

ISSN 2079-004X



**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО**  
**УНІВЕРСИТЕТУ**  
**«XIII»**

**42'2014**

**Харків**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

# **ВІСНИК**

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»**

*Серія: Технології в машинобудуванні*

№ 42 (1085) 2014

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2014

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 42 (1085). – 220 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською та російською мовами.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).*

**Координаційна рада:**

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

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

В. В. Спіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;

В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.;

П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;

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

Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;

М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.

**Заст. відповідального редактора:** О. О. Ключко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Є. В. Басова, канд. техн. наук, ст. виклад.

**Члени редколегії:** С.С. Добротворський, д-р техн. наук, проф.; О.А. Мельніченко, д-р

техн. наук, проф.; О.Я. Мовшович, д-р техн. наук, проф.; О.А. Пермяков, д-р техн. наук,

проф.; Ю.А. Сизий, д-р техн. наук, проф.; Д.В. Сталінський, д-р техн. наук.;

М.С. Степанов, д-р техн. наук, проф.; В.А. Фадєєв, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. Хіцан, д-р техн. наук, проф.; О.М. Шелковий, д-р техн. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Технології в машинобудуванні», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

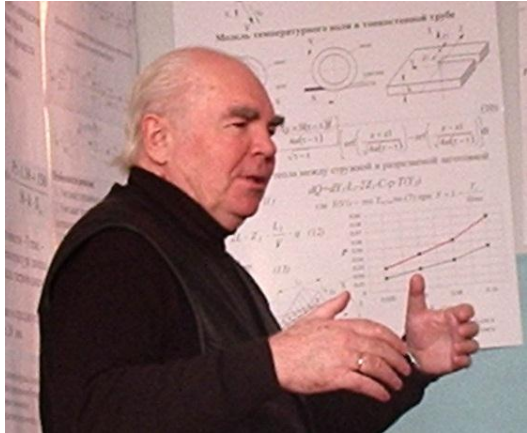
Протокол № 10 від 28 «листопада» 2014 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2014

**30 років завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів в Харківському політехнічному інституті, 65 років трудового стажу!!!**

**Наш вчитель, науковець, прекрасна людина!!!**

**Юрій Вікторович Тимофієв – засновник наукової школи ефективного проєктування, виготовлення та використання агрегованих технологічних систем механообробки**



Юрій Вікторович Тимофієв народився 29 травня 1935 року у м. Харкові.

Після закінчення ремісничого училища у 1949 році працював токарем на заводі ім. В.О. Малишева; із срібною медаллю закінчив вечірню школу робочої молоді; поступив у 1954 році в ХПІ та закінчив його у 1959 році за спеціальністю «Технологія машинобудування, металорізальні верстати та інструменти». Після закінчення ХПІ працював інженером-конструктором на верстатобудівному заводі ім. С.В. Косіора. Із 1961 року по теперішній час працює на кафедрі «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХПІ». Пройшов шлях від асистента, аспіранта до завідувача кафедри, професора, доктора технічних наук. У 70-х роках обіймав посаду декана машинобудівного факультету ХПІ.

В жовтні 1984 року призначений на посаду завідувача кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати». За тридцять років керівництва значно покращений кадровий склад кафедри. Зараз на кафедрі «ТМ і МС» НТУ «ХПІ» працюють 9 професорів, докторів технічних наук та 12 доцентів, кандидатів технічних наук. Професор Тимофієв Ю.В. є автором понад 250 науково-методичних робіт та 6 патентів України. Значну увагу приділяє підготовці наукових кадрів. Під його керівництвом підготовлено та захищено 9 докторських та 12 кандидатських дисертацій.



Ю.В.Тимофіїв – засновник наукової школи ефективного проектування, виготовлення та використання агрегованих технологічних систем механообробки. Агреговані технологічні системи механообробки і агрегатні верстати широко поширені в українському машинобудуванні й машинобудуванні найбільш промислово-розвинених країн (10-15% парку металорізального устаткування), становлячи основу високоорганізованих і найбільш ефективних виробництв. Верстати й системи, як і більшість технічних об'єктів, пройшли період уніфікації. Це привело до виникнення ідеї створення технологічного устаткування на базі загальних цільових вузлів-агрегатів. Агрегування дозволило забезпечити: скорочення строків і вартості проектування й виготовлення (до 12 разів); підвищення продуктивності обробки за рахунок високої концентрації операцій (до 8 разів); зниження собівартості обробки (до 28 разів); скорочення виробничих площ (до 16 разів); спрощення обслуговування й ремонту; оборотність і гнучкість.

Ідеологами агрегованого технологічного устаткування та засновниками цього напрямку в Харкові слід вважати першого завідувача кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Харківського політехнічного інституту Корольова П.К. та доцента кафедри, директора Харківського заводу агрегатних верстатів Рябок Х.Г. Вони заклали фундамент та створили передумови розвитку науково-технічних ідей, сприяли підготовці висококваліфікованих фахівців в галузі агрегованого верстатобудування. Розвиток цього напрямку та остаточне оформлення

наукової школи відбулося під керівництвом теперішнього завідувача кафедри професора Тимофієва Юрія Вікторовича. Його докторська дисертація “Основи аналізу та синтезу систем механообробки методами технологічного подіб'я” у 1985 році була кваліфікована спеціалізованою вченою радою Тульського політехнічного інституту як новий розділ теорії технологічних систем.

У подальших роботах, виконаних на кафедрі «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» під керівництвом проф. Тимофієва Ю.В. у тісному науково-технічному співробітництві з Харківським виробничим об'єднанням агрегатних верстатів на основі узагальнення багаторічного досвіду проектування, виробництва, впровадження й експлуатації в промисловості різних зразків агрегатних верстатів, автоматичних ліній і робототехнічних комплексів у 80-90х роках минулого сторіччя були розроблені та впроваджені загальні принципи й методики автоматизованого проектування агрегованих технологічних систем механообробки, створено основи компонетики (теорія компонувань) багатопозиційних агрегатних верстатів, які дозволяють створювати ефективне високопродуктивне агреговане металорізальне устаткування.

В процесі розвитку наукового напрямку підготовлено та захищено декілька докторських дисертацій, науковим консультантом яких був проф. Тимофієв Ю.В.: докторська дисертація генерального директора Харківського виробничого об'єднання агрегатних верстатів Хіцана В.Д. «Наукові основи удосконалення та розвитку принципу агрегування при створенні технологічних систем металообробки різанням», нині професора кафедри "Технологія машинобудування й металорізальні верстати", що була захищена у 1996 році, не тільки вирішувала значну науково-технічну проблему та концентрувала багаторічний досвід створення агрегатних верстатів, а ї показувала подальші напрямки розвитку цього високоефективного технологічного обладнання; докторська дисертація професора кафедри Карпуся В.Є. «Технологічні основи структурно-параметричного синтезу компоновок багатомономенклатурного агрегованого металорізального обладнання», що була захищена у 1998 році, в якій була теоретично обґрунтована принципова можливість переналадки технологічного обладнання, що створюється за принципом агрегування, та розроблені технологічні принципи структурно-параметричного синтезу багатомономенклатурних агрегатних верстатів на основі використання запропонованого критерію інтенсивності формоутворення;

докторська дисертація професора кафедри Пермякова О.А. «Теоретичні основи компонетики агрегованих технологічних систем», що була захищена у 2002 році, в якій вперше розроблена методологія композиційного проектування багатопозиційних агрегованих технологічних систем із круговим транспортуванням заготовки та на основі розробки узагальненої моделі, принципів спрямованого синтезу просторового компонування на базі

апарату афінних перетворень координатних систем елементів, що компонується; докторська дисертація професора кафедри Шелкового О.М. «Організаційно-технологічні основи реінжинірінга виробничих систем металообробки», яка захищена у 2004 році, вирішувала значну науково-технічну проблему забезпечення життєвого циклу технологічного обладнання та систем механообробки; докторська дисертація професора кафедри Клочко О.О. «Технологічні основи забезпечення продуктивності, точності та якості зубофрезерування крупномодульних коліс, що загартовані» захищена у 2014 році, яка містить розв'язання актуальної для сучасного машинобудування наукової проблеми удосконалення технології забезпечення заданих експлуатаційних властивостей загартованих крупномодульних зубчастих коліс шляхом формування поверхневого шару зуба методами швидкісного фрезерування.

Крім того, за останні два десятиліття років у цьому напрямку було підготовлено й захищено десять кандидатських дисертацій, науковим керівником вісьмох з них був професор Тимофієв Ю.В. Учні професора Тимофієва Ю.В. успішно працюють не тільки в нашому університеті. Декан машинобудівного факультету Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків) Сичов Ю.І. та професор Мельниченко О.А. пройшли наукову школу професора Тимофієва Ю.В. і плідно працюють в своєму ВУЗі. В свій час закінчили аспірантуру, стали кандидатами наук та фахівцями вищої кваліфікації під керівництвом професора Тимофієва Ю.В. громадяни Іраку, Нігерії, Домініканської республіки, Китаю.

Представники наукової школи регулярно опонують або рецензують дисертації, входять до складу спеціалізованих вчених рад інших ВУЗів, комісій МОН України з акредитації навчальних закладів, редакційних рад науково-технічних видань.

Науковий напрямок, пов'язаний зі створенням спеціального високопродуктивного металорізального устаткування, що створюється за агрегатно-модульним принципом, технологічна гнучкість якого забезпечена можливістю його перекомпонування, включений до Державної цільової науково-технічної програми розвитку прогресивних матеріалів та технологічного обладнання для машинобудування на 2011-2015 роки.

Професор Тимофієв Ю.В. є засновником у 1993 році спеціалізованої вченої ради з захисту докторських дисертацій за спеціальностями 05.02.08 - «Технологія машинобудування» та 05.03.01 - «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» у НТУ «ХПІ». Шість професорів кафедри, докторів технічних наук нині входять до складу спеціалізованої вченої ради. На протязі багатьох років професор Тимофієв Ю.В. входив до складу експертної ради ВАК України, має великий авторитет серед науковців-технологів. Користується значною повагою серед колег, обраний академіком АН Вищої школи України.

**Ю.В. ТИМОФЕЕВ**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;  
**А.Н. ШЕЛКОВОЙ**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;  
**Е.В. МИРОНЕНКО**, д-р техн. наук, профессор ДГМА, Краматорск;  
**А.А. КЛОЧКО**, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»;  
**А.Н. КРАВЦОВ**, аспирант, Уральский федеральный университет им.  
первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

## **АНАЛИЗ СХЕМ РЕЗАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ И ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОЙ ЗУБООБРАБОТКЕ ЗАКАЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ КОЛЕС**

Взаимосвязь теоретической зависимости скорости резания от различных технологических факторов, физико-механических свойств материалов инструмента и закаленного зубчатого колеса позволяет осуществлять выбор рациональных режимов резания в каждом конкретном производственном случае с учетом требуемых показателей стойкости инструмента, производительности обработки, точности и качества поверхностного слоя. Разработаны схемы резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке с использованием метода численного моделирования процесса формообразования поверхностного слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и разработаны рекомендации по выбору технологического регламента обработки. Метод численного моделирования основан на решении системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения.

**Ключевые слова:** схемы резания, технологические факторы, качество поверхности, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, численное моделирование

**Введение.** Тяжелые зубофрезерные станки мод. 5А342 по жесткости и быстроходности не предназначены для работы методом обкатки твердосплавными червячными фрезами, а также из-за сравнительно невысокой стойкости используемых твердых сплавов, производственный опыт ряда заводов показал, что точность обработки крупномодульных закаленных до *HRC*, 50...55 колес модулем  $m > 12$  мм червячными твердосплавными фрезами по нормам плавности и контакта не превышает 9...10-ой степеней точности по ГОСТ1643- 81.

**Основная часть.** Для чистовой зубообработки колес крупного модуля предложен метод прерывистого обката с использованием дисковых фрез, оснащенных керамическими пластинками и специальными фрезерными суппортами. Метод прерывистого обката используется на зубострогальных и зубошлифовальных станках и обладает тем преимуществом, что в момент рабочего хода инструмента заготовка колеса неподвижна или совершает незначительный поворот, т.е. обработка протекает, по сравнению с методом



обкатки с обеспечением наибольшей контактной жесткости инструмента и определяет способность поверхностных слоев зубчатых колес, находящихся в контакте с режущей кромкой инструмента, с учетом радиуса округления  $\rho$  мм, обеспечивать процесс резания.

В соответствии со сложившимся представлением о процессе обработки поверхностей зубчатых колес, одним из его результатов является образование равновесной шероховатости. Несущая способность поверхности зубчатых колес, коэффициент трения и интенсивность износа при трении скольжения наряду с шероховатостью, определяются макроотклонением, волнистостью и физико-механическими свойствами (микротвердость и остаточные напряжения), видом обработки и технологическими особенностями конструкции немодульных фрез. Поэтому образующаяся шероховатость поверхностей будет зависеть от остальных параметров состояния поверхностного слоя инструмента и обрабатываемой поверхности зубчатых колес.

Для разработки схем резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке использовался метод численного моделирования процесса формообразования поверхностного слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и рекомендовать оптимальный технологический регламент обработки. Метод численного моделирования основан на решении системы уравнений механики сплошной среды (уравнения движения, неразрывности, энергии). В качестве замыкающих систему уравнений используются определяющие соотношения теории упругости, пластичности и разрушения. Система уравнений решается при заданных начальных и граничных условиях.

На основании выполненных работ разработана математическая модель технологического процесса встречного зубофрезерования с переменным изменением формообразования поверхностного слоя. Модель предназначена для исследования пластического течения металла в зоне стружкообразования, расчета скоростей деформации, напряжений в условной плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента, исследования напряжений в слоях металла, расположенных на различной удаленности от обработанной поверхности, создания базы для изучения нестационарных процессов: врезания инструмента, прерывистого резания, напряжений в условиях элементного и псевдоэлементного стружкообразования и т.п.

Численное моделирование процесса встречного зубофрезерования рассмотрено в двумерной динамической постановке с использованием лагранжева описания движения среды. Метод решения задачи аналогичен известному конечно-разностному методу *HEMP*, поэтому система уравнений Прандтля-Рейса записывается в том же виде.

Уравнения движения

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_x, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} = \rho \dot{u}_y; \quad (1)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\dot{V}}{V} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\dot{E} = -P\dot{V} + (S_{xx}\dot{\epsilon}_{xx} + S_{yy}\dot{\epsilon}_{yy} + 2 \cdot S_{xy}\dot{\epsilon}_{xy}) \cdot V. \quad (3)$$

Скорости деформации

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \dot{\epsilon}_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right). \quad (4)$$

В условиях плоской деформации  $u_z = 0, \epsilon_{zz} = \epsilon_{yz} = 0,$

Скорость вращения

$$\dot{\omega} = \dot{\omega}_{xy} = -\dot{\omega}_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} \right). \quad (5)$$

Полная деформация включает в себя упругую и пластическую части:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^{pl}. \quad (6)$$

Тензор напряжений разбивается на девиаторную  $s$ -шаровую  $P$  части  
Девиатор напряжений с учетом поворота локальной системы координат

$$\begin{aligned} \dot{S}_{xx} &= 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{xx} - \frac{1}{3} V/V \right) + \varpi_{xx}; \\ \dot{S}_{yy} &= 2\mu \left( \dot{\epsilon}_{yy} - \frac{1}{3} V/V \right) + \varpi_{yy}; \\ \dot{S}_{xy} &= 2\mu (\dot{\epsilon}_{xy}) + \varpi_{xy}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\varpi$  – поправка, учитывающая поворот элемента среды.

Гидростатическое давление

$$\dot{P} = -K \frac{\dot{V}}{V}, \quad (8)$$

где  $V = \rho_0/\rho$  – относительный объем.

Условие пластичности Мизеса

$$2J_2 - \frac{2}{3} Y^2 \leq 0, \quad (9)$$

где  $2J_2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, Y$  – предел текучести при растяжении.

В качестве меры упрочнения принята работа пластической деформации  $W^{pl}$ :

$$Y = Y(W^{pl}) = Y_0 + \alpha (W^{pl})^\beta \text{ Мбар}, \quad (10)$$

где  $x, y$  – пространственные координаты;  $u_x, u_y, u_z$  – компоненты вектора скорости;  $s_y$  – компонента тензора деформации;  $c_y$  – компонента тензора напряжений;  $s_y$  – компонента девиатора напряжений;  $P$  – давление;  $E$  – удельная энергия;  $\rho$  – плотность;  $\rho_0$  – первоначальная плотность среды;  $V_{omn}$  – относительный объем;  $K$  – модуль объемного сжатия;  $\mu$  – модуль сдвига.  
Точка сверху означает производную по времени.

В основу разработанной программы положены научные основы стабилизационных или искусственных вязкостей.

Отделение срезаемого поверхностного слоя осуществлялось с использованием специального алгоритма разделения узлов сетки (рис. 1).

Реализация граничных условий в области контакта материала с режущим инструментом осуществлялась по схеме коррекции движения узлов расчетных ячеек.

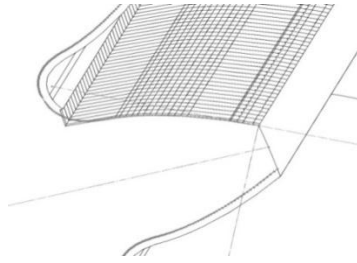


Рис.1 – Схема формообразования сетки на обрабатываемой поверхности зубчатого колеса

Процедура расчета на каждом временном интервале, включала следующую последовательность операций:

1. Расчет движения узлов сетки (рис. 2) при соответствующих граничных условиях. На всех поверхностях, где эти условия заранее не заданы, а определяются в ходе решения задачи, используются условия свободных поверхностей;

2. Расчет контактного взаимодействия поверхностей (условие непроникновения и закон скольжения Амонтона-Кулона) и коррекция движения в соответствии с взаимодействием;

3. Расчет напряженно-деформированного состояния в ячейках сетки;

4. Проверка условия разрушения и формирование новых поверхностей (разделение узлов и задание соответствующих условий на новых поверхностях для отделения срезаемого слоя).

Решение осуществлялось с учетом технологического процесса моделирования формообразования поверхностного слоя и стружки. Поскольку характерное время процесса зубофрезерования значительно превышает время прохождения волн деформации, решение задачи производилось для различных временных интервалов.

Процесс формообразования зубчатых колес при встречном фрезеровании методами численного моделирования заключается в получении минимального значения угла скольжения  $\Psi_{ск}$ , или получения максимального значения  $\sin \Psi_{неит}$ , при котором процесс резания отсутствует с учетом варьирования переменных параметров режимов резания ( $S_{мин}$ ,  $V$ ) и геометрических параметров зуборезных фрез ( $\rho$ ,  $d_{фр}$ ,  $Z$ ) [2, 3].

Соотношение между углом скольжения  $\Psi_{ск}$  и наибольшим углом контакта зуба фрезы  $\Psi_{max}$  с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формообразования через коэффициент эффективности функционального формирования поверхностного слоя  $K_p$ .

Использовались следующие константы обрабатываемого материала:  $K = 180$  ГПа,  $\mu = 80$  ГПа,  $p = 7,85$  г/мм<sup>3</sup>,  $Y_0 = 0,4$  ГПа,  $a = 1/150$ ,  $\beta = 0,2$ . Расчеты проводились для скорости резания  $V = 3,0$  м/с.

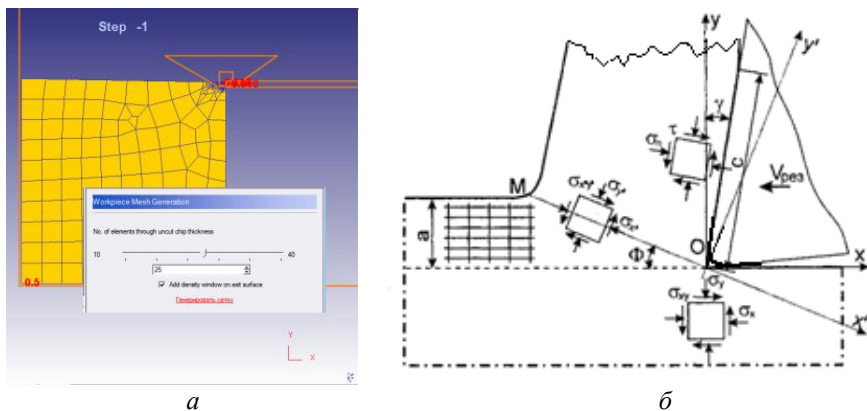


Рис. 2 – Схематическое изображение процедуры разделения узлов сетки: *а* – вдоль линии среза, *б* – схема процесса формообразования

На рис. 3 приведено полученное при исследовании модели распределение интенсивности напряжений в зоне стружкообразования при зубофрезеровании.

Пластическое течение материала сосредоточено вблизи условной плоскости сдвига и передней грани инструмента. На рис. 3 также достаточно четко просматриваются зоны упругого сжатия впереди зуба фрезы и растяжения под задней поверхностью зуба фрезы.

Известно, что поведение материала, не обладающего свойствами деформационного упрочнения (или описываемого в таких рамках), имеет тенденцию к локализации пластической деформации. В связи с этим использование данной модели может оказаться полезным для выделения наиболее активной зоны деформации.

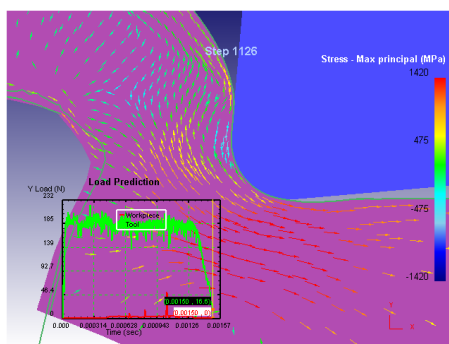


Рис. 3 – Распределение интенсивности напряжений в области формообразования поверхностного слоя

Пластическое течение материала начинается значительно раньше, чем частицы металла оказываются на условной плоскости сдвига, угол наклона которой существенно меньше (рис. 3).

Напряженное состояние не является неизменным в течение процесса. Как физически, так и численно это обусловлено неравномерностью разрушения материала перед зубом фрезы с учетом угла скольжения  $\Psi_{ск}$ . Очевидно, что дискретизация этого процесса связана с технологией численного расчета и значительно усиливает неравномерность. В момент разделения очередного узла сетки происходит разгрузка материала в прилегающей области и излучение упругих волн. Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига показано на рис. 4. Понятно, что в такой ситуации уровень напряжений вблизи лезвия будет циклически меняться, а картина распределения напряжений зависит от местоположения лезвия инструмента в пределах расчетной ячейки, т.е. от момента времени. Именно с этим связана нестабильность процесса формообразования.

На рис. 4 представлены результаты расчета напряжений, действующих на условной линии сдвига, на рис. 5 – изменение интенсивности скорости деформации частиц металла на пути превращения их в стружку. Изменение интенсивности скорости деформации  $\dot{\epsilon}_T$ , вначале плавно, а затем вблизи условной линии сдвига резко возрастет, после чего падает до нуля.

Наибольшая скорость деформации имеет место в слое, прилегающем к лезвию инструмента (кривая 4, рис. 5), наименьшая – в срединных слоях.

Однако, после прохождения условной линии сдвига, скорость деформации по всему сечению остается близкой к ее величине в срединных слоях при прохождении условной плоскости сдвига. При этом отрезок времени активной деформации существенно превышает период наиболее высокоскоростной пластической деформации.

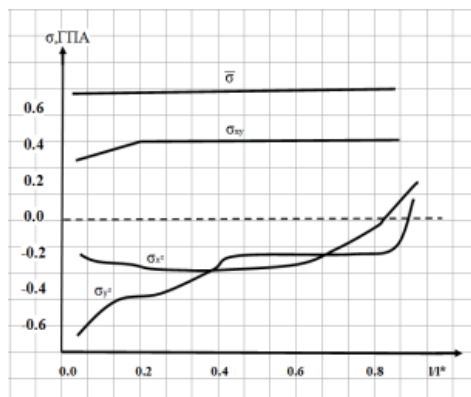


Рис.4 – Распределение напряжений вдоль условной плоскости сдвига

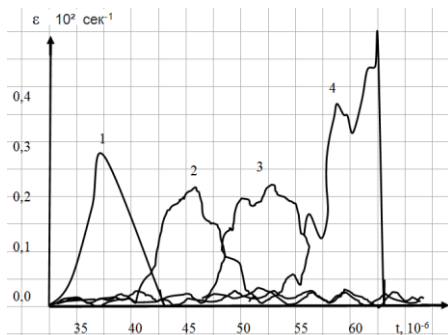


Рис.5 – Изменение интенсивности скорости деформации с течением времени

Сжатие материала, которое наблюдается в области, лежащей впереди зуба фрезы, сменяется интенсивным растяжением при приближении лезвия инструмента; это хорошо видно на рис. 6. Если вертикальная компонента напряжений (в силу граничных условий) после прохождения реза обращается в ноль (рис. 6, б), то для горизонтальной составляющей ситуация значительно отличается. Верхние слои уже обработанной детали вновь оказываются в состоянии сжатия (рис. 6, а).

В разработанной численной модели в качестве установочных параметров были использованы исходная геометрия инструмента, коэффициент трения и свойства материала заготовки. К числу модельных идеализаций относятся переменная толщина срезаемого слоя, радиус округления режущего лезвия и соответствующая схема отделения срезаемого слоя; модель упругопластического поведения материала.

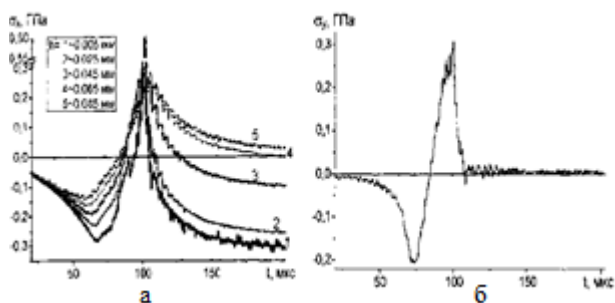


Рис. 6 – Изменение напряжений: а - по глубине поверхностного слоя, б - с течением времени по мере перемещения зуба фрезы

Разработанная на основании проведенных исследований численная модель достаточно хорошо описывает многие явления процесса

зубофрезерования. Возможно и дальнейшее уточнение расчетов путем учета влияния температуры, задания переменного закона трения на передней грани и т.п.

Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным.

Разработанная модель технологического процесса формообразования адекватно описывает условия обеспечения параметров поверхностного слоя зубчатых колес с учетом требуемых эксплуатационных характеристик для скоростного зубофрезерования инструментами дискового типа.

При реализации технологии лезвийной обработки закаленных колес инструментами дискового типа предложены схемы резания I и II (рис. 7, а, б).

Для обработки зубчатых колес различного модуля необходимо регулировать установочное расстояние  $l_y$  между фрезами, которое ориентировочно можно определить по зависимости:

$$l_y = 3,98 \cdot m. \quad (12)$$

Возможна разновидность схемы IV, которую назовем схемой V, когда обработка правой и левой поверхностей зубьев производится отдельно путем установки на оправке вначале одной, например, левой фрезы, а затем правой. Обработка колеса производится в два прохода.

Достоинство схем резания III, IV, V по сравнению со схемами I, II заключается в возможности использования инструментов, размеры режущих кромок которых не зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса и значительно, в 3...7 раз меньше, чем размеры кромок инструментов, рассмотренных в работе.

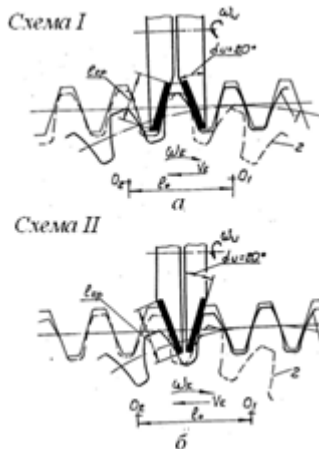


Рис. 7 – Технологические схемы резания дисковыми немодульными фрезами:  
 а – схема одновременной обработки двух профилей одного зуба, б – схема  
 одновременной обработки двух профилей соседних зубьев

Общим недостатком схем I и II является то, что в обоих случаях размеры режущих кромок зубьев  $l_{кр}$  инструмента зависят от размеров (модуля) обрабатываемых зубьев колеса. При крупном модуле зубьев  $m = 18 \dots 36$  мм размеры кромок составляют  $l_{кр} = 45 \dots 90$  мм. Это усложняет процесс припоя твердосплавных зубьев и последующее затачивание инструмента или оснащение его керамикой и сверхтвердыми материалами. Инструмент такой конструкции имеет сравнительно большие периметры резания, что повышает силы резания и способствует возникновению вибраций.

Достоинство схем I и II в том, что оба инструмента расположены на одной и той же оправке, т.е. имеется возможность осуществить привод вращения от одного электродвигателя.

При схеме III (рис. 8,а) в качестве станочной линии зацепления пары инструмент – деталь используется нормаль к эвольвентам  $PK$ , расположенная горизонтально. Профильный угол зубьев инструмента - дисковой фрезы близок к  $\alpha_u = 0^\circ$ . Фреза в первоначальный момент обработки расположена со смещением относительно оси колеса на расстоянии  $l_0$ , определяемом по следующей зависимости:

$$l_0 = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_a, \quad (7.11)$$

где  $r_b$  – радиус основной окружности зубьев;  $\alpha_a$  – угол профиля эвольвенты на вершине зуба.

Обработка правой и левой боковых поверхностей зубьев колеса осуществляется раздельно, обработка ведется за два прохода.

Схема резания IV (рис. 8,б) предполагает одновременную обработку обеих боковых поверхностей зубьев колеса с использованием двух дисковых фрез, расположенных с наклоном на угол  $\alpha_\phi = 20^\circ$ . Профильный угол зубьев фрезы равен  $\alpha_\phi = 0^\circ$ .

Инструменты располагают с охватом одного или нескольких зубьев колеса. Однако с ростом числа зубьев в охвате увеличивается и путь обката, что снижает производительность обработки.

При схемах I и II режущие кромки инструментов полностью задействованы в обработке, точка контакта лезвия и зуба колеса перемещается по всей длине кромки. В этих условиях оснащение всего периметра режущей кромки керамическими пластинками из-за разности их размеров не позволит получить профиль зуба достаточно высокой степени точности.

Применение схем резания III, IV, V позволяет оснастить дисковые фрезы 4<sup>x</sup>-гранными керамическими пластинками марки ВОК-71 с размерами 12,7 x 12,7 мм. Инструмент при этом не требует затачивания и перетачивания, удобен в эксплуатации и ремонте. Так как обработка эвольвентных поверхностей зубьев производится практически одними и теми же участками пластин, то это повышает точность обработки профиля зубьев.



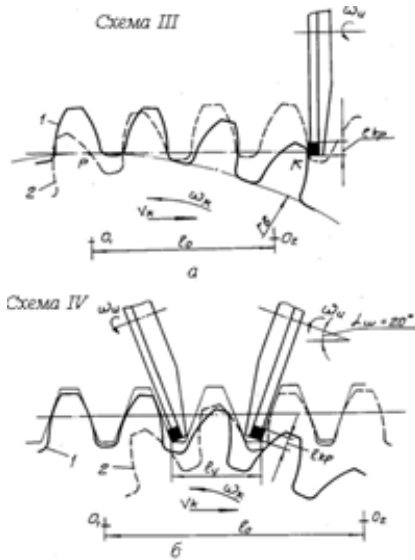


Рис.8 – Перспективные технологические схемы скоростного зубофрезерования: а - схема резания III; б - схема резания IV

В табл1 представлены расчетные значения длины пути обката, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев  $z_k = 25 \dots 100$  при модуле  $m = 28$  мм.

Таблица 1 – Расчетные значения длины пути обката

Схема резания	Путь обката $l_0$ , мм			
	Число зубьев колеса $Z_k$			
	25	50	75	100
I	218,1	218,1	218,1	218,1
II	213,9	229,0	233,7	239,4
III	296,4	308,2	313,2	316,2
IV	301,8	316,9	321,4	327,3
V	278,4	289,6	294,3	297,1

В табл. 2 представлены изменения параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования, полученные для случаев обработки прямозубых зубчатых колес в диапазоне чисел зубьев  $z_k = 25 \dots 100$  при модуле  $m = 28$  мм.

Таблица 2 – Изменение параметров точности и шероховатости при различных схемах формообразования

Схема резания	Параметры точности зубчатых колес, мкм				
	ГОСТ 1643-81				
	Нормы кинамитеской точности $F_r$	Нормы плавности $\pm f_{pt}$	Нормы бокового зазора $F_\beta$	Шероховатость поверхность и $R_a$	Параметр плавности $\pm f_{pt}$ после года эксплуатации
I	45	36	30	1,6	96
II	42	38	35	1,6	84
III	34	30	25	1,2	58
IV	36	28	26	1,1	50
V	32	30	25	1,4	56

Как видно из представленных в таблице данных, наименьший путь обката, а следовательно, и наибольшую производительность обработки, обеспечивает схема резания I. Для этой схемы путь обката не зависит от числа зубьев обрабатываемых колес. Второй по производительности процесса является схема II. Однако эти схемы не позволяют использовать инструмент с уменьшенными размерами режущих кромок.

Из схем резания для дисковых фрез, оснащенных минералокерамикой (III, IV) наиболее эффективной является схема IV. Здесь путь обката наименьший, но необходимо учитывать величину вспомогательного времени, связанного с переустановкой инструмента и подналадкой заготовки колеса.

Схема III является второй по эффективности. Недостаток ее в том, что из-за большого исходного смещения инструмента относительно оси колеса на существующих тяжелых зубофрезерных станках возможна обработка косозубых колес только с наружным диаметром до 800 мм. Схема IV удобна в эксплуатации, т.к. не требует переустановки фрез.

В работе были приняты два направления. Первое заключалось в разработке несложных по конструкции специальных фрезерных суппортов, устанавливаемых на зубострогальных станках фирмы “МААГ” и реализующих схему резания III (рис. 8, а) [2, 78]. Второе учитывало разработку, изготовление и внедрение на заводах машиностроения специальных фрезерных суппортов к широко распространенным вертикально-зубофрезерным станкам. При этом реализовывались технологические схемы резания III и IV [1, 3, 5, 6, 8].

**Выводы.** Для обеспечения оптимальной долговечности и технологической надежности процесса формообразования зубчатых закаленных колес дисковыми фрезами разработаны схемы резания и рекомендации по выбору оптимальных технологических параметров

обработки. Наиболее перспективным представляется использование разработанной методики и численной модели для анализа переходных процессов и разрушения, когда учет динамических явлений становится принципиальным. Разработанная модель технологического процесса формообразования адекватно описывает условия обеспечения параметров поверхностного слоя зубчатых колес с учетом требуемых эксплуатационных характеристик для скоростного зубофрезерования инструментами дискового типа.

**Список литературы:** 1. Тимофеев Ю. В. Новая технология скоростной обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес специальными дисковыми фрезами / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вип. 118. – С. 139–144. 2. Тимофеев Ю. В. Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, А. Н. Крацов // Восточно-европейский журнал передовых технологий: Прикладная механ. ика. Издательство: Технологический центр (Харьков). Том 4, – № 7 (64) (2013). – С. 49–55. 3. Шелковой А. Н. Исследование динамики зубофрезерования крупномодульных закаленных зубчатых колес с помощью WAVLET-анализа [Текст] / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, А. Н. Крацов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ, Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. – 208 с.: ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю. М. Соломенцева). (с. 106 - 115). 4. Шелковой А. Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210. 5. Технология обработки крупномодульных зубчатых колес однокорпусными фрезами двухстороннего резания с чередующимися коническими зубчатыми рейками / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. пр. Тематичний випуск : Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 49. – С. 111–116. 6. Кане М. М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслев, О. А. Горленко под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с. 7. Технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Е. В. Мироненко // Вісник Донецького Національного технічного університету : зб. наук. пр. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк : ДНТУ, 2013. – № 1 (10) (2013). – С. 131–140. 8. Клочко А. А. Области оптимального, управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. А. Клочко, Ю. В. Тимофеев., А. Н. Шелковой // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 332–343. 9. Шелковой А. Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 274–280.

**Bibliography (transliterated):** 1. Timofeev, U.V., A.A. Klochko and V. F. Shapovalov. *New technology high-speed machining of hardened gears coarse-grained special disc cutter*. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinoprikladobuduvannya ta transport." -Sevastopol, 2011. -VIP. 118. -С. 139-144. 2. Timofeev U.V., A.A. Klochko and A.N. Kravtsov. *Optimization of technological support of operational properties of surfaces hardened gears coarse-grained [Text]*. East European Journal of advanced technologies: Applied clockworks Ica . Publisher: Technology Centre

(Kharkiv). Volume 4, - No 7 (64) '(2013). - P. 49-55. **3.** Shelkovoy A.N., A. N. Kravtsov and A.A. Klochko. *Investigation of the dynamics of coarse-grained hobbing of hardened gears using WAVLET-analysis [Text]*. Problems of design and automation engineering industries: a collection of research laborP. - Volgograd: VolgGTU, Togliatti: Irbit: ZAO "ONYX", 2013. - 208 p. : ill., Table. ; - (Series: Quality Management processes in engineering / under total. Ed. YM Solomentseva). (p. 106 - 115). **4.** Shelkovoy A.N., E.V. Mironenko and A.A. Klochko. *General principles of modeling the optimal control parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gearP*. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinopriladobuvannya that transport." - Sevastopol, 2013. - Vip. 140. - P. 203-210. **5.** Timofeev U.V., et al. *Processing Technology coarse-grained cogwheels Monohull cutters cutting with alternating double conical toothed rackP*. News Natsionalnogo tehchnogo universitetu "Harkivsky politehnychny institut ": ST. ScienceP. pr. temachnost vipusk: Tehnologii v mashinobuduvanni. - Kharkiv: NTU KhPI, 2010. - No 49. - pp 111-116. **6.** Kane M.M. et al. *Quality Management Engineering*. - Moscow: Mechanical Engineering, 2010. - 416 p. **7.** Timofeev U.V., et al. *Technological bases ensure productivity, accuracy and quality gear treatment quenched coarse-grained gearP*. News of Donetsk Natsionalnogo tehchnogo universitetu: ST. ScienceP. pr. Seriya: Mashinobuduvannya i mashinoznavstvo. - Donetsk: DNTU, 2013. - No 1 (10) '(2013). - P. 131-140. **8.** Klochko A.A., U.V Timofeev and A. N., Shelkovoy. *Fields optimal. control the parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gearP*. Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramatorsk: DSEA, 2012. - Vol. 32. - P. 332-343. **9.** Shelkovoy A.N., U.V Timofeev and A.A. Klochko. *AN Technological obpespechenie given system parameters of the surface layer of cylindrical gears hardened coarse-grained*. Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Vol. 32. - P. 274-280.

*Поступила (received) 05.09.2014*

## УДК 621.91

**М.С. СТЕПАНОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;  
**М.С. ІВАНОВА**, асистент НТУ «ХПІ»

### ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПОСЛІДОВНО-ПАРАЛЕЛЬНІЙ ОБРОБЦІ ОТВОРІВ КОМБІНОВАНИМ ОСЬОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ

Досліджена осьова складова сили різання і крутний момент при послідовно-паралельній схемі різання комбінованим осьовим інструментом. Досліджений вплив кількості ступенів комбінованого осьового інструмента на сумарні силові навантаження та характер їх зміни при збільшенні кількості одночасно працюючих ступенів інструмента. Зроблено висновок про доцільну кількість одночасно працюючих ступенів комбінованого осьового інструмента.

**Ключові слова:** комбінований осьовий інструмент, режими різання, осьова сила різання, крутний момент, відведення стружки.

**Вступ.** Одним з показників, що підвищують собівартість виробу, є витрати на енергію, яка витрачається при роботі верстата. Величина енергетичних витрат при обробці отворів на металорізальних верстатах прямо пропорційно залежить від величин сил різання, які виникають внаслідок дії різальних кромок на оброблюваний матеріал. Більш того, величини сили

© М.С. Степанов, М.С. Іванова, 2014

різання та крутильного моменту є важливими характеристиками процесу обробки, від яких залежить умови роботи устаткування та інструменту, точність обробки деталі тощо.

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** При обробці ступінчастих отворів автор роботи [1] пропонує отвори діаметром більше 30 мм свердлити за два та більше переходи, спочатку свердлом меншого діаметру, далі – потрібного. В роботі [2], навпаки, для скорочення часу обробки при свердлінні ступінчастих отворів рекомендують починати свердління з отворів більших діаметрів. В роботі [3] також запропоновано при обробці лезовими інструментами виконувати видалення припусків за один або декілька переходів. Крім того, з метою зменшення величини поведіння осі отвору перед свердлінням роблять попереднє засвердлювання (зацентрування) коротким жорстким свердлом.

Для підвищення продуктивності обробки ступінчастих отворів за рахунок концентрації технологічних переходів використовують комбіновані осьові інструменти (КОІ). Найбільший ступінь концентрації технологічних переходів досягається при послідовно-паралельній та паралельній схемі роботи ступенів такого інструмента. Це зменшує тривалість часу обробки, але призводить до концентрації сил різання.

**Метою статті** є дослідження осьової складової сили різання та крутного моменту при обробці отворів КОІ.

**Постановка проблеми.** Раніше [4] на базі використання енергетичного критерію була розроблена математична модель стійкості КОІ від дії всіх складових сил різання, на основі яких отримані значення критичних подач. Проте вплив конструктивних параметрів такого інструмента, а саме кількості одночасно працюючих ступенів, на силові характеристики процесу різання матеріалів недостатньо досліджено.

В умовах обробки КОІ по паралельній або послідовно-паралельній схемі різання можуть бути характерні особливості у формуванні сумарних силових параметрів (осьової сили та крутного моменту).

**Матеріали досліджень.** Процес обробки КОІ має свої особливості. Внаслідок великої кількості одночасно працюючих різальних кромки, видалення стружки відбувається у більш складних умовах, ніж при обробці стандартним осьовим інструментом, що ускладнює її виведення із зони різання та утруднює підведення ЗОР.

Різниця між діаметрами ступенів також може призвести до погіршення умов транспортування стружки і, навіть, її пакетування, що в свою чергу спричиняє утворення несприятливих умов різання із-за зростання сил тертя.

В зв'язку з вищевказаним, величина сили різання та крутий момент, що виникають при обробці КОІ, є важливими характеристиками процесу обробки отворів. При послідовно-паралельній роботі ступенів КОІ осьову складову сили різання та крутий момент можна визначити:

$$P_o = \sum_{i=1}^n P_{oi} = P_{o1} + P_{o2} + P_{o3} + \dots + P_{on};$$

$$M_{kp} = \sum_{i=1}^n M_{kpi} = M_{kp1} + M_{kp2} + M_{kp3} + \dots + M_{kpn},$$

де  $P_{o1}, P_{o2}, P_{o3}, P_{on}, M_{kp1}, M_{kp2}, M_{kp3}, M_{kpn}$  – осьова складова сили різання та крутний момент на першому, другому, третьому та  $n$ -ому ступені КОІ відповідно.

З урахуванням формул [5] для визначення осьової сили та крутого моменту при свердлінні та розсвердлюванні можемо записати:

$$\begin{aligned} P_{o\Sigma} &= 10 \cdot C_p \cdot d_1^q \cdot S^y \cdot K_p + 10 \cdot C_p \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \\ &+ 10 \cdot C_p \cdot \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \dots + 10 \cdot C_p \cdot \left(\frac{d_n - d_{n-1}}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p = \\ &10 \cdot C_p \cdot S^y \cdot K_p \cdot \left[ d_1^q + \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q + \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q + \dots + \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \right]; \\ M_{kp} &= 10 \cdot C_M \cdot d_1^q \cdot S^y \cdot K_p + 10 \cdot C_M \cdot d_1^q \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \\ &+ 10 \cdot C_M \cdot d_2^q \cdot \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p + \dots + 10 \cdot C_M \cdot d_{n-1}^q \cdot \left(\frac{d_n - d_{n-1}}{2}\right)^q \cdot S^y \cdot K_p = \\ &10 \cdot C_M \cdot S^y \cdot K_p \cdot \left[ d_1^q + d_1^q \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q + d_2^q \cdot \left(\frac{d_3 - d_2}{2}\right)^q + \dots + d_{n-1}^q \cdot \left(\frac{d_2 - d_1}{2}\right)^q \right], \end{aligned}$$

де  $C_p, C_M, K_p, q, y$  – емпіричні коефіцієнти та показники ступеню, які залежать від умов обробки (матеріалу деталі, матеріалу інструмента, наявності ЗОР, форми заточки інструмента тощо);  $d_1, d_2, d_3, d_{n-1}, d_n$  – діаметр першого, другого, третього,  $n-1$ -го та  $n$ -го ступенів КОІ.

**Результати досліджень.** Для визначення впливу кількості одночасно працюючих ступенів КОІ типу «ступінчасте свердло» на сумарну осьову складову сили різання та сумарний крутний момент нами були проведені експерименти. Режими обробки призначалися у відповідності до даних з довідника [5] та технічних нормативів [6] для свердлення стандартними свердлами.

