиться до поверхонь п'єзокерамічних пластин через шпильку і болт.

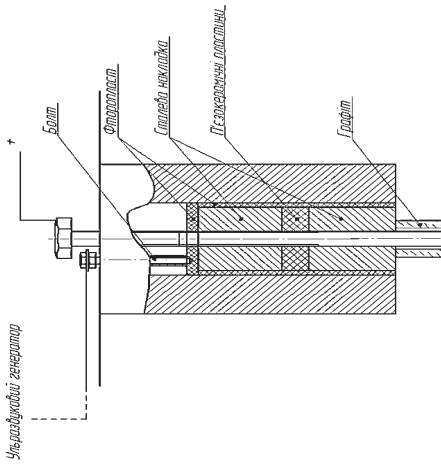


Рис.2.Робоча головка верстату РОД з вбудованим ультразвуковим перетворювачем

В роботі [1] показано, що із збільшенням динамічного тиску потоку рідини в зазорі шортеткість поверхні зменшується. Цей ефект досягається при використанні ультразвукових коливань в моменті зближення електродів.

Таким чином, накладання ультразвукових коливань в режимі чистої обробки дозволяє покращити технологічні показники, а саме - точність і шортеткість, без збільшення динамічного тиску робочої рідини.

**Список літератури:**

1. *Насуретко В.И. Размержная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. -2005. №1. С.8-17.*
2. *Халитов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов. - Л.: Машиностроение. 1988. -224 с.*

УДК 621.785

Ключников Ю.В., Гаврілов Є.Б.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**КОРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ ЗМІЩЕНИХ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЮ ОБРОБКОЮ СТАЛЕЙ У7-У12**

Предметом дослідження є створення зміцнюючих поверхневих покриттів на вуглецевих інструментальних сталях У7-У12 хіміко-термічною обробкою (ХТО) із використанням порошоків титану та ванадію та дослідження утворення нових фазових і мікроструктурних з'єднань на поверхні сталей в умовах різних режимів.

Перспектива таких досліджень полягає у створенні нових матеріалів з підвищеними параметрами щодо твердості, зносостійкості і корозійної стійкості.

В роботі встановлено, що важливим фактором металургійного контакту з металічною основою є температура та витримка ХТО. Встановлено, зокрема, що з підвищенням температури процесу (з 950°C до 1050°C) доля крихкого руйнування зміцнюючого покриття зменшується.

В роботі проведені дослідження кінетики поверхневої структури матеріалів та корозійної активності обробленої поверхні після ХТО (рис.1), розроблена методика оцінки корозійної стійкості оброблених поверхонь ХТО.

Проведено вимірювання корозійної стійкості сталей, що пройшли ХТО різними видами карбідів. Виявлені залежності щодо динаміки атмосферної корозії дозволяють зробити висновки про зниження граничної втрати маси зразків після ХТО внаслідок корозійних руйнувань до 15 % порівняно із необробленими зразками. Приведена методика розрахунку параметрів процесу ХТО сталей, яка дозволяє вибрати оптимальні режими проведення процесу ХТО вуглецевих сталей та передбачити фазовий склад поверхні після проведення обробки.

Встановлено, що ХТО суттєво впливає на розподіл поверхневої енергії, тим самим змінює характер протікання корозії, що виявляється в інтенсифікації процесу в структурно модифікованих областях.

Результати отримані в роботі можна використати при розробці деталей технологічної оснастки і інструменту, що працюють в умовах підвищеного зношування, а саме, в умовах абразивного корозійного середовища, а також при незначних ударних навантаженнях металів.