Результати сумарної осьової сили різання, отримані при обробці ступінчастими свердлами за послідовно-паралельною схемою різання, порівнювали з результатами осьової складової сили різання, отриманими при

свердлінні стандартними свердлами з діаметрами  $d_{ce}$  рівним діаметру останнього ступеня ступінчастого свердла  $d_n$ , тобто максимальному діаметру різального ступеня (рис. 1, 2).

Аналіз графіків (див. рис. 1, 2) показує, що при послідовно-паралельній обробці отворів КОІ зі збільшенням кількості ступенів такого інструмента сумарні значення осьової складової сили різання та крутильного моменту знижуються, причому максимальний градієнт зниження спостерігається при свердлінні отворів двоступінчастим інструментом. Це явище дозволяє зробити висновок, що найбільш доцільно використовувати двоступінчасті та триступінчасті КОІ не лише з точки зору забезпечення точності (зменшення поведіння осі отвору), але і з точки зору покращення силових характеристик.

Для зниження силових навантажень з метою зменшення витрат енергії КОІ типу «ступінчасте свердло» можна також використовувати для обробки гладких наскрізних отворів. В цьому випадку загальна глибина різання розподіляється між ступенями інструменту. Нами було досліджено вплив величина діаметра першого ступеня двоступінчастих свердел з діаметром другого ступеня  $d_2 = 30$  мм на сумарні силові характеристики (рис. 3, 4).

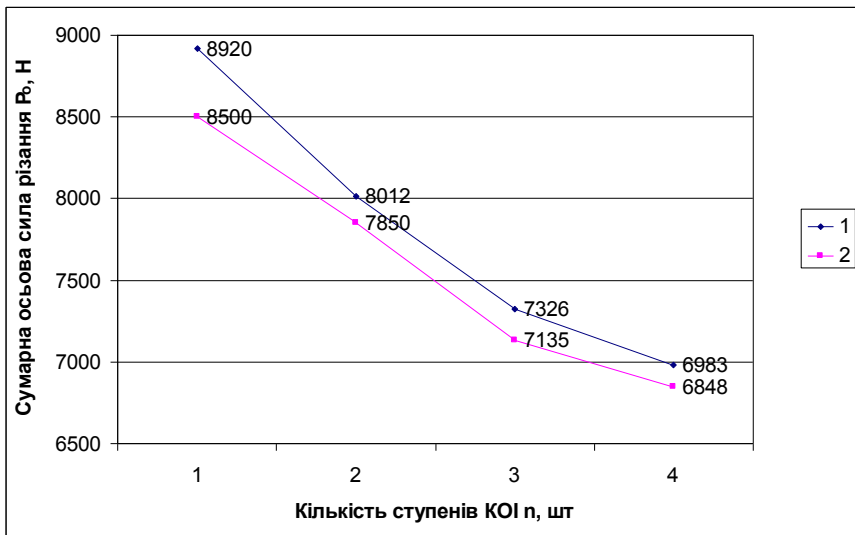


Рис. 1 – Вплив кількості ступенів КОІ на сумарну осьову складову сили різання при послідовно-паралельній обробці: 1 – матеріал заготовки сталь 45, матеріал інструмента Р9К5,  $v=20$  м/хв.,  $S=0,4$  мм/об; 2 – матеріал заготовки сталь 30ХГСА, матеріал інструмента Р6М5,  $v=30$  м/хв.,  $S=0,2$  мм/об

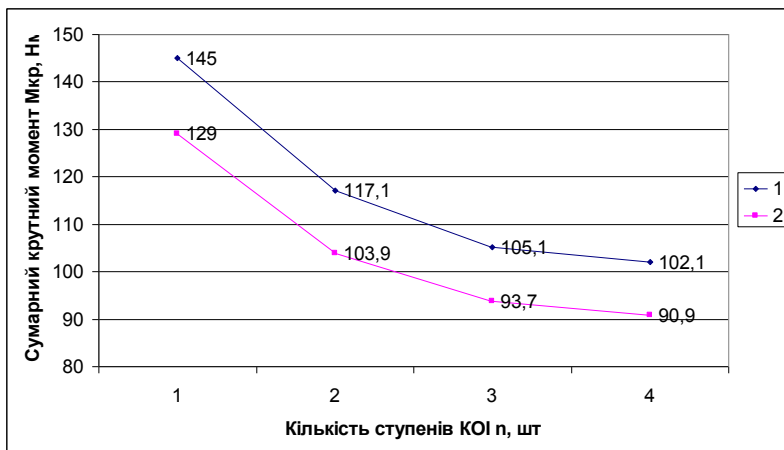


Рис. 2 – Вплив кількості ступенів КОІ на сумарний крутильний момент при послідовно-паралельній обробці: 1 – матеріал заготовки сталь 45, матеріал інструмента Р9К5,  $v=20$  м/хв.,  $S=0,4$  мм/об; 2 – матеріал заготовки сталь 30ХГСА, матеріал інструмента Р6М5,  $v=30$  м/хв.,  $S=0,2$  мм/об

Аналіз графіків (див. рис. 3, 4) показує, що діаметр першого ступеня КОІ також впливає на величину осьової складової сили різання та крутильний момент, причому зі збільшенням діаметру першого ступеня ці параметри на досліджуваних режимах різання зменшувались.

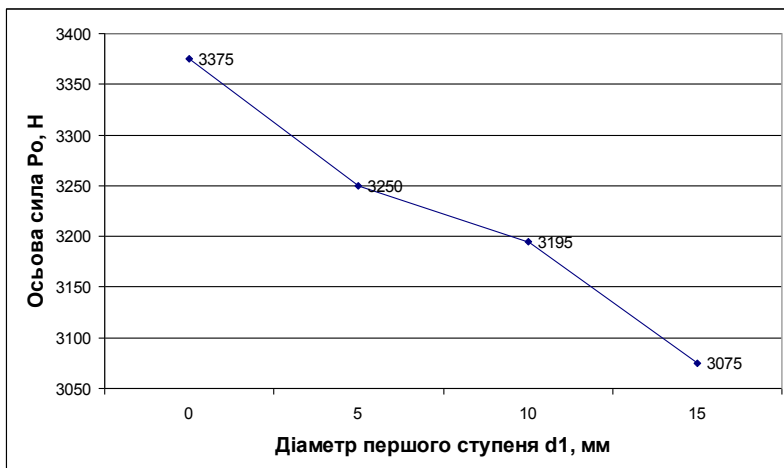


Рис. 3 – Вплив величини діаметра першого ступеня двоступінчастого свердла на сумарну осьову складову сили різання



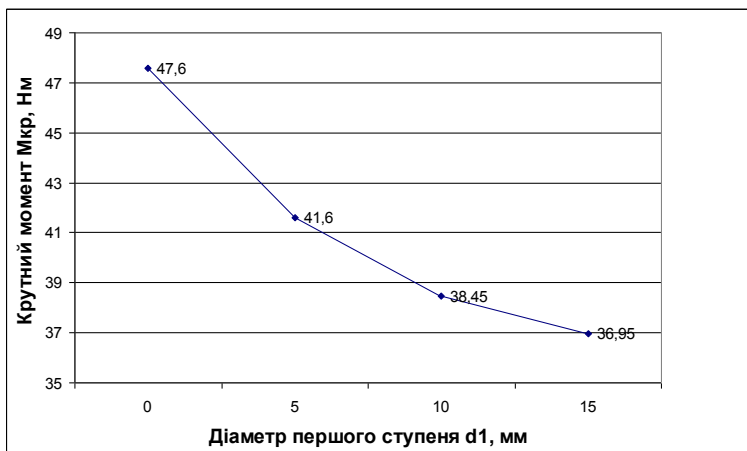


Рис. 4 – Вплив величини діаметра першого ступеня двоступінчастого свердла на сумарний крутящий момент

**Висновки.** Для зменшення силових навантажень та енергетичних витрат при обробці отворів доцільно застосовувати комбінований осьовий інструмента з кількістю ступенів не більше трьох. Причому, у разі використання, наприклад, двоступінчастого свердла, ефективне зменшення силових навантажень досягається при співвідношенні діаметрів ступені  $d_2/d_1 \approx 2$ .

**Список літератури:** **1.** Новиков. Ф.В. Теоретические основы технологии машиностроения: Учеб. / Ф.В. Новиков, А.А. Якимов, Г.В. Новиков, Н.И. Решетов. – Одесса. : ОНПУ, 2002. – 492 с. **2.** Справочник метал листа : в 5-ти т. Т. 5 / Под ред. А.Н. Малова. – М. : Машгиз, 1960. – 1184 с. **3.** Новиков Ф.В. Разработка математической модели обработки отверстий в высокоточных деталях / Ф.В. Новиков, В.И. Полянский // Тези доповідей XXI міжнародн. наук.-практич. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – С. 135. **4.** Мальшко И.А. Осевые комбинированные инструменты (рекомендации по проектированию и эксплуатации) / И. А. Мальшко. – Донецк: ПКТИ, 1996. – 135 с. **5.** Справочник технолога машиностроителя : в 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мецгерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение. 1985. – 496 с. **6.** Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с ЧПУ. В 2-х ч. – М. : Экономика, 1990. – 208 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Novikov., F. V, A. A. Jakimov, G. V. Novikov and N. I. Reshetov. *Teoreticheskie osnovy tehnologi mashinostroenija*. Odessa: ONPU, 2002. Print. **2.** Malov, A. N. *Spravochnik metallista*. Moscow: Mashgiz, 1960. Print. **3.** Novikov, F. V. and V. I. Poljanskij. "Razrabotka matematicheskoj modeli obrabotki otverstij v vysokotocznyh detaljah." *Tezi dopovidej XXI mizhnarodn. nauk.-praktich. konf. "Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja"*. Kharkov: NTU "KhPI", 2013. Print. **4.** Malyshko, I. A. *Osevyje kombinirovannye instrumenty (rekomenyacii po proektirovaniju i jekspluatacii)*. Doneck: PKTI, 1996. 135. Print. **5.** Kosilova, A. G. and R. K. Meshherjakov. *Spravochnik tehnologa mashinostroitelja*. Moscow:

## УДК 621.9.044

**С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**Е.В. БАСОВА**, канд. техн. наук, науч. сотр. НТУ «ХПИ»;  
**Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
**А.К. МЯЛИЦА**, д-р техн. наук, проф., ХГАПП, Харьков.

### **ПОВЫШЕНИЕ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ**

Рассмотрен алгоритм реализации технологии изготовления качественной и точной машиностроительной продукции из труднообрабатываемых материалов на базе современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Приведены особенности обработки закаленных сталей. Обоснованы перспективы энергетического подхода для определения области существования технологических режимов высокоскоростной обработки материалов. Приведены зависимости изменений физических параметров от увеличения скорости резания.

**Ключевые слова:** технология обработки, высокоскоростная обработка, CAD/CAE/CAM/CAPP-системы, труднообрабатываемые материалы, энергетический подход, режимы обработки.

**Введение.** Качество и точность обработки сложнопрофильных поверхностей деталей зависят как от кинематических характеристик оборудования, так и от динамической, термической и статической устойчивости технологической системы. В условиях современного состояния отечественного машиностроительного производства чистовая обработка поверхностей деталей из сложнообрабатываемых материалов, в том числе и из закаленных сталей, обеспечивается в основном абразивной обработкой. До последнего времени это объяснялось разным уровнем оборудования для шлифования и лезвийной обработки. Станки токарной и фрезерной групп не могли обеспечить точность и качество обработки, которые достигались при абразивных операциях. Кроме того технологический процесс изготовления сложнопрофильной продукции требовал применения большого количества инструмента, схем закрепления и базирования, и соответственно большого количества вспомогательных приспособлений, что негативно сказывалось на качестве и точности обработки. Однако с появлением нового поколения оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), которое имеет достаточную точность перемещений и жесткость технологической системы, возросла перспектива высококачественной и высокоточной

© С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская, А.К. Мялица, 2014

высокоскоростной токарной и фрезерной обработки сложнообрабатываемых материалов с минимальным количеством переустановок.

**Анализ работ и источников информации.** Анализ современных источников информации показывает [1], что при реализации технологии высокоскоростной обработки (ВСО) на обрабатывающих центрах (ОЦ) повышенная локальная устойчивость процесса резания возникает тогда, когда частота импульсов врезания инструмента в материал больше собственной частоты колебаний самого нежесткого элемента технологической системы СПИЗ, как правило – инструмента. Для обеспечения жесткости инструмента при ВСО на ОЦ рекомендуется использовать современные термопатроны.

ВСО закаленных сталей – отдельная задача, которая требует глубокого изучения.

Анализа современных источников информации подчеркивает, что на сегодняшний день существует много исследований по лезвийной механообработке, однако мало практических работ, которые направлены на изучение физических и механических особенностей обработки закаленных сталей. Отсутствие понимания физико-механических процессов в зоне обработки привело к разрозненности в рекомендациях производителей режущего инструмента. В работах [2-6] сформулированы и аргументированы принципиальные отличия обработки закаленной стали:

- при обработке закаленной стали формирование суставчатой (пилообразной) стружки происходит за счет надлома обрабатываемого материала. То есть формирование разрыва материала происходит на открытой поверхности в тот момент, когда обрабатываемый материал достигает предельного напряжения сдвига. Следовательно, именно надлом отвечает за процесс стружкообразования;

- не смотря на то, что стружка надлома, полученная посредством адиабатического сдвига при резании труднообрабатываемых материалов, подобна суставчатой стружке, полученной при механообработке закаленной стали, - это два разных вида стружки, так как они имеют разные механизмы формирования;

- процесс стружкообразования характеризуется малым углом сдвига материала в плоскости обработки. Угол сдвига уменьшается с увеличением твердости обрабатываемого материала и слабо зависит от переднего угла режущей кромки инструмента;

- при обработке закаленной стали радиальная составляющая силы резания больше касательной, и эта разница увеличивается с развитием износа инструмента по задней поверхности режущей кромки. Это объясняется свойствами упругости обрабатываемого материала. Большое значение радиальной составляющей силы резания является первопричиной возникновения погрешности обеспечения точности при обработке деталей из закаленных сталей;

- тангенциальная и радиальная составляющие силы резания зависят от величины переднего угла режущей кромки инструмента. Отмечается, что при значении переднего угла режущей кромки в  $0^\circ$  твердость обрабатываемого материала не влияет на составляющие силы резания, однако при величине угла  $-20^\circ$  и неизменной твердости материала значения компонент силы резания уменьшаются;

- тангенциальная и радиальная составляющие силы резания зависят от износа инструмента по задней поверхности режущей кромки неодинаково. При увеличении износа по задней поверхности в диапазоне  $(0 \div 0,2)$  мм, радиальная составляющая силы резания увеличилась в 4 раза.

Учитывая сложность разработки конкурентоспособной технологии обработки закаленной стали необходимо учесть ряд вопросов, которые требуют глубокого понимания и изучения: во-первых, наличие угла режущей кромки при обработке хрупкого материала и его корреляция с направлением распространения разрушения с точки зрения технологии машиностроения может обеспечить целостность и износостойкость деталей машин в процессе эксплуатации; во-вторых, для обеспечения качества рабочих поверхностей необходимо понимание природы источников высокой температуры в зоне обработки закаленной стали, ее влияние на процесс резания, и как результат на формирование физико-механических характеристик обработанного материала и др.

**Цель исследования.** Целью работы является рассмотрение основных этапов создания конкурентоспособной технологии качественной и точной обработки сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых материалов в условиях развития отечественного машиностроения.

**Постановка задачи.** В результате оптимизации цен на ОЦ, расширение номенклатуры сложнопрофильных деталей, более эффективного программирования, а также целого ряда преимуществ многокоординатной обработки по сравнению с другими видами изготовления промышленной продукции появилась необходимость в поиске новых технологических решений обработки сложнопрофильных деталей с учетом всех этапов от проектирования до изготовления продукта в условиях автоматизированного производства с применением современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Создание новой технологии должно учитывать необходимость определения области существования технологических режимов высокоскоростной обработки на этапе планирования техпроцесса изготовления детали, что позволит минимизировать или даже исключить дорогостоящие испытания и отработку режимов.

**Выбор и обоснование рациональной структуры процесса изготовления деталей из закаленных сталей.** Разработка конкурентоспособной технологии изготовления сложнопрофильных деталей из закаленных сталей с применением технологии ВСО требует рассмотрения комплекса технологических решений от проектированию высокоточных CAD-моделей, до их изготовления на современных ОЦ.

I ЭТАП: CAD (3D) объемное моделирование – основа создания конкурентоспособной технологии. Задача этого этапа создание CAD моделей деталей, точность которых раз в 10 выше, чем допуск чистовой обработки.

Наши исследования показывают, что достичь точности моделей возможно посредством описания сложнопрофильных поверхностей nurbs-кривыми и spline-кривыми 5-го порядка, так как 4-ый порядок является не достаточным для обеспечения точности описания поверхности, а 6-й – характеризуется наличием большого количества ошибок при сшивке сегментов сплайна.

Разработка высокоточных 3D CAD-моделей позволяет получить высокоточную конструкторскую документацию на изделие.

II ЭТАП: CAE-анализ на базе методов конечных элементов. Целью данного этапа является определение области существования рациональных режимов обработки закаленной стали. Для достижения цели необходимо изучение процесса резания, т.е. рассмотрение физико-механических особенностей процесса обработки закаленной стали. Для обеспечения точности обработки детали необходим прочностной расчет процесса обработки детали в условиях закрепления на ОЦ. Во избежание брака при изготовлении дорогостоящей продукции, необходима проверка точности работы механизма в сборке.

В процессе выполнение этого этапа нам удалось установить, что чем меньше энергии потребляется на начальный процесс резания, и чем быстрее достигается энергетический пик процесса механообработки, тем стабильнее дальнейшее течение и разрушение материала [7]. Такой результат дал нам основание для разработки подхода к определению области существования технологических режимов высокоскоростной обработки металлов, в том числе и закаленных сталей, на базе МКЭ.

Мы провели ряд экспериментов с применением имитационного моделирования процесса ВСО закаленной стали 38Х2МЮА в среде 3D CAE-модуля [8], моделирование велось с изменением глубины резания от 0,1 до 0,3 мм (рис. 1).

Из результатов моделирования установили, что диапазон существования режимов ВСО находится в ограниченной области глубин резания (для закаленной хромомолибденовой стали  $h=(0.1\div 0,2)$ ). С превышением глубины резания, выше критической, тепловые потоки в зоне обработки растут и превышают предельно допустимые значения, что, в свою очередь, может привести к появлению прижогов и неблагоприятных напряжений растяжения в нарушено-деформированном слое материала. Кроме того, результатом превышения глубины резания является нарушение условия пластического течения материала, при котором реализовываются условия разрушения материала при ВСО (рис. 1) [9].

III ЭТАП: САРР-автоматизированная система технологической подготовки производства. На этом этапе разработки технологии с ВСО необходимо выполнить выбор и обоснование рационального маршрута

обработки сложнопрофильной детали, на основании заданной модели изделия, выполненной в САД-системе и с учетом возможностей ОЦ, режущего инструмента и результатов исследований, полученных из САЕ-анализа.

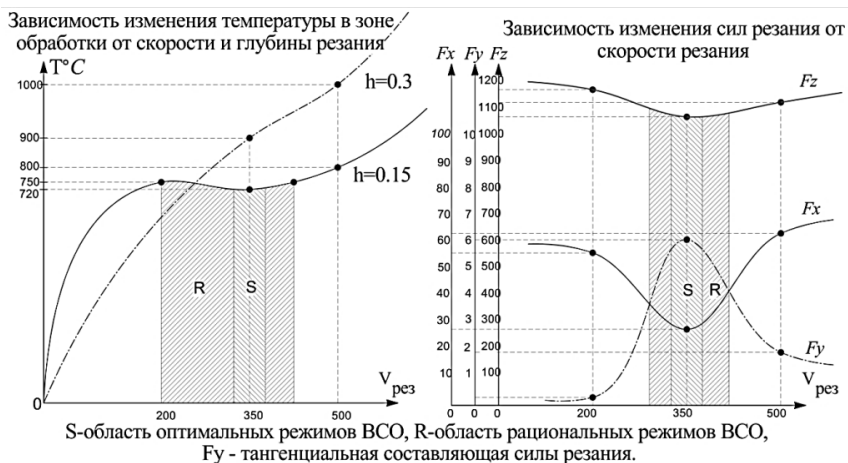


Рис. 1 – Зависимость изменений физических параметров от скорости резания

Выбор рационального маршрута технологического процесса изготовления сложнопрофильных деталей из труднообрабатываемых сталей зависит от требуемых качественных характеристик, выдвигаемых к рабочим поверхностям готового изделия. От выбора ТП зависит стоимость изготовления продукции.

IV ЭТАП: разработка САМ-программы. Этот этап требует разработки высокоточных и высококачественных траекторий перемещения инструмента на современных ОЦ. Возможности универсальных станков и устаревшего оборудования с ЧПУ крайне ограничены для реализации ВСО. При разработке высокоточных алгоритмов и управляющих программ, пригодных для современных систем с ЧПУ необходимо учитывать перемещение инструмента, таким образом, чтоб исключить зарезание прилегающих поверхностей. Разработка высокоточных траекторий возможна при реализации описания траектории перемещения инструмента посредством *nurbs*-интерполирования, либо кривыми 5-го порядка по высокоточным САД-моделям детали. Разработка высокоточных управляющих программ (УП) позволяет получить точность при 5<sup>н</sup>-координатной обработке равной 10-11 мкм, при позиционной обработке (3+2) – достигаемая точность равна 4-5 мкм.

V ЭТАП: изготовление сложнопрофильных деталей на современном оборудовании. На этом этапе выполняют обработку сложнопрофильной детали на основании полученных результатов предварительных этапов из САД/САЕ/САРР/САМ-систем.

VI ЭТАП: измерение готового изделия с помощью автоматизированной системы измерения станка.

Реализация такой технологии перспективна в условиях единичного и мелкосерийного производства.

**Выводы.** Учет всех равнозначно важных этапов от проектирования до изготовления детали на современных обрабатывающих центрах с применением современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем, является единственным направлением разработки высококачественной технологии, которая позволит получить конкурентоспособную продукцию и, одновременно, оптимизировать затраты на ее изготовление.

**Список литературы:** 1. Schmitz T.L. High-Speed Machining Frequency Response Prediction for Process Optimization / T.L. Schmitz, M. Davies, M. Kennedy // In Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, July 2000. North Carolina, – 2000. – 25 p. 2. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 590 с. 3. Внуков Ю. Н. Особенности расчета составляющих силы резания при торцевом фрезеровании сферическими фрезами / Ю.Н. Внуков, А.Г. Саржинская // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ «ХП». – Вып.5.- X., 2010. – С. 12-17. 4. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с. 5. Яцирицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах / П.И. Яцирицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск: Высшая школа, 1990. – 512 с. 6. Аршинов В.А. Резание металлов и режущий инструмент / А.В. Аршинов, Г.А. Алексеев. – М.: Машиностроение, 1976. – 440 с. 7. Доброворский С.С. Моделирование процесса высокоскоростного фрезерования закаленных сталей методом конечных элементов / С.С. Доброворский, Е.В. Басова, С.А. Щучев // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып.55. – С. 20-27. 8. Доброворский С.С. Исследование влияния технологических параметров процесса высокоскоростного фрезерования на качество обработки закаленных сталей / С.С. Доброворский, Е.В. Басова, Р.И. Соломатин / Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – X.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – Вып.60. – С. 54-62. 9. Басова Е.В. Технологическое обеспечение качества и точности поверхностей деталей из закаленных хромомолибденовых сталей методом высокоскоростного фрезерования: дис... канд. техн. наук : 05.02.08 / Басова Евгения Владимировна. – Харьков, 2014. – 236 с. – Библиогр. : с. 214–226.

**Bibliography (transliterated):** 1. Schmitz T.L., Davie M., Kennedy M. High-Speed Machining Frequency Response Prediction for Process Optimization. In Proceedings of the 2nd International Seminar on Improving Machine Tool Performance, July 2000. North Carolina, – 2000. – P.25 2. Poduraev V.N. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov. – Moscow: Vysshaja shkola, 1974. – 590 p. 3. Vnukov Ju.N., Sarzhinskaja A.G. Osobennosti rascheta sostavljajushhix sily rezanija pri torcevom frezerovanii sfericheskimi frezami. Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni: zb. nauk. prac' NTU «HP». – Vol.5. - Kharkov, 2010. – 12-17. 4. Sulima A.M., Shulov V.A., Jagodkin Ju.D. Poverhnostnyj sloj i jekspluatacionnye svojstva detalej mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 1988. – 240 p. 5. Jashhericyn P.I., Eremenk M.L., Fel'dshtejn E.E. Teorija rezanija. Fizicheskie i teplovyje processy v tehnologicheskix sistemah. – Minsk: Vysshaja shkola, 1990. – 512 p. 6. Arshinov V.A., Alekseev G.A. Rezanie metallov i rezhusnij instrument. – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 440 p. 7. Dobrovorskij S.S., Basova E.V., Shhuchev P.A. Modelirovanie processa vysokoskorostnogo frezerovanija zakaljonnyh stalej metodom konechnyh jelementov. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. – Kharkov: Nac. azerokosm. un-t «HAI», 2012. – Vol.55. – P. 20-27. 8. Dobrovorskij S.S., Basova E.V., Solomatin R.I. Issledovanie vlijanija tehnologicheskix parametrov processa vysokoskorostnogo frezerovanija na kachestvo obrabotki zakalennyh stalej. Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii: sb. nauch. tr. –

Kharkov.: Nac. ajerokosm. un-t «НАІ», 2012. – Vol.60. – P. 54–62. 9. *Basova E.V.* Tehnologicheskoe obespechenie kachestva i tochnosti poverhnostej detalej iz zakalennyh hromomolibdenovyh stalej metodom vysokoskorostnogo frezerovaniya: dis... kand. tehn. nauk : 05.02.08 / *Basova Evgeniya Vladimirovna.* – Kharkov, 2014. – 236 p. – Bibliogr. : P. 214–226.

*Поступила (received) 30.09.2014*

**УДК 621:519**

***Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА***, д.т.н., проф. ВНАУ, Вінниця;  
***О.А. ПЕРМЯКОВ***, д.т.н., проф. НТУ «ХПІ»

### **РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВЕРСТАТНИХ КОМПЛЕКСІВ ЗА РАХУНОК МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Основна ідея роботи полягає в розробці принципово нового підходу до моніторингу верстатного комплексу механічної обробки, сутність якого полягає в організації методики керування процесом механічної обробки на основі єдиного інтегрованого інформаційного середовища адаптованого до універсального комплексу комп'ютерного моделювання Matlab/Stateflow та Matlab/Simulink, при структурному поданні всіх складових процесу механічної обробки та моделювання як інструменту розв'язання задачі, що розширює функціональні можливості верстатних комплексів.

**Ключові слова:** верстатний комплекс, функціональні можливості, моніторинг, калібрування обладнання, процес механічної обробки, інформаційний, матеріальний та енергетичний потоки, багатоцільові та багатокоординатні верстати, верстати з паралельною кінематикою.

**Постановка проблеми.** Проблема забезпечення необхідної якості та експлуатації властивостей деталей машин набуває в машинобудуванні все більш важливого значення. Проте до теперішнього часу не розроблені узагальнені теоретичні залежності між параметрами якості поверхні, точністю обробки, експлуатаційними властивостями деталей і параметрами процесів механічної обробки, що дозволяють вирішувати задачу технологічного забезпечення заданих експлуатаційних властивостей деталей. Керування процесом формування поверхні з необхідними властивостями здійснюється переважно шляхом використання часткових експериментальних залежностей і таблиць режимів обробки. Складність проблеми полягає в тому, що при обробці деталей необхідно встановити такі умови обробки, які б забезпечували комплекс вимог щодо зносу інструменту, точності обробки, характеристикам якості поверхні, продуктивності тощо. Області найбільш ефективного використання виробничих систем перш за все визначаються технологічним обладнанням, яке є складовою частиною системи, номенклатурою оброблюваних деталей та автоматизованою системою керування.

---

© Н.Р. Веселовська, О.А. Пермяков, 2014



**Основна частина.** Розробку системи моніторингу режиму механічної обробки слід починати з визначення критерію оптимізації на основі техніко-економічного аналізу [3, 4, 6, 7]. На практиці найчастіше застосовуються критерії продуктивності та собівартості, які включають залежність стійкості інструменту від параметрів різання. В результаті оптимізації за цими критеріями знаходяться умови, які забезпечують максимальні (у першому випадку) і мінімальні (у другому випадку) значення даних критеріїв в певних ситуаціях. Такими умовами в багатьох ситуаціях виступають певні значення стійкості інструменту. Проте на виробництві часто ставиться задача знаходження максимально можливої продуктивності або мінімально можливої собівартості механічної обробки при заданих значеннях стійкості.

Останніми роками були зроблені спроби розробити інші залежності зносу або стійкості інструменту від параметрів різання. Проте розрахунки оптимальних режимів різання зручніше виконувати за цільовою функцією оптимізації, що є основою нормативів, за якими визначаються режими механічної обробки майже в усіх галузях машинобудування. Тому подальші обчислення будуть проводитися з використанням формули

$$P_v = \frac{bhs}{1 + \tau_{cm} (h^{x_v} \frac{318c_v k_v D^{q_v-1}}{z^{u_v-y_v} b^{r_v}} s^{y_v} n^{1-y_v})^{1/m}}, \quad (1)$$

де  $\frac{318c_v k_v D^{q_v-1}}{z^{u_v-y_v} b^{r_v}} = A_1$ ,  $c_v$  – постійна величина для певної групи оброблюваних матеріалів;  $k_v$  – коефіцієнт, залежний від властивостей оброблюваного матеріалу, ріжучою частини інструменту і від типу рідини, що змащує-охолоджує;  $D$  – діаметр фрези або заготовки;  $n$  – частота обертання, об./хв.;  $sz = s/(nz)$  – подача, мм/об., мм/зуб.;  $z$  – число зубців фрези;  $h$  і  $b$  – глибина і ширина різання, мм;  $x_v, y_v, r_v, q_v, u_v$ ;  $m$  – показники мір, залежні від властивостей інструменту і умов різання (значення цих показників і коефіцієнтів  $c_v$  і  $k_v$  містяться у відповідних довідниках).

Для різних видів обробки значення  $c_v, k_v$  і показників мір змінних різні. Крім того, показники  $x_v, y_v, r_v, q_v, u_v$  використовуються не у всіх видах механічної обробки.

Вхідними даними моделі є електронний образ деталі, який включає геометричні та конструктивні параметри. Як приклад на рис. 1 наведена реалізація електронної моделі виробу (корпусу гідрозподільника) засобами САПР AutoDESK Inventor [5].

Створена система описує всі зазначені вище потоки і відображає такі дії: декомпозицію електронного образу і перетворення його в процес механічної обробки, який відображає система; отримання оптимізованого процесу механічної обробки (шляхом моделювання); вибір в залежності від поточного стану системи маршруту обробки; складання моделі виробничої системи обробки із підсистем; декомпозицію геометричного образу деталі,

отриманого із системи автоматизованого проектування; декодування керівної програми для системи числового програмного управління, отриманої із системи адаптивного управління; вибір і призначення інструменту; моніторинг стану процесу обробки на верстаті тощо.

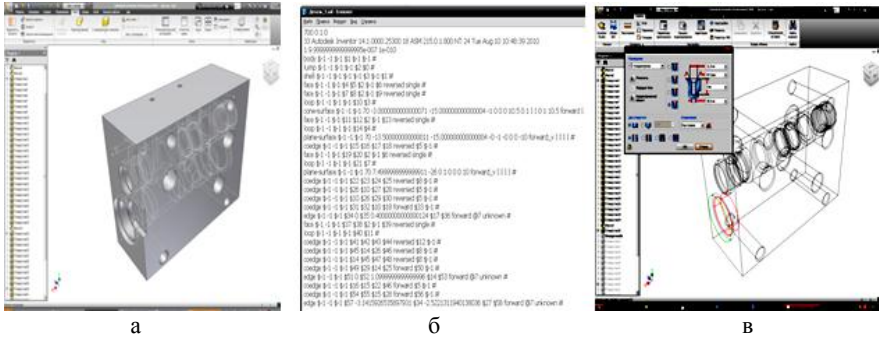


Рис. 1 – Електронний образ деталі: а - 3D модель корпусу розподільника; б - фрагмент текстового файлу, в - параметрична модель корпусу, що містить опис геометрії та елементів деталі

Оптимізація технології обробки деталі на верстаті здійснюється за класичною методикою на основі критерію максимальної продуктивності обробки. У верстатів традиційних схемних рішень задаються і вимірюються порівняно прості графічні об'єкти: лінії, площини, циліндри, які відповідають простим рухам, а верстати паралельної кінематики мають складні елементарні рухи контроль яких є утруднений. Тому розроблено подійно-орієнтований граф станів процесу обробки, який реалізований за допомогою комплексу Stateflow [2].

Оптимізація процесу обробки деталі на верстаті здійснюється за методикою, що базується на основі критерію максимальної продуктивності обробки. Конструктивними та технологічними обмеженнями виступають найменша можлива частота обертання фрези  $n_{\theta min}$ , при якій погіршуються умови отримання стружки і з'являється наріст, найбільша можлива частота обертання фрези  $n_{\theta max}$ , що визначається конструктивно заданою верхньою межею діапазону та величиною  $n_{\theta max}$ , при перевищенні якої відбувається швидкий знос і руйнування інструменту внаслідок його нагрівання, найбільша подача на зубець  $s_{z1max}$ , обмежена допустимою чистотою обробки та міцністю інструменту, найбільша і найменша подачі  $s_{min} \leq s \leq s_{max}$  зміни частоти обертання приводу подачі. Допустимий момент на інструменті  $M \leq \min(M_{1\theta}, M_{2\theta})$ , що визначається міцністю інструменту і механізмів верстата (рис. 2). Особливістю оптимізації процесу механічної обробки на верстаті паралельної кінематики є те, що подача  $S_z$  здійснюється одночасними переміщеннями декількох кінематичних ланок. Тому оптимізацію процесу обробки доводиться здійснювати в два етапи. На першому визначати необхідні технологічні

показники процесу обробки ( $s_z, h_i b, n_d$ ). На другому етапі за визначеним значенням  $s_z$  визначати оптимальний розподіл переміщень кожного кінематичного ланцюга, необхідних для реалізації визначеного  $s_z$ . За цільову функцію обрано мінімум суми робіт, виконаних на кожному переміщенні:

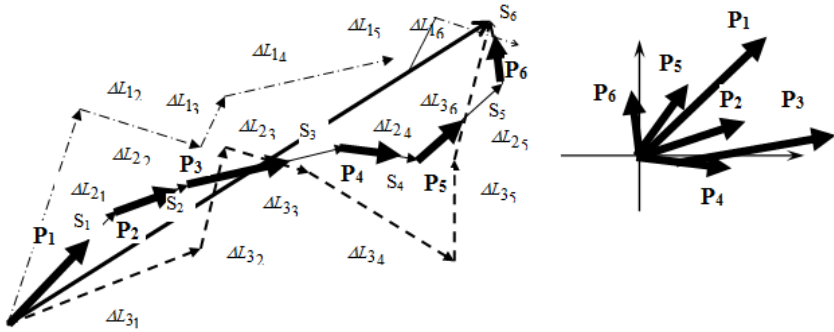


Рис. 2 – Варіанти траєкторій координатних рухів приводів верстата паралельної кінематики

За конструктивні обмеження на цьому етапі приймаються геометричні характеристики робочого простору верстата (здатність приводу забезпечити необхідне значення переміщення під заданим кутом), похибка апроксимації траєкторії переміщення (що визначається мінімальною дискретністю переміщень приводів) та максимально допустимі зусилля, що розвиваються приводами переміщення [1, 3, 5]. Просторова система верстата паралельної кінематики є статично невизначеною системою. Для визначення навантажень, що виникають в приводах подач верстата, необхідно створювати та реалізовувати його математичну модель. Моделювання руху платформи верстата паралельної кінематики здійснюється за допомогою пакета Simulink математичної системи Matlab. Розрахунок здійснюється за допомогою блоків розширення пакета SimMechanicsP. Пакет розширення SimMechanics системи Simulink призначений для фізичного моделювання. Його мета - технічне проектування та моделювання механічних систем (в межах законів теоретичної механіки). Модель механізму створюється на основі задання інерційних параметрів його рухомих частин.

Найпростіший спосіб визначення цих параметрів - використання твердотільної моделі механізму (рис 3), створеної за допомогою CAD системи. SimMechanics дозволяє моделювати поступальний та обертовий рух в трьох площинах. SimMechanics містить набір інструментів для задання параметрів ланок (маса, моменти інерції, геометричні параметри), кінематичних обмежень, локальних систем координат, способів задання і вимірів параметрів руху. SimMechanics дозволяє створювати моделі механічних систем подібно іншим Simulink-моделям у вигляді блок-схем.

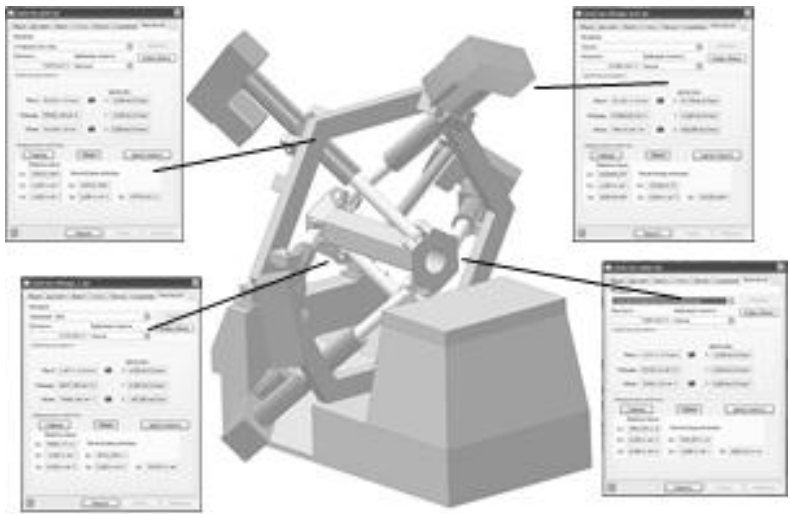


Рис.3 – Твердотільна модель механізму, створеної за допомогою CAD системи

На рис. 4-7 наведено процедури розрахунку кінематичних і силових параметрів верстата паралельної кінематики та геометрична модель механізму. В моделі передбачено задання двох основних видів навантаження – обробка осьовими інструментами (свердла, зенкери, розвертки) та фрезами (кінцевими, канавковими, грибоквими). Моделювання руху платформи здійснюється за принципом зворотної динаміки. Геометричні характеристики руху визначаються на основі точної геометричної моделі. А далі в розраховані координати вноситься поправка, яка враховує динамічні явища, що виникають при русі внаслідок інерційних властивостей самої платформи і ланок приводів.

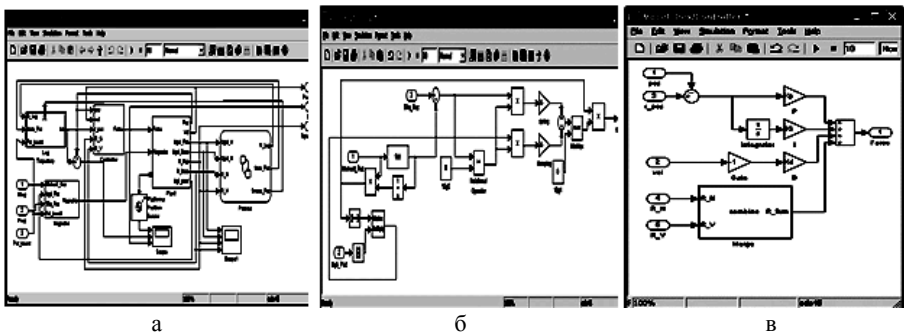


Рис. 4 – Математична модель розрахунку параметрів верстата: а - головний модуль процедури; б - модуль задання навантаження платформи; в - модуль визначення навантаження в приводі лінійного переміщення штанги

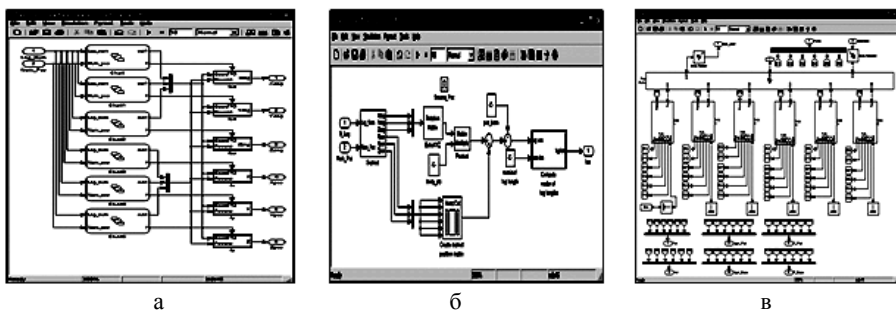


Рис. 5 – Математичні моделі розрахунку координат траєкторії руху платформи: а - модуль задання; б - модуль розрахунку; в - модуль моделювання

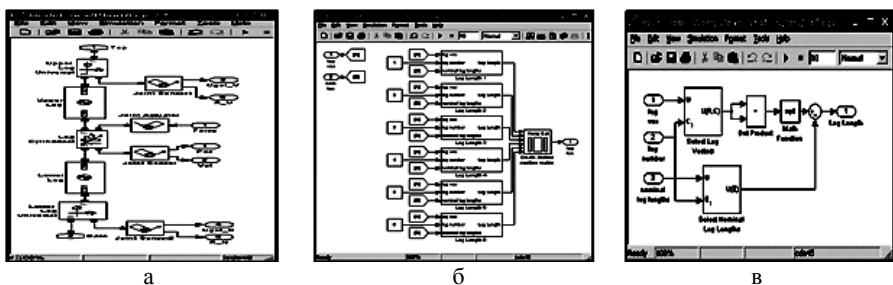


Рис.6 – Математичні моделі визначення переміщення штанги: а - модуль моделювання руху штанги; б - модуль визначення поточної довжини штанг механізму; в - модуль розрахунку поточної довжини і-ої штанги

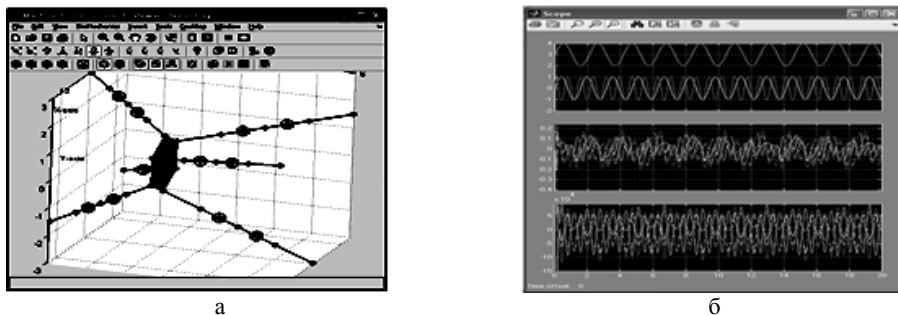


Рис. 7 – Результати моделювання: а - візуалізація результатів моделювання; б - результати моделювання руху платформи

На основі розрахунку параметрів руху приводної штанги платформи визначаються кути нахилу штанги, реакції в шарнірах та приводах переміщення

штанг механізму. Моделі, що використовують блоки функцій пакета SimMechanics, є універсальними і дозволяють створювати моделі нових механізмів просто заміною деяких модулів.

**Висновки** Використання даного інструменту дозволяє автоматизувати процес програмування і модифікації та налаштувань системи ЧПК з метою зниження трудомісткості проведення контрольних робіт. Використання результатів роботи суттєво підвищить показники ефективності та надійності виробничих систем механообробки і дозволить вести корекцію в план-графіки роботи автоматизованої лінії, що забезпечує більш ефективне її використання і зниження енергозатрат. Встановлені умови обробки забезпечують вимогу до зносу інструменту, точності обробки, характеристик якості поверхні, продуктивності.

**Список літератури:** 1. *Веселовська Н.Р.* Подійно-орієнтований графо-аналітичний опис елементів гнучких інтегрованих виробничих систем / *Н. Р. Веселовська // Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях».*-2010.- №1(57).-С.43-53. 2. *Метьюз Д. Г.* Численные методы. Использование MATLAB / *Метьюз Д. Г., Финк К. Д.* - 3-е изд. - М.: Изд. Дом "Вильямс", 2001. - 720 с. 3. *Митрофанов В.Г.* САПР в технологии машиностроения / *В.Г. Митрофанов, О.Н. Калачев, А.Г. Схиртладзе* и др. - Ярославль. Изд. ЯрГТУ.1995. -298 с. 4. *Струтинський В.Б.* Загальні методи діагностування та принципи підвищення надійності технологічних систем та процесів/ *В. Б. Струтинський, Н. Р. Веселовська // Всеукраїнський НТЖ «Вібрації в техніці та технологіях».*- 2007. - №4(49). - С.81-85. 5. *Петраков Ю.В.* Пути развития интегрированных CAD/CAM систем в машиностроении / *Ю.В. Петраков // Сучасні технології в машинобудуванні.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №3. – С.160-167. 6. *Пермяков А.А.* Компонетика многопозиционных агрегатированных технологических систем механообработки / *А.А. Пермяков // Східно-Європейський журнал передових технологій.* – Харків. – 2005. – Вып.3/1(15). – С.9-17. 7. *Пермяков А.А.* Об экономии электроэнергии и ее нормировании в механообработке / *А.А. Пермяков, А.С. Забара // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».* - Харків: НТУ «ХПІ». - 2009. - №1. - С.43-51.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Veselovs'ka N.R.* Podijno-orijentovanyj grafo-analitychnyj opy's elementiv gnuchkyx integrovanyx vy'robny'chy'x sy'stem. Vseukrayins'ky'j NTZh «Vibraciyi v texnici ta tehnologiyax».-2010.- No1(57).-P.43-53. 2. *Met'juz D.G., Fink K.D.* Chislennye metody. Ispol'zovanie MATLAB - 3-e izd. - Moscow: Izd. Dom "Vil'jame", 2001. - 720 P. 3. *Mitrofanov V.G., Kalache O.N., Shirtladze A.G.* i dr. SAPR v tehnologii mashinostroenija. - Jaroslavl'. Izd. JarGTU.1995. -298 P. 4. *Struty'ns'ky'j V.B., Veselovs'ka N. R.* Zagal'ni metody` diagnostuvannya ta pry'ncy'pu` pidvy`shhennya nadijnosti` texnologichny'x sy'stem ta procesiv. Vseukrayins'ky'j NTZh «Vibraciyi v texnici ta tehnologiyax».- 2007. - No4(49). - P.81-85. 5. *Petrakov Yu.V.* Puty` razvy'ty'ya y`ntegy'rovany'x CAD/CAM sy'stem v mashy'nostroeny'j. Suchasni tehnologiyi v mashy'nobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2009. – No3. – P.160-167. 6. *Permyakov A.A.* Komponenty`ka mnogopozy'cy`onny'x agregaty'rovanny'x tehnology`chesky'x sy'stem mehanoo'brabotky`. Sxidno-Yevropejs'ky'j zhurnal peredovy'x tehnologij. – Kharkiv. – 2005. – Vol.3/1(15). – P.9-17. 7. *Permjakov A.A., Zabara A.S.* Ob jekonomii jelektrojenergii i ee normirovanii v mehanoo'brabotke. Visnik Nacional'nogo tehnicnogo universiteta «KhPI». - Kharkiv: NTU "KhPI". - 2009. - No1. - P.43-51.

*Надійшла (received) 15.10.2014*

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

**Д. В. СТАЛИНСКИЙ**, д-р техн. наук, ген. д-р, Укр ДНТЦ  
«Енергосталь», Харьков;

**Е. М. ПОМАЗАН**, магистр, НТУ «ХПИ».

## **ИЗМЕНЕНИЯ ГЛУБИНЫ ОБДИРОЧНОГО ШЛИФОВАНИЯ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ КРИВИЗНОЙ ПРОКАТА И ПРЕРЫВИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КРУГА**

В статье представлена модель динамической системы обдирочного шлифования (ДСОШ) с воздействием на нее кривизной проката и прерывистой поверхностью шлифовального круга. Анализ модели динамической системы обдирочного шлифования выполнен прямым моделированием на компьютере и посредством амплитудно-частотной характеристики системы. Этот анализ позволяет назначать условия обдирочного шлифования для достижения требований к качеству проката после обдирочного шлифования.

**Ключевые слова:** обдирочное шлифование, динамика, моделирование, шлифовальный круг, прокат.

**Введение.** Обдирочное шлифование – шлифование проката для удаления дефектного поверхностного слоя производится по упругой схеме, то есть при постоянном усилии прижима круга к прокату, которая должна обеспечить постоянную, необходимую глубину шлифования.

**Обзор проблемы.** Если шлифуется сортовой прокат прямоугольного или шестигранного сечения, который имеет кривизну, то усилие прижима круга  $P_y$  к прокату будет колебаться в связи с инерционностью деталей и узлов обдирочно-шлифовального станка (ОШС) в нормальном направлении к зачищаемой поверхности. Колебания  $P_y$  ведут к колебанию глубины шлифования, которая ограничивается требованиями на операцию зачистки.

Если для зачистки проката применяют круг с прерывистой режущей поверхностью для снижения температуры нагрева проката, то будет также иметь место колебание глубины шлифования.

Колебания глубины шлифования, возбуждаемые кривизной проката исследованы в [1], а возбуждаемые прерывистой поверхностью круга в [2]. Однако, в обоих случаях модель ОШС двумерная. В первом случае это прокат и шлифовальная бабка, а во втором прокат и круг на шпинделе станка.

**Цель работы.** В настоящей статье дискретность представления ОШС увеличивается до трехмассовой «прокат-круг-шпиндельная бабка», что позволяет более точно оценить и сравнить колебания глубины шлифования от обоих источников и разработать практические рекомендации по управлению этими колебаниями.

**Трехмассовая модель.** Графически трехмассовая модель ОШС представлена

на рис. 1. На этом рисунке  $m_1, m_2, m_3$  – массы шлифовальной бабки, круга и проката соответственно;  $C_1, C_2, C_3$  – жесткости связи круга с бабкой, круга с прокатом и проката со станиной станка соответственно. Шлифовальная бабка массой  $m_1$  присоединена к станине только через демпфер  $b_1$ , что моделирует упругую схему шлифования. Бабка прижимается к прокату усилием  $P_{np}$ . Демпферы  $b_1, b_2, b_3$  моделируют силы сопротивления в связях бабки со станиной, круга с бабкой и проката со станиной.

На рис. 1 представлено статическое равновесие системы обдирочного шлифования, когда круг прижат к прокату с постоянной силой  $P_{np}$  и шлифуется абсолютно ровный прокат кругом с правильной цилиндрической поверхностью. Таким образом  $P_{np}$  равна вертикальной составляющей силы шлифования  $P_y$  и шлифование осуществляется с постоянной  $h_{cm}$ .

Принимаем, что

$$P_y = C_2 \cdot h, \quad (1)$$

где  $C_2$  – «жесткость» пружины моделирующей сопротивление обрабатываемой поверхности внедрению шлифовального круга, что в дальнейшем называется «жесткостью» процесса шлифования.

В рассматриваемом случае  $h = h_{cm}$  и все силы, действующие на элементы станка в вертикальном направлении находятся в статическом равновесии:

$$C_3 \cdot x_{3cm} = C_2 \cdot h_{cm} = P_y. \quad (2)$$

Функцией  $h(t)$  можно описать кривизну проката и тем самым учесть возмущающее воздействие на динамическую систему обдирочного шлифования (ДСОШ) кривизной проката.

Рассматривая динамическое равновесие всех трех масс, то есть с учетом сил инерции при движении этих масс, сил демпфирования и жесткости связи между массами получена система дифференциальных уравнений в системе координат:  $x$  – перемещение круга,  $x_1$  – перемещение шлифовальной бабки,  $x_2$  – перемещение проката; описывающих динамическую систему обдирочного шлифования.

$$\left. \begin{aligned} m_2 \cdot \ddot{x} + b_2 \cdot \dot{x} + C_1 \cdot x_1 &= C_2 \cdot x_2; \\ m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{x}_1 - C_1 \cdot x - b_2 \cdot \dot{x} &= 0; \\ m_3 \cdot \ddot{x}_3 + b_3 \cdot \dot{x}_3 + C_3 \cdot x_3 &= C_2 \cdot x_2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Перемещение круга  $x$  в вертикальном направлении будет меньше высоты  $h$  набегающего выступа проката на  $x_2$  – увеличение глубины шлифования и опускания  $x_3$  проката за счет возросшей силы резания, т.е.  $x = h - x_2 - x_3$ . Подставив это значение  $x$  в уравнение (3), получим:



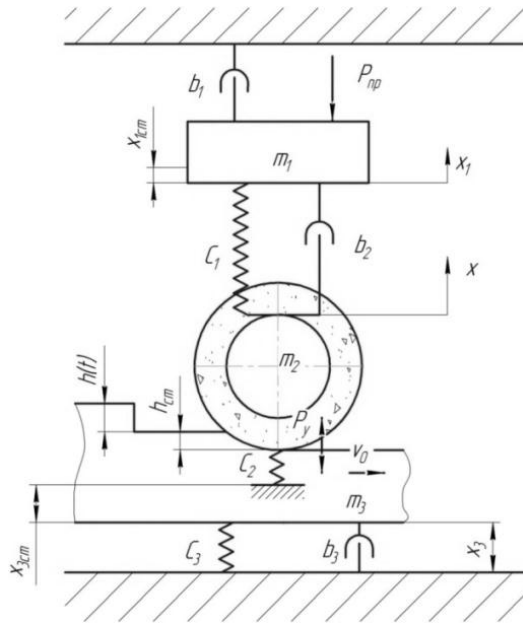


Рис. 1 – Модель обдирочно-шлифовального станка в статическом состоянии

$$\left. \begin{aligned}
 m_2 \cdot (\ddot{x}_2 + \ddot{x}_3) + b_2 \cdot (\dot{x}_2 + \dot{x}_3) + C_1 \cdot (x_2 + x_3) + C_1 \cdot x_1 + C_2 \cdot x_2 &= \\
 = m_2 \cdot \ddot{h} + b_2 \cdot \dot{h} + C_1 \cdot h; \\
 m_1 \cdot \ddot{x}_1 + b_1 \cdot \dot{x}_1 + b_2 \cdot (\dot{x}_2 + \dot{x}_3) + C_1 \cdot (x_1 + x_2 + x_3) &= b_2 \cdot \dot{h} + C_1 \cdot h; \\
 m_3 \cdot \ddot{x}_3 + b_3 \cdot \dot{x}_3 + C_3 \cdot x_3 - C_2 \cdot x_2 &= 0.
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Процесс обдирочного шлифования моделируется уравнением (1) и его важнейший параметр  $C_2$  находится экспериментально. В [3] приведены результаты исследования шлифования шестигранного проката из стали 40Х на станке СВД-60 кругом ПП300х30х75 38А100СТ2Б при скорости шлифования  $V = 40$  м/с, скорости продольной (осевой) подачи  $V_{oc} = 7$  м/мин и усилия прижима  $P_y = (10...40)$  Н/мм (Ньютон на миллиметр высоты круга) в виде полинома второй степени в зависимости  $h(P_y)$ .

Линеаризация этой зависимости методом наименьших квадратов в диапазоне  $P_y = (10...30)$  Н/мм позволила получить линейную модель (1) с  $C_2 = 26,3$  Н/мм и погрешностью не более 5% от нелинейной. Следовательно,  $h(P_y) = 1/C_2 = 0,038$  мм/Н.

В рассматриваемых исследованиях ставится цель моделирования прерывистого шлифования, экспериментальных исследований, которого нет для упругой схемы шлифования. Однако, в [2] показано, что «упругое» шлифование кругом формы ПП с прерывистой режущей поверхностью аналогично сплошному шлифованию кругами в меньшей высотой.

Количественная связь между глубиной шлифования сплошным  $h_{cn}$  и прерывистым  $h_{cn}$  кругами получена из условия, что глубина шлифования прямо пропорционально зависит от удельной нормальной силы, прижимающей круг к прокату.

В результате получено, что для кругов одинаковой высоты:

$$h_{np} = h_{cn} \cdot \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1}, \quad (5)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – размеры выступа и впадины на наружной прерывистой поверхности круга формы ПП.

Для рассматриваемого примера прерывистого шлифования с  $l_1 = 29$  мм;  $l_2 = 17$  мм и с учетом выражения (5) получена «жесткость» прерывистого шлифования  $C_{2np} = 10,46$  Н/мм. Можно сказать, что пружина моделирующая процесс прерывистого шлифования в  $(l_1 + l_2)/l_1$  раза менее жесткая, в сравнении с шлифовальным кругом со сплошной режущей поверхностью.

При прерывистом шлифовании длину дуги контакта  $l(t)$  занятой абразивом можно описать функцией:

$$l(t) = l_{cp} \cdot (1 + \sin(\omega_{np} \cdot t)), \quad (6)$$

где  $l_{cp} = (L \cdot l_1) / (l_1 + l_2)$  – среднее значение длины дуги контакта занятой абразивом,

$L$  – длина дуги контакта ( $L < l_2 < l_1$ );

$\omega_{np} = \frac{2\pi \cdot v}{l_1 + l_2}$  рад/с – круговая частота прерывистого шлифования.

Необходимо отметить, что полученное  $C_{2np} = 10,46$  Н/мм – это значение «жесткости» процесса при среднем значении дуги контакта  $l_{cp}$ . поэтому с учетом выражения (6):

$$C_2(t) = C_{2np} \cdot (1 + \sin(\omega_{np} \cdot t)) = C_{2np} \cdot dC(t), \quad (7)$$

где  $dC = 1 + \sin(\omega_{np} \cdot t)$ .

Как отмечено выше воздействие на ДСОШ кривизной проката можно описать функцией  $h(t)$  – высотой набегающего выступа проката в результате его кривизны. Последняя нормируется в технических условиях значением  $K$

на длине  $L$ . Эту кривизну удобно моделировать волнистостью проката в виде синусоиды:

$$h(t) = \frac{K}{2} \cdot \sin(\omega_p \cdot t), \quad (8)$$

где  $\omega_{np} = \frac{\pi \cdot V_0}{L \cdot 60}$  рад/с – круговая частота кривизны проката.

Анализ полученного описания ДСОШ уравнениями (3) с внешними воздействиями согласно (6) и (7) полезно произвести при помощи частотных характеристик и прямым моделированием.

Структурная схема ДСОШ показана на рисунке 2.

Согласно схемы рис. 2 моделирование деформаций  $d$  упругой системы станка может выполняться при сплошном шлифовании, когда сила  $P_y$  моделируется произведением  $C_2 \cdot x_2$ , и при прерывистом шлифовании, когда  $P_y = C_{2np} \cdot dC \cdot x_2$ .

Передаточную функцию динамической системы сплошного шлифования получим пользуясь правилами преобразования структурных схем в следующем виде:

$$W_{СП}(S) = \frac{d(S)}{h(S)} = \frac{W_{ШШ}(S) \cdot W_{СТ}(S)}{1 + W_{ШШ}(S) \cdot W_{СТ}(S)}, \quad (9)$$

где  $W_{ШШ}(S) = \frac{P_y(S)}{x_2(S)} = C_2$  – передаточная функция процесса шлифования;

$W_{СТ}(S) = \frac{x(S)}{P_y(S)} = W_{КБ} + W_{ПО}$  – передаточная функция станка;

$W_{КБ}(S) = \frac{x(S)}{P_y(S)}$  – передаточная функция системы «круг-бабка»;

$W_{ПО} = \frac{x_3(S)}{P_y(S)}$  – передаточная функция системы «прокат-опоры».

Преобразовав по Лапласу уравнения (3) при нулевых начальных условиях, получено:

$$W_{КБ}(S) = \frac{m_1 S^2 + b_1 S + C_1}{(m_2 S^2 + b_2 S + C_1) \cdot (m_1 S^2 + b_1 S + C_1) - C_1 \cdot (b_2 S + C_1)}; \quad (10)$$

$$W_{ПО}(S) = \frac{1}{m_3 S^2 + b_3 S + C_3}. \quad (11)$$

Для сплошного шлифования в рассматриваемом примере  $W_{ШШ} = 26,3$  м/мин для круга высотой 1 мм. Так как круг ПП300х30х75 высотой  $B=30$  мм, то  $W_{ШШ} = 26,3 \cdot 30 \cdot 1000 = 789000$  Н/мм. Кроме  $W_{СП}(S)$

представляет интерес определение передаточной функции отклонения глубины шлифования от настройки при воздействии кривизной проката:

$$W_{om.2}(S) = \frac{x_2(S)}{h(S)}. \quad (12)$$

Согласно рис. 2:

$$x_2(S) = h(S) - d(S). \quad (13)$$

В свою очередь из (9) получаем:

$$d(S) = h(S) \cdot \frac{W_{пш}(S) \cdot W_{CT}(S)}{1 + W_{пш}(S) \cdot W_{CT}(S)}.$$

Подставив  $d(S)$  в (13) и выполнив преобразования получим:

$$\begin{aligned} W_{om.2}(S) &= \frac{x_2(S)}{h(S)} = \frac{1}{1 + W_{пш}(S) \cdot W_{CT}(S)} = \\ &= \frac{1}{1 + W_{пш}(S) \cdot (W_{КБ}(S) + W_{ПО}(S))} \end{aligned} \quad (14)$$

**Анализ характеристик.** Анализ частотных характеристик для  $W_{cn}(S)$  и  $W_{om.2}(S)$  выполнен в пакете «СС» применительно к «станку-стенду» УкрНИИМет для исследования процесса обдирочного шлифования с полученными экспериментально и расчетом [1] параметрами этого станка:  $m_1=300$ кг,  $b_1=5057$ (Н·с)/м,  $C_1=3,36 \cdot 10^7$  Н/м;  $m_2=10$ кг,  $b_2=3000$ (Н·с)/м;  $m_3=10$ кг,  $b_3=71$ (Н·с)/м,  $C_3=3,3 \cdot 10^6$  Н/м.

Передаточные функции  $W_{cn}(S)$  и  $W_{om.2}$ , обозначенные соответственно как  $g7$  и  $g8$  в пакете «СС», приведены на распечатке их определения на рис. 3.

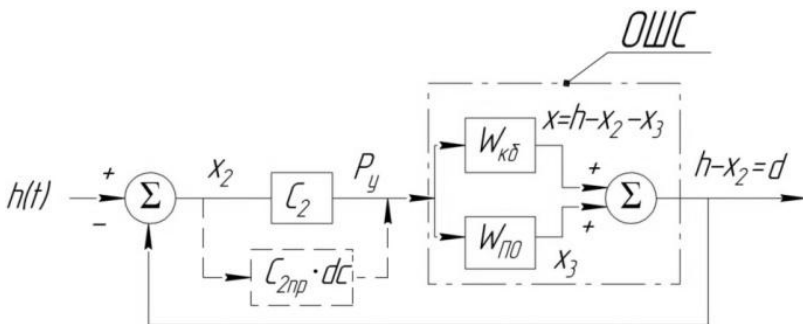


Рис. 2 – Структурная схема ДСОШ

Type help, winhelp, or demos to get started.  
Type CTRL+ALT+I to interrupt execution.

```

CC>g1=789000
CC>g2=1/(10*s^2+71*s+3.6e+06)
CC>g3=(3000*s+3.36e+07)/(300*s^2+5057*s+3.36e+07)
CC>g4=1/(10*s^2+3000*s+3.36e+07-3.36e+07*g3)
CC>g5=g2+g4
CC>g6=g1*g5
CC>g7=g1*g5/(1+g1*g5)
CC>g8=1/(1+g1*g5)
CC>g7

      7,98e+05( 6000s^4 +1,022e+06s^3 +1,185e+10s^2 +1,905e+11s +1,21e+14)
g7(s) = -----
      3e+04s^6 +9,719e+06s^5 +1,2e+11s^4 +6,678e+12s^3 +4,702e+16s^2
      +7,637e+17s +9,653e+19

CC>g8

      s( 10s^2 +71s +3,6e+06)( 3000s^3 +9,506e+05s^2 +1,043e+10s +1,699e+11)
g8(s) = -----
      3e+04s^6 +9,719e+06s^5 +1,2e+11s^4 +6,678e+12s^3 +4,702e+16s^2
      +7,637e+17s +9,653e+19

CC>bode(g7)
CC>figure
CC>bode(g8)
CC>figure
CC>bode(g8)

```

Рис. 3 – Распечатка расчета  $W_{cn}(S) = g7(S)$  и  $W_{om,2} = g8(S)$ .

На рис. 4 приведены амплитудная (сплошная линия) и фазовая (пунктирная линия) характеристики для  $W_{cn}(S)$ . Из амплитудной характеристики видно, что система сплошного шлифования имеет три резонанса на частотах воздействия 42,32 рад/с, 647 рад/с 1875 рад/с.

Частота воздействия кривизной проката  $\omega_k$  при  $V_0 = 7$  м/мин и  $L = 1$  м согласно (8) равна 0,366 рад/с, то есть значительно меньше наименьшей частоты собственных колебаний станка 42,32 рад/с. Частота воздействия прерывистой поверхностью круга  $\omega_{np} = (2\pi \cdot V) / (l_1 \cdot l_2) = 2666,7$  рад/с больше наибольшей собственной частоты колебания станка 1875 рад/с. Таким образом, резонанс при воздействии кривизной проката и прерывистой поверхностью круга невозможен. Такой вывод справедлив для конкретных условий шлифования и параметров прерывистой поверхности круга.

На рис. 5 а представлены частотные характеристики, полученные в пакете «CC» для  $W_{om,2}(S) = x_2(S) / h(S)$ . Обращает на себя внимание участок амплитудной характеристики до резонансного пика на низшей собственной частоте. Этот участок имеет монотонный подъем с ростом частоты воздействия  $h(t)$  – неровностью проката. Таким образом, с ростом частоты

воздействия неровностью проката растет амплитуда отклонения глубины шлифования  $x_2(t)$  от заданной настройкой станка.

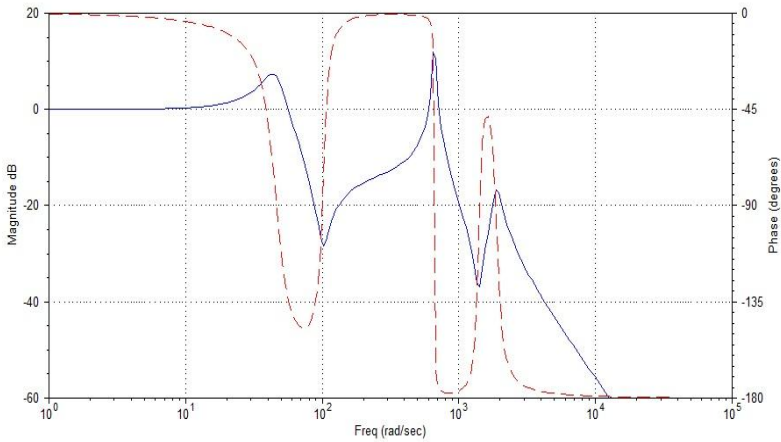
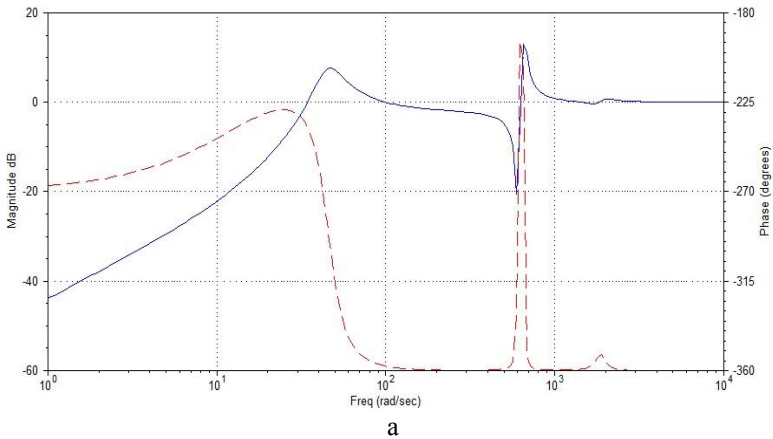
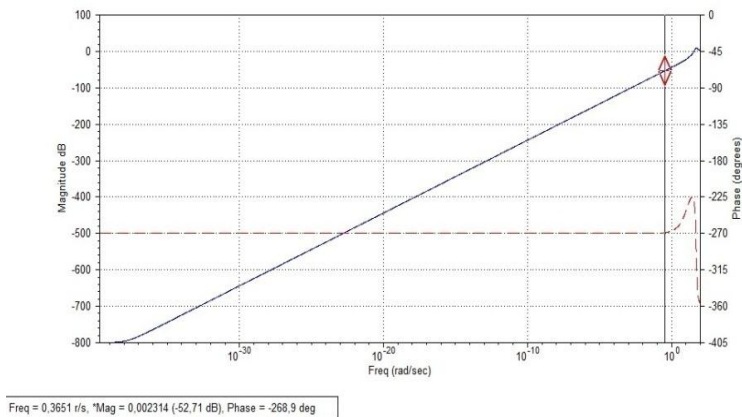


Рис. 4 – Амплитудная (сплошная линия) и фазовая (пунктирная линия) характеристики  $W_{cn}(S) = h_f(S) / h(S)$

Реальные значения частот неровностей проката обычно не превышают  $1 \text{ rad/s}$ . Поэтому, для практики интересен именно этот диапазон частот, для которого приведены частотные характеристики на рис. 5, б.





б

Рис. 5 – Амплитудная и фазовая характеристики из  $W_{om.2} = x_2(S) / h(S)$ .

Диапазоны частот: а – (1...10000) рад/с; б – (0...50) рад/с.

Зная частоту кривизны проката  $\omega_k$  можно найти амплитудную характеристику  $A(\omega) = \frac{x_2}{k/2}$  и отсюда  $x_2 = A(\omega) \cdot k/2$ . В рассматриваемом примере  $k=0,005$  м, для  $\omega_k=0,366$  рад/с считываем амплитудную характеристику  $Mag=0,0023$  м (см. рис. 5, б). Таким образом, амплитуду колебаний глубины шлифования  $x_2$  вследствие кривизны проката получим следующей:  $x_2=0,023 \cdot (0,005 / 2)=5,76 \cdot 10^{-6}=5,78$  мкм.

Прямое моделирование системы ДСОШ было выполнено в пакете «VisSim». Результаты моделирования, то есть  $x_2$  – отклонение глубины шлифования от заданной настройкой станка, приведены на графиках рис. 6.

На рисунке 6, а показана величина  $x_2$  как результат воздействия кривизной проката и прерывистой поверхности круга. Из этого рисунка видно, что  $x_2$  за счет кривизны проката  $k=5$  мм на длине  $L=1$  м представляет собой синусоиду с амплитудой  $1,5 \cdot 10^{-5}$  м = 15 мкм. Выделив в графике рис. 6, а участок в пределах времени 15 – 19 с и увеличив его получим рис. 6, б. Из него видно, что на низкочастотную синусоиду накладывается высокочастотная с амплитудой  $0,0355 \cdot 10^{-5}$  м = 0,3 мкм. Это колебания глубины шлифования  $x_2$  от воздействия прерывистой поверхностью круга, что показано на рис. 6, в. Таким образом, из этого рисунка видно, что колебания глубины шлифования, возбуждаемые прерывистой поверхностью круга, очень малы и могут оказать влияние только на шероховатость

зачищаемого проката и не могут быть ограничением на применение прерывистого шлифования при зачистке.

Колебания глубины шлифования, возбуждаемые кривизной проката значительно больше. Однако, как установлено моделированием, колебание глубины шлифования кругом со сплошной режущей поверхностью в диапазоне применяемых режимов шлифования не превышает допустимых ее значений составляющих обычно 10% от нормируемой толщины снимаемого дефектного слоя с поверхности проката.

В связи с меньшей «жесткостью» процесса прерывистого шлифования (в рассматриваемом примере  $C_{np} = 10,46 \text{ Н/мм}$ ) по сравнению с «жесткостью» сплошного шлифования ( $C_2 = 26,3 \text{ Н/мм}$ ), колебания глубины шлифования возбуждаемые кривизной проката будут в  $(C_2 / C_{2np}) = 2,514$  раза больше. Такой результат подтверждается прямым моделированием шлифования проката с прерывистой поверхностью ( $x_2 = 15 \text{ мкм}$ ) и анализом частотной характеристики из  $W_{om.2}(S)$  приведенной на рис. 5, б ( $x_2 = 5,78 \text{ мкм}$ ). Отношение  $15 / 5,78 = 2,59$  практически совпадает с отношением  $C_2 / C_{2np} = 2,514$ .

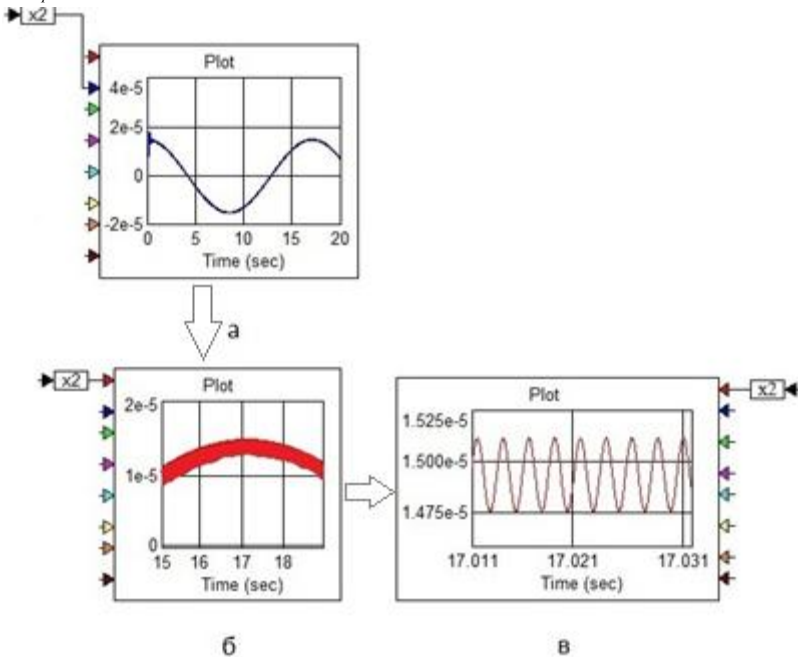


Рис. 6 – Колебание глубины шлифования  $x_2$ : а - результат воздействия кривизной проката и прерывистой поверхностью круга; б – аштабированный участок синусоиды в пределах времени 15-19 с; в – колебания глубины шлифования



Следовательно, прерывистое обдирочное шлифование по упругой схеме ведет к большему колебанию глубины шлифования по сравнению с шлифованием кругом со сплошной режущей поверхностью. Поэтому, если для шлифования сплошным кругом колебания глубины шлифования возбуждаемые кривизной проката не превышают обычно допустимое в 10% отклонение от нормируемой толщины снимаемого слоя, то при применении прерывистого шлифования требуется проверка выполнения требований к отклонению глубины шлифования от нормируемой техническими условиями.

Эта проверка может быть проведена теоретически, так как это выполнено в настоящей статье на основе анализа амплитудно-частотной характеристики по передаточной функции  $W_{om,2}(S)$ .

**Выводы.** На основании прямого моделирования и анализа амплитудно-частотных характеристик системы обдирочного шлифования установлено:

1. Колебания глубины обдирочного шлифования кругом со сплошной режущей поверхностью возбуждаемые кривизной проката обычно на превышают 10% от нормируемой глубины зачистки проката.

2. Колебания глубины обдирочного шлифования возбуждаемые прерывистой поверхностью круга находятся в пределах шероховатости поверхности и, следовательно, не являются ограничением на применение прерывистого шлифования при зачистке проката.

3. Поскольку круги для прерывистого шлифования можно изготавливать из сегментов, расход абразивного материала будет значительно меньше чем при шлифовании цельными кругами. Кроме этого известное свойство прерывистого шлифования значительно снижает нагрев шлифуемой поверхности вместе с уменьшением расхода абразива в сборных кругах и создает предпосылки эффективного его применения при зачистке проката.

4. Колебания глубины прерывистого шлифования возбуждаемые кривизной проката значительно больше этих колебаний при шлифовании кругом со сплошной режущей поверхностью и возможность применения прерывистого шлифования требует проверки экспериментально или теоретически как это приведено в настоящей статье.

**Список литературы:** 1. *Сталинский Д. В.* Оптимальное проектирование динамических систем обдирочно-шлифовальных станков / *Д. В. Сталинский, Ю. А. Сизый.* – Х. : ХГПУ, 2000. – 113 с. 2. *Сизый Ю. А.* Динамика упругой схемы обдирочного шлифования кругом с прерывистой режущей поверхностью / *Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский, А. Ю. Пирогов* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 28. – С. 14–20. 3. *Сталинский Д. В.* Теория и методы проектирования технологии обдирочного шлифования / *Д. В. Сталинский.* – Х. : Рубикон, 2001. – 230 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Stalinskij D. V., Sizyj Ju. A.* Optimal'noe proektirovanie dinamicheskikh sistem obdirochno-shlifoval'nyh stankov. – Kharkov : HGPU, 2000. – 113 P. 2. *Sizyj Ju. A., Stalinskij D. V., Pirogov A. Ju.* Dinamika uprugoj shemy obdirochnogo shlifovanija krugom s preryvistoj rezhushhej poverhnost'ju. Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. – 2007. – No 28. – P. 14–20. 3. *Stalinskij D. V.* Teorija i metody proektirovanija tehnologii obdirochnogo shlifovanija. – Kharkov. : Rubikon, 2001. – 230 P.

*Поступила (received) 15.10.2014*

*Е. В. НАБОКА*, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
*М.Э.КОЛЕСНИК*, канд. техн. наук, ст. викладач НТУ «ХПИ»

## **ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ МЕЖДУНАРОДНЫХ СТАНДАРТОВ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

В работе проведен анализ стандартов ISO и даны рекомендации по их применению при любых видах производства, во всех организациях независимо от вида деятельности, размера организации и поставляемой продукции (услуг). Выявлена взаимосвязь между основными стандартами качества продукции. Предложены требования, которые могут применяться для разработки системы качества изготовления продукции.

**Ключевые слова:** стандарт, сертификация, качество, управление, производство.

**Введение.** Общеизвестно на мировом уровне, что XXI век будет веком качества, так как в условиях глобального рынка уровень качества товаров, услуг и менеджмента становится главным, определяющим фактором конкурентоспособности, а значит, и благополучия любых предприятий, организаций, регионов, стран. В условиях жесткой конкурентной борьбы на рынке отечественных и зарубежных организаций, выжить могут лишь компании, обладающие главным конкурентным преимуществом – высоким качеством менеджмента. Мировая практика показала, что применение международных стандартов ISO серии 9000 на сегодняшний день является надежным инструментом для построения эффективной системы управления, повышения конкурентоспособности и создания благоприятных условий для роста инвестиций. Международные стандарты распространяются сегодня на все сферы деятельности: промышленность и инновации, финансовые и иные услуги, социальную сферу, сферу управления, включая государственное и муниципальное управление. Т.е. стандартизация является важнейшим инструментом конкурентоспособности продукции.

**Цель статьи.** Внедрение международных стандартов в машиностроительное производство.

**Постановка задачи.** Стандартизация – это научно-техническая деятельность, направленная на достижение оптимальной степени упорядочения в определенной области посредством установления требований для всеобщего и многократного применения в отношении реально существующих или потенциальных задач.

Стандартизация решает поставленные перед ней задачи путем разработки, внедрения стандартов и других нормативных документов по стандартизации и проведения государственного надзора за ними.

Главной целевой установкой международных стандартов является: построение систем качества, обеспечивающих изготовление продукции, соответствующей требованиям заказчиков и соответственно ориентированных на

предоставление доказательств заказчику способности предприятия стабильно выпускать продукцию определенного уровня качества.

Стандарты серии ISO 9000 определяют задачи систем качества, которые необходимо выполнить, однако они не описывают способа их достижения и предоставляют такой выбор руководству предприятия. В стандартах дается различие между требованиями к системе качества и требованиями к продукции. На основе этого стандарты ISO применяются к организациям, обеспечивающим продукцией, относящейся ко всем общим категориям продукции (оборудование, программное обеспечение, перерабатываемые материалы, услуги), и ко всем характеристикам качества продукции

Проблема роста безопасности и качества продукции предприятий и услуг может быть решена на основе всеобщей стандартизации и сертификации в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001:2008. Как показала практика стран, входящих во Всемирную торговую организацию (ВТО), чем больше предприятий сертифицировано по ISO 9001:2008, тем выше конкурентоспособность и качество товаров и услуг в стране, тем меньше нужно применять меры для защиты рынков товаров и услуг. Сегодня в Украине сотни, а в Европе уже сотни тысяч предприятий внедрили и сертифицировали Систему менеджмента качества (СМК) на базе ISO 9001, и с каждым годом их число неуклонно растет.

**Материалы исследований.** Стандарты серии ISO 9000 – это пакет документов по обеспечению качества подготовленный членами международной делегации, известной как " ISO /Технический Комитет 176" (ISO/TC 176). В настоящее время серия ISO 9000 включает (см. рис. 1):

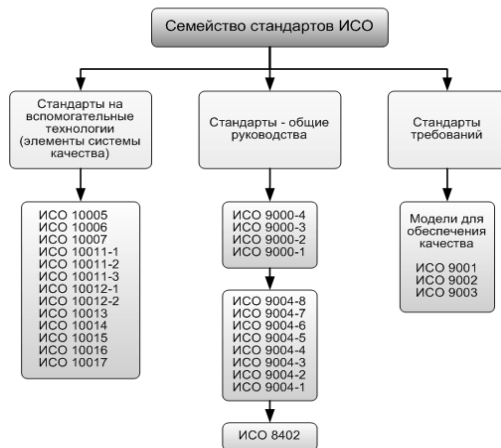


Рис.1 – Схема семейства стандартов качества ISO

Из стандартов серии ИСО 9000 три стандарта ISO 9001, ISO 9002 и ISO 9003 являются основополагающими документами системы качества,

описывающими модели обеспечения качества: ISO 9001 "Система Качества: Модель обеспечения качества при проектировании, разработке, производстве, монтаже и обслуживании"; ISO 9002 "Система Качества: Модель обеспечения качества при производстве, монтаже и обслуживании"; ISO 9003 "Система Качества: Модель обеспечения качества при окончательном контроле и испытаниях".

Анализ области применения и содержания стандартов этих стандартов позволяет выявить их взаимосвязь (рис. 2).

Систему качества изготовления продукции необходимо разрабатывать с учетом выполнения требований стандарта ISO 9001, т.к. они универсальны и подходят для любого вида производства, в то время как, требования стандартов ISO 9002, 9003 не в полной мере соответствуют нашему производству.

Стандарт ISO 9001:2008 состоит из следующих разделов:

Раздел 1. Область применения – описывает общие положения стандарта и его применение в организациях. Также определяет те случаи, когда предприятие, разрабатывающее и внедряющее систему качества, может сделать исключение из реализации требований стандарта.

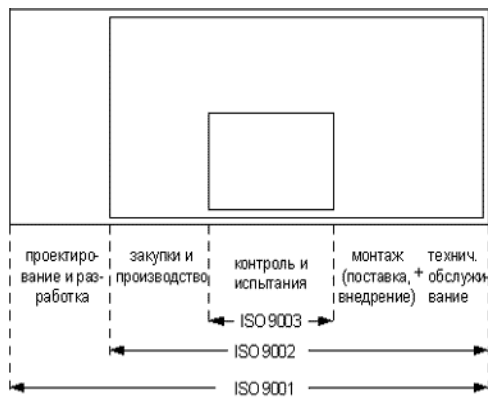


Рис.2 – Взаимосвязь между ISO 9001, 9002, 9003

Раздел 2. Нормативные ссылки – даются ссылки на стандарты серии ISO 9000.

Раздел 3. Термины и определения – приводятся термины и определения, используемые в стандарте.

Раздел 4. Система менеджмента качества – определяет общие требования к системе менеджмента качества, управлению документацией и записями по качеству.

Раздел 5. Ответственность руководства – определяет требования к административному управлению построением, внедрением и

функционированием системы менеджмента качества. Требования данного раздела предъявляются к высшему руководству организации и к системе административного управления.

Раздел 6. Менеджмент ресурсов – определяет требования к ресурсам, необходимым для разработки, внедрения и функционирования системы качества. К таким ресурсам стандарт относит человеческие ресурсы, материальные ресурсы, инфраструктуру и производственную среду.

Раздел 7. Процессы жизненного цикла – определяет требования к основным и обеспечивающим процессам предприятия. В этом разделе представлены, наиболее объемные требования, которые предъявляются к основной деятельности предприятия по управлению процессами производства продукции или предоставления услуг.

Раздел 8. Измерение, анализ и улучшение – определяет требования к проведению и организации анализа, измерений и улучшений системы менеджмента качества, процессов и выпускаемой продукции (оказываемым услугам).

Приложение А – приводится соответствие между разделами стандарта ISO 9001:2008 и ISO 14001:2004 (Системы управления окружающей средой. Требования и руководство по применению). Взаимосвязь этих стандартов приводится для того, чтобы организации могли строить интегрированные системы менеджмента качества и экологического менеджмента.

Приложение В – приводятся изменения в тексте стандарта ISO 9001:2008 по сравнению с текстом предыдущей редакции данного стандарта ISO 9001:2000.

Приложение С – Библиография. Список стандартов, использованных при разработке стандарта ISO 9001:2008.

**Результаты исследований.** Стандарт ISO 9001:2008 (в Украине ДСТУ ISO 9001:2009) предназначен для разработки и внедрения систем менеджмента качества предприятий с целью последующей сертификации или для заключения контрактов с другими предприятиями, которые предъявляют требования к стабильности и надежности выполнения контрактных обязательств.

Требования, содержащиеся в стандарте ISO 9001:2008 являются общими и предназначены для применения ко всем организациям независимо от вида деятельности, размера организации и поставляемой продукции (услуг). Стандарт определяет, что необходимо делать для внедрения системы качества, но не определяет, как это делать. Именно за счет такого подхода требования стандарта являются универсальными и применимыми к любой организации. Методы, как реализовать то или иное требование стандарта предприятие выбирает само, исходя из своих потребностей и возможностей.

**Выводы.** Анализ содержания и применения международных стандартов позволяет выявить взаимосвязи между тремя стандартами: ISO 9001, ISO 9002, ISO 9003. В результате чего было установлено, что требования стандарта ISO 9001 универсальны, подходят для любого типа производства и

могут применяться для разработки системы качества изготовления продукции.

**Список литературы:** 1. Ребрин Ю.И. Управление качеством: учебное пособие / Ю.И. Ребрин. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 174с. 2. Васильев А.С. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко, Л.Г. Полонский, М.Л. Хейфец, П. И. Ящерицын. – М.: Машиностроение, 2003. – 256 с. 3. Управление качеством: учебник по специальности «Менеджмент организации» / Т. А. Салимова. – М.: Издательство «Омега-Л», 2007. – 414 с. 4. Управление качеством: учебник / Д.А. Шевчук. – М.: ГроссМедиа, РОСБУХ, 2008. – 216с. 5. ДСТУ ISO 9001:2009 (официальный перевод ISO 9001:2008).

**Bibliography (transliterated):** 1. Rebrin Ju.I. Upravlenie kachestvom: uchebnoe posobie. – Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004. – 174P. 2. Vasil'ev A.P., Dal'skij A.M., Klimenko P.A., Polonskij L.G., Hejfec M.L., Jashhericyн P. I. Tehnologicheskie osnovy upravlenija kachestvom mashin. – Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 256 P. 3. Salimova T. A. Upravlenie kachestvom: uchebник po special'nosti «Menedzhment organizacii» . – Moscow: Izdatel'stvo «Omega-L», 2007. – 414 P. 4. Shevchuk D.A. Upravlenie kachestvom: uchebник. – Moscow: GrossMedia, ROSBUH, 2008. – 216P. 5. DSTU ISO 9001:2009 (oficial'nyj perevod ISO 9001:2008).

*Поступила (received) 01.10.2014*

## УДК 621.9

**О.Ю.ПРИХОДЬКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;  
**С.Е.СЛИПЧЕНКО**, науч. сотр НТУ «ХПИ»

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ УПРАВЛЯЮЩИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

В статье рассматривается интерпретация управляющих сетей (SN), которая построена на основе безопасных сетей Петри (SPN). Приведено обоснование применения сетей Петри при решении задач технологии машиностроения. На примере задачи об эффективном использовании производственных ресурсов продемонстрированы возможности SN, проведено сравнение с моделями на основе безопасных сетей Петри. Рассмотрена возможность моделирования параллельных процессов обработки сложных деталей на базе SPN.

**Ключевые слова:** сети Петри, имитационное моделирование, деталь, макропереход, метка, алгоритм, управляемые переходы.

**Введение.** В статье рассмотрены управляющие сети Петри с функциональными расширениями, позволяющими моделировать управление асинхронными параллельными потоками при многовариантном выборе в вершинах мест и вершинах переходов, а также при соблюдении запрещающих условий.

**Моделирование сложных управляющих алгоритмов на основе сетей Петри.** Имитационное моделирование часто применяется при разработке

© О.Ю. Приходько, С.Е. Слипченко, 2014

программного обеспечения, когда возникает задача оценки эффективности его работы. При выборе средства имитационного моделирования руководствуются рядом требований, таких как возможность проверки работоспособности, отображение корректного формирования и взаимодействия параллельных потоков, возможность отслеживания тупиковых ситуаций, возможность проверки корректности реализации задачи в параллельном алгоритме.

Для удовлетворения вышеназванных требований в теории сетей Петри разработаны наборы статических и динамических свойств, которые позволяют отслеживать топологию модели на этапе построения, устранять свойства небезопасности и конфликтности, определять неживые участки сети Петри при имитационном моделировании.

Перспективными с точки зрения изобразительной мощности являются управляющие сети Петри (SN), которые основываются на свойствах безопасной интерпретации сетей Петри (SPN) с применением ингибиторных дуг и управляющих векторов для моделирования параллельных процессов с многовариантным выбором. Такие задачи возникают при моделировании логистических задач, задач об эффективном размещении, задач об оптимальном использовании производственных ресурсов и многих подобных задач.