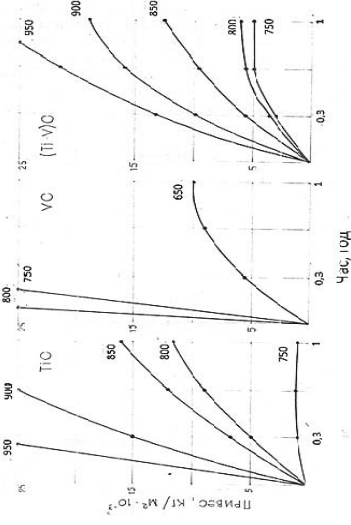


Рис. 1.- Кінетичні криві окислення покриттів на сталі У8

УДК 621.785

Сергітов О.Г., к.т.н., доц., Довбиш В.Л.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

## ДИФУЗІЙНЕ ТИТАНОВАНАДІДНОВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ У8 В ЗАКРИТОМУ РЕАКЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ

Значна частина відмов деталей машин та інструменту, що працюють в умовах дії абразивних і агресивних середовищ, високих температур та тисків, безпосередньо пов'язана зі зношуванням контактуючих поверхонь деталей, втрачено геометричних форм і розмірів.

Ефективним способом продовження тривалості експлуатації деталей машин та інструменту є хіміко-термічна обробка їх поверхні, що цілеспрямовано змінює фізико-механічні властивості поверхневих шарів деталей.

**Метою роботи** є створення на інструментальній сталі У8 карбідного покриття (Ti,V)C з високими властивостями. Відповідно до поставленої мети в роботі будуть вирішені наступні задачі: визначення фазовий, хімічний склад, структура, мікротвердість покриття.

**Методика дослідження.** В якості об'єкта досліджень була вибрана інструментальна сталь У8. Хіміко-термічну обробку проводили при температурі 1050°C, 2 години витримка в закритому реакційному просторі методом фізичного осадження з газової фази шар покриття (Ti,V)C товщиною 4,5 мкм – 5 мкм.

Встановлено, що титанованадінновання супроводжується формуванням на вихідному сплаві багатofазних, багатшарових покриттів, в яких відповідно до загальнопринятій термінології можна відзначити присутність декількох зон та перехідну зону. Мікротвердість цих зон набагато вище мікротвердості сталі. Перехідна зона – це дуже тонка зона, яка знаходиться, як і карбідне покриття, паралельно фронту дифузії. Перехідна зона має мікротвердість менше, ніж мікротвердість покриття, але вище твердості нелегованого ферриту та перліту 6000-6500 МПа і 7000-8000 МПа відповідно.

На поверхні дифузійного покриття знаходиться дуже тонкий світлий шар, рентгеноструктурно ідентифікований як легований титаном карбід ванадію (V,Ti)C. Під ним знаходиться більш товстий шар з легованого ванадієм карбиду титану (Ti,V)C. Перехідна зона складається з твердого розчину титану та ванадію у залізі, карбідів титану та ванадію і цементиту. При порівнянні мікроструктур верхньої зони (V,Ti)C з зоною (Ti,V)C можна відзначити, що (Ti,V)C має добре виражений дрібнозернистий характер. При цьому концентрація заліза та карбону зменшується по товщині покриття по мірі приближення до його зовнішнього шару. Вміст хімічних елементів у зовнішній та внутрішній зонах покриття представлені у табл. 1.

Таблиця 1.  
Вміст хімічних елементів у зовнішній та внутрішній зонах покриття

Вміст елементів, % за масою			
Сталь У8	Ti	V	C
зовнішня	10	74,3	2,3
внутрішня	75	9,1	13,3

Отримані в роботі карбідні покриття (Ti,V)C на інструментальній сталі У8 за фазовим і хімічним складами, структурою можуть бути перспективними в умовах дії високих навантажень на різальних інструментах.

356

УДК 621.785

Сергітов О.Г., к.т.н., доц., Хасцька М.С.  
КПШ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

## ВПЛИВ КОМПОЗИЦІЙНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛЕЙ

Потреба у забезпеченні високого рівня експлуатаційних властивостей та надійності сучасної техніки робить актуальною задачу розробки нових та удосконалення існуючих методів модифікації поверхневого шару деталей машин та механізмів.