**Постановка задачи.** При формулировании задачи об эффективном использовании производственных ресурсов важно задать ограничения, налагаемые внутренними и внешними обстоятельствами, а также начальные ресурсы и их распределение. Задача состоит в оптимальном использовании свободных производственных ресурсов при обработке корпусных деталей на многооперационных станках с ЧПУ (обрабатывающих центрах). Критерием оптимальности является максимизация производительности и точности обработки при минимизации времени обработки и задействованных производственных ресурсов. При решении задачи должны быть учтены особенности обрабатываемых деталей, технологические возможности станков и предусмотрены алгоритмы минимизации производственных ресурсов. Кроме того по условию задачи необходимо исключить обработку двух деталей на одном обрабатывающем центре.

**Применение управляющих сетей Петри.** При создании моделей систем управления параллельными процессами с неравномерным распределением условий и ресурсов неизбежно возникает необходимость обработки вариантов решений и выбора наилучшего по установленному критерию решения для реализации дальнейших действий.

В случае построения модели поставленной задачи на основе безопасных сетей Петри возникают трудности с отображением и проверкой функционирования алгоритмов выбора альтернативного варианта из множества доступных. Так на рис. 1 представлена модель решения поставленной задачи для трех обрабатываемых деталей ( $p_1, p_2, p_3$ )

для изделия ( $B$ ), которые могут быть изготовлены на многооперационных станках с ЧПУ ( $A_1, A_2, A_3$ ).

На первом этапе построения модели необходимо отобразить конструкцию, которая позволит выбрать наиболее сложную деталь и подобрать для нее оптимальные условия обработки. Дальнейшие действия по обработке оставшихся деталей должны быть отображены с использованием тех же алгоритмов, что и для первой детали. Для отображения таких алгоритмов в безопасных сетях Петри необходимо применить макропереходы  $\tau_i$ , которые позволяют производить совместную обработку условий и осуществлять перекрещивание потоков действий.

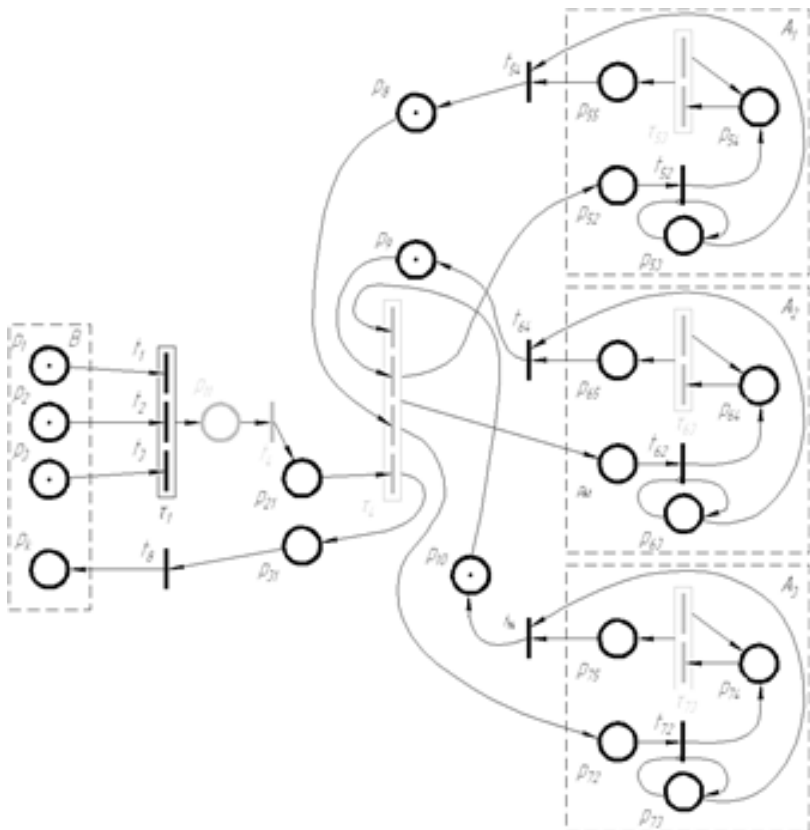


Рис. 1 – Модель оптимизации обработки трех деталей представленная безопасной сетью Петри.

Начальными (входными) вершинами в модели задачи являются  $p_1, p_2, p_3$ , которые содержат заготовки (метки), предоставленные для обработки.



Заготовки концентрируются через соответствующие переходы  $t_1, t_2, t_3$ , в макропереходе  $\tau_1$  и последовательно поступают в вершину места  $p_{11}$ , далее для составления списка передаются в вершину перехода  $t_4$ , где и проводится выбор наиболее сложной детали. Данная заготовка поступает в макропереход  $\tau_4$ , в котором проводится анализ поступившей информации о возможностях многооперационных станков с ЧПУ (по количеству координат обработки).

После срабатывания макроперехода  $\tau_4$ , метки передаются в вершины мест  $p_{52}, p_{62}, p_{72}, p_{31}$ . Информация, которая переносится этими метками, будет различной, поскольку заготовка может обрабатываться только на одном станке, то на остальные многооперационные станки с ЧПУ приходят метки с нулевыми значениями, и в конечную вершину  $p_k$  также, поскольку до совершения операций в ней не должны появиться другие значения. Метки с нулевыми значениями сжигаются в вершинах переходов  $t_{i2}$  и  $t_8$ . Допустим наибольшее значение получено для станка  $A_1$ , тогда метка, которая будет передана в  $p_{52}$ , содержит определенное значение (число обрабатываемых поверхностей), а метки поступившие в вершины  $p_{62}, p_{72}, p_{31}$ , нулевые значения (эти метки будут удалены из сети в вершинах переходов  $t_{62}, t_{72}$  и  $t_8$ ).

Метка из вершины места  $p_{52}$  активизирует переход  $t_{52}$ , поскольку в вершине  $p_{53}$ , от которой идет ингибиторная (запрещающая) дуга к  $t_{52}$ , нет метки. Переход  $t_{52}$  моделирует принятие решения об обрабатываемом оборудовании, а перемещение метки в вершину  $p_{54}$  – начало обработки; в  $p_{53}$  – блокирование новых заданий для поступления на станок на протяжении времени обработки. Если условия обработки остаются в пределах допустимых отклонений, определяемых требованиями заказчика, то метка, активизируя макропереход  $\tau_{53}$ , возвращается в вершину места  $p_{54}$ . Если отклонения превышают допустимые пределы, метка из макроперехода  $\tau_{53}$  направляется в вершину  $p_{55}$ , активизируя переход  $t_{54}$  погашая метки в вершинах мест  $p_{55}$  и  $p_{53}$ . При удалении метки из  $p_{53}$ , получаем новую возможность активизировать переход  $t_{52}$ , срабатывание которого моделирует обработку новой заготовки. Из вершины перехода  $t_{54}$ , моделирующей окончание обработки (из-за неудовлетворительного качества или по окончанию партии деталей), метка передается в вершину места  $p_8$ . Далее метка возвращается в вершину макроперехода  $\tau_4$ , из которой может опять перейти в одну из вершин  $p_{52}, p_{62}, p_{72}$  для обработки если таковая обоснована, иначе метка будет передана через вершины  $p_{31}$  (окончание периода обработки) и  $t_8$ , в которой производится технический контроль полученной детали, в выходную вершину  $p_k$  – итоговые ресурсы заказчика.

Условия запрета обработки двух деталей на одном многооперационном станке с ЧПУ реализовано в модели конструкцией с ингибиторной дугой, которая на время поступления одной заготовки на станок, блокирует входящую в подмодель станка  $A_i$  вершину  $t_{i2}$  (метка в вершине  $p_{i3}$ ) и не

позволяет до окончания обработки (до активизации вершины перехода  $t_{i4}$ ) ее разблокировать.

При представлении модели управляющей сети Петри (рис.2) большинство макропереходов представляем управляемыми переходами, в которых реализуются алгоритмы расчета условий выбора альтернатив или проводится перекрещивание потоков действий (моделируемых движением меток). Также избавляемся от избыточных вершин, которые на рис. 1 выделены серым цветом.

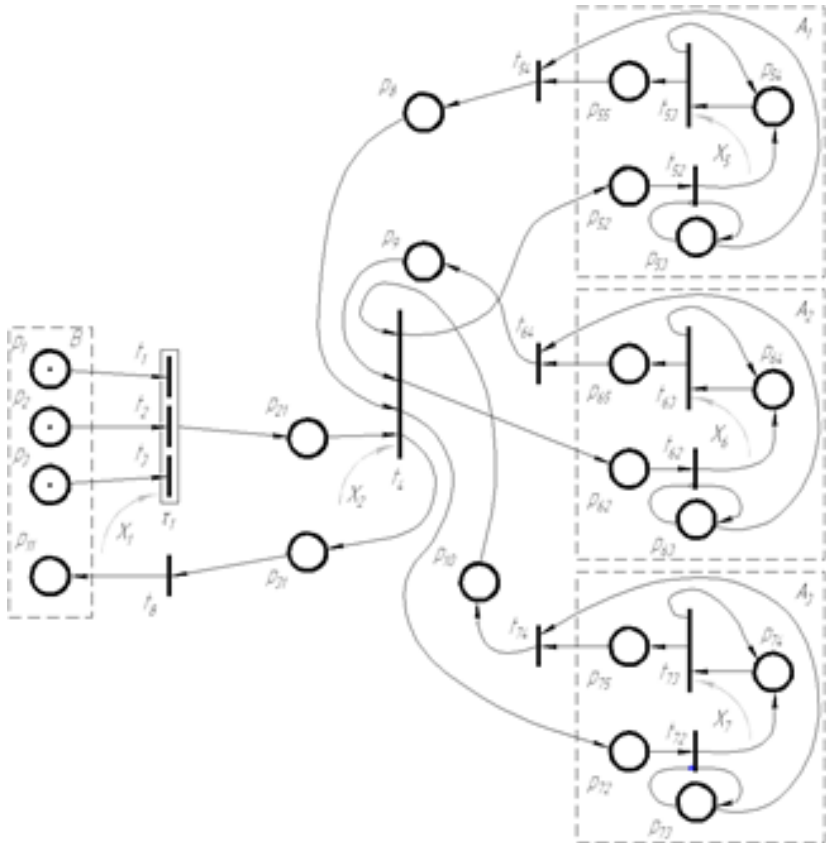


Рис. 2 – Модель оптимизации обработки трех деталей представленная управляющей сетью Петри.

При рассмотрении модели, представленной управляющей сетью Петри, нужно обратить внимание на различные функции, моделируемые управляющими векторами  $X_i$ .

Вектор  $X_1$  моделирует выбор наиболее сложной обрабатываемой детали и передает его в вершину места  $p_{21}$  для выбора его дальнейшего размещения, которое производится в вершине  $t_4$ . Вектор  $X_2$  позволяет скоординировать передачу метки только в одну из вершин  $p_{52}, p_{62}, p_{72}, p_{31}$ , что избавляет от ненужных операций с передачей и погашением нулевых пакетов. Вектора  $X_5, X_6, X_7$  позволяют моделировать изменение условий обработки и принимать решение о сохранении или прекращении дальнейшей обработки деталей.

**Результаты исследования.** Рассмотренный пример позволяет сравнить полученные модели задачи, построенные безопасной и управляющей сетями Петри. Анализируя рисунки 1 и 2 можно наглядно убедиться в лаконичности управляющей сети, которая избавляет от мелких элементов модели, все же позволяет достичь адекватного визуального отражения основных внутренних и внешних факторов, более обстоятельно провести анализ модели, устранить критические свойства, не наращивая при этом количество служебных элементов сети Петри.

**Заключение.** На примере задачи об эффективном использовании производственных ресурсов продемонстрированы преимущества управляющей сети (SN) в сравнении с безопасной сетью (SPN). При использовании управляющей сети удастся наглядно отобразить многовариантный выбор альтернатив, передачу управляющей информации от внешних систем, более лаконично построить модель исследуемой системы. Важным свойством управляющих сетей Петри является установка приоритетов в вершинах переходов и мест, основанная на логических конструкциях, параметрами которых являются как внутренние, так и внешние переменные. Это позволяет говорить о возможности построения адаптивных моделей сложных систем с многопоточным параллелизмом, оперативно реагирующих на изменение внутренних и внешних условий. Представленное средство моделирования позволяет проводить в динамике (при перемещении меток) контроль критических свойств в модели и указывать локализацию небезопасных и конфликтных участков.

**Список литературы:** 1. *Бородакий В.Ю.* Анализ средств имитационного моделирования распределенных информационных систем. / *В.Ю. Бородакий, Г.Е. Окороченко* // Компьютерные системы и технологии: Научная сессия МИФИ. - 2007. - Том 12. - С. 129-130. 2. *Васильев В.В.* Сети Петри, параллельные алгоритмы и модели мультипроцессорных систем. / *В.В. Васильев, В.В. Кузьмук* - Киев: Наукова думка, 1990 - 216с. 3. *Кузьмук В.В.* Модифицированные сети Петри и устройства моделирования параллельных процессов / *В.В. Кузьмук, О.О. Супруненко* : Монография. - Киев: Маклаут, 2010.-252с.

**Bibliographi:** 1. *Borodakij V.YU., Okorochenko G.E.* Analiz sredstv imitacionnogo modelirovaniya raspredelennyh informacionnyh system. Kompyuternye sistemy i tehnologii: Nauchnaya sessiya MIFI – 2007. – Tom 12 – P. 129-130. 2. *Vasilev V.V., Kuzmuk V.V.* Seti Petri, paralelne algoritmy i modeli multiprocessornyh system – Kiev: Naukova dumka, 1990 - 216P. 3. *Kuzmuk V.V., Suprunenko O.O.* Modificirovannye seti Petri i ustrojstva modelirovaniya paralelnyh processov. Monografiya. – Kiev: Maklout.2010.-252P.

*Поступила (received) 01.10.2014*

*А.Н. УШАКОВ*, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ НАПРЯЖЕННОГО– ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ «АБРАЗИВНОЕ ЗЕРНО- СВЯЗКА»**

В статье выполнен анализ существующих форм абразивных зерен. Разработана трехмерная модель напряженного-деформированного состояния в которой связка представлена в виде мостиков связи цилиндрической формы, а само зерно представлено в виде комбинированной формы. Эта модель позволяет выполнить комплексное исследование с применением средств вычислительной техники для усовершенствования технологических процессов изготовления и эксплуатации шлифовальных кругов.

**Ключевые слова:** врезное шлифование, шлифовальный круг, зерно, связка, модель.

**Введение.** Процесс шлифования характеризуется высокими требованиями к точности размеров, формы и качеству поверхностного слоя обрабатываемых деталей. Большие скорости вращения шлифовальных кругов порождают значительные периодические силы, оказывающие существенное влияние на микро- и макрогеометрию изделия. Процесс шлифования является нестабильным и до настоящего времени недостаточно изученным.

В настоящее время для комплексного исследования процесса шлифования все более активно используют широкий спектр программного обеспечения, работающего с трехмерными моделями.

**Обзор проблемы.** Известно, что статические модели режущей поверхности абразивного круга формируются на основе определенной формы зерен и закона их распределения, закона распределения центров зерен в абразивном пространстве, пространства абразивного слоя и расположения в абразивном пространстве поверхности связки. Каждое зерно в зависимости от технологии его получения имеет индивидуальную форму поверхности и вследствие хаотического расположения в связке обладает индивидуальными режущими свойствами, совокупность которых определяет качество инструмента, которое в свою очередь при соответствующих режимах шлифования должно обеспечить заданный уровень микро- и макрогеометрии детали.

Достаточно сложным является получение реалистической модели рабочей поверхности абразивного круга. Это связано со стохастическим характером процесса шлифования, так как текущие параметры формы зерен и их расположения, как и всего шлифовального круга, в целом являются случайными.

Существует четыре основных элемента, на базе которых строятся статические модели рабочей поверхности абразивного инструмента: форма и закон распределения размеров зерен, закон распределения центров

зерен в абразивном пространстве, пространство абразивного слоя и поверхность связки, определенным образом расположенная в абразивном пространстве.

Единичное абразивное зерно характеризуется размерами и формой, причем форма зерна не регламентируется. Традиционная методология создания модели абразивного инструмента заключается в последовательном решении нескольких фундаментальных задач, главной из которых является геометрическая форма абразивных зерен.

Теоретические расчеты и моделирование сложной геометрической формы конкретных абразивных зерен, как правило, выполнены в 2D изображении и представляются в виде ортогональной схемы резания абразивным зерном с площадкой затупления, пирамиды, конуса, призмы, эллипсоида, шара и т.п.

Моделирование механизма взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемой поверхностью детали изложено в работах: А.Н. Резникова, С.Н. Корчака, Е.Н. Маслова, А.К. Байкалова, В.И. Островского и др.

**Цель работы.** Целью работы является обоснование и разработка трехмерной модели силового напряженного состояния зерно-связка с учетом основных характеристик абразивных шлифовальных кругов.

**Разработка модели.** В теоретических работах по шлифованию достаточно часто используется понятие критической глубины заделки абразивного зерна в круге. Под ним понимается следующее – это такая глубина заделки зерна в связке  $d_{кр}$ , при которой сила резания, вырывающая зерно из связки, равна силе разрушающей зерно. Если зерно заделано в связку на глубину большую чем  $d_{кр}$ , то сила резания не вырвет зерно из связки, т.к. для вырывания его из связки требуется значительно большее усилие, чем для разрушения зерна.

Критическая глубина заделки характеризует обобщенно совокупность физико-механических свойств абразивного материала и связки, способность круга к самозатачиванию. Низкая прочность связки обеспечивает хорошее самозатачивание круга, т.е. выравнивание затупившихся зерен из связки силами резания. При этом режущая способность круга поддерживается естественно процессом самозатачивания.

Однако, при этом износ круга, потеря им правильной геометрической формы происходит достаточно интенсивно, что в конечном итоге снижает точность обработки. Поэтому технологические процессы изготовления и эксплуатации кругов должны обеспечить работу в режиме самозатачивания, что обусловлено оптимальным сочетанием прочности связки с абразивным материалом и соответствующими режимами шлифования.

Поскольку  $d_{кр}$  – это глубина заделки, при которой сила разрушающая зерно и вырывающая его из связки равны, то задача определения  $d_{кр}$  распадается на две задачи: определение предельного значения силы резания из условия прочности зерна; определение нагрузки на зерно, вырывающей его из связки.

Для решения первой задачи надо решить задачу прочности зерна при нагружении его силой резания, а для решения второй задачи надо решить задачу определения прочности связки на границе «абразивное зерно-связка». Решение этих задач возможно выполнить с применением современных средств вычислительной техники. Для этого вначале необходимо разработать 3D модель «абразивное зерно-связка».

Решение поставленных задач будем делать применительно к кругам, используемых для процесса круглого наружного врезного шлифования для различных сочетаний абразивного и связующего материалов.

Среди всех режущих инструментов абразивные являются единственными, у которых ГОСТ регламентирует не важнейший параметр рабочей поверхности - число режущих зерен, а характеристики внутреннего объемного строения - зернистость, твердость и структуру. Эти параметры зависят от объемного содержания зерна, связки и пор.

Некоторые исследователи в объемной геометрической модели располагают зерно в сплошном пространстве связки, не учитывая объем пор. Естественно этот подход снижает достоверность результатов расчетов.

Задача расположения абразивных зерен как геометрических объектов в объеме шлифовального круга представляет собой разновидность общей статистической задачи размещения объектом фиксированных или случайных размеров в заданном объеме пространства.

Модель объемного строения абразивного инструмента достаточно подробно описана в работе [1].

Выполним анализ и расчет данной модели.

Выполним анализ характеристик внутреннего объемного строения абразивных кругов представленных в таблице 3.1 [1].

В результате анализа установлено, что для абразивных кругов с номером структуры 4-12 и твердости от М1 до Т2 максимальное количество мостиков связки, приходящееся на одно зерно варьируется от 8 до 12. В качестве примера покажем влияние твердости круга на максимальное количество мостиков связки, приходящееся на одно зерно для абразивных кругов структуры №10 (см. рис.1).

В качестве примера приведем расчет в Mathcad для шлифовального круга 10 структуры, твердости Т2, зернистости 25.

Для восьми мостиков связки объемная геометрическая модель может быть расположена в октаэдре, причем зерно в виде сферы (или в

виде комбинированной фигуры, приближенной к форме зерна) совпадает с центром описанной сферы и соединены с вершинами октаэдра.

$$\beta_z := 0.42$$

$\beta_c :=$	0.295	T2
	0.280	T1
	0.265	CT3
	0.250	CT2
	0.235	CT1
	0.220	C2
	0.205	C1
	0.190	CM2
	0.175	CM1
	0.160	M3
	0.145	M2
	0.130	M1

$$nm10(\beta_c) := 19.5 \cdot (\beta_z + \beta_c) - 2.2$$

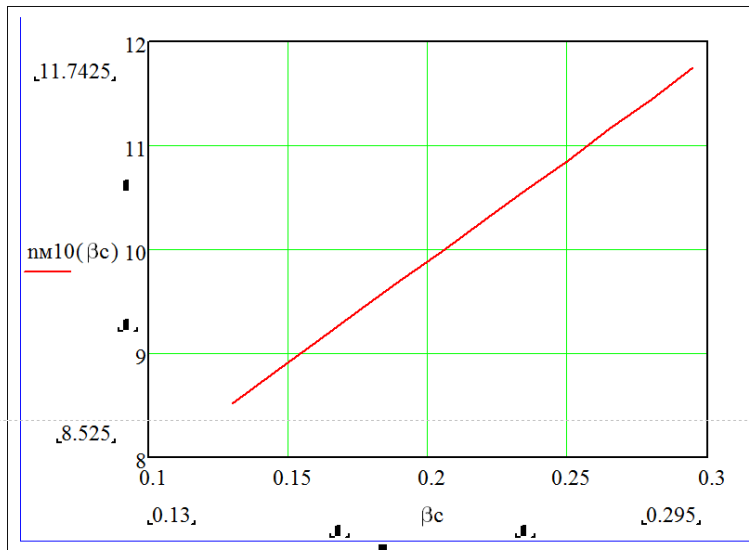


Рис. 1 – Влияние твердости круга на количество мостиков связки, приходящееся на одно зерно для абразивных кругов структуры №10

**+** **no** - число зерен в единице объема, 1/ мм<sup>3</sup>

$\beta_z := 0.42$  относительное содержание зерен

$\eta_z := 0.523$  коэффициент объема зерна

$d := 0.255$  размер зерна, мм

$\beta_c := 0.2$  относительное содержание связки

$$n_o := \frac{\beta_z}{\eta_z \cdot d^3}$$

$n_o = 48.431$  шт

**lc** -расстояние между центрами зерен, мм

$\eta_{zs} := 0.785$

$$l_c := \left( \frac{\eta_z}{\eta_{zs}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\beta_z} \right) \cdot d$$

$l_c = 0.405$  мм

**nm**-максимальное число мостиков на одно зерно, шт

$nm := 19.5 \cdot (\beta_z + \beta_c) - 2.2$

$nm = 9.89$  шт

**lc**-длина мостика связки, мм

$$l_c := d \cdot \left[ \left[ \left( \frac{\eta_z}{\eta_{zs}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\beta_z} \right) \right] - 1 \right]$$

$l_c = 0.15$  мм

**dc**-поперечный размер мостика связки, мм

$$d_c := d \cdot \sqrt{\frac{\beta_c}{\beta_z \cdot nm} \cdot \frac{\eta_z}{\eta_{zs}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{\eta_z}{\eta_{zs}} \right) \cdot \left( \frac{1}{\beta_z} \right) - 1}}$$

$d_c = 0.06$  мм

Аналогично строится геометрическая модель для двенадцати мостиков связки, модель может быть расположена в икосаэдре, изначально примем форму зерна в виде сферы (см. рис.2).



Для количества мостиков связки 9-11 не существует многогранников правильной формы, поэтому геометрическая модель строится с максимальным приближением равномерности распределения мостиков связки в пространстве.

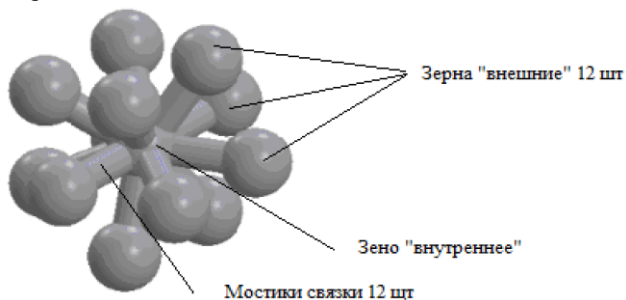


Рис. 2 – Трехмерная модель зерно-связка

Предположим, что в процессе правки алмазным инструментом или процесса самозатачивания круга трехмерная модель лишится верхних мостиков связки (см. рис.2). При этом центральное зерно окажется на режущей части периферии круга. Далее модель можно упростить – «внешние» зерна исключаются из модели т.к. основания цилиндров будут жестко защемленными.

Кроме этого предположим, что само зерно из сферы преобразуется в комбинированную форму, состоящую из полусферы, усеченного конуса и усеченной пирамиды с фигурами заполнения в виде бобышек которые можно построить в SolidWorks (см. рис.3). Представление комбинированной формы обусловлено и тем, что при дальнейшем моделировании необходимо будет прикладывать реальные нагрузки, что затруднительно применить к сфере.

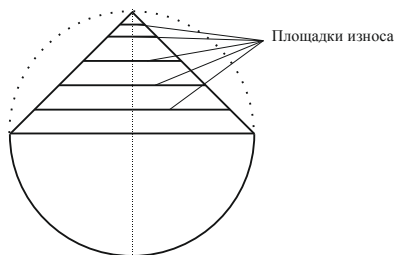


Рис. 3 – Форма зерна

В результате получена окончательная модель. В качестве примера представим трехмерную модель (см. рис.4) с изношенным зерном, построенную с использованием вышеизложенного расчета в Mathcad.



Рис. 4 – Трехмерная модель зерно-связка с изношенным зерном

**Выводы.** Трехмерная модель силового напряженного состояния в которой связка представлена в виде мостиков связи цилиндрической формы, а само зерно представлено в виде комбинированной формы позволит выполнить исследование напряженного состояния для конкретных условий процесса шлифования.

**Список литературы:** 1. *Островский В.И.* Теоретические основы процесса шлифования / *В.И. Островский.*-Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981.- 141 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Ostrovskij V.I.* Teoreticheskie osnovy processa shlifovaniya. - Leningrad: Izd-vo Leningr. un-ta, 1981.- 141 P.

*Надійшла до редколегії 15.10.2014*

**УДК 621.874**

**С.О. ГУБСЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

### **ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ МОСТОВИХ КРАНІВ З РІЗНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ**

Проведено порівняння впливу різних конструкцій механізму пересування мостових кранів на напружено-деформований стан їх металоконструкцій. Досліджено вітчизняну конструкцію механізму пересування крана на «вікатних» брусках Харківського заводу «ПТУ» та фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА». Ресурс металоконструкції останнього крана буде менш залежати від його механізму пересування завдяки конструктивним та технологічним рішенням в самому механізмі.

**Ключові слова:** мостовий кран, механізм пересування, металоконструкція, бруска, колесо, навантаження.

**Вступ.** На напружено-деформований стан (далі НДС) металоконструкцій

© С.О. Губський, 2014

мостових кранів суттєво впливають навантаження, що викликані силовою взаємодією колеса крана з підкрановою рейкою (система «колесо-рейка») [1]. Незначне збільшення кута перекосу кранових коліс веде до різкого збільшення бічних сил. В результаті досліджень Марквардта Г. Г. та Шефлера М. [2] встановлено, що при досягненні перекосу в  $0,4^\circ$  бічні сили досягають максимального значення, тому боротьба повинна вестися в діапазоні  $0\text{--}0,4^\circ$ , причому має значення кожна сота і тисячна частка градуса. Ці дослідження були підтверджені Ємельяновим О. А. [3].

**Аналіз останніх досліджень та літератури.** Наразі існують різні конструктивні рішення механізмів пересування мостових кранів – вітчизняна, з механізмом пересування на «вікатних» буксах; фірми KETTEN та Demag (Німеччина); фірми KONE (Фінляндія) та інші.

Фірма KONE (Фінляндія) запропонувала варіант кріплення кранових коліс, що зображено на рис. 1 [4]

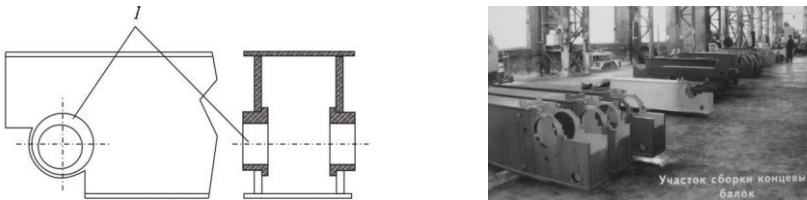


Рис. 1 – Конструкції кріплення кранових коліс, що запропоновано фірмою KONE (Фінляндія)

Ексцентричні втулки 1 (див. рис. 1) – є корпусами підшипників, які ставляться в розточені отвори у стінках. Поворотом втулок забезпечується точне позиціонування коліс, після чого втулки фіксуються болтами (кріплення не показано). Ця конструкція має суттєву перевагу в порівнянні з іншими конструкціями механізму пересування – в ній передбачено можливість регулювання установки колеса, якщо відбудеться деформації конструкції і ця установка колеса зміниться. В даній конструкції, не використовується зварювання при з'єднанні головних і кінцевих балок, а збірку проводиться на високоміцних болтах. Це дозволило уникнути порушення геометрії крана від теплових деформацій («поводки», неминуче виникали від застосування електродугового зварювання при монтажі).

Раніше було проведено дослідження впливу механізму пересування мостових кранів на ресурс металоконструкцій на основі магнітно-коерцитивного контролю [5]. Досліджувалися крани лише з механізмом пересування на «вікатних» буксах.

**Мета статті.** Провести порівняння впливу різних конструкцій механізму пересування мостових кранів на напружено-деформований стан їх металоконструкцій.

**Постановка проблеми.** Виробничі допуски установки ходових кранових коліс VDI 3571 в два рази жорсткіші за вітчизняні ДСТ 27584-88. Дослідженнями К. І. Смальчевського та А. С. Смальчевського, встановлено, що тільки в 20 % кранів, виготовлених на вітчизняних заводах, точність установки відповідає нормативним документам. Це є наслідком застарілого та недосконалого устаткування, недоліків конструкції механізму пересування мостового крана [6].

**Матеріали досліджень.** Для дослідження НДС металокопструкцій мостових кранів можливо використовувати аналітичні, числові та інші методи розрахунку. Підтвердити ці розрахунки можливо експериментально, наприклад, магнітно-коерцитивним методом НК, тензометричним методом НК.

Розрахунок НДС металокопструкції кранів числовим методом можна виконати за допомогою МКЕ. Це дозволяє проводити розрахунки металокопструкцій кранів з різними видами навантаження та зі складною конфігурацією елементів. При цьому є можливість врахування нелінійності (фізичної, геометричної). Тому для подальших розрахунків будуть використовуватися числові методи.

Проведений розгляд різних копструкцій механізму пересування мостового крана дозволив зробити висновок, що найбільше недоліків має копструкція механізму пересування вітчизняних мостових кранів на «вікатних» буксах, а найменше – копструкція фірми KONE (Фінляндія) [7]. Тому для подальших досліджень було обрано два крана мостових електричних загального призначення вантажопідйомністю 32 т кожен, прогін 22,5 м, важкого режиму роботи, один - виробництва Харківського заводу «ПТУ» (матеріал – сталь 09Г2С12, ГОСТ 19281-89) з механізмом пересування на «вікатних» буксах, інший - виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА» (матеріал – сталь S355J2G3, EN10025).

Для визначення впливу різних копструктивних рішень механізмів пересування досліджуваних мостових кранів на НДС їх металокопструкції розрахунок проводився для характерного технологічного циклу (ХТЦ) роботи крана: підйом вантажу в крайньому положенні біля кінцевої балки, переміщення крана, переміщення вантажного візка в інше крайнє положення та опускання вантажу. Загалом цей ХТЦ було розділено на дев'ять розрахункових випадків.

Побудовані трьохмірні моделі мостових кранів в масштабі 1:1 (див. рис. 2). Для моделювання використовувалися елементи оболонкового типу. Модель спрощена в порівнянні із реальним об'єктом: відсутні механізми, галереї, кронштейни для кріплення механізмів та інші допоміжні елементи металокопструкції.

В розрахункових випадках ХТЦ враховувалися такі складові: власна вага копструкції, вантажного візка, вантажу; швидкість підйому вантажу та пересування крана; прискорення при пересуванні крана та вільного падіння; динамічні коефіцієнти, що виникають при «відриві» від основи і завершенні

підйому вантажу; коефіцієнт поштовхів для крана та візка, які враховують вертикальне навантаження, що виникає при пересуванні крана (візка) внаслідок наїзду його на нерівності підкранової (підвізкової) колії; інерційні (горизонтальні) навантаження, що виникають при русі крана (в т.ч. від відхилення вантажних канатів при розгоні (гальмуванні) крана (візка) [8]).

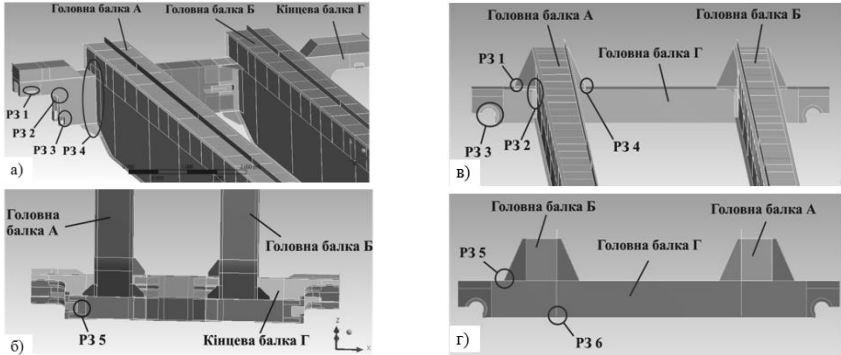


Рис. 2 – Трьохмірні моделі мостових кранів в масштабі 1:1 (P3.1...P3.6 – розрахункові зони): а, б – кран з механізмом пересування на «викатник» буксах (виробництва ХЗ «ПТУ»); в, г - кран виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА»

В результаті розрахунку НДС металоконструкцій кранів МКЕ при дев'яти розрахункових випадках були встановлені наступні елементи (розрахункові зони (далі P3)) з підвищеним рівнем напружень та досить великим розмахом напружень ( $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ) – див. рис. 2, таблиця 1

Таблиця 1 – Напруження (МПа) в найбільш навантажених елементах металоконструкцій досліджуваних кранів (розрахункових зонах) при різних розрахункових випадках

Розрахунковий випадок навантаження	Напруження в розрахункових зонах, МПа (кран ХЗ «ПТУ»/кран «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА»)					
	P3.1	P3.2	P3.3	P3.4	P3.5	P3.6
I	10,4/12,0	12,8/11,1	12,0/4,3	14,2/14,5	3,8/20,0	/20,0
II	41,2/38,1	44,8/33,5	36,4/15,0	46,7/62,0	15,0/69,9	/71,0
III	33,0/35,0	35,0/32,0	30,0/13,0	36,2/54,0	11,9/61,0	/61,0
IV	35,0/43,0	42,1/32,9	35,2/8,9	46,3/52,9	16,2/72,0	/70,0
V	54,2/35,9	46,0/40,0	41,9/18,2	44,0/75,0	15,2/74,0	/61,2
VI	52,0/7,2	54,0/61,9	47,0/47,0	55,0/74,0	54,2/40,2	/93,8
VII	22,8/15,2	25,0/27,0	25,1/34,2	25,6/7,0	31,0/16,3	/45,0
VIII	15,0/13,8	17,4/12,5	12,0/4,8	17,0/13,1	6,1/15,0	/21,3
IX	16,0/16,0	18,0/14,0	14,0/5,4	19,0/13,4	5,5/16,3	/24,5

Як видно з таблиці 1 найбільш небезпечні розрахункові зони:

- РЗ 5 - кран ХЗ «ПТУ»;
- РЗ 6 - кран фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА».

Межа витривалості (на базі  $N_0=2 \cdot 10^6$  циклів) для найбільш навантажених елементів металокопструкцій кранів (розрахункових зон, див. рис. 2) наведено в таблиці 2

Таблиця 2 – Межа витривалості (на базі  $N_0=2 \cdot 10^6$  циклів, МПа) для найбільш навантажених елементів металокопструкцій досліджуваних кранів (розрахункових зонах)

	Межа витривалості (МПа) в розрахунковій зоні (кран ХЗ «ПТУ» / кран фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА»)										
	РЗ 1		РЗ 2		РЗ 3		РЗ 4		РЗ 5		РЗ 6
Базова межа витривалості $\sigma_{1KB}$ , МПа (табл. 5.3.1 [26])	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
Товщина елемента розрахункової зони, мм	10	10	10	8	10	50	10	10	14	10	10
Межа витривалості $\sigma_{1K}$ , МПа	86	86	86	90	86	62	86	86	81	86	86

Схематизацію зміни напружень в розрахункових зонах при різних розрахункових випадках було виконано методом «потоків дощу» [9] (див. рис. 3)

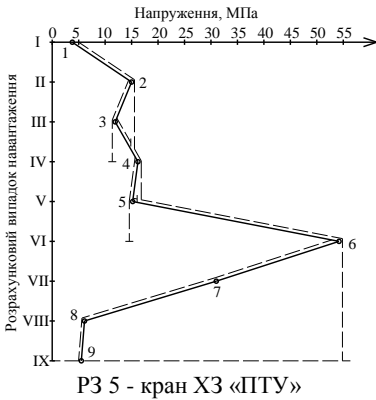


Рис. 3 – Схематизація зміни напружень в найбільш небезпечних розрахункових зонах при різних розрахункових випадках навантаження МК кранів методом «потоків дощу»

Приведення асиметричних циклів напруження до еквівалентних симетричних здійснювали відповідно до вимог [9]

$$\sigma_{\text{пр.л}} = \begin{cases} \sigma_{aj} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m, & \sigma_m > 0 \\ \sigma_{aj} < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\sigma_{\text{пр.л}}$  – амплітуда приведенного симетричного циклу напружень, МПа;  
 $\sigma_{aj}$  – амплітуда асиметричного циклу напружень, МПа;  
 $\sigma_m$  – середнє значення напружень циклу, МПа;  
 $\psi_{\sigma}$  – коефіцієнт чутливості сталі до асиметрії циклу.

Також був розглянутий найбільш несприятливий випадок навантаження металоконструкції мостових кранів з механізмом пересування на «вкатних» буксах (ХЗ «ПТУ») та виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА», що може трапитися з ними в динаміці їх руху (див. рис. 4):

- проводяться динамічних випробуваннях згідно НПАОП 0.00-1.01-07 [10] (перевантаження 1,1 номінальної вантажопідйомності);

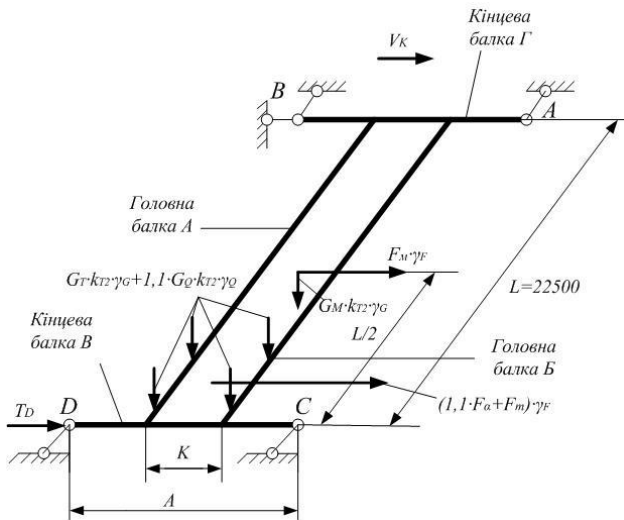


Рис. 4 – Схема для числового розрахунку НДС МКЕ МК мостових кранів з механізмом пересування на «вкатних» буксах (ХЗ «ПТУ») та виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА» при перекосі:  $G_M$ ,  $G_T$ ,  $G_Q$ ,  $N$  – вага моста, візка, вантажу відповідно;  $V_K$ , м/с – швидкість пересування крана;  $K$ , мм – колія візка;  $L$ , мм – прогін крана;  $A$ , мм – колія крана;  $k_{T2}$  – коефіцієнт поштовхів при русі крана;  $F_{\omega}$ ,  $F_m$ ,  $F_M$ ,  $N$  – горизонтальні сили інерції від відхилення вантажних канатів, від кранового візка, від моста крана відповідно;  $\gamma_G$ ,  $\gamma_Q$ ,  $\gamma_F$  – коефіцієнти перевантаження для відповідних навантажень;  $T_D$ ,  $N$  – перекісне навантаження

- візок крана знаходиться в крайньому правому положенні (біля кінцевої балки В);

- при переміщенні крана відбулося «заклинення» одного приводного блока механізму пересування крана, що знаходиться на кінцевій балці Г

При даному випадку навантаження виникає перекісне навантаження  $T_D$ , що направлене вздовж руху крана та діє зі сторони справного приводного блоку

$$T_D = \max \left\{ \begin{array}{l} M_{кр.дв.} \cdot \frac{\omega_H}{V_H} \\ \frac{R_{C+D}}{2} \cdot \psi \end{array} \right. , \quad (2)$$

де  $M_{кр.дв.}$  – критичний момент двигуна, Н·м;

$\omega_H$  – кутова швидкість двигуна, 1/с;

$V_H$  – швидкість пересування крана, м/с;

$\psi$  – коефіцієнт зчеплення приводних коліс з підкрановою рейкою;

$R_{C+D}$  – реакція в опорах кінцевої балки зі сторони справного привода, Н.

**Результати досліджень.** В результаті приведення асиметричних циклів напруження до еквівалентних симетричних в розрахункових зонах металоконструкцій досліджуваних кранів (крани ХЗ «ПТУ», кран фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА») при експлуатаційному навантаженні отримані результати – таблиця 3 та 4

Таблиця 3 – Результати схематизації по методу «потоків дощу» для найбільш небезпечної розрахункової зони 5 (кран з механізмом пересування на «вкатних» буксах виробництва Харківського заводу «ПТУ»)

№ шляху «поток»	1-2-4-6	2-3	3-2	4-5	5-4	6-7-8-9
$\sigma_{min}$ , МПа	3,8	11,9	11,9	15,2	15,2	5,5
$\sigma_{max}$ , МПа	15,2	15,0	15,0	16,2	16,2	54,2
$\sigma_{d_2}$ , МПа	11,4	3,1	3,1	1,0	1,0	48,7
$\sigma_{m_2}$ , МПа	9,5	13,5	13,5	15,7	15,7	29,9
$\sigma_{np,j}$ , МПа	12,4	4,6	4,6	2,7	2,7	51,9

Як видно з вище наведених таблиць 3 та 4 отримані амплітуди напружень приведених симетричних циклів для всіх розрахункових зон задовольняють умову

$$\sigma_{пр,j} < \sigma_{JK} \quad (3)$$

тобто, у всіх розрахункових зонах діють напруження, що не проводять до накопичення ушкоджень і металоконструкції досліджуваних кранів при експлуатаційному навантаженні мають необмежену довговічність [4].



Найбільш небезпечним вузлом є РЗ 5 (кран Харківського заводу «Підйомно-транспортного устаткування») та РЗ 6 (кран фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА») (див. рис. 2).

Таблиця 4 – Результати схематизації по методу «потоків дощу» для найбільш небезпечної розрахункової зони 6 (кран виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА»)

№ шляху «потокую»	1-2-6	2-3	3-4-2	4-5	5-4	6-7-8	8-9
$\sigma_{min}$ , МПа	20,0	61,0	61,0	61,2	61,2	21,3	21,3
$\sigma_{max}$ , МПа	93,8	71,0	71,0	70,0	70,0	93,8	24,5
$\sigma_{a_2}$ , МПа	73,8	10,0	10,0	8,8	8,8	72,5	3,2
$\sigma_m$ , МПа	56,9	66,0	66,0	65,6	65,6	57,6	22,9
$\sigma_{np,j}$ , МПа	80,6	17,9	17,9	16,7	16,7	79,4	5,9

Результати моделювання (розрахунку) МКЕ напружено-деформованого стану металоконструкцій досліджуваних мостових кранів (крани виробництва ХЗ «ПТУ» та фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА») при перекісних навантаженнях – див. рис. 5

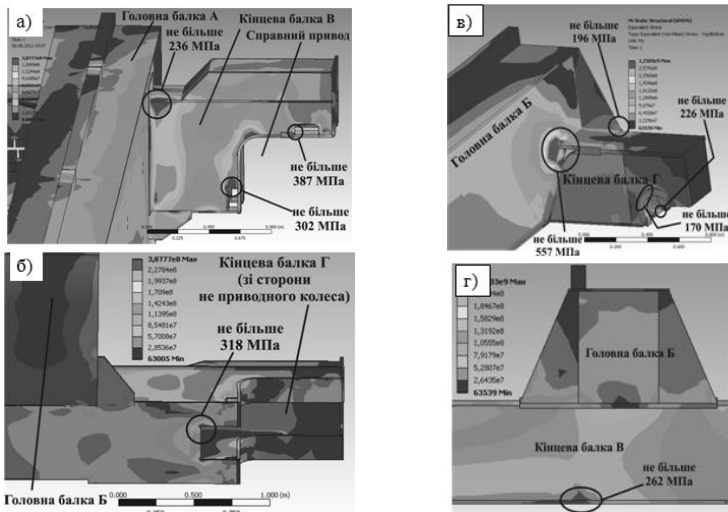


Рис. 5 – Розподілення напружень (еквівалентні напруження за Мізесом): а, б – кран з механізмом пересування на «вікатних» буксах (ХЗ «ПТУ»); в, г – кран виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА»

Як видно з рис. 5, в досліджуваних мостових кранах при їх русі внаслідок перекісних навантажень можливе виникнення складного НДС їх металоконструкцій з великим рівнем напружень (що перевищують межу

плинності): в кінцевих балках в зоні кранового колеса (кран виробництва ХЗ «ПТУ», див. рис. 5 а, б); в зоні кріплення головних балок з кінцевими балками (кран виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА», див. рис. 5 в, г). Це може призвести до швидкого тріщиноутворення (кран ХЗ «ПТУ») та до руйнування конструкції (кран фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА»).