Перспективним методом поверхневого зміцнення на сучасному етапі розвитку інженерії поверхні вважається удосконалений варіант карбідних покриттів – композиційне покриття на основі титану та ванадію (Ti,V)C, при якому послідується переваги використання покриття сталею TiC та VC. Завдяки застосуванню композиційних покриттів (Ti,V)C підвищуються властивості оброблених деталей, зокрема зносостійкість та корозійна витривалість [1,2].

Метою даної роботи є дослідження впливу корозійних покриттів на сталі 40ХФА на зносостійкість зміцнених деталей.

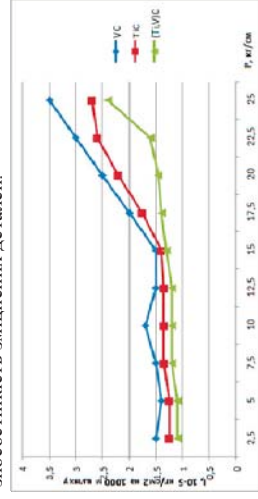


Рис. 1. - Залежність інтенсивності зношування (I) зразків від питомого навантаження (P) при швидкості ковзання V=1,0 м/с

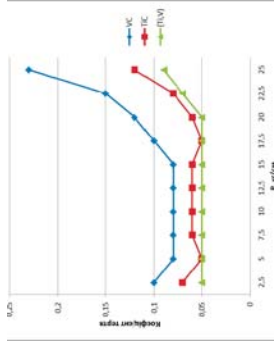


Рис. 2. - Залежність коефіцієнту тертя зразків від питомого навантаження (P) при швидкості ковзання V=1,0 м/с

Проведені дослідження поведінки сформованих зносостійких поверхневих шарів виявили, що інтенсивність зношування та коефіцієнт тертя залежать від питомого навантаження за різних швидкостей ковзання та видів покриття.

З аналізу кривих видно, що за однакових значень питомих навантажень та швидкостей ковзання інтенсивність зношування зміцнених зразків композиційним покриттям (Ti,V)C за своїм абсолютним значенням у 1,8...2,0, а коефіцієнт тертя у 1,4-1,8 разів є меншим ніж у зміцнених зразків покриттями TiC та VC.

Наступні дослідження показали, що зразки зі сталі 40ХФА після зміцнення композиційним карбідним покриттям (Ti,V)C мають кращу зносостійкість при оптимальних значеннях залишкових напружень. Встановлено, що після зміцнення поверхні (Ti,V)C у поверхневих шарах деталей зі сталі 40ХФА виникають стискаючі залишкові напруження, рівень і розподіл яких по глибині залежить від режимів нанесення карбідних покриттів.

У подальшому перспективним вбачається дослідження впливу залишкових напружень в композиційних шарах типу (Ti,V)C на декілька властивостей, наприклад на зносостійкість та опір втомі одночасно.

## Список літератури:

1. Хмельяк В.Г., Помарин Ю.М., Курило Н.А., Мелова І.Ю., Диффузійне покриття на основі карбидів Ti,V у Ст на сталі У8А // Современная электрометаллургия. – 2007. – №4. – С. 30-33.
2. Сівак В.І., Хмельяк В.Г., Курило Н.А. Азотитанування конструкційних та інструментальних сталей // Вісник Сумського держ. Ун-ту. -2007 - №2. - с.73-79.

357



УДК 621.9.048

Ключников Ю.В, к.ф-м.н., Блощицина М.С, к.т.н., Лаюк О.М.  
КІП ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

### ОГЛЯД ОСНОВНИХ ВИДІВ АДДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Аддитивна технологія визначається як «процес об'єднання матеріалів з метою створення об'єктів з даних 3D-моделі, як правило, шар за шаром, на відміну від субтрактивних (відіمالних) виробничих технологій». (Стандарт ASTM F2792.1549323-1: «Additive Manufacturing - process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies»).

Аддитивне виробництво включає процеси, що дозволяють отримувати об'єкти моделі, готові деталі і вироби, зразки для випробування, скоротивши витрати часу і засобів на їх виробку, використовуючи можливості сучасних комплексів комп'ютерного проектування і установок швидкого прототипування. По суті справи, математичну модель з монітора комп'ютера можна легко і швидко "матеріалізувати" безпосередньо без виготовлення робочих креслень, технологічних карт і спеціального оснащення.