Для недопущення виникнення суттєвих перекісних навантажень (можуть спричинити руйнування конструкції) в металокопструкції крана виробництва фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА» встановлюється більш досконалі прилади безпеки [11, 12]. Що, унеможливило виникнення великих перекісних навантажень при його русі (лише при поломці приладів безпеки).

**Висновки.** В результаті проведеного дослідження напружено-деформованого стану металокопструкцій мостових кранів різних виробників встановлено, що металокопструкція крана мостового виробництва ХЗ ПТУ має більший (на 15-25 %) розрахунковий запас міцності, але внаслідок конструктивних та технологічних недоліків ресурс її на практиці менший (на 10-15 %), ніж металокопструкції крана фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА».

**Список літератури. 1.** Григоров О. В. Вплив механізму пересування мостового крана на ресурс металокопструкції / О. В. Григоров, С. О. Губський // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков : ХНАДУ, 2012. – №57. – С. 296-299. **2.** M. Scheffler Abhängigkeit der Seiteträfte an Kranen von der Schragstellung der Lauftradachsen / M. Scheffler, H. Marquardt // Hebezeuge und Fördermittel. – August 1969. – 9 Jahragang – Heft 8. **3.** Емельянов, О. А. Усталостные повреждения сварных крановых мостов / О. А. Емельянов, В. П. Шепотко, В. Ю. Пихота, С. В. Лубенец, А. Т. Буренко // Техническая диагностика и не разрушающий контроль. – 2001. – №1. – С. 13–18. **4.** Соколов С. А. Металлические конструкции подъемно–транспортных машин: Учебное пособие. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с. **5.** Григоров О. В. Вплив механізму пересування мостового крана на ресурс металокопструкції / О. В. Григоров, С. О. Губський // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Харьков : ХНАДУ, 2012. – №57. – С. 296-299. **6.** Григоров, О. В. Вантажопідйомні машини / О. В. Григоров, Н. О. Петренко. – Харків: НТУ «ХПБ», 2006. – 304 с. **7.** Григоров О. В. Вплив параметрів механізму пересування мостового крана на напружено-деформований стан його металокопструкції / О. В. Григоров, С. О. Губський // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : XIX міжнародна науково-практична конференція, 01–03 червня 2011 р. : тези доповідей ч. I. – Харків, 2011. – С. 99. **8.** Губський С. О. Спрощення розрахунків для оцінки та прогнозування технічного стану металокопструкцій кранів / С. О. Губський, А. О. Окунь // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПБ», 2013. – №54. – С.106-110. **9.** ГОСТ 25.101–83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статического представления результатов. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 21 с. **10.** НПАОП 0.00–1.01–07. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. – Изд-во «Форт», 2007. – 256 с. **11.** Регуляторьскоросты DynA <http://www.konecraneP.com.Ua/equipment/dyna.html>. **12.** Современные системы управления крановыми приводами KONECRANES (<http://www.konecraneP.com.ua/issue/16.pdf>).

**Bibliography (transliterated): 1.** Hryhorov O. V., Gubskiy S.O. Vplyv mekhanizmu peresuvannya mostovoho kрана na resurs metalokonstruktсийi. Vestnyk Khar'kovskoho natsyonal'noho avtomobyl'no-dorozhnoho unyversyteta. – Kharkov: KhNADU, 2012. – No57. – P. 296-299. **2.** Scheffler M., Marquardt H. Abhängigkeit der Seiteträfte an Kranen von der Schragstellung der Lauftradachsen. Hebezeuge und Fördermittel. – August 1969. – 9 Jahragang – Heft 8. **3.** Emel'janov, O. A., Shepotko V.P., Pihota V. Ju., Lubenec P.V., Burenko A. T. Ustalostnye povrezhdenija svarnyh kранovyh

mostov. Tehnicheskaja diagnostika i ne razrushajushij kontrol'. – 2001. – No1. – P. 13–18. **4.** Sokolov P. A. Metallicheskie konstrukcii podNoemno–transportnyh mashin: Uchebnoe posobie. – SPb.: Politehnika, 2005. – 423 P. **5.** Hryhorov O. V., Gubskiy S.O. Vplyv mekhanizmu peresuvannya mostovoho krana na resurs metalokonstruktсийi. Vestnyk Khar'kovskoho natsyonal'noho avtomobyl'no-dorozhnoho unyversyteta. – Kharkov : KhNADU, 2012. – No57. – P. 296-299. **6.** Hryhorov, O. V., Petrenko N. O. Vantazhopidyomni mashyny. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2006. – 304 P. **7.** Hryhorov O. V., Gubskiy S.O. Vplyv parametriv mekhanizmu peresuvannya mostovoho krana na napruzheno–deformovany stan yoho metalokonstruktсийi. Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya : XIX mizhnarodna naukovо–praktychna konferentsiya, 01–03 chervnya 2011 r. : tezy dopovidey ch. I. – Kharkiv, 2011. – P. 99. **8.** Gubskiy S. O., Okun' A. O. Sproshchennya rozrakhunkiv dlya otsinky ta prohnozuvannya tekhnichnoho stanu metalokonstruktсийi kraniv. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho unyversytetu «Kharkivskyy politekhnichnyy instytut». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2013. – No54. – P.106-110. **9.** GOST 25.101–83. Metody shematizatsii sluchajnyh processov nagruzheniya jelementov mashin i konstrukcij i staticheskogo predstavleniya rezul'tatov. – Moscow: Izd–vo standartov, 1983. – 21 P. **10.** NPAOP 0.00–1.01–07. Pravila ustrojstva i bezopasnoj jekspluatsacii gruzopodNoemnyh kranov. – Izd–vo «Fort», 2007. – 256 P. **11.** Reguljatory skorosti DynA (<http://www.konecraneP.com.ua/equipment/dyna.html>). **12.** Sovremennye sistemy upravleniya kranovymi privodami KONECRANES (<http://www.konecraneP.com.ua/issue/16.pdf>).

*Поступила (received) 02.10.2014*

## УДК 621.9

*Д.О. МІНЕНКО*, канд. техн. наук, ст. викл., СумДУ, Суми;  
*В.О. ІВАНОВ*, канд. техн. наук, доц., СумДУ, Суми;  
*І.Г. ГОНЧАРЕНКО*, студент, СумДУ, Суми

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВІТРЯНО-ПЛАЗМОВОГО РІЗАННЯ ТОНКОЛИСТОВОГО МЕТАЛУ

Розглянуто основні критерії забезпечення якості повітряно-плазмової різки сталі. Запропоновано залежність для визначення режимів повітряно-плазмової різки тонколистового металу за умов забезпечення необхідної якості розрізу та максимальної продуктивності обробки з урахуванням оптимального співвідношення продуктивності плазмової різки з трудомісткістю подальшої механічної обробки. Нведені залежності формування величини хвилястості та висоти ґрата від швидкості переміщення плазмотрону.

**Ключові слова:** ефективність, повітряно-плазмове різання, швидкість переміщення, товщина металу, сила струму, ґрат, якість.

**Вступ.** Одним із перспективніших напрямків у області різання металу є повітряно-плазмове різання, яке забезпечує високу продуктивність обробки та якість поверхонь деталей. Європейський стандарт якості ENISO 9013 «Термічне різання» містить вимоги щодо геометричних параметрів виробів і допуски на розміри, стосовно матеріалів, які можуть бути оброблені методами термічного різання. Для плазменого різання для товщини металу 1–150 мм, стандарт виділяє наступні параметри якості: нерівність та кутовий

© Д.О. Міненко, В.О. Іванов, І.Г. Гончаренко, 2014

допуск, середня висота від западини до вершини, інтервал боріз, оплавлення країв вершин, утворення грата.

**Постновк проблеми.** Обробка металу товщиною 1–10 мм з точки зору підвищення якості перерізу не викликає значних труднощів. Однак при обробці тонкого металу однією з проблем є утворення грату, видалення якого в деяких випадках буває досить важким і потребує додаткових слюсарних операцій. Грат – це метал і оксиди метала, що пристали до нижньої частини поверхні після виконання плазмового різання. На верхній кромці поверхні, яка пройшла плазмову обробку, також можуть бути бризки металу. На формування грата впливає безліч перемінних значень, які відносяться до процесу, наприклад, швидкість переміщення плазмотрону, відстань від сопла плазмотрону до поверхні металу, сила струму, напруга, плазموутворюючий газ, та інші технологічні фактори. Існує також залежність від таких перемінних значень як сам матеріал, його товщина, стан поверхні та перепади температури матеріалу під час різання.

**Матеріали досліджень.** Виділено два основних параметри, які найбільше впливають на якість різання та потребують оптимізації – сила струму та швидкість переміщення плазмотрону. Швидкість і сила струму взаємопов'язані величини. Зі збільшенням сили струму необхідно збільшувати швидкість переміщення плазмотрону, однак сила струму обмежується потужністю джерела плазмової установки, швидкість переміщення плазмотрона також обмежується можливостями механіки верстата. При достатньо великій швидкості переміщення плазмотрона та недостатній силі струму спостерігається ускладнене прорізання листа, що призводить до неякісного різання, появи браку та швидкого виходу сопла з ладу. У літературі [1] для визначення співвідношення сили струму та швидкості переміщення плазмотрону рекомендується використовувати таблиці, або математичну залежність (1), однак ці рекомендації направлені на отримання максимальної продуктивності різання та не визначають якість поверхні різання та утворення грату. При незадовільній якості різання рекомендується змінювати параметри режимів обробки та шляхом підбору отримувати необхідну якість поверхні.

$$S = 150 \frac{I}{\delta} \cdot k_m \quad (1)$$

де  $S$  – швидкість переміщення плазмотрону;

$\delta$  – товщина металу;

$I$  – сила струму;

$k_m$  – коефіцієнт, що залежить від оброблюваного матеріалу.

**Результати досліджень.** З метою отримання оптимального співвідношення швидкості переміщення плазмотрону та сили струму, які забезпечують найкращу якість поверхні різання було проведено серію дослідів. Досліджувалися залежності швидкості переміщення плазмотрону та сила

струму, які дозволять не тільки забезпечити найкращу якість поверхні різу, а й полегшити подальшу слюсарну обробку за рахунок зменшення кількості та покращення видалення грата. Експеримент виконувався на установці плазмового різання з ЧПК, з джерелом плазми, яке забезпечує силу струму від 20 до 70 А, чого цілком досить для якісного та продуктивного різання сталі товщиною 6–10 мм.

Наявність грата та легкість його видалення оцінювалась за 5-ти бальною шкалою методом експертних оцінок. Експерт керувався такими критеріями, як легкість видалення грата та чистота кромки, що залишилася після видалення грата. Також вимірювалися крок хвилястості на поверхні розрізу, висота грата та визначалася його структура (табл. 1).

Таблиця 1 – Критерії експертні оцінки якості поверхні

Оцінка	Характеристика	Якісні критерії
2	незадовільно	гат важко видаляється з поверхні деталі, після видалення присутні його залишки
3	задовільно	гат важко видаляється, але після видалення відсутні його залишки на поверхні деталі
4	добре	добре видалення грату, але присутність його залишків після видалення
5	відмінно	легке видалення грата та відсутність його залишків на поверхні

Відповідно до рекомендацій [2] для розрізання сталевого листа марки Ст3 товщиною 3 мм при силі струму 40 А швидкість переміщення плазмотрону має бути 2000 мм/хв. У проведених дослідах швидкість переміщення плазмотрону змінювалась у межах від 1000 до 3000 мм/хв, сила струму змінювалась від 20 до 70 А.

Детально розглянемо один дослід із серії експериментів. Експериментально встановлено, що при занадто низькій швидкості переміщення плазмотрону (від 1000 до 1300 мм/хв при силі струму 40 А) отримується широкий розріз та сильна хвилястість поверхні з кроком хвиль 1,1–1,26 мм (рис. 1). Зі збільшенням швидкості переміщення плазмотрону помітне значне зменшення хвилястості поверхні (рис. 2). Найменша величина кроку хвилястості  $p=0,4$  мм відповідає максимальній швидкості переміщення плазмотрону  $S=2800$  мм/хв, однак подальше збільшення швидкості переміщення плазмотрону призводить до сильного викривлення поверхні розрізу. Хвилі на поверхні мають сильний кут нахилу або, при збільшенні товщини листа, мають форму у вигляді літери S, що значно знижує якість розрізу.

При швидкості переміщення плазмотрону від 1000 до 1300 мм/хв грат утворюється у великій кількості та має пористу структуру, що характеризує наявність великої кількості оксидів металу. Висота грата  $h$  дорівнює 1,1–1,2 мм (рис. 3). Видалити такий грат досить важко, після видалення на кромці

розрізу залишаються зазублини та залишки ґрата, що потребує додаткової слюсарної обробки. Обробка кромки деталі після роботи верстата на таких режимах вимагає найбільших витрат часу для зачистки поверхні тому при швидкості переміщення плазмотрона 1000 мм/хв експертом присвоєна оцінка «незадовільно», а при швидкості 1300 мм/хв «задовільно» (рис. 4). Причиною утворення такого ґрата є перегрів матеріалу унаслідок його тривалого контакту з плазмою, що утворена занадто високою силою струму для вибраної швидкості переміщення плазмотрона. До того ж процес різання супроводжується виділенням великої кількості диму та пилу, внаслідок згоряння металу. Наявність великої кількості диму є першою ознакою необхідності збільшення швидкості різання, або зменшення сили струму.



Рис. 1 – Хвилястість на поверхні розрізаного металу товщиною 3 мм при силі струму 40 А: а –  $S = 1000$  мм/хв,  $p = 1,3$  мм; б –  $S = 1300$  мм/хв,  $p = 1,1$  мм;  
в –  $S = 1600$  мм/хв,  $p = 1,0$  мм; г –  $S = 1900$  мм/хв,  $p = 0,8$  мм;  
д –  $S = 2200$  мм/хв,  $p = 0,75$  мм; е –  $S = 2500$  мм/хв,  $p = 0,7$  мм;  
ж –  $S = 2800$  мм/хв,  $p = 0,4$  мм

Зі збільшенням швидкості переміщення плазмотрона до 1600–1800 мм/хв ґрат має висоту до 1,15 мм (рис. 3), а в деяких місцях повністю відсутній. Ґрат стає на вигляд більш твердим, але помітно його пористу структуру. Видаляється такий ґрат значно легше, а після видалення залишаються незначні сліди, тому даним режимам обробки присвоєно оцінку «добре». Утворення диму при таких режимах обробки значно зменшується.

Найкращі показники утворення та легкості видалення ґрата, якому експертом присвоєно оцінку «відмінно» відповідають значенню швидкості переміщення плазмотрона 1900–2500 мм/хв. При швидкості переміщення плазмотрона 2100 мм/хв висота ґрата складає 1,1 мм. Пориста структура майже відсутня. Видалення ґрата у більшості випадків відбувається під час вибивання готових деталей з листа металу. Ґрат відламується одночасно на значних ділянках розрізу для чого майже непотрібно прикладати зусиль. Поверхня залишається чистою та не потребує додаткової слюсарної обробки.

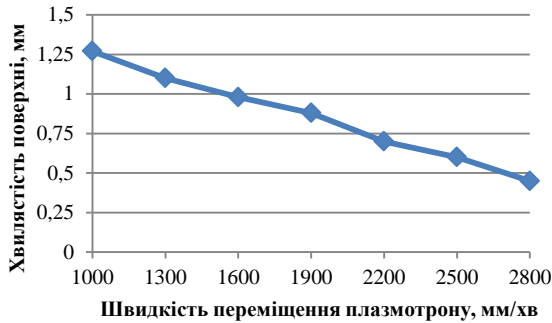


Рис. 2 – Залежність хвилястості поверхні розрізу від швидкості переміщення плазмотрону

При швидкості переміщення плазмотрона в діапазоні 2500–2800 мм/хв. висота ґрата зменшується та складає відповідно 0,8–0,9 мм. Такий ґрат переважно складається лише з затвердішого металу, пористість повністю відсутня. Видалення ґрата потребує значних зусиль. При швидкості плазмотрона 3100 мм/хв ґрат має висоту 0,4 мм, а на деяких ділянках повністю відсутній. Для видалення такого ґрата необхідно прикласти значні зусилля, що часто призводить до псування поверхні деталі. До того ж при такій швидкості переміщення плазмотрона в деяких місцях спостерігається ускладнене прорізання металу, причиною чого є недостатня сила струму для такої швидкості переміщення плазмотрону.

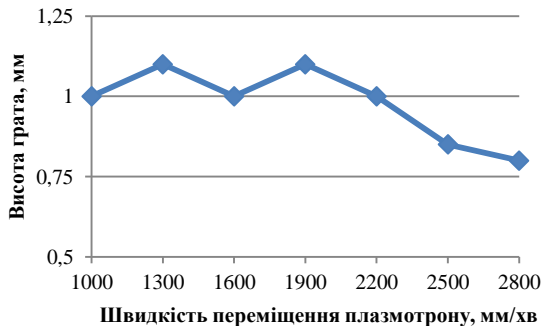


Рис. 3 – Залежність висоти ґрата від швидкості переміщення плазмотрону при силі струму  $I=40$  А

Проаналізувавши отримані результати для даного випадку обробки сталі Ст3 товщиною 3 мм, можна рекомендувати наступні режими обробки: сила струму  $I=40$ А; швидкість переміщення плазмотрону  $S=1900$ – $2500$  мм/хв.

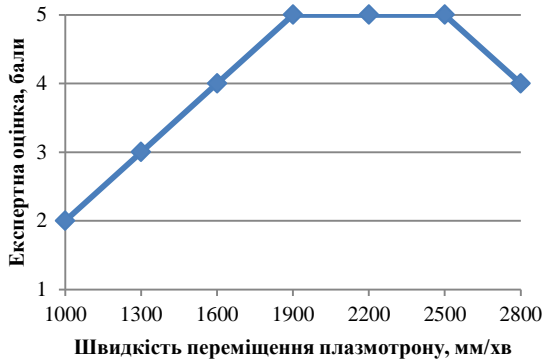


Рис. 4 – Експертна оцінка легкості видалення ґрата залежно від швидкості переміщення плазмотрону

Перевагу слід надати швидкості переміщення  $S=2500$  мм/хв., оскільки вона забезпечує найбільш високу продуктивність і необхідну якість розрізу металу. Таким чином, постійний коефіцієнт 150 у формулі 1 занижено, що не дозволяє отримати максимально можливої продуктивності обробки. Для досягнення максимальної продуктивності даний коефіцієнт має бути не менше 180–185. Подальші експериментальні дослідження показали, що зі збільшенням товщини металу при використанні коефіцієнту 185 часто спостерігається не прорізання металу. Так при товщини листа 12 мм товщина непрорізаного металу складає близько треті від товщини листа (рис. 5), тоді як при розрахунку швидкості переміщення плазмотрону з використанням коефіцієнту 150 лист було пропалено наскрізь.



Рис. 5 – Непропалений метал при товщині листа 12 мм

**Висновки.** Таким чином, отримані результати дозволяють зробити висновок, що при розрахунку залежності швидкості переміщенні плазмотрону від сили току слід враховувати додатково коефіцієнт  $K_T$ , який залежить від товщини матеріалу. У цьому випадку формула для розрахунку швидкості переміщення плазмотрону має вигляд:

$$S = K_T \frac{I}{\delta} \cdot k_M \quad (2)$$



де:  $K_T$  – коефіцієнт, що залежить від товщини металу.

Величина коефіцієнта  $K_T$  отримана експериментально та представлена на рис. 6.

У випадку якщо сила струму може бути змінена в широкому діапазоні, а обмежуючим фактором є швидкість переміщення плазмотрону, останню визначають за формулою (3) або графіком (рис. 7):

$$I = \frac{S \cdot \delta}{K_T \cdot k_M} \quad (3)$$

Отримана залежність дозволяє визначати режими повітряно-плазмового різання тонколистового металу, що забезпечують необхідну якість розрізу та найкраще видалення ґрату з поверхні розрізу при максимальній продуктивності обробки.

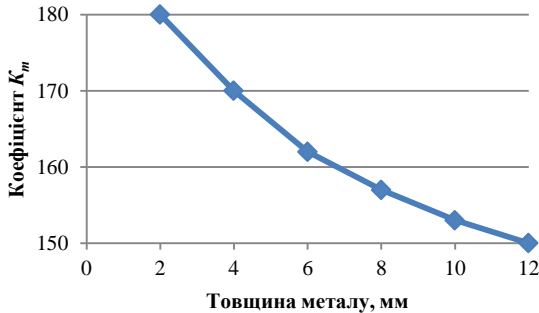


Рис. 6 – Залежність коефіцієнта  $K_T$  від товщини листа

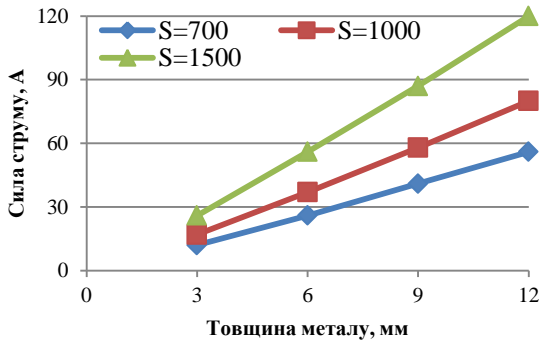


Рис. 7 – Залежність сили струму від товщини металу при різних швидкостях переміщення плазмотрона S

**Список літератури:** 1. Офіційний сайт компанії REDSTEEL [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.redsteel.ru>. – Дата звертання : 20 жовтня 2014. 2. Дзюба В. Л. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / В. Л. Дзюба, К. А. Корсунов. – Луганск : Изд-во ВЛУ им. В. Даля, 2007. – 448 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Oficijniy sajt kompanii REDSTEEL [Elektronniy resurs]. Web. 20 October 2014 <<http://www.redsteel.ru>>. 2. *Dzjuba V.L., Korsunov K. A.* Fizika, tehnika i primenenie nizektemperaturnoj plazmy. – Lugansk : Izd-vo VNU im. V. Dalja, 2007. – 448 P.

*Надійшла (received) 04.10.2014*

**УДК 621.9.048**

**Н.В. ТАРЕЛЬНИК**, к.э.н., доц. Сумского НАУ

## **НОВЫЙ СПОСОБ НИТРОЦЕМЕНТАЦИИ СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Предложен новый способ нитроцементации стальных деталей, включающий электроэрозионное легирование (ЭЭЛ) углеродом в сочетании с ионным азотированием (ИА), при этом ионное азотирование осуществляют до или после операции электроэрозионного легирования в течение времени, достаточного для насыщения металла азотом на глубину зоны термического влияния. Приведен анализ микроструктур исследуемых образцов стали 40Х после различных методов упрочнения.

**Ключевые слова:** нитроцементация, электроэрозионное легирование, ионное азотирование, поверхностный слой, упрочнение.

**Введение.** Одним из основных показателей качества машин является их надежность. Наиболее распространенной причиной отказов машин является не поломка, а износ и повреждение рабочих поверхностей их деталей и рабочих органов. Как правило, все разрушения деталей начинаются с поверхности.

Использование упрочняющих и защитных покрытий существенно повышает качество продукции в машиностроении, обеспечивает надежную работу узлов и деталей в тяжелых условиях эксплуатации оборудования, позволяет снизить материальные и энергетические затраты на эксплуатацию машин, уменьшить расход дорогостоящих конструкционных материалов. Поэтому исследования в направлении создания новых защитных покрытий и повышение качества существующих актуальны и своевременны.

### **Анализ основных достижений и публикаций**

Одним из наиболее простых с технологической точки зрения методов поверхностного легирования является электроэрозионное. Его достоинствами являются локальность воздействия, малый расход энергии, отсутствие объемного нагрева материала, простота автоматизации и «встраиваемости» в технологический процесс изготовления деталей, возможность совмещения операций.

При помощи электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) можно повысить твердость металлической поверхности, нанесением на нее материала более высокой твердости или диффузионным введением в поверхностный слой необходимых химических элементов из окружающей среды, или из материала анода; или понизить твердость, нанося на поверхность более

© Н.В. Тарельник, 2014

мягкие материалы [1].

Однако ЭЭЛ термообработанных деталей, подвергаемых в условиях эксплуатации высоким удельным нагрузкам (детали штампов, валы прокатных станов и др.) не всегда приводит к желаемому результату. Причиной выхода из строя некоторых из них является то, что под слоем повышенной твердости после ЭЭЛ появляется зона отпуска – зона сниженной твердости. Это приводит к продавливанию упрочненного слоя и, как следствие, к быстрому износу детали. ЭЭЛ в данном случае принесет вред, особенно если допустимый износ легированной поверхности превышает толщину слоя повышенной твердости [1].

Согласно [2] «провал» твердости в зоне термического влияния можно устранить путем применения после ЭЭЛ дополнительной обработки для создания наклепа методом поверхностного пластического деформирования. Однако, следует отметить, что в данном случае общего повышения твердости в переходной зоне не наблюдается.

Согласно [3] проведение ионного азотирования (ИА) до или после ЭЭЛ позволяет устранить зоны пониженной твердости при использовании электродов из чистых твердых износостойких металлов. Кроме того, наблюдается более плавное изменение твердости упрочненного слоя и увеличение общей глубины зоны повышенной твердости.

Известен способ цементации стальных деталей электроэрозионным легированием (ЦЭЭЛ) [4], который имеет ряд достоинств, основными из которых являются:

- достижение 100% сплошности упрочнения поверхностного слоя;
- повышение твердости поверхностного слоя детали за счет диффузионно-закалочных процессов;
- легирование можно осуществлять в строго указанных местах, не защищая при этом остальную поверхность детали;
- отсутствие объемного нагрева детали, а следовательно поводок и короблений.

С целью снижения шероховатости поверхности деталей машин, с сохранением качества поверхностного слоя (отсутствие микротрещин, наличие слоя повышенной твердости, 100%-я сплошность и др.) и таким образом расширения области их применения, предложено после ЭЭЛ углеродом (графитовым электродом) производить легирование этим же электродом, но поэтапно [5].

**Постановка задачи.** По сравнению с цементацией и закалкой процесс азотирования протекает при более низкой температуре; азотированная поверхность имеет более высокую твердость, износостойкость и коррозионную стойкость, лучшую полируемость; свойства азотированной поверхности сохраняются практически неизменными при повторных нагревах вплоть до 500 - 600 °С, в то время как при нагревах цементированной и закаленной поверхности до 225 -275 °С твердость ее снижается.

Учитывая это свойство в предварительно азотированной поверхности не следует ожидать снижения твердости в зоне термического влияния после ЭЭЛ углеродом.

При ЭЭЛ углеродом (графитовым электродом) стальной азотированной поверхности происходит процесс аналогичный цианированию, только при обычном цианировании происходит одновременное насыщение поверхности азотом и углеродом, а в данном случае поочередное.

Следует отметить, что метод ИА имеет значительные преимущества перед обычным азотированием (минимальные поводки, снижение энергозатрат и длительности процесса и др.) и широко применяется при упрочнении поверхностей деталей компрессорного и насосного оборудования, работающих в тяжелых условиях. Это штоки, серьги, поршни, защитные втулки и др.

Учитывая, то что при ЭЭЛ наименьшая шероховатость поверхности формируется при использовании графитовых электродов (легирование углеродом) представляет научный и практический интерес проведение металлографических и дюрOMETрических исследований стальных поверхностей после ЦЭЭЛ и ИА проводимых в различных последовательностях.

Таким образом, **целью** работы является повышение качества поверхностей стальных деталей после ЦЭЭЛ проводимой до, или после ИА.

#### **Методика исследований**

Ниже приведена методика и результаты проведенных исследований.

Для ИА и ЦЭЭЛ использовали специальные образцы, изготовленные из стали 40Х в виде катушки, состоящей из двух дисков, диаметром 50 мм и шириной 10 мм, соединенных между собой проставкой диаметром 15 мм и имеющей два технологических участка такого же диаметра (рис. 1,а). Поверхности дисков шлифовались до  $Ra = 0,5$  мкм.

Процесс ЦЭЭЛ производился в автоматическом режиме с помощью установки модели «ЭИЛ – 8А». Образцы закреплялись в патроне токарного станка, после чего производилась поэтапная ЦЭЭЛ, путем последующего легирования графитовым электродом марки ЭГ-4 (ОСТ 229-83) с энергией разряда 0,42 Дж (1-й этап) и 0,1 Дж (2-й этап) с производительностью, соответственно 2 и 5 мин/см<sup>2</sup> (рис. 2).

Из упрочненных образцов вырезали сегменты из которых изготавливали шлифы (рис. 1, б).

Шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», где проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя – диффузионной зоны и зоны термического влияния. Одновременно проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвердости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н.



а б  
Рис. 1 – Образец для ИА и ЦЭЭЛ (а); шлифы (б).



Рис. 2 – ЦЭЭЛ стали 40X с использованием токарного станка.  
Ионное азотирование образцов проводили при температуре 520 °С в течение 12 ч  
на установке НГВ-6,6/6-И1

На всех этапах обработки измеряли шероховатость поверхности на приборе профилографе - профилометре мод. 201 завода «Калибр».

#### **Результаты исследований**

На рис. 3 изображены микроструктуры образцов стали 40X после ИА (а), ЭЭЛ углеродом (б) и ИА с предыдущим и последующим ЭЭЛ углеродом, соответственно (в) и (г), а в табл. 1. представлено распределение микротвердости по глубине слоя.

На всех микрофотографиях четко просматривается «белый», не поддающийся травлению обычными реактивами слой. Его микротвердость наиболее высокая и в зависимости от вида упрочнения колеблется от 7010 МПа при ИА и ЭЭЛ углеродом до 8250 и 11190 МПа при ИА, соответственно, с предыдущим и последующим ЭЭЛ углеродом.

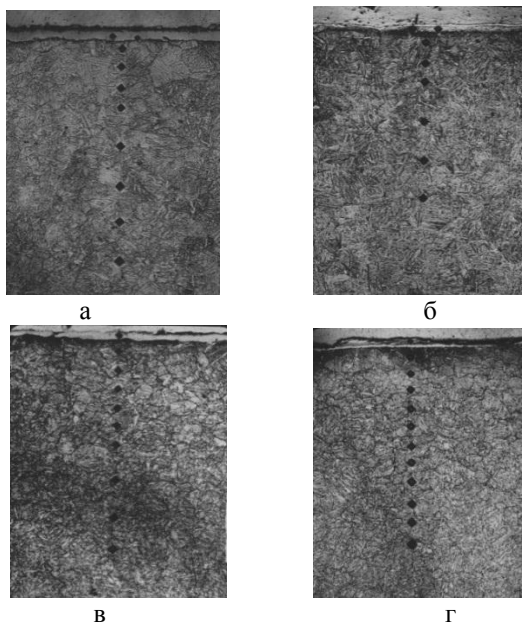


Рис. 3 – Структура образцов стали 40X после:  
а – ИА; б – ЭЭЛ ЭГ-4; в – ЭЭЛ ЭГ-4 + ИА; г – ИА + ЭЭЛ ЭГ-4

Таблица 1 – Шероховатость и распределение микротвердости в поверхностном слое стали 40X после упрочнения различными способами

Вид упрочнения	Микротвердость, МПа (шаг измерения ~ 30 мкм)										Ra, мкм
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ИА	7010	5010	4800	4800	4800	4010	3700	3000			0,5
ЭЭЛгр	7010	5010	4010	3860	3100						0,8
ЭЭЛгр+ИА	8250	5490	5010	5010	4600	4410	4410	3580	3000		0,8
ИА+ЭЭЛгр	11190	5490	5220	4600	4410	4410	4230	3860	3700	3100	0,8

Ниже располагается переходная, диффузионная зона, с плавно снижающейся микротвердостью, переходящей в микротвердость основы (3000-3100 МПа).

Глубина зоны повышенной твердости при ЭЭЛ углеродом составляет 60-70 мкм при ИА до 190 мкм, а при ИА с предыдущим и последующим ЭЭЛ углеродом, соответственно, 220 и 250 мкм.

### Выводы:

1. Предложен новый способ нитроцементации стальных деталей, когда стальную деталь подвергают ЭЭЛ углеродом (графитовым электродом) в сочетании с ИА, при этом ИА осуществляют до или после операции ЭЭЛ в

течение времени, достаточного для насыщения металла азотом на глубину зоны термического влияния.

2. Наибольшая толщина и микротвердость поверхностного слоя формируются при нитроцементации, осуществляемой в последовательности ИА + ЭЭЛ углеродов (графитовым электродом).

**Список литературы:** 1. *Лазаренко Н.И.* Электроискровое легирование металлических поверхностей / *Н.И. Лазаренко* – М.: Машиностроение, 1976. – 45 с. 2. *Андреев В.И.* Повышение эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей / *В.И. Андреев* // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 1978. – №7. – С.71–72. 3. Патент України на винахід № 103701, 23Н 5/00. Спосіб зміцнення поверхонь сталевих деталей, підданих термічній обробці. / *В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник* / Опубл. 11.11.2013, бюл. № 21. 4. Патент України на винахід № 82948, 23С 8/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ *В.С. Марцинковский, В.Б.Тарельник, А.В. Белоус* / Опубл. 25.03.2008, бюл. № 10. 5. Патент України на винахід № 101715, 23Н 9/00. Спосіб цементації сталевих деталей електроерозійним легуванням/ *В.С. Марцинковский, В.Б. Тарельник, М.П. Братушак* / Опубл. 25.01.2013, бюл. № 8.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Lazarenko N.I.* Jelektroiskrovoe legirovanie metallicheskih poverhnošej – Moscow: Mashinostroenie, 1976. – 45 P. 2. *Andreev V.I.* Povyshenie jekspluatacionnyh harakteristik rabochih poverhnošej detalej. Vestnik mashinostroenija. – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – No7. – P.71–72. 3. *V.P. Marcinkovskij, V.B. Tarel'nik* Patent Ukraїni na vinahid No 103701, 23N 5/00. Sposib zmichenija poverhon' stalevih detalej, piddanih termichnij obrobci. Opubl. 11.11.2013, bjul. No 21. 4. *V.P. Marcinkovskij, V.B.Tarel'nik, A.V. Belous* Patent Ukraїni na vinahid No 82948, 23S 8/00. Sposib cementacїї stalevih detalej elektroeroziijnim leguvannjam. Opubl. 25.03.2008, bjul. No 10. 5. *V.P. Marcinkovskij, V.B. Tarel'nik, M.P. Bratushshak* Patent ukraїni na vinahid No 101715, 23N 9/00. Sposib cementacїї stalevih detalej elektroeroziijnim leguvannjam. Opubl. 25.01.2013, bjul. No 8.

*Поступила (received) 06.10.2014*

**УДК 681.518.3**

**О.Ф. ЕНІКЄВ**, канд. техн. наук, УкрДАЗТ, Харків;

**Ф.М. ЄВСЮКОВА**, науч. сотр. НТУ «ХПИ»;

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

## **РОЗПОДІЛЕНА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ**

На основі методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічного принципу та непрямих вимірів амплітуди мікронерівностей розроблено концепцію побудови комп'ютерної системи для підвищення ефективності алмазного шліфування в умовах неповної інформації. Запропоновано метод та апаратні засоби для компенсації кінематичної похибки первинних перетворювачів миттєвої швидкості.

**Ключові слова:** концепція, архітектура, структурно-логічна організація, методи підвищення точності.

**Вступ.** Впровадження до машинобудівного виробництва України

© О.Ф. Енікєв, Ф.М. Євсюкова, Л.О. Шищенко, 2014

сучасних інформаційних та енергозберігаючих технологій базується на розробці технічних засобів для автоматизації технологічних процесів й, зокрема, алмазного шліфування. Програмні впливи відомих систем на виконуючі механізми шліфувального верстату орієнтовано на скорочення тривалості технологічного циклу обробки деталі та отримання заданих мікронерівностей її обробленої поверхні. Архітектура відомих комп'ютерних систем не використовує сигнал стану поточних мікронерівностей, що зумовлено відсутністю відповідних первинних перетворювачів.

**Постановка завдань для досліджень.** Авторами пропонується ідея підвищення ефективності процесу алмазного шліфування в умовах неповної інформації з використанням непрямих вимірювань мікронерівностей для забезпечення заданої якості обробленої поверхні, а також у створенні нової технології обробки деталі, яка передбачає періодичну правку шліфувального круга з метою відновлення його ріжучої спроможності. Реалізація цієї ідеї можлива на основі ієрархічної розбудови архітектури комп'ютерної системи з використанням принципу безпосереднього цифрового управління виконуваними механізмами верстату та застосуванням непрямих вимірювань амплітуди мікронерівностей і ріжучої спроможності алмазного інструменту. У якості по координатних програмних впливів на верстат по досягненню поставленої мети комп'ютерна система може використати поперечну та повздовжню подачі шліфувального круга, кутові швидкості обертання алмазного інструменту та деталі.

Традиційна технологія програмного управління процесом алмазного шліфування знайшла застосування при розробці апаратних засобів першого рівня системи. Девіації швидкості обертання шліфувального круга використано у якості вхідного сигналу для апаратних засобів другого рівня при оцінюванні прогнозованих мікронерівностей поверхні деталі, яку оброблено верстатом. Інформаційно-вимірювальний канал отримає цю інформацію шляхом вимірювань миттєвої швидкості з подальшим виділенням із її часової реалізації сигналу девіацій. Еталонні рівні девіацій можна визначити на основі можливих «квалітетів» чистоти та внести до банку даних апаратних засобів у вигляді нормативів [1]. Тому девіації є джерелом непрямої інформації про фактичні мікронерівності та сигналом, який містить в собі інформацію про відхилення прогнозованого «квалітету» чистоти від встановленого програмою обробки партії деталей.

У якості методу автоматичної правки алмазного інструменту на металевому зв'язуванні можливо використання процесу алмазно-іскрового шліфування. Технічна реалізація апаратних засобів третього рівня системи будеться на пошукі непрямих методів для вірогідного оцінювання ріжучої спроможності шліфувального круга та реалізації нової технології обробки деталі.

**Інформаційне забезпечення системи.** В основу розробки нової інформаційної технології для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування в умовах неповної інформації та дії на систему випадкових завад покладено непрямі вимірювання амплітуди мікронерівностей та ріжучої



спроможності алмазного інструменту (рис. 1).

На рис. 1 позначено:  $\Delta\omega$  – вимірювальний сигнал,  $\bar{U} = (u_1, u_2, \dots, u_i)^T$  – вектор впливів на виконуючі механізми шліфувального верстату,  $R_z$  – амплітуда мікронерівностей,  $P_e$  – вимірювальний сигнал потужності приводу головного руху верстату,  $\bar{X} = (S_{non}, S_{np}, f_{кр})^T$  – вектор стану технологічних параметрів процесу алмазного шліфування,  $\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k)^T$  – вектор випадкових завад,  $q_{onnt}$  – розрахункова сквапність сигналу ТДЖ,  $\bar{Q} = (\Delta_{эм}, S_{non,onnt}, S_{np,onnt}, f_{кр,onnt})^T$  – вектор уставок для виконання процесу шліфування.

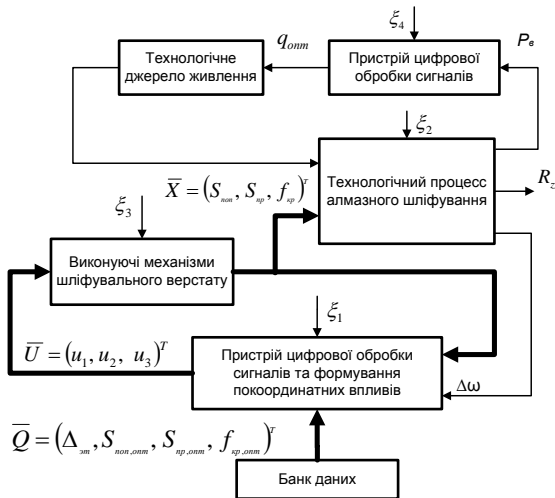


Рис. 1 – Структурна схема нової інформаційної технології для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування в умовах неповної інформації та дії випадкових завад

Архітектура багатопроцесорної системи для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування подана на рис. 2.

На рис. 2 позначено: ЕП – електричний привод; ВМ – виконуючий механізм верстату; Д – первинний перетворювач; П – перетворювач вихідного сигналу Д у цифровий код; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ПОРСК – пристрій для статистичного оцінювання ріжучої спроможності круга; ТДЖ – технологічне джерело живлення для організації періодичної правки круга на металевому зв'язуванні; К – комутатор сигналів; П5 – вимірювач параметрів вихідного сигналу ТДЖ;  $S_{non}$ ,  $S_{np}$  – відповідно поперечна та повздовжня подачі круга;  $f_{кр}$  – середня швидкість обертання круга;  $I$ ,  $U$  – відповідно струм та напруга, яку споживає привод головного

руху верстату,  $Q_{вну}$  – вектор налаштувань пристроїв 1 та 2 по результатам вимірювань девіацій. Технічну реалізацію пристроїв цифрової обробки сигналів виконано на базі мікроконтролерів.

Апаратні засоби третього рівня системи реалізують періодичну правку круга. Відсутність первинних перетворювачів безпосереднього контролю ріжучої здатності круга компенсуємо застосуванням таких непрямих методів для її оцінювання:

- по збільшенню на 5% потужності, яка споживається приводом обертання шліфувального круга;
- по зменшенню на 7% середньої швидкості обертання алмазного інструменту.

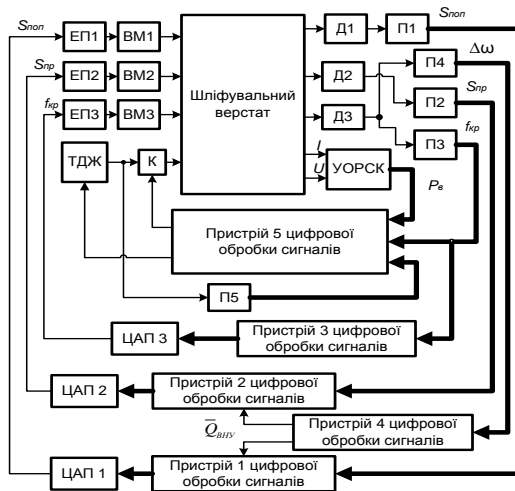


Рис. 2 – Архітектура тривірневої комп’ютерної системи для підвищення ефективності процесу алмазного шліфування на основі обробки даних непрямих вимірювань

Ці рівні порогів встановлено в результаті статистичної обробки експериментальних даних. Якщо вхідні сигнали каналу повертаються до встановлених для них меж, то пристрій 5 повертає верстат до процесу алмазного шліфування. При процесі алмазно-іскрового шліфування має місце підвищений знос алмазного інструменту і, отже, він економічно не вигідний. Наявність у складі апаратних засобів третього рівня мікроконтролеру (пристрій 5 цифрової обробки сигналів) дозволяє організувати регулювання електричних параметрів технологічного процесу алмазно-іскрового шліфування, метою якого є усунення можливих припикань обробленої поверхні деталі та досягнення прогнозованих мікронерівностей.

**Моделювання елементів першого рівня.** Функціонально апаратні засоби для підтримки постійної швидкості обертання шліфувального круга побудовано на базі привода головного руху та пристрою формування цифрових впливів на нього. В результаті аналізу структурної схеми та перетворювань отримано передатну функцію приводу [2]

$$W_1(p) = \frac{K_o T_{om} P}{[(\tau_{ms} P + 1)(T_{os} P + 1)(T_{\phi} P + 1)(T_{om} P + 1) - T_{om} P](T_M P + 1)}, \quad (1)$$

де  $K_i, T_i$  – відповідно коефіцієнти передачі та постійні часу елементарних ланок математичної моделі привода.