Розглянемо основні види аддитивних технологій.

**Stereolithography (SLA).** Метод лазерної стереолітографії дає можливість "вирощувати" моделі із смоли, що фотополімеризується під дією ультрафіолетового лазерного випромінювання (Рис.1а).

**Selective Laser Sintering (SLS).** Порошок зі сталі, крохмалю або кераміки, покритий зв'язуючим пластиком спікають пошарово лазерним променем (Рис.1б).

**ColorJet Printing (CJP).** Привимірний кольоровий друк застосовується для виробництва повнокольорових деталей, що ідеально підходить для концептуальних моделей, архітектурних моделей і демонстраційних моделей. Ця технологія пропонує повний колір, швидко виробництво деталей, які можуть бути прозорими або з покриттям (Рис.1в).

**MultiJet Printing (MJP).** Тут використовують два матеріали - будівельний і підтримуючий, який запобігає обваленню нависаючих частин моделі при побудові. Після побудови підтримуючий матеріал змивають гарячою водою. Модельний матеріал, наприклад, фото-полімерну смолу подають в зону побудови через багатослопову головку (Рис.1г).

**PlasticJet Printing (PJP).** Формування осадженням з рославу. Матеріал у вигляді полімерної нитки підводять до екструдера, де полімерну нитку розплавають і з її допомогою формують фізичну модель відповідно до конфігурації перетину віртуальної CAD-моделі (Рис.1д).

Для прямого друку металу (Direct Metal Printing (DMP) в даний час застосовуються найчастіше наступні технології.

1. **SLS.** При селективному лазерному спіканні створюються моделі-прототипи і деякі деталі (Рис.2а).
2. **SLM.** При селективному лазерному наплавленні частки металу піддаються плавленню і зварюванню, після чого утворюється жорсткий каркас. Виробничий процес ведеться у вакуумній камері, яка заповнюється інертними газами (Рис.2б).
3. **EBM.** В процесі електронно-променевої плавки металевий порошок плавиться за допомогою впливу електронних променів. На основі даної технології створюються деталі і прототипи для медичної сфери, аерокосмічної промисловості, автомобілебудування (Рис.2в).

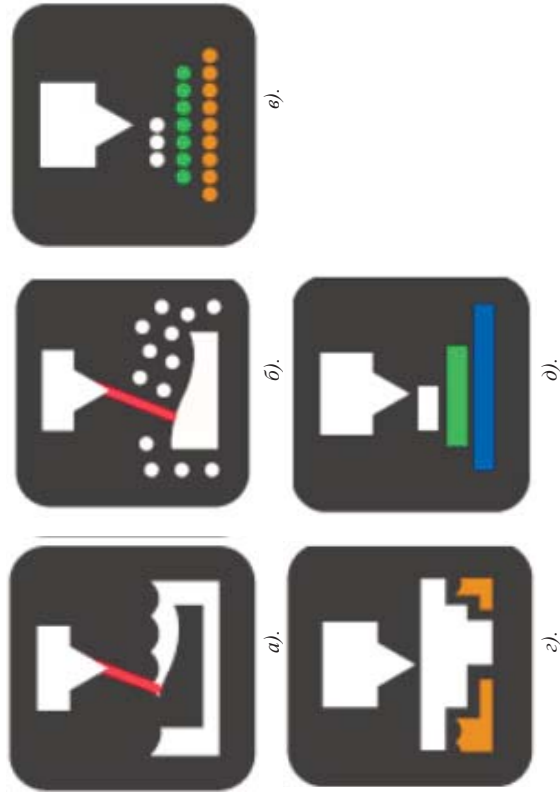


Рис.1.- Схеми основних аддитивних технологій



Рис.2.- Схеми основних аддитивних технологій прямого друку металу

### Список використаних джерел:

1. Зленко М.А. *Аддитивные технологии в машиностроении* / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
2. *Аддитивные технологии* [Електронний ресурс]. Scientific Research Institute of technological Progress. - 2015. - Режим доступу до ресурсу: <http://tomado.co.com/>.
3. ON-DEMAND PARTS MANUFACTURING Quickparts® [Електронний ресурс]. - Режим доступу до ресурсу: [www.3dsystems.com/quickparts](http://www.3dsystems.com/quickparts)

УДК 621.375.826

Джабер Фади магистр, *научн. ручка. Головка Л.Ф. д.т.н., проф.*  
КПІ ім. Ігоря Сікорського, г. Клев, Україна

### ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОГО СПЕКАНИЯ АЛМАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Разработка принципиально нового способа лазерного термомодеформационного спекания алмазосодержащих композитов с целью увеличения производительности и эффективности процесса спекания, снижения его себестоимости, повышения качества продукции является актуальной научно-технической задачей.

Показано, что существует диапазон режимов лазерного облучения, при которых синтетические алмазы подвергаются как прямому, так и косвенному нагреву расплавленной высокотемпературной связкой до температур 1500<sup>0</sup>С, и при этом сохраняют свою исходную прочность. При этом алмазы, обладающая меньшим удельным весом чем связка, всплывают в ее расплаве образуя регулярные их группы. Полученные данные явились основой нового процесса лазерного термомодеформационного спекания, при котором зерна алмазов размещаются в слое расплавленной связки на глубине соизмеримой с их размерами, а затем на этапе охлаждения принудительно удерживаются в остывающем расплаве специальными деформирующим элементом.

Предложена математическая модель процесса лазерного термомодеформационного спекания алмазосодержащих композитов, в качестве которой использовано трехмерную нелинейную нестационарную задачу теплопроводности с применением обобщенной постановки задачи Стефана. Решение задачи выполнено численным методом конечных элементов с помощью программного обеспечения ANSYS 7.0. Особенностью задачи является наличие в сплеме трех различных компонентов, материалы которых существенно различаются по своим теплофизическим характеристикам - связка, корпус инструмента, матрица. Получено распределение температур по слоям, включающих облученную поверхность алмазосодержащего композита, поверхности корпуса инструмента, поверхность нижней матрицы. Показано, что при изменении времени лазерного облучения можно получить ситуацию, когда на нижней границе матрицы будет температура плавления композита, а ниже (в корпусе инструмента и матрицы) температура будет иметь значение 400-500<sup>0</sup>С. Это дало основание считать, что расплавленный металл не будет иметь адгезионного сцепления с материалом матрицы. Расчет проведен для компонентов, состоящих из легированной стали. Определены оптимальные энергетические параметры и исследованы основные закономерности влияния режимов теплового и динамического воздействия на распределение температур и механических напряжений при формировании алмазного слоя с регулярной структурой. Определены оптимальные энергетические параметры лазерного излучения (мощность 1,0-2,5 кВт, диаметр пятна фокусировки 0,7-2,0 мм, амплитуда 7 мм и частота сканирования 150-200 Гц), скорость относительного движения лазерного излучения и матрицы - 0,2 - 1,0 м / мин.

Разработаны две основные схемы радиального и осевого спекания и экспериментальная лазерная установка мощностью 2 ... 3 кВт с соответствующими узлами и приборами для измерения основных параметров лазерного спекания. Показано, что наиболее эффективной схемой подачи порошковой связки является подача вслед лазерного луча с расходом в пределах 0,3-0,5 г/с. Определены температуры 500-600<sup>0</sup>С в их пределах целесообразно формировать рабочий слой, величина и координаты точки приложения динамического воздействия.

Исследованы особенности и основные закономерности формирования алмазосодержащих композитов, что позволило использовать крупнозернистые термостойкие высокопрочные алмазы при изготовлении реальных алмазных кругов диаметром 125 мм. Время изготовления такого круга по существующей технологии - 3 часа, по разработанной - 4 мин.