Z-перетворення передатної функції апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання шліфувального круга отримано в такому вигляді [2]

$$W_2(z) = \frac{\Delta_n k_o (c_1 + c_2 z^{-1}) z^{-1}}{\left(1 - e^{-\frac{T_0}{T_{14}}} z^{-1}\right) \left(1 - e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} z^{-1}\right)}, \quad (2)$$

$$c_1 = 1 + \frac{T_{15} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} - T_{14} e^{-\frac{T_0}{T_{14}}}}{T_{14} - T_{15}}, \quad c_2 = e^{-\frac{T_0}{T_{14}}} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} + \frac{T_{15} e^{-\frac{T_0}{T_{15}}} - T_{14} e^{-\frac{T_0}{T_{14}}}}{T_{14} - T_{15}},$$

де  $\Delta_i$  – довірчий інтервал вимірювань швидкості обертання круга первинним перетворювачем, який отримано на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу отримана передатна функція пристрою з цифрової обробки сигналу швидкості у такому вигляді [2]

$$W_{пз}(z) = 1.206 \frac{z^2 - 0.1706z}{z^2 - 0.995z - 5.019 \cdot 10^{-3}}. \quad (3)$$

На основі виразів (2) та (3) складено імітаційну модель апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання круга (рис. 3).

Первинний перетворювач та виконуючий механізм вносять запізнення у роботу апаратних засобів для завдання поперечної подачі шліфувального круга. Z-перетворення виразів для передатних функцій цього каналу комп'ютерної системи за управляючим та збурювальним впливами мають такий вигляд [3]

$$W_3(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^\circ + b_1^\circ z^{-1} + b_2^\circ z^{-2} + b_3^\circ z^{-3}}{1 + a_1^\circ z^{-1} + a_2^\circ z^{-2} + a_3^\circ z^{-3}}, \quad W_4(z^{-1}) = \frac{k_M T_M (1 - l_4) z^{-1}}{1 - (1 + l_4) z^{-1} + l_4 z^{-2}}, \quad (4)$$

В цих виразах врахована зона нечутливості первинного перетворювача, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

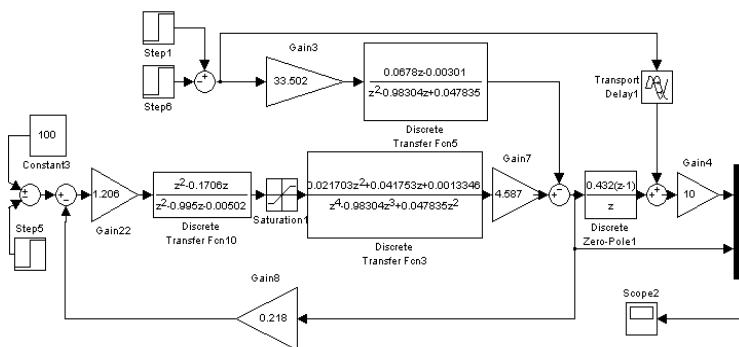


Рис. 3 – Імітаційна модель апаратних засобів для підтримки постійної швидкості обертання шліфувального круга

При визначенні вхідного сигналу апаратних засобів для завдання поперечної подачі круга авторами враховано таке:

- під час прямої та зворотної ходи шліфувального круга фаза вихідного сигналу змінюється на  $180^0$ ;
- пряма та зворотна хода круга утворюють період основної гармоніки частотного подання вхідного впливу.

На підставі цього словесного опису найбільш повно поставленому завданні відповідає такий сигнал [1]

$$S_{non}(t) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } -\pi < \Omega t < -\pi + \alpha, -\alpha < \Omega t < \alpha, \pi - \alpha < \Omega t < \pi, \\ S_{non}, & \text{якщо } \alpha < \Omega t < \pi - \alpha, \\ -S_{non}, & \text{якщо } -\pi + \alpha < \Omega t < -\alpha, \alpha > 0, 0 < \alpha < 0.5\pi, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\alpha = \frac{\Omega}{2}(t_1 - t_2)$ ,  $t_2$  – час взаємодії шліфувального круга з поверхнею деталі, яка оброблюється верстатом.

Перетворення Фур'є для сигналу (5) має наступний вигляд

$$S_{non}(t) = \frac{4S_{non}}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2k-1} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1 - t_2)\right] \sin(2k-1)\Omega t. \quad (6)$$

Після заміни гармонійних складових сумою експоненціальних сигналів та перетворень маємо

$$S_{non}(t) = \sum_{k=1}^n \frac{4S_{non}}{\pi(2k-1)} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1 - t_2)\right] \{e^{j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]} - e^{-j[(2k-1)\Omega t - 0.5\pi]}\}. \quad (7)$$

Розв'язування задачі Коші для диференціальних рівнянь, які описують процес перетворення вхідної інформації каналом для завдання поперечної подачі круга, виконаємо з використанням теореми про згортку. Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції каналу та математичних перетворень отримали таке

$$W_5(t) = \sum_{k=1}^4 B_k e^{-p_k t}, \quad (8)$$

$$\text{де } B_k = \frac{b_0^* \tau_r (\tau_4 p + 1)}{4a_4 p^3 + 3a_3 p^2 + 2a_2 p + a_1} \Big|_{p=p_k}.$$

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (7) та (8) після математичних перетворень отримали вихідний сигнал апаратних засобів для програмного завдання поперечної подачі шліфувального круга у такому вигляді

$$y_{non}(t) = \sum_{k=1}^4 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{2A_{2i-1} T_k}{\sqrt{1 + T_k^2 (2i-1)^2 \Omega^2}} e^{j[0.5\pi - \arctg T_k (2i-1)\Omega]}$$

Пристрій 1 цифрової обробки сигналу поперечної подачі розроблено методом мінімізації квадратичного критерію якості з використанням еталонної моделі каналу. На основі виразу (6) отримана передатна функція пристрою 1 у такому вигляді [3]

$$W_{in}(z^{-1}) = 767.113 \frac{2.3 - 3.453z^{-1} + 1.33z^{-2}}{0.262 + 0.008z^{-1} + 0.2182z^{-2}}. \quad (9)$$

На основі виразів (4) та (9) складено імітаційну модель апаратних засобів для завдання поперечної подачі круга (рис. 4).

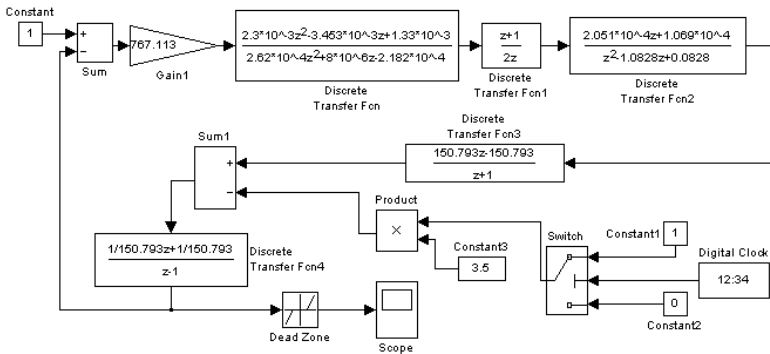


Рис. 4 – Імітаційна модель апаратних засобів для завдання поперечної подачі круга

У результаті аналізу структурної схеми каналу для завдання поздовжньої подачі алмазного інструменту із застосуванням імітаційного моделювання та апарата z-перетворень отримано наступні вирази для передатних функцій за управляючим та збурювальним впливами [4]

$$W_5(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^* + b_1^* z^{-1} + b_2^* z^{-2} + b_3^* z^{-3}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2} + a_3^* z^{-3}}, \quad W_6(z^{-1}) = \frac{k_j z^{-1} [1 - T_j + (T_j - L_4) z^{-1}]}{1 - (1 + L_4) z^{-1} + L_4 z^{-2}}. \quad (10)$$

У цих виразах враховано запізнювання, яке вносять пристрої П2, екстраполятор та ЕП2. Також враховано зону нечутливості первинного перетворювача, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

При поданні вхідного сигналу каналу для завдання поздовжньої подачі шліфувального круга авторами враховано те, що вона за своєю сутністю являє швидкість переміщення приводу

$$S'_{np}(t) = \sum_{k=1}^n B_{2k-1} [e^{j(2k-1)\Omega t} + e^{-j(2k-1)\Omega t}] \text{ при } B_{2k-1} = \frac{2S_{np}}{\pi} \cos \left[ \frac{(2k-1)\Omega}{2} (t_1 - t_2) \right]. \quad (11)$$

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції каналу для завдання поздовжньої подачі круга та математичних перетворень отримали таке

$$W_7(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t} \text{ при } B_k = \frac{b_0^* \tau_r p (\tau_a p + 1)}{4a_4 p^3 + 3a_3 p^2 + 2a_2 p + a_1} \Big|_{p=p_k}. \quad (12)$$

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (11) та (12) отримали вихідний сигнал апаратних засобів для програмного завдання поздовжньої подачі круга

$$y_{nd}(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{A}_{2i-1} T_k}{\sqrt{1 + T_k^2 (2i-1)^2 \Omega^2}} [e^{j \arctg T_k (2i-1) \Omega} - e^{-j \arctg T_k (2i-1) \Omega}].$$

В основу розробки пристрою 2 цифрової обробки сигналу поздовжньої подачі шліфувального круга в умовах дії випадкових завад покладено метод його синтезу з використанням еталонної моделі каналу. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням апарату z-перетворень отримана передатна функція пристрою 2 в такому вигляді [4]

$$W_{f2}(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (13)$$

На основі виразів (10) та (13) складено імітаційну модель апаратних засобів для завдання поздовжньої подачі круга (рис. 5).

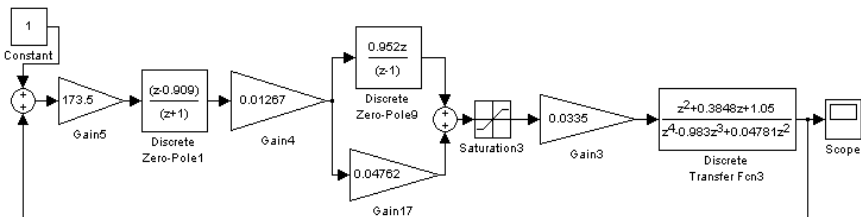


Рис. 5 – Імітаційна модель апаратних засобів для завдання поздовжньої подачі круга

### Модельовання елементів другого рівня. В результаті аналізу

структурної схеми каналу із застосуванням імітаційного моделювання та апарату z-перетворень отримано такий вираз для передатної функції [5]

$$W_8(z^{-1}) = z^{-1} \frac{b_1^* z^{-1}}{1 + a_1^* z^{-1} + a_2^* z^{-2}}. \quad (14)$$

У цьому виразі враховано запізнення каналу та похибка вимірювань девіацій, яку визначено на основі інформаційного підходу у результаті статистичної обробки експериментальних даних.

Подаємо вхідний вплив апаратних засобів зворотного зв'язку у вигляді обмеженого ряду Фур'є. Після заміни гармонійних складових сумою експоненціальних сигналів маємо

$$\Delta\omega(t) = \sum_{k=1}^{10} A_k \left[ e^{j(k\Omega t + \psi_k - 0.5\pi)} - e^{-j(k\Omega t + \psi_k + 0.5\pi)} \right]. \quad (15)$$

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції каналу та математичних перетворень отримали таке

$$W_{33}(t) = B_9 e^{-\frac{1}{T_{16}} t} + B_{10} e^{-\frac{1}{T_{17}} t}, \quad (16)$$

де  $B_9 = \frac{\Delta_5 k_{a3} k_{\gamma 4}}{\hat{O}_{16}(T_{17} - T_{16})}$ ,  $B_{10} = \frac{\Delta_5 k_{a3} k_{\gamma 4}}{\hat{O}_{17}(T_{17} - T_{16})}$ ,  $\hat{O}_{16} = \hat{O}_{a3}$ ,  $\hat{O}_{17} = \tau_{\gamma 4}$ ,  $\Delta_5$  – похибка вимірювань девіацій,  $\tau_{\gamma 4}$  – запізнення, яке вносить пристрій П4 у роботу каналу.

За допомогою теореми про згортку на основі виразів (15) та (16) отримали вихідний сигнал апаратних засобів

$$y_{oc}(t) = B_9 e^{-\frac{1}{T_{16}} t} \sum_{k=1}^{10} \frac{A_k T_{16}}{\sqrt{1 + T_{16}^2 k^2 \Omega^2}} \left[ e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{16} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{16} k \Omega)} \right] +$$

$$+ B_{10} e^{-\frac{1}{T_{17}} t} \sum_{k=1}^n \frac{A_k T_{17}}{\sqrt{1 + T_{17}^2 k^2 \Omega^2}} \left[ e^{j(\psi_k + 0.5\pi - \arctg T_{17} k \Omega)} - e^{-j(\psi_k + 0.5\pi + \arctg T_{17} k \Omega)} \right]$$

В основу розробки пристрою 4 цифрової обробки сигналу миттєвої швидкості покладено метод його синтезу на базі еталонної моделі каналу. Мінімізацію квадратичного критерію якості з використанням математичного апарату z-перетворень отримана передатна функція пристрою 4 в такому вигляді [5]

$$W_{\gamma 4}(z^{-1}) = \frac{1.54 - 2.096z^{-1} + 0.616z^{-2}}{2.574 + 0.083z^{-1} - 2.156z^{-2}}. \quad (17)$$

На основі виразів (14) та (17) складна імітаційна модель каналу комп'ютерної системи (рис. 6).

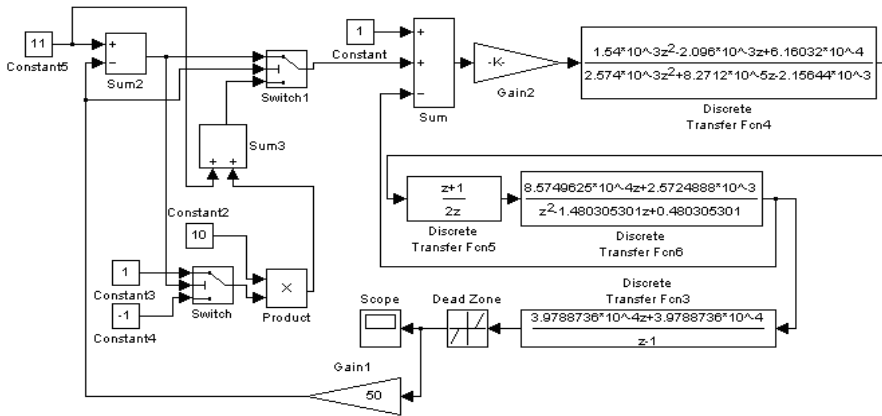


Рис. 6 – Імітаційна модель третього рівня системи

**Моделювання елементів третього рівня.** В результаті аналізу структурної схеми третього рівня із застосуванням апарату z-перетворень маємо такий вираз для дискретної передатної функції каналу, який реалізує нову технологію обробки деталі [6]

$$W_8(z) = \frac{k_{\partial \dot{E} I} T_a (T_a + K_{I \dot{O}} T_{i \dot{o}}) \frac{T_1}{T_3 - T_2} \left( e^{-\frac{T_0}{T_3}} + e^{-\frac{T_0}{T_2}} \right) z^{-1}}{\left( 1 - e^{-\frac{T_0}{T_2}} z^{-1} \right) \left( 1 - e^{-\frac{T_0}{T_3}} z^{-1} \right)}, \quad (18)$$

Після застосування зворотного перетворення Лапласу до передатної функції апаратних засобів третього рівня та перетворень отримали таке

$$W_8(t) = B_{41} e^{-\frac{1}{T_{17}} t} + B_{42} e^{-\frac{1}{T_{18}} t}, \quad (19)$$

$$\text{де } B_{41} = \frac{K_{\partial \dot{E} I} T_a (T_a + K_{I \dot{O}} T_{i \dot{o}})}{\dot{O}_{17} (T_{18} - T_{17})}, \quad B_{42} = \frac{K_{\partial \dot{E} I} T_a (T_a + K_{I \dot{O}} T_{i \dot{o}})}{\dot{O}_{18} (T_{17} - T_{18})}.$$

Подаємо вхідний сигнал апаратних засобів третього рівня системи у вигляді функції Хевісайда. На основі виразу (19) за допомогою теореми про згортку отримали вихідний сигнал

$$y_{B3}(t) = 1(t) + \frac{B_{42} \dot{O}_{18}}{\dot{O}_{18} + 1} e^{-\frac{\dot{O}_{18} t}{T_{18} + 1}} - \frac{B_{41} \dot{O}_{17}}{\dot{O}_{17} + 1} e^{-\frac{\dot{O}_{17} t}{T_{17} + 1}}. \quad (20)$$

Мінімізацією квадратичного критерію якості одержали передатну функцію пристрою 5 цифрової обробки сигналів [6]



$$W_{f5}(z) = \frac{k_{\text{OËT}} T_{\bar{a}} \left( T_{\bar{a}} + K_{\text{IO}} T_{i\bar{0}} \right) \frac{\tau_r}{T_3 - T_2} \left[ z^2 + \left( e^{-\frac{T_0}{T_3}} + e^{-\frac{T_0}{T_2}} \right) z \right]}{e^{-\frac{T_0}{T_3}} e^{-\frac{T_0}{T_2}} z^2 - \left( e^{-\frac{T_0}{T_3}} + e^{-\frac{T_0}{T_2}} \right) z + 1}. \quad (21)$$

На основі виразів (18) та (21) складено імітаційну модель (рис. 7) каналу, який реалізує нову технологію обробки деталі.

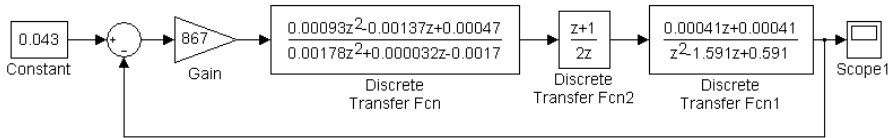


Рис. 7 – Імітаційна модель апаратних засобів третього рівня

**Розробка критерію вибору періоду дискретизації впливу.** Для цього задаємося значенням похибки відновлення аналогового сигналу за дискретними відліками. Вплив системи на виконуючий механізм верстату подаємо у вигляді обмеженого ряду Фур'є, який має десять гармонійних складових

$$v(t) = \sum_{i=1}^n A_{2i-1} \sin[(2i-1)\omega t]. \quad (22)$$

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

$$\delta_{\text{дин}} = 1 - \frac{\pi}{m} \sum_{k=0}^{0.5m-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right), \quad (23)$$

де  $m$  – кількість інтервалів дискретизації.

Відносна похибка дискретизації сигналу (22) визначена з урахуванням внесків гармонійних складових

$$\delta_{\text{н\ddot{o}i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}} \delta_{(2i-1)\ddot{a}e\ddot{t}}. \quad (24)$$

За допомогою цього виразу побудовано графік (рис. 8). Цей Рис. використано авторами для визначення кількості інтервалів дискретизації прямої або зворотної ходи круга при обраній похибці відновлення. Період дискретизації сигналу системи визначається шляхом поділу часу прямої ходи круга на визначену кількість інтервалів. Швидкодія апаратних засобів системи повинна перевищувати це значення періоду дискретизації.

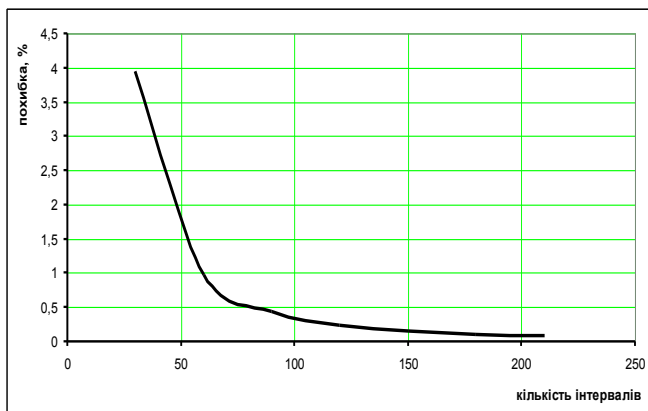


Рис. 8 – Графік похибок дискретизації

**Висновок.** З метою підвищення ефективності технологічного процесу алмазного шліфування запропоновано інформаційну технологію та розподілену комп'ютерну систему. Архітектуру системи розбудовано з використанням ієрархічного принципу, непрямих вимірювань амплітуди мікронерівностей та ріжучої спроможності круга. На основі дискретного перетворення Лапласа побудовано математичні моделі апаратних засобів багатопроцесорної системи в умовах дії випадкових завад й з урахуванням запізнення. Мінімізацією квадратичного критерію якості з використанням еталонних моделей синтезовано потрібні апаратні засоби цифрової обробки сигналів. Побудовано імітаційні моделі апаратних засобів комп'ютерної системи. У результаті імітаційного моделювання встановлено, що вони відповідають вимогам системи за величиною похибки та швидкістю перетворення.

**Список літератури:** 1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования / А.Ф. Еникеев – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. 2. Єнікєєв О.Ф. Аналіз динамічних характеристик системи стабілізації швидкості обертання круга / О.Ф. Єнікєєв, О.В. Суботін, Р.О. Яровий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорск, 2005. – № 18 – С. 107 – 113. 3. Єнікєєв А.Ф. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / А.Ф. Єнікєєв, І.С. Зиков // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков, 2008. – №57 – С. 87 – 93. 4. Борисенко А.М. Аналіз динаміки дворівневої системи підвищення ефективності алмазного шліфування / А.М. Борисенко, О.Ф. Єнікєєв, І.С. Зиков // Вісник Національного технічного університету «ХПИ» «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – Харків, 2012. – № 2 – с. 34 – 43. 5. Єнікєєв О.Ф. Адаптивна система цифрового управління технологічним процесом алмазного шліфування з еталонною моделлю / О.Ф. Єнікєєв, О.В. Суботін // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. – Краматорск, 2008. – №23 – С. 307 – 314. 6. Єнікєєв О.Ф. Аналіз динамічних характеристик системи відновлення ріжучої здатності шліфувальних кругів / О.Ф. Єнікєєв, Г.В. Соколовська // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць ПІМЕ НАН України. – К.: 2011. – № 58 – С. 135 – 140.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Enikeev A.F.* Optimal'noe upravlenie tehnologicheskim procesom almaznogo shlifovaniya. – Kramatorsk: DGMA, 2001. – 160 P. 2. *Yenikyeyev O.F., Subotin O.V., Yarovyj R.O.* Analiz dy'namichny'x karaktery'sty'k sy'stemy` stabilizaciyi shvy'dkosti obertannya kruga. Nadijnist` instrumentu ta opy`mizaciya tehnologichny'x sy'stem. – Kramatorsk, 2005. – No 18 – P. 107 – 113. 3. *Yenikyeyev A.F., Zy'kov Y.P.* Sy'ntez cy`frovogo regulatora poperechnoyi peredachi shlifoval'nogo kruga. Vestny'k Nacy`onal'nogo texny`cheskogo uny`versy'teta «KhPI». – Kharkov, 2008. – No 57 – P. 87 – 93. 4. *Borysenko A.M., Yenikyeyev O.F., Zy'kov I.P.* Analiz dy'namiky` dvorivnevoyi sy'stemy` pidvy`shhennya efekty`vnosti almaznogo shlifuvannya. Visny'k Nacional'nogo texnichnogo univerty'setu «KhPI» «Matematy`chne modelyuvannya v texnici ta tehnologiyax». – Kharkiv, 2012. – No 2 – P. 34 – 43. 5. *Yenikyeyev O.F., Subotin O.V.* Adaptivna sy`stema cy`frovogo upravlinnya tehnologichny'm procesom almaznogo shlifuvannya z etalonnoyu modellyu. Nadijnist` instrumentu ta opy`mizaciya tehnologichny'x sy'stem. – Kramatorsk, 2008. – No 23 – P. 307 – 314. 5. *Yenikyeyev O.F., Sokolovska G.V.* Analiz dy'namichny'x karaktery'sty'k sy'stemy` vidnovlennya rizhuchoyi zdatnosti shlifoval'ny'x krugiv. Modelyuvannya ta informaciyi tehnologiyi. Zbirny'k naukovy'x prac` IPME NAN Ukrainy`. – Kyiv: 2011. – No 58 – P. 135 – 140.

*Надійшла (received) 06.10.2014*

**УДК 621.921**

**А.А. АНДИЛАХАЙ**, докт. техн. наук, доц., ГВУЗ “ПГТУ”, Мариуполь

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФИНИШНОЙ СТРУЙНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕЛКИХ ДЕТАЛЕЙ**

В статье разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 - 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

**Ключевые слова:** абразивная обработка, абразивные зерна, мелкие детали, сжатый воздух, сопло Лавала, шероховатость поверхности, производительность обработки.

**Введение.** Струйно-абразивная обработка получила применение при обработке деталей сложной конфигурации. Однако интенсивный износ каналов сопел, через которые прокачивается абразивная суспензия, в ряде случаев ограничивает ее эффективное использование. Поэтому применительно к обработке мелких деталей (массой до 3 г) предложен метод абразивной обработки затопленными струями. Его сущность состоит в том, что через сопла прокачивается только сжатый воздух, а абразивные зерна, находящиеся в абразивной суспензии, присоединяются к струям сжатого воздуха после срезов сопел. Струи сжатого воздуха подаются таким образом, чтобы достигались обработка и равномерное перемешивание деталей, а также

© А.А. Андилахай, 2014

обеспечивалась сохранность внутренних поверхностей рабочей камеры. Учитывая недостаточную изученность этого прогрессивного метода обработки, настоящая работа посвящена обоснованию его технологических возможностей с точки зрения повышения качества и производительности обработки, а также разработки практических рекомендаций.

**Анализ основных достижений и литературы.** Проблемам струйно-абразивной обработки посвящены многочисленные исследования [1,2], на основе которых созданы специальные установки и определены оптимальные условия осуществления процесса обработки. При этом установлено, что изготовление сопел из износостойких материалов не решает проблемы их интенсивного износа. Поэтому кардинальным решением проблемы износа сопел стало создание метода абразивной обработки деталей затопленными струями, когда абразивные зерна присоединяются к абразивной струе за пределами сопла. В работах [3,4] определены основные технологические возможности этого метода обработки. Однако для обоснованного выбора рациональных условий обработки необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований качества и производительности обработки.

**Цель исследования, постановка задачи.** Целью данной работы является обоснование условий повышения качества и производительности абразивной обработки мелких деталей затопленными струями. Для этого необходимо выявить и реализовать основные факторы, определяющие функционирование процесса, разработать математические эмпирические модели шероховатости и производительности обработки и на их основе определить рациональные параметры обработки и размеры конструктивных элементов струйно-абразивных установок при их проектировании.

**Материалы исследования.** Для решения поставленной задачи проведен комплекс экспериментальных исследований основных параметров абразивной обработки деталей затопленными струями на установке, показанной на рис. 1. Экспериментально установлено, что плотность покрытия следами абразивных зерен обрабатываемой поверхности детали (рис. 2) увеличивается от середины к ее кромкам (рис. 3). Следовательно, наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцовых поверхностях обрабатываемых мелких деталей.

На базе планированного дробного факторного эксперимента  $2 \cdot 10^{-6}$  (1/8 реплики) построены математические модели определения производительности обработки (в качестве критерия оценки выбран металлосъем  $M$  в мг за 30 минут обработки) и шероховатости поверхности (по критерию  $R_{max}$ , в мкм):

$$M = 39,9 \frac{V_a^{0,313} \cdot D_a^{0,046} \cdot m_d^{0,002} \cdot \Sigma^{0,833} \cdot W_{ж}^{0,16} \cdot d_c^{0,088} \cdot n_c^{0,4} \cdot D_{разм}^{0,074} \cdot \zeta^{0,009}}{\delta^{0,02}}, \quad (1)$$

$$R_{max} = 7,4 \frac{V_a^{0,27} \cdot D_a^{0,083} \cdot m_d^{0,028} \cdot \Sigma^{0,277} \cdot W_{ж}^{0,136} \cdot d_c^{0,09} \cdot n_c^{0,04} \cdot D_{разм}^{0,273} \cdot \zeta^{0,143}}{\delta^{0,054}}, \quad (2)$$

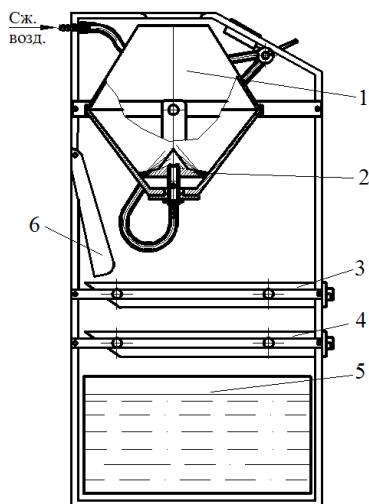


Рис. 1 – Схема лабораторной струйно-абразивной установки с объемом рабочей камеры 30 л: 1 – рабочая камера; 2 – сопловой аппарат (завихритель); 3 – решето для деталей; 4 – решето для абразивного зерна; 5 – бак-отстойник; 6 – желоб для суспензии

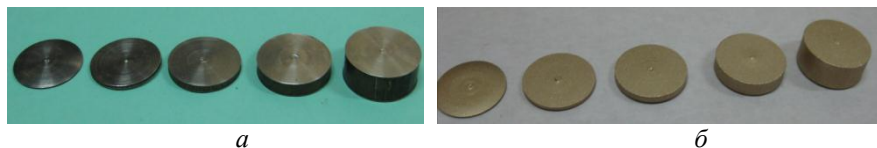


Рис. 2 – Образцы из латуни ЛС59.1 в форме диска диаметром 20 мм и толщиной 0,5; 1; 2; 4 и 8 мм: а – до обработки; б – после обработки

где  $V_a$  – объем загружаемого абразива, л;  
 $D_a$  – зернистость абразива, мм;  
 $m_0$  – единичная масса обрабатываемых деталей, г;  
 $\Sigma$  – суммарная масса обрабатываемых деталей, кг;  
 $W_{жс}$  – объем заливаемой жидкости, л;  
 $d_c$  – диаметр сопел, мм;  $n_c$  – количество сопел;  
 $D_{разм}$  – диаметр размещения сопел, м;  
 $\xi$  – угол оси сопла к горизонту, градус;  
 $\delta$  – угол между осью сопла и касательной к окружности в точке ее размещения, градус.

Как следует из зависимости (1), наибольшее влияние на производительность обработки оказывает суммарная масса деталей  $\Sigma$  и в меньшей мере параметры  $n_c$ ,  $V_a$  и  $W_{жс}$ . Установлено также незначительное влияние зернистости абразива  $D_a$  на производительность абразивной

обработки затопленными струями (рис. 4, а), тогда как в известных методах струйно-абразивной обработки зернистость абразива является определяющим параметром процесса.

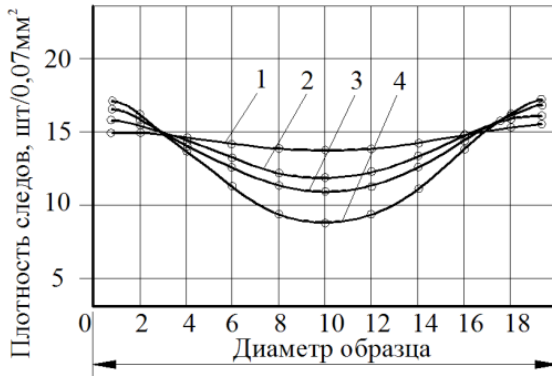


Рис. 3 – Плотность следов абразивных зерен (в поле зрения объектива – 0,07 мм<sup>2</sup>) в диаметральном направлении образцов в форме диска при толщине диска: 1 – 4,0 мм; 2 – 2,0 мм; 3 – 1,0 мм; 4 – 0,5 мм

Как следует из зависимости (2), фактически в одинаковой степени основное влияние на максимальную высоту микронеровностей обработанной поверхности  $R_{max}$  оказывают параметры  $\Sigma$ ,  $V_a$  и  $D_{разм}$ . Доказано, что достигаемая высота микронеровностей  $R_{max}$  (рис. 4,б) находится в непосредственной связи с производительностью обработки, представленной съемом металла, и стабилизируется для данных условий обработки при  $R_{max} = 3,4$  мкм.

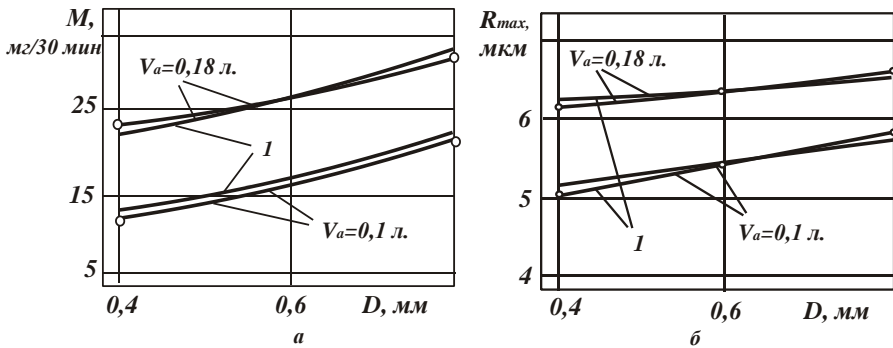


Рис. 4 – Исследуемые параметры механообработки: а – зависимость производительности обработки  $M$  от размера абразивного зерна  $D_a$ ; б – зависимость высоты микронеровностей  $R_{max}$  от размера абразивного зерна; 1 – расчетные кривые

Таким образом, разработанные обобщающие эмпирические математические модели параметров процесса абразивной обработки деталей затопленными струями ( $M$  и  $R_{max}$ ) дают достаточно полное представление о технологических возможностях процесса и позволяют по критериям наибольшей производительности и наименьшей шероховатости поверхности определить рациональные параметры обработки. Экспериментально установлено, что реализовать наибольшую производительность обработки, например, для заданной шероховатости поверхности  $R_{max} = 3,4$  мкм можно применением следующих условий обработки: объем загружаемого абразива – 0,18 л.; зернистость абразива – № 40; суммарная масса обрабатываемых деталей – 0,4 кг; объем заливаемой жидкости – 3,0 л.; диаметр сопел – 2 мм; количество сопел – 8; диаметр размещения сопел – 110 мм, угол оси сопла к горизонту –  $25^0$ ; угол между осью сопла и касательной к окружности в точке ее размещения –  $0...5^0$ . Полученные эмпирические зависимости для определения производительности обработки и шероховатости поверхности позволяют производить выбор рациональных технологических и конструктивных параметров и научно обоснованно подходить к проектированию оборудования для отделочной абразивной обработки деталей затопленными струями.

На этой основе разработано эффективное оборудование в виде гаммы установок (защищенных авторскими свидетельствами и патентами) для абразивной отделочной обработки мелкогабаритных деталей затопленными струями, позволяющее ликвидировать трудоемкие ручные зачистные операции, повысить качество, производительность и стабильность обработки за счет улучшения товарного вида обработанных деталей при одновременной обработке большого количества деталей с загрузкой в рабочую камеру «навалом». Разработанные установки обеспечивают высокоэффективную направленную обработку торцовых поверхностей, плоских поверхностей и одновременно торцовых и плоских поверхностей деталей, а также обеспечивают улучшение эргономических показателей обработки за счет ее автоматизации и механизации. Повышение качества и производительности обработки достигается за счет применения сверхзвуковых профилированных сопел Лаваля.

Проведенные экспериментальные исследования абразивной обработки деталей затопленными струями на разработанной установке показали возможность увеличения производительности обработки (рис. 5) при обеспечении требуемого качества обработанных поверхностей деталей по сравнению с используемыми базовыми установками. В процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях (рис. 6), образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8...1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5–6 мкм).

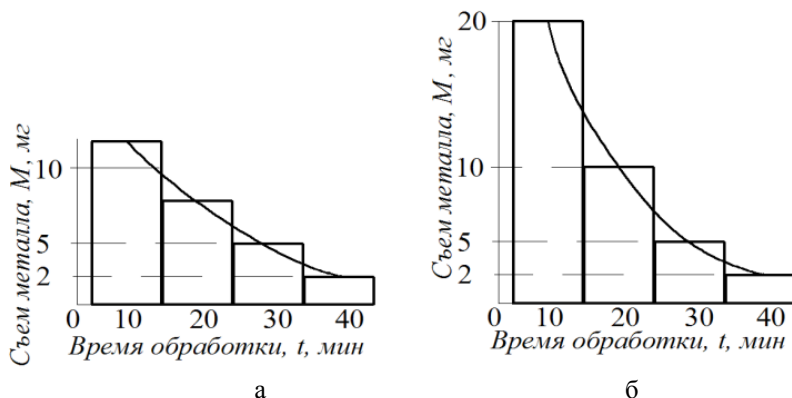


Рис. 5 – Зависимость съема металла  $M$  для различных промежутков времени обработки  $t$  : а – при использовании базовой установки; б – при использовании разработанной установки. Условия обработки: шлифзерно 63С; зернистость абразива 63П (630 мкм); давление сжатого воздуха 0,5 МПа; угол наклона осей сопел к горизонту  $10^\circ$ ; сопловой аппарат базовой установки оснащен цилиндрическими соплами диаметром 2 мм, вновь разработанной установки - соплами Лавалья с критическим сечением 2 мм

Проведенные испытания разработанных установок показали, что благодаря новым техническим решениям в конечном итоге удалось на 62% повысить производительность обработки при обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей. При этом установлено, что за счет создания дополнительного источника перемешивания обрабатываемых деталей, обеспечивающего увеличение количества одновременно обрабатываемых деталей, производительность обработки выросла на 10%. Установлено также, что благодаря улучшению качества абразивного материала, за счет очистки от отходов, а также использования чистой воды, достигнуто увеличение производительности обработки в среднем на 5 %.

Значительный прирост производительности обработки (на 39 %) получен в результате замены сопел с цилиндрическим каналом на профилированные сверхзвуковые сопла Лавалья. Применение сопла Лавалья стало возможным лишь благодаря использованию принципиально новой схемы струйно-абразивной обработки – абразивной обработки деталей затопленными струями, исключаящей износ каналов сопел потоком абразивных зерен, т.к. при использовании традиционных схем струйно-абразивной обработки “узким” местом (подверженным повышенному износу) в профилированном сопле является его критическое сечение.

Практикой установлено, что эффективной областью применения абразивной обработки затопленными струями является обработка мелких точных деталей малой жесткости и сложной конфигурации радио- и электротехнической промышленности, приборостроения, точной механики,



оптико-механического производства, прецизионных деталей, используемых для нанотехнологий, общемашиностроительного назначения и деталей ювелирных изделий и геральдики.

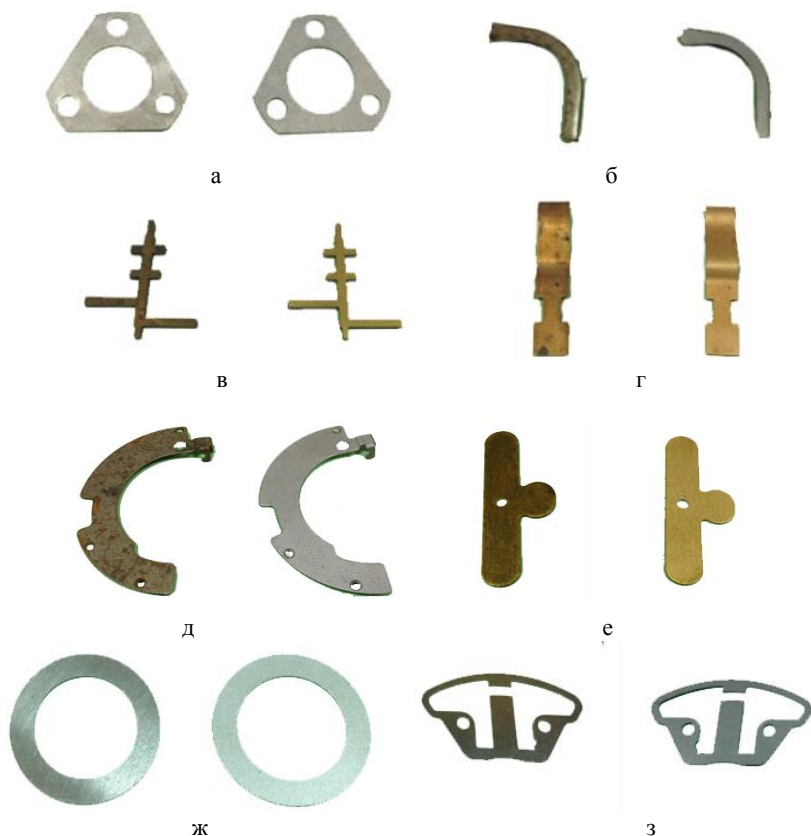


Рис. 6 – Внешний вид деталей из различных материалов до и после обработки:  
а – алюминий; б – сталь 3; в – латунь ЛС59.1; г – бериллиевая бронза БрБ2;  
д – сталь 3; е – титановый сплав ВТ-1; ж – латунь Л63; з – дуралюмин Д16.

Промышленные испытания разработанных установок показали, что за счет сохранности каналов сопел обеспечивается их надежная и бесперебойная работа, практически не нуждающаяся в техническом обслуживании. Установлено, что за время выполнения операции (приблизительно 40 минут) основное (машинное) время составляет 30 – 35 минут, т.е. оператор занят на обслуживании одной установки 5 – 10 минут. Следовательно, в условиях участка отделочной обработки оператор может одновременно обслуживать три таких установки с последовательным запуском их в работу.

Производительность обработки мелких деталей на разработанных установках по сравнению с их традиционной ручной немеханизированной обработкой может быть увеличена до 66 раз. Все зависит от количества обрабатываемых деталей: с их увеличением производительность резко увеличивается. Это, естественно, позволяет исключить технологические операции на предприятии, связанные с ручной отделочной (зачистной) обработкой данных деталей, и уменьшить число рабочих на этих операциях.

**Выводы.** Экспериментально установлено, что наибольшая интенсивность съема материала при абразивной обработке затопленными струями достигается на торцовых поверхностях обрабатываемых мелких деталей, что позволяет в первую очередь рекомендовать предлагаемый метод для обработки торцовых поверхностей мелкоразмерных деталей. Разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки и произвести выбор количества и размеров конструктивных элементов установок при их проектировании. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 - 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

**Список литературы:** 1. Кремень З.И. Турбоабразивная обработка деталей сложного профиля / З.И. Кремень, М.Л. Миссарский, В.З. Гузэль. – М.: НИИмаш, 1987. – 53 с. 2. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин / А.Е. Проволоцкий – К: Техника, 1989. – 177 с. 3. Андiлахай А.А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А.А. Андiлахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с. 4. Андiлахай А.А. Технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями / А.А. Андiлахай // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 49. – С. 140-143.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kremen Z.I., Missarskiy M.L., Guz'el V.Z. Turboabrazivnaya obrabotka detaley slozhnogo profilya. – Moscow: NIImach, 1987. – 53 P. 2. Provolotskiy A.E. Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashin. – Kiev: Tekhnika, 1989. – 177 P. 3. Andilakhay A.A. Abrazivnaya obrabotka detaley zatoplennymi struyami. – Mariupol: PGTU, 2006. – 190 P. 4. Andilakhay A.A. Tekhnologicheskie vozmozhnosti abrazivnoy obrabotki detaley zatoplennymi struyami. Visnyk NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh pratP. Tematychnyi vypusk: Tekhnologii v mashynobuduvanni. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. – No 49. – P. 140-143.

*Поступила (received) 12.08.2014*

**Ф.В. НОВИКОВ**, д-р техн. наук, проф., ХНЭУ, Харьков;  
**О.С. КЛЕНОВ**, канд. техн. наук, Фирма “ДиМерус Инженеринг”, Харьков

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ

Приведено аналитическое решение об условиях уменьшения технологической себестоимости обработки и возможности реализации высокоскоростного резания. Показано, что скорость резания ограничена экстремумом (минимумом) себестоимости обработки. Увеличить скорость резания и реализовать условия высокоскоростной обработки можно за счет повышения стойкости режущего инструмента путем применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов, характеризующихся низким коэффициентом трения.

**Ключевые слова:** высокоскоростная обработка, инструментальный материал, себестоимость обработки, скорость резания, температура резания, производительность обработки.

**Введение.** Современные металлорежущие станки с ЧПУ типа “обрабатывающий центр” реализуют условия высокоскоростного резания, что открывает широкие возможности повышения точности, качества и производительности обработки. Однако, как показывает практика, обработка в условиях высокоскоростного резания характеризуется повышенной технологической себестоимостью, что нивелирует преимущества этого прогрессивного метода обработки. В связи с этим актуальной является проблема поиска новых технологических решений, обеспечивающих снижение себестоимости обработки без снижения параметров точности, качества и производительности обработки в условиях высокоскоростного резания.

**Анализ основных достижений и литературы.** Задачи теоретического определения условий уменьшения технологической себестоимости освещены в работах [1-3]. Вместе с тем, полученные решения основаны на использовании эмпирических зависимостей для определения стойкости режущего инструмента, справедливых для частных условий обработки. Кроме того, используемые эмпирические зависимости содержат лишь параметры режима резания, тогда как стойкость инструмента зависит от различных физических факторов, учет которых позволил бы получить более общие теоретические решения и обосновать основные пути снижения технологической себестоимости обработки в условиях высокоскоростного резания. Поэтому теоретический анализ технологической себестоимости обработки с позиции аналитического представления стойкости инструмента позволит более полно раскрыть технологические закономерности и возможности высокоскоростной обработки по критерию себестоимости обработки.

**Цель исследования, постановка задачи.** Целью работы является обоснование условий уменьшения технологической себестоимости обработки на основе математического моделирования технологические закономерности и возможности высокоскоростной обработки. Работа является развитием работ по исследованию технологической себестоимости обработки [4-6].

**Материалы исследования.** Для достижения поставленной цели воспользуемся зависимостью для определения технологической себестоимости обработки  $C$  при продольном точении для трех основных изменяющихся статей затрат, учитывающих затраты по заработной плате рабочего за обработку партии деталей и замену изношенного инструмента, а также затраты на инструмент [4,6]:

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N_0 \cdot \Pi, \quad (1)$$

где  $N, N_0$  – количество обрабатываемых деталей и потребляемых режущих инструментов;

$t_0$  – основное технологическое время обработки, мин;

$S_{\text{час}}$  – тарифная ставка рабочего, грн/мин;

$k$  – коэффициент, учитывающий всевозможные начисления на тарифную ставку рабочего;

$t_c$  – время, затрачиваемое на снятие затупившегося инструмента [1], мин;

$\Pi$  – цена инструмента, грн.

С учетом соотношений  $t_0 = \mathcal{G}/Q$  и  $N \cdot t_0 = N_0 \cdot T$  получено:

$$C = N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{час}} \cdot k + N \cdot \frac{\mathcal{G}}{V \cdot t \cdot S} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{час}} \cdot k + \Pi)}{T}, \quad (2)$$

где  $Q = V \cdot t \cdot S$  – производительность обработки (при продольном точении), м<sup>3</sup>/с;

$V$  – скорость резания, м/мин;

$t$  – глубина резания, м;

$S$  – подача, м/об;

$T$  – стойкость режущего инструмента, с.

Стойкость режущего инструмента  $T$  можно представить:

$$T = \frac{h}{V_{\text{изн}}}, \quad (3)$$

где  $h$  – длина площадки износа на задней поверхности инструмента, м;

$V_{\text{изн}}$  – скорость износа инструмента на задней поверхности, м/с.

Тогда зависимость (2) опишется:

$$C = N \cdot \frac{g}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot \frac{g}{V \cdot t \cdot S} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi) \cdot V_{\text{изн}}}{h}. \quad (4)$$

Как видно, с увеличением параметров режима резания  $V$ ,  $t$ ,  $S$  и  $T$  (или  $h$ ) себестоимость обработки  $C$  будет уменьшаться. Однако при этом с увеличением  $V$ ,  $t$ ,  $S$ , очевидно, будет увеличиваться  $V_{\text{изн}}$  и уменьшаться  $T$ , что приведет к увеличению  $C$ . Следовательно, в общем случае себестоимость обработки  $C$  будет изменяться по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Для определения экстремального значения  $C$  выразим стойкость режущего инструмента  $T$  эмпирической зависимостью [1]:

$$T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}, \quad (5)$$

где  $C_4, m_1, q, p$  – постоянные для определенных условий обработки ( $m_1 > p > q; m_1 > 1$ ).

В результате зависимость (2) примет вид:

$$C = N \cdot \frac{g}{V \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot g \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4}. \quad (6)$$

Поскольку  $m_1 > 1$ ,  $p > 1$ ,  $q < 1$ , то скорость резания  $V$  и подача  $S$  неоднозначно влияют на себестоимость обработки  $C$ , т.е. существуют экстремумы функции  $C$  от переменных  $V$  и  $S$ . Для определения экстремальных значений  $V$  и  $S$  следует подчинить функцию  $C$  необходимым условиям экстремума:  $C'_V = 0$ ;  $C'_S = 0$ . Тогда

$$-N \cdot \frac{g}{V^2 \cdot t \cdot S} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot g \cdot (m_1 - 1) \cdot V^{m_1-2} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-1} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0; \quad (7)$$

$$-N \cdot \frac{g}{V \cdot t \cdot S^2} \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot g \cdot (p - 1) \cdot V^{m_1-1} \cdot t^{q-1} \cdot S^{p-2} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0. \quad (8)$$

После преобразований получено:

$$-N \cdot g \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot g \cdot (m_1 - 1) \cdot V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0; \quad (9)$$

$$-N \cdot g \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + N \cdot g \cdot (p - 1) \cdot V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{vac}} \cdot k + \Pi)}{C_4} = 0. \quad (10)$$

Как видно, решением системы уравнений является условие  $m_1 = p$ . Однако, как установлено экспериментально,  $m_1 > p$ . Следовательно, данное решение лишено физического смысла. Такое же неопределенное решение получено в работе [3]. Чтобы уйти от неопределенности, необходимо в качестве переменной величины рассматривать производительность обработки  $Q = V \cdot t \cdot S$ , а не ее компоненты  $V$  и  $S$ . Тогда зависимость (2) примет вид:

$$C = N \cdot \frac{g}{Q} \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + N \cdot \frac{Q^{m_1-1}}{t^{m_1-q} \cdot S^{m_1-p}} \cdot \frac{(t_c \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + \Pi)}{C_4}. \quad (11)$$

Из зависимости (11) вытекает, что минимум себестоимость обработки  $C$  будет достигаться при экстремальной производительности обработки  $Q_{\text{экстр}}$  и максимально возможных значениях глубины резания  $t$  и подачи  $S$ . Подчиняя функцию  $C$  необходимому условию экстремума  $C'_Q = 0$  получено:

$$Q_{\text{экстр}} = \left[ \frac{S_{\text{нас}} \cdot k \cdot C_4}{(t_c \cdot S_{\text{нас}} \cdot k + \Pi) \cdot (m_1 - 1)} \cdot S^{m_1-p} \cdot t^{m_1-q} \right]^{\frac{1}{m_1}}; \quad (12)$$

$$C_{\text{min}} = \frac{N \cdot g \cdot S_{\text{нас}} \cdot k}{Q_{\text{экстр}}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{(m_1 - 1)} \right]. \quad (13)$$

Как следует из зависимостей (12) и (13), увеличить  $Q_{\text{экстр}}$  и уменьшить минимальное значение себестоимости обработки  $C_{\text{min}}$  можно главным образом за счет увеличения величины  $C_4$ , зависящей от физико-механических свойств инструментального материала. Экстремальное значение скорости резания  $V_{\text{экстр}}$  определяется из зависимости  $V_{\text{экстр}} = Q_{\text{экстр}} / t \cdot S$ . Следовательно, увеличение  $V_{\text{экстр}}$  ограничено экстремумом (минимумом) себестоимости обработки  $C_{\text{min}}$ . Увеличить  $V_{\text{экстр}}$  и соответственно реализовать условия высокоскоростной обработки можно в основном увеличением величины  $C_4$  за счет применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов.

Для раскрытия физической сущности полученного решения проведем его анализ на основе аналитической зависимости для определения температуры резания, возникающей на задней поверхности резца [6]:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot h \cdot V}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (14)$$

где  $f$  – коэффициент трения резца с обрабатываемым материалом;  
 $HV$  – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м<sup>2</sup>;  
 $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  
 $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К).

Как видно, при заданной температуре резания  $\theta$  существенно увеличить скорость резания  $V$  и таким образом осуществить высокоскоростную обработку можно уменьшением двух параметров –  $f$  и  $h$  за счет применения инструментальных материалов, характеризующихся низким коэффициентом трения и высокой износостойкостью, например, синтетических сверхтвердых материалов (алмаз, эльбор и т.д.), твердых сплавов с износостойкими покрытиями. Уменьшение длины площадки износа на задней поверхности инструмента  $h$  предполагает уменьшение стойкости режущего инструмента  $T$ . Если представить  $V_{изн} = k_1 \cdot V^{n_1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}$  (где  $k_1, n_1, n_2, n_3$  – величины, зависящие от физико-механических свойств инструментального материала), то с учетом зависимости (3) зависимость (14) примет вид:

$$\theta = f \cdot HV \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k_1 \cdot T \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}. \quad (15)$$

Откуда

$$T = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2 \cdot V^{n_1+1} \cdot t^{n_2} \cdot S^{n_3}}. \quad (16)$$

Сравнивая зависимости (5) и (16) видно, что по структуре они фактически идентичны, рассматривая

$$C_4 = \frac{c \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \theta^2}{2k_1 \cdot f^2 \cdot HV^2}. \quad (17)$$

Таким образом, полученное аналитическое решение позволяет раскрыть физическую сущность постоянной величины  $C_4$  (которая устанавливается экспериментальным путем) и определить условия осуществления высокоскоростной обработки, которые, как установлено выше, состоят в увеличении  $C_4$ . Согласно зависимости (17), они реализуются за счет увеличения предельной температуры резания  $\theta$  и уменьшения коэффициента трения  $f$ .

Из зависимости (16) вытекает, что стойкость режущего инструмента  $T$  обусловлена температурным фактором. Чем больше предельная температура

резания  $\theta$  для рассматриваемого инструментального материала, тем больше  $T$ . Причем, наличие квадратичной зависимости между  $T$  и  $\theta$  указывает на существенное влияние физико-механических свойств инструментального материала на стойкость режущего инструмента  $T$ . Такое же существенное влияние на  $T$  оказывает и коэффициент трения инструмента с обрабатываемым материалом  $f$ : чем меньше  $f$ , тем больше  $T$ , а соответственно и производительность обработки  $Q_{экстр}$ , и меньше технологическая себестоимость обработки  $C_{min}$ .

**Выводы.** В работе получено аналитическое решение об условиях уменьшения технологической себестоимости обработки и возможности реализации высокоскоростного резания. Показано, что скорость резания ограничена экстремумом (минимумом) себестоимости обработки. Увеличить скорость резания и реализовать условия высокоскоростной обработки можно за счет повышения стойкости режущего инструмента путем применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов, характеризующихся низким коэффициентом трения.

**Список литературы:** 1. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с. 2. *Грановский Г.И.* Резание металлов: учебник / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с. 3. *Армарего И.Дж.А.* Обработка металлов резанием / И.Дж.А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с. 4. *Новиков Ф.В.* Разработка эффективных технологий механической обработки деталей машин / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх // Автомобильный транспорт: сборник научных трудов. – Х.: ХНАДУ, вып. 29, 2011. – С. 212-215. 5. *Новиков Ф.В.* Определение оптимальных условий механической обработки деталей машин по критерию наименьшей себестоимости / Ф.В. Новиков, В.А. Жовтобрюх, Е.Ю. Бенин // Вісник Приазовського державного технічного університету. Сер.: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ “Приазов. держ. техн. ун-т”, 2012. – №1 (24). – 2012. – С. 241-247. 6. *Жовтобрюх В.А.* Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Bobrov V.F.* Osnovy teorii rezaniya metallov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 343 P. 2. *Granovskiy G.I., Granovskiy V.G.* Rezanie metallov: uchebnik. – Moscow: Vysshaya shkola, 1985. – 304 P. 3. *Armarego I.Dzh.A., Braun R.Kh.* Obrabotka metallov rezaniem. – Moscow: Mashinostroenie, 1977. – 325 P. 4. *Novikov F.V., Zhovtobruk V.A.* Razrabotka effektivnykh tekhnologiy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin. Avtomobil transport: sbornik nauchnykh trudov. – Kharkov.: KhNADU, vyp. 29, 2011. – P. 212-215. 5. *Novikov F.V., Zhovtobruk V.A., Benin E.Y.* Opredelenie optimalnykh usloviy mekhanicheskoy obrabotki detaley mashin po kriteriyu naimenshey sebestoimosti. Visnyk Priazovskogo derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Ser.: Tekhnichni nauky: Zb. nauk. pratP. – Mariupol: DVNZ “Priazov. derzh. tekhn. un-t”, 2012. – No1 (24). – 2012. – P. 241-247. 6. *Zhovtobruk V.A.* Povyshenie effektivnosti mekhanicheskoy obrabotki detaley gidravlicheskih sistem putem vybora ratsionalnykh parametrov operatsiy po kriteriyu sebestoimosti: avtofef. diP. na soiskanie nauchn. stepeni kand. tekhn. nauk: spetP. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya”. – Mariupol, 2012. – 21 P.

*Поступила (received) 12.08.2014*



**В. К. ЛОБАНОВ**, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
**Г. И. ПАШКОВА**, канд. техн. наук, нач. лаб., Завод им. В. А. Малышева

## **МЕТОДИКА И ТЕХНИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ ЦАПФ ЗАДНИХ МОСТОВ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

В работе представлена методика и техника исследования сопротивления усталости цапф заднего моста транспортного средства «Дозор», изготовленных по различным технологическим схемам, в условиях нагружения, имитирующего эксплуатационное. Приведены результаты натурных испытаний, осуществленных при знакопостоянном цикле нагружения. Показано, что оптимальными являются испытания деталей при совместном действии изгиба и кручения.

**Ключевые слова:** транспортное средство, задний мост, цапфа, сопротивление усталости

**Введение и постановка задачи.** Для анализа эксплуатационной долговечности узлов транспортных машин используют данные лабораторных и дорожных испытаний. Причем при лабораторных испытаниях иногда не все детали работают в условиях, аналогичных эксплуатационным, поэтому в процессе испытания агрегата в целом может не выявиться истинная долговечность некоторых деталей. В этом случае соответствующий узел или деталь необходимо испытывать отдельно [1, 2].

Цапфы задних мостов транспортных средств относятся к числу наиболее ответственных деталей, подвергающихся в процессе эксплуатации высоким циклическим нагрузкам. Целесообразно определить влияние конструктивных особенностей изготовления цапф на их сопротивление усталости.

**Целью** настоящей работы являлась разработка адаптированной к заводским условиям методики сравнительной оценки сопротивления усталости цапф заднего моста специального транспортного средства «Дозор», изготовленных по различным технологическим схемам, в условиях нагружения, имитирующего эксплуатационное.

**Техника и методика испытаний и тензометрирования.** В качестве объектов исследования рассматриваются натурные цапфы заднего моста, сварной или составной конструкции. Общий вид цапф показан на рис. 1, а.

Разработка основана на использовании для проведения испытаний универсальной испытательной машины типа МУП-50 (см. рис. 1, б), позволяющей создавать максимальную статическую нагрузку 500 кН и максимальную циклическую нагрузку 250 кН с точностью  $\pm 1\%$ . Испытания осуществляются при знакопостоянном цикле нагружения. База испытаний –  $2 \cdot 10^6$  циклов.

Первый этап испытаний цапф проводится при действии изгибающего момента. Частота нагружения –  $500 \text{ мин}^{-1}$ .

Испытаниям при циклическом знакопостоянном изгибе подвергаются одновременно две цапфы, расположенные симметрично относительно оси

приложения нагружающего усилия (рис. 2).

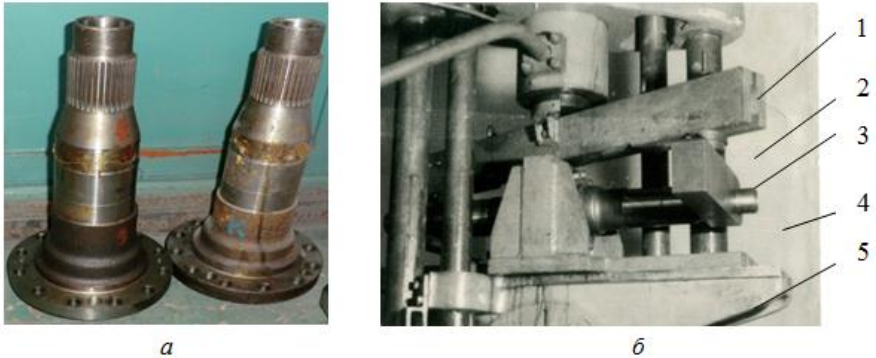


Рис. 1 – Общий вид : а – испытываемые цапфы; б – испытательная машины МУП-50 с установленными в приспособление цапфами: 1 – траверса; 2 – пуансон; 3 – рычаг; 4 – испытываемая цапфа; 5 – основание приспособления

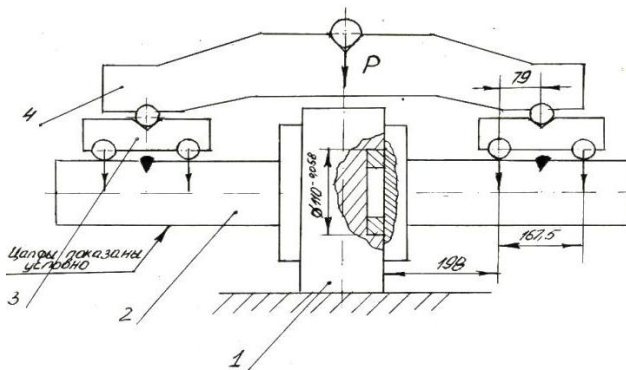


Рис. 2 – Схема приспособления для циклических испытаний цапф при изгибе:  
 1 – основание приспособления; 2 – испытываемые детали;  
 3 – периферийные пуансоны; 4 – центральный пуансон

Цапфы устанавливаются в специальное приспособление. Нагрузка через центральный пуансон передается на два периферийных пуансона, которые обеспечивают нагружение в местах расположения подшипников качения.

В этом случае цапфы, как и в реальной конструкции, представляют собой консоли с нагрузкой, приложенной в месте расположения колес.

Такая схема позволяет оценивать как опасные сечения самой цапфы, так и узла ее крепления. Максимальная нагрузка на каждую цапфу – 100 кН, минимальная – 40 кН. При разрушении одной из испытываемых цапф до

достижения базового количества циклов проводится замена разрушенной цапфы, и испытания продолжаются. При таких параметрах испытаниям подлежат как сварные, так и составные цапфы.

Перед проведением циклических испытаний производится исследование напряженного состояния цапф методом электротензометрии [3].

При тензометрировании используются тензорезисторы типа ФКП: для резких переходов сечений и района сварного шва – с базой 3 мм, для гладких участков – с базой 5 мм. Определение деформаций производится с помощью полумостовых измерительных схем подключения тензорезисторов. Выходные сигналы тензорезисторов в исходном состоянии и при нагружении цапфы статическим усилием 100 кН фиксируются с помощью тензометрической системы СИИТ-3 с коэффициентом чувствительности равным  $1,98 \cdot 10^{-6}$  единиц относительной деформации. Расчет напряжений производится по стандартным формулам для плоского напряженного состояния [4].

На втором этапе исследований оценивается работоспособность цапф при совместном действии изгибающего и крутящего моментов, т.е. в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Общий вид приспособления для проведения таких испытаний, размещенного на машине МУП-50, показан на рис. 1, б.

Две испытываемые цапфы крепятся к корпусу приспособления с помощью штатных болтов. На шлицевых частях обеих цапф закрепляются рычаги, через которые посредством пуансонов, установленных в специальную траверсу, нагрузка передается на испытываемые детали. Таким образом, цапфы представляют собой консоли, нагруженные одновременно изгибающим и крутящим моментами.

В соответствии с расчетными данными максимальная нагрузка на каждую цапфу составляет 50 кН, минимальная – 15 кН, величина максимального крутящего момента 1000 кгс·м, минимального – 300 кгс·м. Частота нагружения – 500 мин<sup>-1</sup>. Таким образом испытывают цапфы обоих конструктивных вариантов, т.е. сварные и составные.

На рис. 3 показана схема расположения тензорезисторов и распределение напряжений по длине цапфы сварной конструкции из стали 18Х2Н4МА при испытаниях на изгиб.

Как видно из приведенного графика, наиболее нагруженной зоной в процессе испытаний является участок, прилегающий к месту крепления цапфы, что вполне объяснимо, учитывая консольный характер нагружения.

Однако и в этих местах значения напряжений при заданном уровне максимальной нагрузки, находящиеся в пределах 200...256 МПа, существенно ниже предела выносливости материала цапфы, который составляет от 470 до 540 МПа [5, 6]. Следует также учесть, что величина напряжений в районе сварного шва еще ниже, что гарантирует малую вероятность усталостного разрушения в этой зоне.

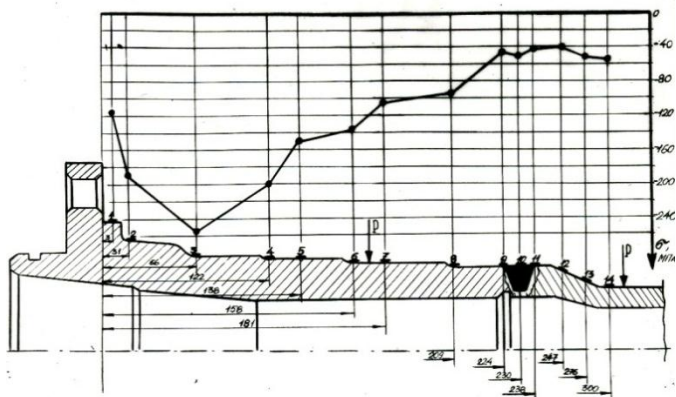


Рис. 3 – Схема размещения тензорезисторов и распределение напряжений в цапфе сварной конструкции из стали 18Х2Н4МА (при испытаниях на изгиб)

Для тензометрирования при испытаниях на изгиб с кручением тензорезисторы наклеивают в наиболее нагруженном сечении цапф с двух противоположных сторон: по схеме розеток (два тензорезистора под углом  $45^\circ$ ) – для измерения напряжений кручения, и друг напротив друга вдоль оси цапфы – для определения напряжений от изгиба. Значения напряжений рассчитываются по известным формулам [7].

**Выводы.** Впервые разработана и адаптирована к реальным лабораторным условиям методика испытаний на усталость цапф заднего моста транспортного средства «Дозор» с различными вариантами изготовления.

**Список литературы:** 1. Гольд Б. В. Основы прочности и долговечности автомобиля / Б. В. Гольд, Е. П. Оболенский, Ю. Г. Стефанович, О. Ф. Трофимов. – М.: Машиностроение, 1967. – 212 с. 2. Кугель Р. В. Испытания на надежность машин и их элементов. – М.: Машиностроение, 1982. – 182 с. 3. Шушкевич В. А. Основы электротензометрии. – Минск: Вышэйшая школа, 1975. – 352 с. 4. Биргер И. А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с. 5. Троценко В. Т., Сосновский Л. А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. – К.: Наукова думка, 1987. – 308 с. 6. Приданцев М. В., Давыдов Л. Н., Тамарина И. А. Конструкционные стали: Справочник. – М.: Metallurgiya, 1980. – 288 с. 7. Тензометрирование деталей автомобиля / Под ред. И. С. Лулева. – М.: Машгиз, 1962. – 231 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gol'd, B. V., E. P. Obolenskij, Yu. G. Stefanovich, and O. F. Trofimov. *Osnovy prochnosti i dolgovechnosti avtomobilja*. Moscow: Mashinostroenie, 1967. Print. 2. Kugel', R. V. *Ispytaniya na nadezhnost' mashin i ih jelementov*. Moscow: Mashinostroenie, 1982. Print. 3. Shushkevich, V. A. *Osnovy jelektrotenzometrii*. Minsk: Vyshhejschaja shkola, 1975. Print. 4. Birger, I. A. *Ostatocnyje naprjazhenija*. Moscow: Mashgiz, 1963. Print. 5. Troshhenko, V. T., and L. A. Sosnovskij. *Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov*. Kiev: Naukova dumka, 1987. Print. 6. Pridancev, M. V., L. N. Davydov, and I. A. Tamarina. *Konstrukcionnye stali*. Moscow: Metallurgija, 1980. Print. 7. *Tenzometrirovanie detalej avtomobilja*. I. P. Luneva, ed. Moscow: Mashgiz, 1962. Print.

Поступила (received) 10.10.2014

V.*STUPNYTSKYI*, PhD, National University "Lviv Polytechnic"

## **A GENERALIZED EXAMPLE OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC OPTIMIZATION OF FUNCTIONALLY-ORIENTED PROCESS**

The example of structural and parametric optimization of the functionally-oriented technological process machining of mold's parts is described in the article. The most essential criteria of optimization are wearproofness, fatigue strength, contact stiffness and corrosion resistance of production. In the article the brought methodology over of researches and algorithm of optimization.

**Keywords:** **functionally-oriented technological process, optimization, wear resistance, residual stress, contact stiffness, corrosion resistance, coefficient of friction, CAF- system**

**Introduction.** The systems approach to technological ensure efficiency components based on the one hand, the evaluation of parts quality indicators that characterize their geometric shape, surface layer microstructure and its physical and mechanical properties (including residual) based on technological factors and other hand, the forecasting measure parts properties (wear resistance, the contact stiffness, corrosion resistance, etc.) depending on their quality. Obviously, providing only some local indicators of quality products not guarantee optimal measure properties of the product as a whole. It is therefore necessary to design functional- oriented process, based on the analysis of a set of interrelated operational measures of the product.

Manufacture of various parts of dies and molds is extremely difficult in modern engineering. This is due to their high accuracy, low roughness of the functional surfaces, significant temperature changes during operation (to 500-700°C), difficult workability of these parts material, high frequency and intensity of cyclic and alternating loads more. Particular attention to the operation of molds are ejectorP. As described in [1] statistics bounce functional parts and assemblies molds, pushing the system accounts for 25-30 % of all failures at work and breakdowns of these productP. This is due to high-frequency complex thermodynamic operating conditions ejector, cooling problems, combined with their non-rigid structure ( ratio of length to diameter in the range of 15-20 ), the requirements of superdense mobile connection tightness, wear resistance, fatigue strength and high manufacturing quality (precision size - 5-7 ISO accuracy degree, functional surface roughness - 0.2-0.8 microns, etc.). The working surface of the mold insert with ejector form a joint that can roll over. During this period numb molten metal, forming fin on the casting surface. Therefore, the gap between the ejector and the hole in the ear performed within 0,08-0,1 mm. On the other side, this gap should be the maximum, it depends on the use of materials for inserts and ejector fabrication, casting material, temperature, pouring temperature heating molds, liquid metal flow rate, specific pressure on the walls of the working cavity and other factors [2].

In this example ejector is made from the high-alloy low-carbon steel 316L. This design element is subject to intense wear and alternating power and thermal loads during operation, which combined to cause loss of use of molds in general. Therefore, the most important measure properties ejector is wear resistance, contact stiffness, fatigue strength and corrosion resistance. The above measure properties depend strongly from parameters such as surface layer microstructure, functional surfaces microhardness (hardness of the surface layer), character and depth of the residual stress and deformation.

Measure as a working surface formed mainly at the final stage of the process manufacturing ejector comprising finish turning and smoothing diamond shape P. It is the final stage of manufacturing ejector investigated in part in this example. Principles of functional and process-oriented indicators formation of a product intended to for given values of quality parameters of the finished part, known range of values of the original piece and given information about their transformation, technological heredity and mutual influence in the formation of functional surfaces to develop the most efficient technological process to ensure the optimal combination of product quality parameters

**Main part.** Consider the implementation of 2 version workflow handling most accurate cylindrical surface on finish operation.

– 1-st variant. Finish grinding by the abrasive wheel.

– 2-nd variant. Fine turning tool with synthetic polycrystalline diamond - carbonado (as an example, suggested the use of PCD universal mark - CTM302 ElementSix [3]).

To determine the basic measure criteria functionally-oriented technological process mold ejector machining, it is necessary to analyze the mechanisms of formation parameters durability, fatigue strength, corrosion resistance and so on. To do this, CAF system simulation rheological model of formation of base surfaces ejector and identify indicators of stress- strain state (including residual) parameters mikrotopolohiyi surface and its structural and phase state as a result of cutting [4,5].

Featured [6] geometrical parameters for sharpening cutters with PCD  $\gamma = 15-20^\circ$ ,  $\alpha = 10-12^\circ$ ,  $r = 0,3-0,5$  mm. Tools with circles sharpen PCD ACB 100/80-50/40 TO2 50% with the use of lubricoolant containing water as coolant soda solution. After bringing sharpening is performed by iron discs, overact diamond powder ACM 40/28-28/20. The model implemented within the system Deform-2D, use: type of modeling - Lagrangian Incremental (Lagrangian Analysis) with gradient mesh (ratio - 0.1 mm); shows the geometry of the object modeling - Plane Strain; object type modeling: workpiece - Elasto-Plastic; tool - Rigid; iterative method for solving problems - Newton-Raphson; condition of convergence calculation - Conjugate-Gradient Solver (combined gradient method); condition yield stress - Generalized Johnson & Cook Model; criterion destruction - Normalized C & L Fracture; model of structural phase machinings - Avrami model.

Results of simulation of rheological modeling are shown in Figure 1.

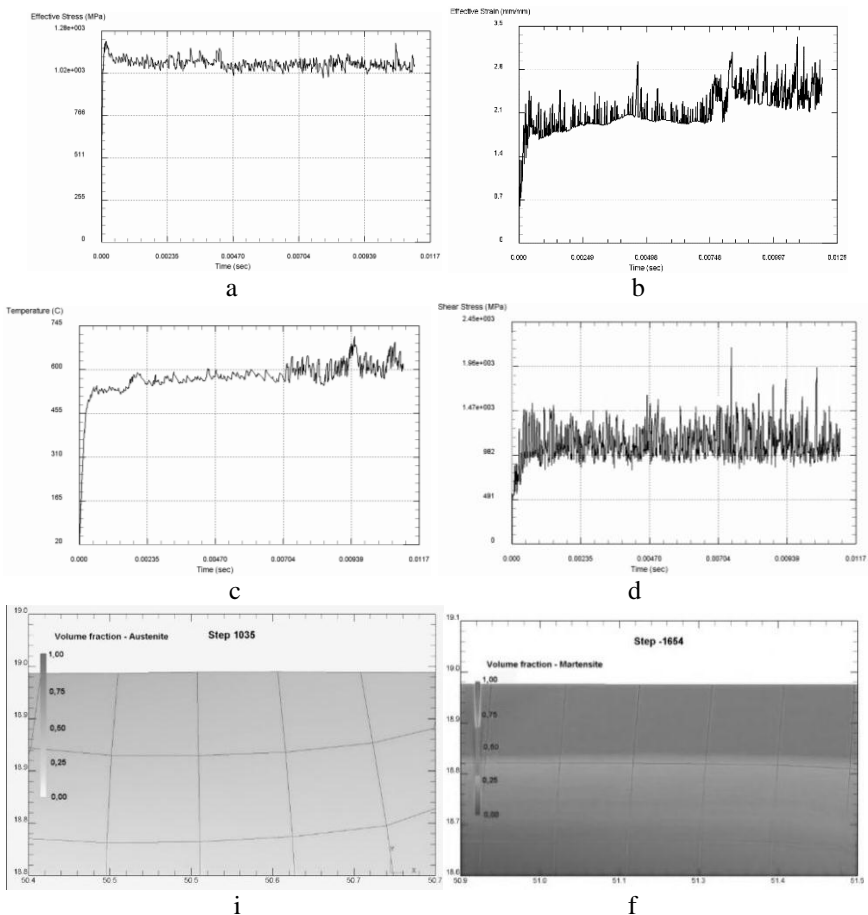


Fig.1—Results of the rheological modeling machining mold’s ejector by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302. a - effective stress; b – effective strain; c - temperature in the cutting zone; d – shear stress; i-f - picture structure and phase state of the surface after machining.

Microprofile finish surface, which determines the value of its roughness, formed by vector addition of three components: the microscopic height derived as a result of copying the cutting wedge tool considering its kinematic characteristics of motion ( $\Delta_1$ ), microscopic height, which is determined by fluctuations in the elements of the cutting tool ( $\Delta_2$ ) and the component profile roughness caused by plastic deformation in the contact zone of tool and workpiece ( $\Delta_3$ ).

Geometric-kinematic component of roughness  $\Delta_1$  under the conditions:  $\varphi > \arcsin(\frac{s}{2r})$  і  $\varphi_1 \geq \arcsin(\frac{s}{2r})$  after transformation in Chebyshev equation [7]:

$$\Delta_1 = \frac{S^2}{8r} = \frac{0,05^2}{8 \cdot 0,5} = 0,000625 \text{ mm} = 0,625 \text{ mic} \quad (15)$$

Method of determining the microscopic of roughness height, which is determined by fluctuations elements of the cutting tool ( $\Delta_2$ ) is written in [8]. Moreover, the nonlinear dynamic model of self-oscillation technology system allows for regenerative mechanism of excitation of vibrations when moving the tool along the workpiece surface formed by the previous machining ( $Ra_{i-1}=5$  microns). In the model the cutting force depends on the geometrical parameters of the tool and mechanical properties of orthogonal cutting:

$$\begin{cases} M\ddot{x} + K_x \dot{x} + C_x x = \tau_{xy} \cdot S_i \times \\ \times \left( b_1 + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left( 1 + \sin \left( \frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \frac{\cos(\eta - \gamma)}{\sin\beta \cdot \cos(\beta + \eta - \gamma)} \\ M\ddot{y} + K_y \dot{y} + C_y y = \tau_{xy} \cdot S_i \times \\ \times \left( b_1 + \frac{S_{i-1}^2}{16r} \left( 1 + \sin \left( \frac{2\pi x}{S_{i-1}} - \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \cdot \frac{\sin(\eta - \gamma)}{\sin\beta \cdot \cos(\beta + \eta - \gamma)} \end{cases} \quad (16)$$

Surface microrelief in the transverse direction is modeled by imposing an array of tool motion profile in terms of its summit, which describes an arc with radius R. In this case [9]

$$\Delta_2 = 2A_{max} - H_B = 2 \cdot 0,00027 - 0,00015 = 0,00039 \text{ мм} = 0,4 \text{ мкм} \quad (17)$$

where  $A_{max} = \frac{\chi}{\sqrt{(J^p + \chi - mp^2\omega^2)^2 + \mu_{mp}^2 p^2 \omega^2}} H_g$  - maximum amplitude of

oscillation tool, determined in solving the differential equations of the tool motion;  $J^p$  - radial stiffness of the technological system, N/mm; ( $\chi$  - coefficient depending on the specific machining conditions; m - reduced mass of the moving system, kg;

$\omega = \frac{\pi n}{30} = 167,5 \text{ rad}$  - cyclic frequency of the main motion;

$H_{g_{i-1}} = \frac{Ra_{i-1}}{2} = 0,0025 \text{ мм}$  - amplitude of surface irregularities resulting from

implementation of previous technological machining.

It is the top of the tool in this technological machining step:

$$\begin{aligned} H_{g_{i-1}} &= R - (R - r) \cos \frac{\Psi}{2} - \sqrt{r^2 - \left( (R - r) \sin \frac{\Psi}{2} \right)^2} = \\ &= 0,85 - (0,85 - 0,5) \cos \frac{0,143}{2} - \\ &- \sqrt{0,5^2 - \left( (0,85 - 0,5) \sin \frac{0,143}{2} \right)^2} = 0,00015 \text{ мм} \end{aligned} \quad (18)$$



Where central angle tips:

$$\psi = \arccos\left(1 - \frac{S^2}{2(R-r)^2}\right) = \arccos\left(1 - \frac{0,05^2}{2(0,85-0,5)^2}\right) = 0,143 \text{ rad} \quad (19)$$

Component profile roughness caused by plastic deformation in the contact zone of tool and workpiece  $\Delta_3$  determined from the [7] under the conditions:  $\varphi > \arcsin(\frac{s}{2r})$  and  $\varphi_1 \geq \arcsin(\frac{s}{2r})$ :

$$\Delta_3 = \frac{\left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right) \cdot \left(2S_i + \frac{r}{2} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{xy}}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \bar{\sigma}^2}}\right)\right)}{64} =$$

$$\frac{\left(1 - \frac{992}{\sqrt{992^2 + 1099^2}}\right) \cdot \left(2 \cdot 0,05 + \frac{0,5}{2} \cdot \left(1 - \frac{992}{\sqrt{992^2 + 1099^2}}\right)\right)}{64} = 0,0001 \text{ мм}$$

where  $\tau_{xy}$  - dynamic shear stress, MPa;  $\bar{\sigma}$  - effective mean stress, MPa.

So, in this case the average value of the roughness derived as a result of copying the cutting wedge tool considering its kinematic characteristics of motion ( $\Delta_1$ ) constitute 55,5%, microscopic height, which is determined by fluctuations elements of the cutting tool ( $\Delta_2$ ) – 34,7% and the component profile roughness caused by plastic deformation in the contact zone of tool and workpiece ( $\Delta_3$ ) - 9,8%, respectively. Thus, the result  $Ra = 0,625 + 0,39 + 0,13 = 1,125 \text{ mic}$  corresponding specifications drawings (set  $Ra = 1,25 \text{ mic}$ ).

In Fig.2 is shown the picture of residual stresses rheological modeling as a result of finishing lathe machining mold's ejector tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302. These stresses exponential decrease as a result of thermodynamic relaxation with increasing distance from the top of the cutting wedge along the machined surface. The depth of plastic deformation is based on solving of the Prandtl problem [7].

The curve of residual stresses I type (Fig.2) shows an interference pattern manifestation fluktatsiynh stretching (temperature and friction) and compressive (force) loadP. Average values the of residual stresses in the zone of thermal stabilization (at about 100°C) will be approximately 170 MPa for machining the workpiece ejector manufactured from steel 316L by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302.

Steel 316L has high viscosity due to the low carbon content. In the annealed steel contains about 12% soluble carbide M6P. Hardening steel in oil at a temperature of 1050 - 1100°C dissolved in austenite is about 7 % of carbides, enriching it with carbon, tungsten and chromium.

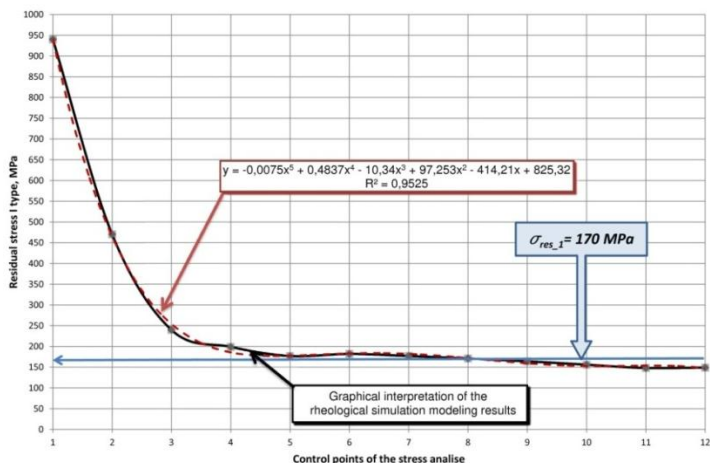


Fig.2 – Graphical dependence of residual stresses I type, resulting in rheological modeling technology finishing lathe mold’s ejector machining by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302

After quenching structure consists of alloyed martensite, 5% excess carbides and a small amount of residual austenite, HRC 48-50. After tempering at 600 - 620°C structure consists of troostyta and 5% excess carbides, HRC 38-44. Carbide M6S coagulates only at temperatures above 600°C that provides high red hardness and heat resistance. Thus, if the machining of hardened steel 316L parts a martensitic structure in the surface layer, there will be a of martensite-austenite or martensite-troostite structure, then treated will create conditions of residual tensile stress since  $1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} > 0$ .

$$1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} > 0.$$

Structural volume austenitic phase  $\zeta_A$  was determined from the joint modeling of thermal fields and structural phase machinings using the Avrami equation [10]:

$$\zeta_A = 1 - \exp\{-k \cdot \tau^n\} \quad (20)$$

where  $\zeta_A$  - volume fraction of austenite phase formed by machining; k and n - kinetic parameters calculation which takes place from the kinetic diagrams of austenite decomposition [11];  $\tau$  - cutting time.

Thus, the modeled stress-strain and thermodynamic state of the cutting area and with empirical coefficients  $\psi_1, \psi_2, \psi_{31}, \psi_{32}, \psi_4$  [12], you can make a simulation of residual stresses II type in the environment Deform HT 2. We can use the coefficients in Maggie equation:

$$\zeta_M = 1 - \exp\{0,025T - 0,002315\sigma_m - 0,003314\bar{\sigma} - 5,35\} \quad (21)$$

Average values of density  $\rho_{\Sigma}$  formed by the impact force and thermodynamic factors finish cutting of the polyphase structure is equivalent density  $\rho_i$  different phases according to their percentage  $\zeta_i$ . That is:

$$\sigma_{\phi}(l) = E_M \left( 1 - \frac{\rho_M \cdot \zeta_M(l) + \rho_{II} \cdot [1 - \zeta_M(l)]}{\rho_{II}} \right) \quad (22)$$

where  $\sigma_{\phi}(l)$  - the value of residual stress II type of depth  $l$  (mic) of their occurrence on the treated surface;  $E_M = 224$  - Young's modulus of 314L steel, GPa

According to the results of rheological analysis (Fig.1) on the workpiece surface the volume phase is  $\zeta_M = 0,45 \dots 0,47$  (45-47%), denying the formation of "white layer". According to the calculations (12)  $\zeta_M = 0,395$  (39,5%):

$$\zeta_M = 1 - \exp\{0,025 \cdot 330 - 0,002315 \cdot 620 - 0,003314 \cdot 594 - 5,35\} = 0,395$$

The error of simulation and design value does not exceed in this case 12,5%, which is quite receptive to confirm the adequacy of modeling.

Thus, the value of residual stress II type is just  $\sigma_{r_2} \approx 5,5$  MPa. This is primarily due to the low temperature in the cutting zone, which does not contribute to the phase transformation and, consequently, does not produce significant II type residual stress.

Degree label can be calculated by the prof.Silin empirical equation [13]:

$$N = 40h_s T^{-0,72} = 40 \cdot 0,12 \cdot 580^{-0,72} = 0,049 \quad (23)$$

where  $h_s = 0.12$  mm - depth of the strain hardening, determined by the results of rheological modeling of technological machining, mm (Fig.1);  $T = 580^\circ\text{C}$  - the temperature in the cutting zone when working tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 ( $S = 0,05$  mm;  $t = 0,12$  mm;  $V = 50,2$  m/min).

The value of the degree of work hardening in the case the finishing lathe machining ejector by tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 not relatively large, because depth of cut is small ( $t = 0,12$  mm) and temperature in the cutting area is relatively low ( $T \approx 580^\circ\text{C}$ ). According to experimental results [13] for grinding stainless steel 316L importance degree defamation is  $N = 0,5 \dots 0,6$  which having a significant negative impact on the operating conditions of molds partP.

According defined in [14] algorithm structural and parametric optimization of functionally -oriented process ejector machining, should be implemented step of calculating local criteria - the wear of functional surfaces in terms of the potential operation of the product, depending on the variable structure parameters and functional- oriented process of forming most loaded surfaces of the product. It is important to formulate the initial conditions for the subsequent calculation: A fully conjugated wear two bodies in a stationary ( steady ) mode of dry friction or boundary; subject to wear ejector mold: the body - hard and rough; coupled guide bushing is taken as smooth and deformed counterbody; rated pressure, speed and temperature sliding friction constant in time and uniformly distributed over the contact surface.

Table. 1– Comparative table of analytical and experimental studies results of finish machining mold's ejector

Parameters		The results of analytical studies in the system Deform2D	Of average results of experimental and industrial research ("Interterm Ltd")	
		Finishing lathe cutting tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 (machining rates: S = 0,05 mm; t = 0,12 mm; V = 50,2 m/min)	DIA diamond grinding around 125/100 M5-2 (machining rates V <sub>c</sub> = 31 m/s, t = 0,01 mm, S <sub>n</sub> = 6 m/min)	
Microprofile finish surface	Ra, mic	1,125	1,29	1,22
	Δ <sub>1</sub> , mic	0,625	-	
	Δ <sub>2</sub> , mic	0,39		
	Δ <sub>3</sub> , mic	0,13		
	Rpk, mic	0,30	0,28	0,43
	Rk, mic	0,75	0,84	0,61
	Rvk, mic	0,12	0,17	0,18
	Rmax	-	2,0	2,2
	r	-	35	20
	b	-	2,0	1,29
	v	-	1,7	1,9
	$\Delta = \frac{R \max}{rb\%}$	-	0,024	0,096
dual stres	±σ <sub>r-1</sub> , MPa	+170	-	

Mark "+" implies on the treated surface of the workpiece residual stresses of compression, and the mark "-" - tensile residual stresses

	$\pm\sigma_{r_2}, \text{MPa}$	-5		
	$\pm\sigma_{r_\Sigma}, \text{MPa}$	+165	+143	-130
Residual deformation	Depth of hardening $h_3$ , mm	0,12	-	-
	Level of hardening, $N$	0,049	0,06	0,5

In terms of elastic contact intensity of wear depends on the topology mikroheometrychnykh characteristics conjugate surfaces ( $b, v, Rvk, Rpk, Rk, Rmax, tm$ ), mechanical properties ( $\sigma_T, \sigma_B, \sigma_{0,2}, E, \mu$ ), coefficient of friction  $f$ , fatigue characteristics and pressures  $t$ : nominal - Pa and contour - Pc.

$\lambda$  - Coefficient taking into account the influence of surface residual stresses on wear intensity (provided that the limit of fatigue strength for steel 316L -  $\sigma_B=1530$  MPa;  $t_y=3$ - coefficient of friction fatigue in elastic contact surfaces is given:

- for turning

$$\lambda_1 = \left( \frac{1530 - 143}{1530} \right)^3 = 0,75 \quad (24)$$

- for grinding

$$\lambda_2 = \left( \frac{1530 - (-130)}{1530} \right)^3 = 1,27 \quad (25)$$

The intensity of wear on the product under given conditions of operation in the case of the second option and process of manufacturing this product, we can write [15]

$$I_{hi} = \frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_i}{\sqrt{v_i} (v_i^2 - 1) \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \quad (26)$$

Then a relative measure of durability  $K(I_h)$ , that characterizes the change in the wear rate depending on the state of functional surfaces arising from the implementation of different variants of structures and process parameters is given by:

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\left[ \frac{0,6(1-\mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1(v_1^2-1)} \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]}{\left[ \frac{0,6(1-\mu^2) \cdot P_a \cdot \lambda_2}{\sqrt{v_2(v_2^2-1)} \cdot K_2 \cdot E \cdot n} \right]} = \frac{\sqrt{v_2(v_2^2-1)} \cdot \lambda_1}{\sqrt{v_1(v_1^2-1)} \cdot \lambda_2} \quad (27)$$

where  $v_i$  - parameter curve fitting step.

Comparing finishing lathe machining ejector by the tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 (cutting conditions:  $S = 0,05$  mm;  $t = 0,12$  mm;  $V = 50,2$  m/min) and its grinding by the diamond wheels DIA 125/100 M5-2 (cutting conditions  $V_c = 31$  m/sec,  $t = 0,01$  mm,  $S_n = 6$  m/min), we obtain a relative measure of durability  $K(I_h)$ :

$$K(I_h) = \frac{I_{h1}}{I_{h2}} = \frac{\sqrt{1,9(1,9^2-1)} \cdot 0,75}{\sqrt{1,7(1,7^2-1)} \cdot 1,27} = 0,86$$

That is, as a result of changes in the structure of the process of finishing machining ejector wear functional surface increases about 14% due to changes in the prevailing surface microstructure and changes in the nature and nominal values of residual stress  $P$ .

Among the important measure factors of the ejector should be noted relative measure of fatigue strength. As stated in [14], the overall impact to the safety factor in fatigue strength with a number of design and technological factors: effective stress concentration factor ( $n_{\sigma K}$ ); coefficient of influence of geometrical dimensions of the parts ( $n_{\sigma D}$ ); influence of surface hardening coefficient ( $n_{\sigma V}$ ); coefficient of influence of surface roughness ( $n_{\sigma R}$ ) and coefficient of influence of residual deformations resulting from machining parts ( $n_{\sigma Z}$ ). Moreover, only the last 2 figures depend on the quality of the surface layer of formation which is a consequence of the structure and parameters of the process of its machining.

Factor influence surface roughness functional ejector if it is a finishing lathe cutting tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 can be defined by the Stepnov equation [16]

$$n_{\sigma R_1} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left( \lg \left( \frac{\sigma_{\sigma}}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,0 \cdot \left( \lg \left( \frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,94$$

Similarly, this coefficient for the case of grinding ejector is:

$$n_{\sigma R_2} = 1 - 0,22 \cdot \lg R_{\max} \cdot \left( \lg \left( \frac{\sigma_{\sigma}}{20} \right) - 1 \right) = 1 - 0,22 \cdot \lg 2,2 \cdot \left( \lg \left( \frac{1530}{20} \right) - 1 \right) = 0,93$$

Factor influence functional surface residual stress  $n_{6Z}$  in case of the finishing by lathe cutting tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 is determined by the interference dominance residual stresses first and second type for compression  $\sigma_{el}^+, \sigma_{ell}^+$  and tension  $\sigma_{el}^-, \sigma_{ell}^-$

$$n_{6Z_{-1}} = \frac{\sigma_{-1} + (\sigma_{el}^+ + \sigma_{ell}^+)}{\sigma_{-1}} = \frac{780 + 143}{780} = 1,18$$

where  $\sigma_{-1} = 780$  MPa - tensile strength of the material when tested in tension-compression cycle for outzero load, which is typical for ejector working [17].

When grinding ejector mold by the around diamond DIA 125/100 M5-2:

$$n_{6Z_{-2}} = \frac{\sigma_{-1} - (\sigma_{el}^- + \sigma_{ell}^-)}{\sigma_{-1}} = \frac{780 - 130}{780} = 0,83$$

The other coefficients do not depend on the quality of the surface layer and therefore will not be important for structural and parametric optimization process machining ejector for functionally-oriented criteria.

Then a relative measure of fatigue strength  $K(n_{-1})$ , which characterizes the change in fatigue strength safety factor depending on the state of functional surfaces arising from the implementation of different variants of structures and process parameters is given by:

$$K(n_{-1}) = \frac{n_{-1,1}}{n_{-1,2}} = \frac{n_{BR,1} \cdot n_{6Z_{-1}}}{n_{BR,2} \cdot n_{6Z_{-2}}} = \frac{0,94 \cdot 1,18}{0,93 \cdot 0,83} = 1,43 \quad (28)$$

That is, as a result of changes in the structure of the process of finishing machining ejector surface functional fatigue strength increases about 43% due to changes in the prevailing surface microstructure and changes in the nature and nominal values of residual stresses.

Measure of corrosion resistance in a volume equivalent  $\tau_m$  determined taking into account the fact that the decrease in mass per unit area to be permissible value

$$\Delta m = (Rp k_{ekv} + Rk_{ekv}) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right). \text{ In this case, approximate interaction of}$$

rough surfaces in the form of a spherical contact surface and a planar plastic half-space by the Ishlinsky method [18]. Then a relative measure of the speed of fretting corrosion  $K(\tau)$  is given as:

$$K(\tau) = \frac{\tau_{m,1}}{\tau_{m,2}} = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2} = \frac{(Rp k_1 + Rk_1) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)}{(Rp k_2 + Rk_2) \cdot l \cdot k_o \cdot \ln\left(\frac{t}{\tau} + 1\right)} = \quad (29)$$

$$= \frac{(Rp k_1 + Rk_1)}{(Rp k_2 + Rk_2)} = \frac{0,28 + 0,84}{0,43 + 0,61} = 1,07$$

That is, as a result of changes in the structure of the process of finishing machining ejector intensity fretting corrosion-functional surface increases about 7% due to changes in the prevailing surface.

As one of the most important criteria of efficiency of mobile connections is adherence to fluid friction between surfaces conjugated components by providing a minimum thickness of liquid friction in the contact zone, relative rate coefficient of reliability of mechanical systems in liquid contact mode  $K(S)$  is given:

$$K(S) = \frac{h_{\min_1}}{h_{\min_2}} = \frac{k_s \cdot Rvk_1}{k_s \cdot Rvk_2} = \frac{Rvk_1}{Rvk_2} = \frac{0,17}{0,18} = 0,94 \quad (30)$$

Tribological quality conjugations by the energy losses due to friction in the conjugate surfaces of machine partP. The relative index  $K(f)$ , that characterizes the change from the coefficient of friction in the conjugated tribological pair depending on the state of functional surfaces arising from the implementation of different variants of structures and process parameters is given:

$$K(f) = \frac{f_1}{f_2} = \frac{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/\nu_1}}}}{\sqrt{\frac{R \max_1}{rb_1^{1/\nu_1}}}} = \sqrt{\frac{\Delta_1}{\Delta_2}} = \sqrt{\frac{0,024}{0,096}} = 0,5 \quad (31)$$

Calculation non-standardize local criteria optimization qualimetric indicators for finishing lathe machining functional surface ejector by the tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 for this example is in relative terms durability  $Q1 = 0,28$ ; safety factor for fatigue strength  $Q2 = 0,30$ ; the parameter tribotechnical as conjugations  $Q3 = 0,10$ ; parameter for corrosion resistance  $Q4 = -0,14$ ; safety factor for liquid contact  $Q5 = -0,17$ . Finally, a generic optimization criterion, determined by the method [14] is  $F_1 = 0,383$ . As in this example compared only 2 options of technological processes, generalized optimization criterion for the case of functional surface grinding ejector around diamond DIA 125/100 M5-2, the amount accordingly  $F_2 = -0,383$ .

**Conclusion.** Thus, the variant of finishing lathe machining functional surface mold's ejector by the tool with synthetic polycrystalline diamond CTM302 compared to grinding diamond wheels DIA 125/100 M5-2 is more optimal for qualimetric integral indicator system characterizes wear resistance, fatigue strength, quality of the tribotechnical conjugations, corrosion resistance and ensure the option of carrying capacity lubricant layer and is obtained as a result of the formation process of forming microstructure surface layer, residual stresses and strainP.

**Список літератури:** 1. *Maus W.* Simulation as tool in high-pressure die casting processes / *W. Maus H.Rocknaim, Seefeldt.R.* // MAGMA, 2002. – 23 p. 2. *Паней М.М.* Технология производства приспособлений пресс-форм и штампов / *М.М.Паней* // – М.: Машиностроение, 1979. – 293 с. 3. *Smith G.* Cutting Tool Technology: Industrial Handbook. / *Smith G.* // London: Springer-Verlag London



Limited, 2008.– 559 p. **4.** *Stupnytsky Vadym.* New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering / V. Stupnytsky// Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing, Stuttgart, Germany, 2012. – № 1.– P.327–329. **5.** *Stupnytsky Vadym.* Planning features of function-oriented technology engineering production / V.Stupnytsky // «Scientific Potential». Elkraft, Indiana, USA – 2013.– Vol. 1.– Issue 1.– P.60–64. **6.** *Борисов А.А.* Производство и эксплуатация современного режущего инструмента. / А.А.Борисов, Г.В.Боровский, В.А.Вычеров, В.А.Гречишников, Е.А.Негинский // М.: Издательство "ИТО", 2011.– 104 с. **7.** *Суслов А.Г.* Инженерия поверхности деталей / Суслов А.Г. // М.: Машиностроение, 2008. – 320 с. **8.** *Ступницький В.В.* Математичне моделювання автоколиваний різального інструменту та їхній вплив на інженерію поверхні / В.В.Ступницький, Я.М.Новіцький // Машинознавство, 2013.– №1–2 (187–188). – С.19–22. **9.** *Марецька В.В.* К вопросу автоматизации направленного формирования показателей качества деталей / В.В.Марецька // Вестник компьютерных и информационных технологий,– 2008. – № 3.– С. 29 – 34. **10.** *Ramesh A.* White Layer Formation in Machining of Hardened Steel: Experiments and Modeling / A.Ramesh, P.N.Melkote // Dojo on High Speed Machining of Hard/Super Hard Materials, JSME, Singapore, 2003.– P.16–29. **11.** *Sheng I.* Modeling Welding by Surface Healing / I.Sheng, Y.Chen // Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.114.– 1992.– P.439–448. **12.** *Han P.* Mechanism and Modeling of White Layer Formation in Orthogonal Machining of Steels / P.Han // Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2006.– 213p. **13.** *Силин С.С.* Применение метода подобия для определения обрабатываемости резанием современных материалов / С.С.Силин // Труды Рыбинского авиационного технолог. ин-та: Новые методы определения обрабатываемости материалов резанием и шлифованием. Ярославль, 1975.– с. 5–33. **14.** *Ступницький В.В.* Структурно-параметрична оптимізація технологічних процесів при забезпеченні експлуатаційних властивостей деталей / В.В.Ступницький // Східно-Європейський журнал передових технологій, Харків.– 2014.– №2/3(68).– с.9–16. **15.** *Крагельский И.В.* Основы расчета на трение и знос / И.В.Крагельский, М.Н.Добычин, В.С.Комбалов // М.: «Машиностроение», 1977. – 526 с. **16.** *Степнов М.Н.* Расчетные методы оценки характеристик сопротивления усталости материалов и элементов конструкций / Степнов М.Н. // М.: МАТИ, 2003.– 119 с. **17.** *Писаренко Г.С.* Справочник по сопротивлению материалов / Г.С.Писаренко, А.П.Яковлев, В.В.Матвеев // Киев: Наукова думка, 1988.– 736 с. **18.** *Демкин Н.Б.* Качество поверхности и контакт деталей машин / Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. // М.: Машиностроение, 1981.– 224 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Maus, W., Rockmair, H. and Seefeldt, R. *Simulation as tool in high-pressure die casting processes*. P. Bremen: MAGMA, 2002. Print. **2.** Paley, M.M. *Tekhnologiya proizvodstva prisposobleny press-form i shtampov.* – Moscow: Mashinostroyeniye, 1979. Print. **3.** Smith, G. *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook.* London: Springer-Verlag, 2008. Print. **4.** Stupnytsky, V. "New features CAD/CAM/CAE systems in mechanical engineering". Stuttgart: Europäische Fachhochschule, Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing, 2012. No 1. 327–329. Print. **5.** Stupnytsky, V. "Planning features of function-oriented technology engineering production". Elkraft: Scientific Potential. USA. 2013. Vol. 1. No 1. 60–64. Print. **6.** Borisov, A.A., Borovsky, G.V., Vyчерov V.A., Grechishnikov V.A., Neginsky Y.A. *Proizvodstvo i ekspluatatsiya sovremennogo rezhushchego instrumenta.* Moscow: ITO, 2011. Print. **7.** Suslov, A.G. *Inzheneriya poverkhnosti detaley.* Moscow: Mashinostroyeniye, 2008. Print. **8.** Stupnitsky, V.V. and Novitsky, Y.M. "Matematichne modelyuvannya avtokolivan rizalnogo instrumentu ta yikhniy vplyv na inzheneriyu poverkhni". Lviv: Mashinoznavstvo, 2013. No1–2. (187–188). Print. **9.** Maretskaya, V.V. "K voprosu avtomatizatsii napravlennoho formirovaniya pokazateley kachestva detaley". Moscow: Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh technology. 2008. No3. 29–34. Print **10.** Ramesh, A. and Melkote, P. "White Layer Formation in Machining of Hardened Steel: Experiments and Modeling". Singapore: Dojo on High Speed Machining of Hard/Super Hard Materials, JSME. 2003. 16–29. Print **11.** Sheng, I. and Chen, Y. "Modeling Welding by Surface Healing". London: Journal of Engineering Materials and Technology, No.114. 1992. 439–448. Print. **12.** Han P. *Mechanism and Modeling of White Layer Formation in Orthogonal Machining of Steels*. Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology. 2006. Print. **13.** Silin, P.P. "Primeneniye metoda podobiya dlya opredeleniya obrabatyvayemosti rezaniyem sovremennykh materialov". Yaroslavl: Trudy Rybinskogo aviatsionnogo tekhnologicheskogo instituta. Novye metody opredeleniya obrabatyvayemosti materialov rezaniyem i shlifovaniyem. 1975.

5–33. Print. **14.** Stupnitsky, V.V. "Strukturno-parametrichna optimizatsiya tekhnologichnikh protsesiv pri zabezpechnni ekspluatatsiyimikh vlastivostey detaley". Kharkiv: Skhidno-Cvropeysky zhurnal peredovikh tekhnologiy. 2014. No 2/3(68). 9–16. Print. **15.** Kragelsky, I.V., Dobychin, M.N. and Kombalov, V.P. *Osnovy rascheta na treniye i znos* Moscow: Mashinostroyeniye, 1977. Print. **16.** Stepnov M.N. *Raschetnye metody otsenki kharakteristik soprotivleniya ustalosti materialov i elementov konstruksiy* Moscow: MAFI, 2003. Print. **17.** Pisarenko, G.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov*. Kiev: Naukova dumka, 1988. Print. **18.** Demkin, N.B., Ryzhov, E.V. *Kachestvo poverkhnosti i kontakt detaley mashin*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981. Print.

Received 20.10.2014

## УДК 621.91

*Г.Л. ХАВИН*, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

### ТРЕЩЕНООБРАЗОВАНИЕ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрена задача определения величины и глубины залегания трещины расслоения при сверлении полимерных многослойных композитов. Учитывая анизотропию свойств материала, предполагается, что трещина расслоения имеет эллиптическую форму, и значение большей оси трактуется как максимальная длина трещины. Используя эмпирическое представление фактора расслоения, как функции режимных параметров обработки, представлена модель локального расслоения. Полученное соотношение связывает глубину появления максимальной трещины расслаивания и значение ее длины. Представлены количественные зависимости длины трещины от частоты вращения и подачи.

**Ключевые слова:** трещина расслоения, фактор расслаивания, полимерные композиты.

**Вступление.** При сверлении полимерных многослойных композитов, как и других конструкционных материалов, возникают дефекты, ухудшающие качество обработанной поверхности. Эти дефекты в основном связаны с начальным контактом инструмента и его выходом из заготовки. Разрушение при сверлении было классифицировано многими авторами [1-5], которые выделили следующие явления: разрыв волокон армирования, межслойная трещина, расщепление вдоль волокон, растрескивание и выкрашивание, нарушение адгезионной связи волокно – связующее и термическое разрушение. Эти факторы были рассмотрены и проанализированы в работах [6-8].

Наиболее опасным дефектом считается расслаивание между соседними слоями армирования вдоль его направления. Основной причиной появления расслаивания при сверлении многослойных композитов является высокое значение действующей осевой силы, величина которой в основном определяется подачей. Кроме того существенную роль играет также неправильный выбор режущего инструмента и степень его изношенности. Для уменьшения расслаивания известно несколько приемов, например,

© Г.Л.Хавин 2014

снижение подачи и сверление в подкладную плиту. В последнее время для устранения этого дефекта все чаще применяется вибрационное сверление. Межслойное расслаивание, возникающее при сверлении многослойных композитов, является главным дефектом, не только уменьшающим целостность композита и его изгибную прочность, но также во многом определяет усталостную прочность под действием циклической нагрузки. Поэтому задача создания математических моделей, позволяющих на стадии проектирования технологической операции сверления прогнозировать появление и рост величины межслойного разрушения, является актуальной и имеет практическую ценность.

**Анализ последних достижений и литературы.** Экспериментальные наблюдения показали, что расслаивание появляется вокруг отверстия на входе и выходе инструмента из заготовки, рис.1. Механизм этого явления подробно рассмотрен в литературе [5,9-10]. Расслаивание возникает под действием поперечной режущей кромки сверла и собственно режущей кромки.

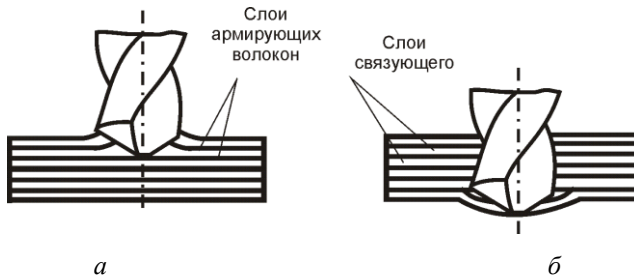


Рис. 1 – Механизм появления трещины расслаивания:  
*а* – на входе инструмента в заготовку; *б* – на выходе

Появление межслойных трещин на входе обусловлено контактным взаимодействием поперечной режущей кромки с поверхностью заготовки, вследствие чего тонкий слой начинает шелушиться, в результате отделяется от соседнего и образуется зона расслаивания вокруг входного отверстия. Во втором случае, в момент, когда сверло находится возле выхода из отверстия, число слоев композита, находящиеся перед сверлом, уменьшается и снижается их общая жесткость в структуре композита, и, как следствие, происходит расслаивание (отслаивание) последних слоев и разрушение последних волокон (жгутов) в материале, рис.2.

Изучению качественных и количественных характеристик этого процесса посвящено достаточно много исследований [3,8,11-13]. Размер зоны растрескивания и ее амплитуда определяется условиями сверления и рабочим инструментом. Так, известно, что при сверлении традиционным спиральным сверлом из быстрорежущей стали, величина зоны растрескивания растет с увеличением подачи, но уменьшается с ростом частоты вращения шпинделя.

Однако влияние подачи часто намного сильнее, чем частоты вращения шпинделя.

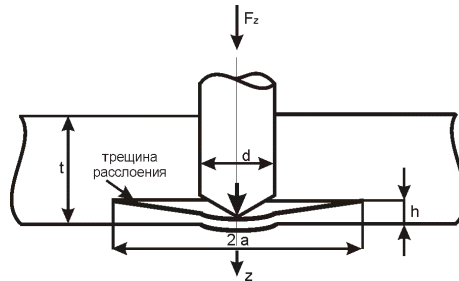


Рис. 2 – Модель образования межслойной эллиптической трещины расслоения

В большинстве практических приложений зона резания на входе и выходе сверла помимо появления межслойных трещин сопровождается наличием не срезанных волокон в виде заусенцев, распушиваний и разлохмачиваний. Общие закономерности появления этих дефектов сводятся к следующему:

- расслаивание (растрескивание) проявляется вдоль направления армирования (вдоль волокон) и его размеры обычно больше, чем сопровождающее расслаивание (растрескивание) распушивание;
- расслаивание (растрескивание) развивается в два этапа. На первом этапе расслаивание происходит под действием поперечной режущей кромки, когда осевая сила, действующая через поперечную режущую кромку на выходную поверхность заготовки станет больше некоторой критической величины, после чего наступает расслаивание, рис. 3, а. Этот этап заканчивается, когда поперечная режущая кромка выходит за пределы заготовки, рис. 3, б. С этого момента наступает этап действия режущей кромки и расслаивание (растрескивание), которое образовалось на первом этапе, продолжает развиваться и заканчивается крутящим воздействием режущих кромок на край образовавшегося отверстия, рис. 3, в.

Для оценки уровня разрушения вокруг просверленного отверстия было предложено несколько критериев. При обработке отверстий в работе [2] расслаивание предложено характеризовать одномерным критерием  $F_{dam}$  (фактор расслаивания), который определяется отношением максимального диаметра зоны разрушения –  $D_{dam}$  к номинальному диаметру отверстия –  $D_{hole}$ , рис. 4,  $F_{dam} = D_{dam} / D_{hole}$ .

Однако этот критерий имеет ряд недостатков так, как расслаивание на входе и на выходе имеет некоторую протяженность по ширине и реально зона расслаивания отличается от ее изображения в виде окружности на рис.4.

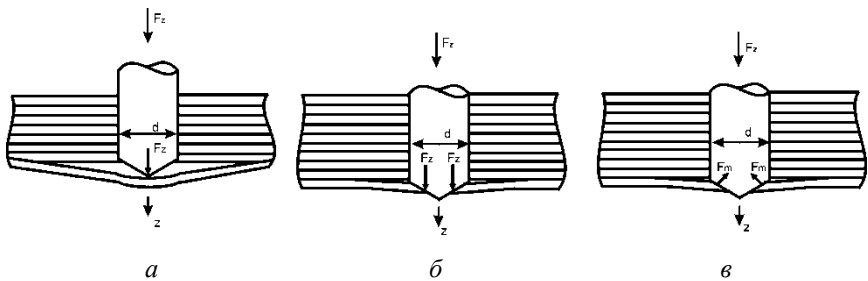


Рис. 3 – Общая схема появления и развития трещины расслаивания на выходе инструмента: *а* – расслаивание под действием поперечной режущей кромки; *б* – расслаивание непосредственно под действием режущих кромок; *в* – крутящее воздействие режущих кромок на выходе из заготовки.

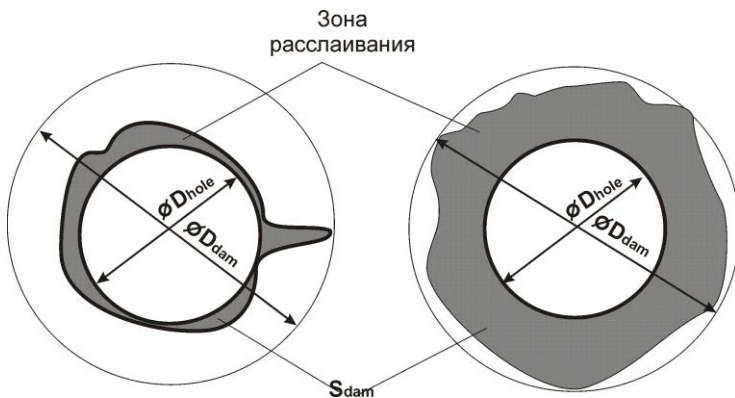


Рис. 4 – Расслаивание при сверлении слоистого композита

Следовательно, более корректно использовать двумерный критерий, который более качественно будет отражать степень межслоевого разрушения. В [15] для сравнения поврежденности при сверлении предложено использовать коэффициент повреждения  $K_{dam}$ , который представляет собой отношение площади разрушения  $S_{dam}$  к номинальной площади отверстия  $S_{hole}$ ,  $K_{dam} = S_{dam} / S_{hole}$ .

Двумерный критерий  $F_a$  также был предложен в работе [16], где он определяется как относительное увеличение площади разрушения  $S_{dam}$  по отношению к номинальной площади отверстия  $S_{hole}$ ,  $F_a = (S_{dam} - S_{hole}) / S_{hole}$ .

В работе [17] предложен компромиссный фактор расслаивания  $F_{da}$ , который основан на анализе цифрового изображения при изучении зоны разрушения после сверления многослойного композита, а именно вычисление фактора расслаивания в виде  $F_{da} = \alpha \cdot (D_{dam} / D_{hole}) + \beta \cdot (S_{max} / S_{hole})$ , где  $S_{max}$  –

площадь разрушения, соответствующая максимальному диаметру  $D_{dam}$  зоны расслоения;  $\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты.

В [18] было предложено вычислять величины  $F_{dam}$  и  $F_{da}$ , используя приближение из [17]. Коэффициент  $\beta$  рассматривается как отношение области разрушения  $S_{max}$ , соответствующей диаметру  $D_{dam}$  за вычетом номинальной площади отверстия  $S_{max} - S_{hole}$ . Коэффициент  $\alpha$  определяется как дополнение весового коэффициента  $\alpha = 1 - \beta$ . Тогда соотношение для  $F_{da}$  может быть переписано в виде  $F_{da} = F_{dam} + S_{hole} / (S_{max} / S_{hole}) \cdot (F_{dam}^2 - F_{dam})$ .

Среди всех представленных критериев наибольшее распространение получил одномерный критерий  $F_{dam}$ , как более простой для измерения и практического использования. В настоящее время имеется достаточно большое количество экспериментальных исследований по сверлению угле- и стеклопластиков различными типами инструментов, для которых получены эмпирические зависимости расчета фактора расслаивания [18-23].

**Цель работы.** Целью настоящей работы является построение математической модели, позволяющей для заготовки из многослойного композита данной марки, выбранного типа инструмента и технологических параметров сверления спрогнозировать характер предполагаемой зоны разрушения и рассчитать ее величину.

Зона разрушения может служить одной из важнейших характеристик, определяющих прочность и долговечность крепления в отверстии. Поэтому предсказать величину зоны разрушения очень важно. В работах [9-10,24] для характеристики зоны разрушения используются достижения механики линейного разрушения, где принято, что по достижению упругой энергии высвобождения определенного, характерного для данного материала, значения происходит движение трещины. Проведенные эксперименты вполне ясно показали, что зона разрушения занимает достаточно малую область вокруг отверстия, а не всю заготовку, которая обрабатывается. В работах [24,25] показано, что размер зоны расслоения во многом определяется действующей осевой силой. Были проведены замеры зоны расслоения для эпоксидных стекло- и углепластиков и, используя линейную зависимость, получено соотношение между осевой силой и величиной зоны расслоения.

В [11] были проведены экспериментальные замеры зоны расслоения как функции от различных параметров процесса: подачи, частоты вращения и радиуса сверла. Полученные результаты были обобщены методами регрессионного анализа. Было получено соотношение вида

$$F_{dam} = \frac{l_{dam}}{D_{hole}} = k \left( \frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^n \cdot \left( \frac{F_z}{E \cdot D_{hole}^2} \right)^m,$$

где  $l_{dam}$  – размер зоны расслоения,  $l_{dam} = (l_{dam1} + l_{dam2}) / 2$ , мм;  $D_{hole}$  – диаметр отверстия, м;  $s$  – величина подачи, мм/мин;  $f$  – частота вращения шпинделя, об/мин;  $F_z$  – осевая сила, Н;  $E$  – модуль упругости армирующих волокон, Па;  $n, m, k$  – постоянные.

**Постановка задачи.** Как было сказано выше, развитие расслоения происходит в два этапа. Это порождает образование главной и вторичной области трещинообразования, рис.5. Главная область с максимальным повреждением расположена в основном в направлении волокон. Вторичная область имеет небольшие размеры и образуется в режущей фазе, в которой контакт между направлением армирования и скоростью резания образует острый угол.

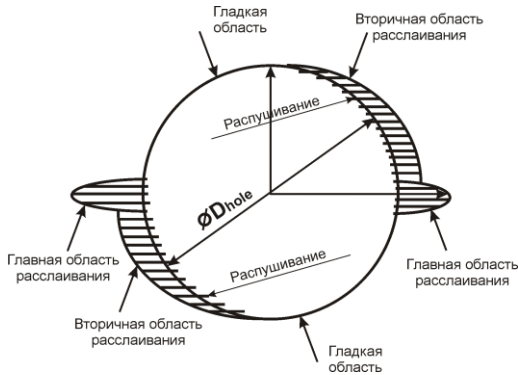


Рис. 5 – Модель образования главной и вторичной области разрушения и межслойной эллиптической трещины расслоения

Проведенный в [26] анализ на основе анизотропной теории упругости и линейной механики разрушения для эллиптической зоны расслоения, позволил определить осевую силу, при которой происходит старт межслойной трещины на расстоянии  $h_{dam}$  от нижнего края заготовки, следующим уравнением

$$F_z = \pi \sqrt{\frac{E_{22}}{E_{11}}} \left[ \frac{G_{IC} \cdot K_a \cdot h_{dam}^3}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где  $G_{IC}$  – критическое значение энергии трещинообразования по I-му типу, Дж/м<sup>2</sup>;  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  – модули упругости в направлении армирования – 11 и ему перпендикулярном (трансверсальном направлении) – 22, Па;  $\nu_{12}$ ,  $\nu_{21}$  – соответственно коэффициенты Пуассона; значение коэффициента  $K_a$  рассчитывается по формуле

$$K_a = 2E_{11} + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{E_{11}}{E_{22}}} \left[ \nu_{12} \cdot E_{22} + 2 \cdot G_{12} (1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}) \right],$$

где  $G_{12}$  – модуль сдвига. Из уравнения (1) можно найти значение  $h^*$  соответствующее критическому значению осевой силы  $F_z$

$$h^* = \sqrt[3]{\frac{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}{G_{12} \cdot K_a \cdot \pi^2} \left( \frac{E_{11}}{E_{22}} \right) \cdot F_z^2}.$$

Заметим также, что из выражения (1) можно получить известное соотношение Но–Cheng и Dharan [14] для изотропного материала, приняв  $E_{11} = E_{22} = E$ ,  $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$ ,  $G_{12} = E/2/(1 + \nu)$ . Соотношение (1) можно представить в виде

$$F_z = \left[ \frac{l_{dam}}{k} \cdot \left( \frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^{-n} \cdot E_{11}^m \cdot D_{hole}^{2m-1} \right]^{1/m}. \quad (2)$$

Приравняем правые части (1) и (2) и разрешим относительно  $l_{dam}$

$$l_{dam} = h_{dam}^{3m/2} \cdot k \cdot \left( \frac{\pi \cdot f \cdot D_{hole}}{10^3 \cdot s} \right)^n \cdot D_{holq}^{1-2m} \cdot E_{11}^{-m} \cdot \left[ \frac{G_{12} \cdot K_a \cdot \pi^2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \cdot \left( \frac{E_{22}}{E_{11}} \right) \right]^{m/2}. \quad (3)$$

Уравнение (3) при заданном отношении скорости резания к величине подачи связывает усредненное значение максимальной величины расслоения с толщиной материала заготовки от нижнего ее края, на котором это расслоение реализуется. Это соотношение позволяет оценить величину разрушения поверхностных слоев материала при заданных технологических параметрах обработки в зависимости от расстояния до нижней поверхности заготовки.

**Материалы и результаты исследования.** В качестве примера использования предложенного подхода рассмотрим сверление отверстия диаметром 5,5 мм в заготовке из эпоксидного однонаправленного углепластика марки Т300 толщиной 2 мм с объемным содержанием волокон 60% и основными механическими характеристиками: плотность – 1600 кг/м<sup>3</sup>; продольный модуль упругости  $E_{11} = 181$  ГПа; поперечный модуль упругости  $E_{22} = 10,3$  ГПа; модуль сдвига  $G_{12} = 7,17$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\nu_{12} = \nu_{21} = 0,28$ ; критическая энергия трещинообразования  $G_{IC} = 250$  Дж/м<sup>2</sup>. Значения постоянных коэффициентов приняты:  $k = 1,3 \cdot 10^3$ ;  $n = -0,35$ ;  $m = 0,5$ .



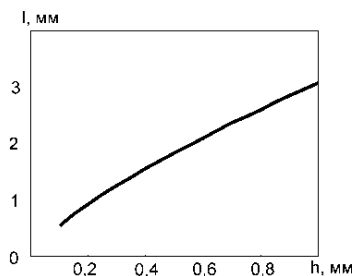


Рис. 6 – Изменение длины трещины в зависимости от задаваемой глубины ее появления

На рис.6 приведена зависимость длины трещины  $l$  расслоения от глубины ее залегания от нижней поверхности заготовки  $h$ , вычисленная из соотношения (3) при значениях частоты вращения шпинделя  $f = 3000$  об/мин и подаче  $s = 20$  мм/мин.

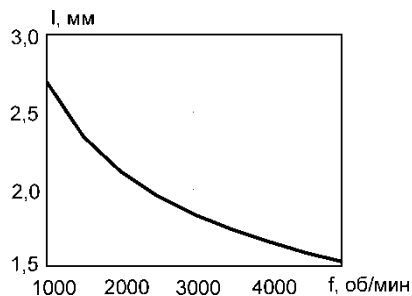


Рис. 7 – Изменение длины трещины в зависимости от частоты вращения шпинделя для заданной подачи 20 мм/мин и глубине 0,5 мм

Приведенные результаты подтверждают тот факт, что главным фактором, определяющим качество выходного отверстия, является значение осевой силы. Чем больше осевая сила, тем больше глубина начала появления расслаивания  $h$  и тем больше длина трещины  $l_{\max}$ , рис.5. Можно видеть, что зависимость длины трещины расслоения от глубины ее образования для рассматриваемого диапазона изменения носит примерно линейный характер.

С увеличением частоты вращения шпинделя величина появляющихся дефектов и, в частности, трещины расслоения уменьшается, рис.7, что наблюдалось экспериментально многими авторами [18].

Увеличение подачи оказывает наиболее сильное влияние на возникновение дефектов, что многими исследователями объясняется увеличением величины осевого усилия при сверлении. Значение трещины расслоения растет с увеличением подачи, рис.8, причем этот рост не компенсируется увеличением частоты вращения, что также подтверждается экспериментально [15-19].

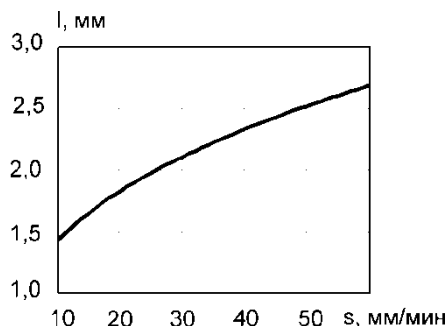


Рис. 8 – Изменение длины трещины в зависимости от подачи для заданной частоты вращения шпинделя 3000 об/мин и глубине 0,5 мм

**Выводы.** Представлена модель, позволяющая прогнозировать величину трещины расслоения на выходе инструмента. Базируясь на экспериментальных данных, предложенная зависимость связывает физико-механические параметры материала композита с режимными параметрами обработки. В поученной зависимости не учитываются тип и марка инструмента, а также его геометрические параметры. Учет влияния этих факторов в новой модернизированной модели предсказания образования и величины дефектов обработки при сверлении полимерных композитов, является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена по проекту М2132Ф финансируемого министерством образования и науки Украины.

**Список литературы:** 1. *Ariffin M. K. A.* An optimize drilling process for an aircraft composite structure using design of experiments / *M. K. A. Ariffin, M. I. Mohd Ali, Sapuan P. M., Ismail N.* // Scientific Research and Essay. – 2009. – V.4, No.10. – P. 1109–1116. 2. *Chen W. C.* Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates / *W. C. Chen* // Int. J. Machine Tools & Manufacture. – 1997. – No.37. – P. 1097–1110. 3. *Durão P. M. L.* Machining of hybrid composites / Thesis, Porto, 2005. 4. *Valavan U.* Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP composites / Thesis, Tamil Nadu, India, 2003. 5. *Vandervelde H.* Drilling processes / Printed circuits handbook, Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. 6. *Bendjaballah D.* Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage / Thèse, Université Mentouri – Constantine, 2009. 7. *Bonnet C.* Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone. Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2010. 8. *Ghidossi P.* Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique / Thèse, L'ENSAM, Châlons-En-Champagne, 2003. 9. *Iliescu D.* Approches expérimentale et numérique de l'usinage à sec des composites carbon/epoxy / Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. 10. *Jain P.* Delamination free drilling of composite laminates / *P. Jain, D.C.H. Yang* // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. – 1994. – No.116. – P. 475–481. 11. *Zhang H.* Assessment of exit defects in carbon fiber-reinforced plastic plates caused by drilling / *H. Zhang, W. Chen, D. Chen, L. Zhang* // Key Engineering MaterialP. – 2001. – No.196. – P. 43–52. 12. *Ho-Cheng H.* Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits / *H. Ho-Cheng, C. C. Tsao* // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – No.140. – P. 335–339. 13. *Tsao C. C.* Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) / *C. C. Tsao* //

International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2008. – No.37. – P. 23–28. **14.** Ho-Cheng H. Delamination during drilling in composites laminates / H. Ho-Cheng, C. K. H. Drahan // Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry. – 1990. – No.112. – P. 236–239. **15.** Mehta M. Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates / M. Mehta, T. J. Reinhart, A. H. Soni // In: Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week, 1992. – P. 113–126. **16.** Faraz A. Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates / A. Faraz, D. Biermann, K. Weiert // Int. J. Mach. Tools Manuf., 2009. – No.49. – P. 1185–1196. **17.** Davim J. P. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates / J. P. Davim, J. C. Rubio, A. M. Abrao // CompoP. Sci. Technol., 2007. – No.67. – P. 1939–1945. **18.** Rubio J. C. Effect of high speed in the drilling of the glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor / J. C. Rubio, A. M. Abrao, P. E. Faria, A. E. Correia, J. P. Davim // International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008. – No.48. – P. 715–720. **19.** Davim J. P. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study / J. P. Davim, P. Reis // Mater. DeP., 2003. – No.24. – P. 315–324. **20.** Tsao C. C. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material / C. C. Tsao, H. Hocheng // Int. J. Mach. Tools Manuf., 2004. – No.44. – P. 1085–1090. **21.** Sardinas R. Q. Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms / R. Q. Sardinas, P. Reis, J. P. Davim // CompoP. Sci. Technol., 2006. – No.66. – P. 3083–3088. **22.** Gaitonde V. N. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites / V. N. Gaitonde, P. R. Karnik, R. J. Campos, C. A. Esteves, A. M. Abrao, Davim P. J. // J. Mater Process Technol., 2008. – No.203. – P. 431–438. **23.** Khashaba U. A. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear / U. A. Khashaba, I. A. El-Sobaty, A. I. Selmy, A. A. Megahed // Composites: Part A, 2010. – No.41. – P. 1130–1137. **24.** Ho-cheng H. An analysis of drilling of composite materials / H. Hocheng // PhD thesis, University of California, Berkeley, 1988. **25.** Lachaud F. Drilling of composite structure / F. Lachaud, R. Piquet, T. Collombet, L. Surcin // Composite structureP. – 2001. – No.52. – P. 511–516. **26.** Tsao C. C. Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates / C. C. Tsao, W. C. Chen // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – No.70. – P. 185–189.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Ariffin, M. K. A. et al. "An optimize drilling process for an aircraft composite structure using design of experimentP." *Scientific Research and Essay*. No. 4, 10 (2009): 1109–1116. Print. **2.** Chen, W. C. "Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminateP." *Int. J. Machine Tools & Manufacture*. No.37. (1997): 1097–1110. Print. **3.** Durão, P. M. L. "Machining of hybrid compositeP." Thesis, Porto, 2005. Print. **4.** Valavan, U. "Tool life prediction based on cutting forces and surface temperature in edge trimming of multidirectional CFRP compositeP." Thesis, Tamil Nadu, India, 2003. Print. **5.** Vandervelde, H. "Drilling processes / Printed circuits handbook." Ed. C. F. Coombs, Jr., Ed. Mc. Graw Hill Companies, 2008. Print. **6.** Bendjaballah, D. "Analyse des plaques composites carbone/epoxyde sous l'effet des efforts de perçage." Thèse, Université Mentouri – Constantine, 2009. Print. **7.** Bonnet, C. "Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage T16A14V/Composite fibre de carbone." Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2010. Print. **8.** Ghidossi, P. "Contribution à l'étude de l'effet des conditions d'usinage d'éprouvettes en composites à matrice polymère sur leur réponse mécanique." Thèse, L'ENSAM, Châlons-En-Champagne, 2003. Print. **9.** Iliescu, D. "Approches expérimentale et numérique de l'usinage a sec des composites carbon/epoxy Thèse, Arts et Métiers Paris Tech, Paris, 2008. Print. **10.** Jain, P. and D.C.H. Yang, "Delamination free drilling of composite laminateP." *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* No.116 (1994): 475–481. Print **11.** Zhang H. et al. "Assessment of exit defects in carbon fiber–reinforced plastic plates caused by drilling." *Key Engineering Materials* No.196 (2001): 43–52. Print. **12.** Ho-Cheng H. and C. C. Tsao "Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bitP." *Journal of Materials Processing Technology* No.140 (2003): 335–339. Print. **13.** Tsao C. C. "Thrust force and delamination of core-saw drill during drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP)." *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, No.37 (2008): 23–28. Print. **14.** Ho-Cheng H. and C. K. H. Drahan "Delamination during drilling in composites laminateP." *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* No.112

(1990): 236–239. Print. **15.** Mehta M., Reinhart T. J. and A. H. Soni "Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminateP." *In: Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week* (1992): 113–126. Print. **16.** Faraz A. Biermann D. and K. Weinert "Cutting edge rounding: an innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminateP." *Int. J. Mach. Tools Manuf.* No.49 (2009): 1185–1196. Print. **17.** Davim J. P., Rubio J. C. and A. M. Abrao "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminateP." *CompoP. Sci. Technol.* No.67 (2007): 1939–1945. Print. **18.** Rubio J. C. et al. "Effect of high speed in the drilling of the glass fibre reinforced plastic: Evaluation of the delamination factor." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* No.48 (2008.): 715–720. Print. **19.** Davim J. P. and P. Reis "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study." *Mater. DeP.* No.24 (2003): 315–324. Print. **20.** Tsao C. C. and H. Hocheng "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material." *Int. J. Mach. Tools Manuf.*No.44 (2004): 1085–1090. Print. **21.** Sardinas R. Q., Reis P. and J. P. Davim "Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithmP." *CompoP. Sci. Technol.* No.66 (2006): 3083–3088. Print. **22.** Gaitonde V. N. et al. "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic compositeP." *J. Mater Process Technol.* No.203 (2008): 431–438. Print. **23.** Khashaba U. A. et al. "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part II – effect of drill wear." *Composites: Part A.* No.41 (2010): 1130–1137. Print. **24.** Ho-cheng H. "An analysis of drilling of composite materialP." *PhD thesis, University of California, Berkeley*, 1988. Print. **25.** Lachaud F. et al. "Drilling of composite structure." *Composite structureP.* No.52 (2001): 511–516. Print. **26.** Tsao C. C. and W. C. Chen "Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminateP." *Journal of Materials Processing Technology*–No.70 (1997): 185–189. Print.

*Поступила (received) 20.02.2014*

## УДК 621.002

*А. Р. РУЗМЕТОВ*, ассистент НТУ «ХПИ»

### **МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ В СИСТЕМЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА**

В статье представлена методика решения проблемы оптимизации затрат вспомогательного времени, связанных с машинно-ручной работой в системе многостаночного производственного комплекса полуавтоматического оборудования. Для более детального отображения особенностей проведения операции целесообразно использование микроэлементного синтеза рабочего процесса с помощью управляемых функций принадлежности. Это способствует более точному учету производственных нужд конкретной рабочей ситуации.

**Ключевые слова:** технологическое оснащение, технологический прием, технологический переход, техническая инструкция, фаза функциональной активизации, лингвистическая переменная.

**Введение.** Для решения задачи распределения времени обслуживания и обработки между рабочими местами многостаночного комплекса необходимо, как можно более точно, определить затраты времени на каждый технологический

© А.Р. Рuzметов, 2014

переход. Значительную часть рабочего времени механической операции обработки резанием (возле 40%) занимают вспомогательные операции с использованием ручной работы.

**Постановка проблемы.** Операционный процесс основан на изменении состояний средств технологического обеспечения: элементов оснащения, оборудования, функциональных звеньев исполнителя, и изготавливаемой детали. Для любого средства технологического обеспечения можно выделить группы состояний упорядоченные на основе отношения «функциональная активизация». То есть каждый элемент технологического оснащения предполагает некоторое множество возможных функций для своей реализации.

**Материалы исследований.** Структурным обеспечением проведения технологических приемов является техническая инструкция, в которой связаны состояния технических систем в достижении технологически значимой цели. Значимость цели подтверждается выполнением необходимой технической функции (группы функций) одного (нескольких) элемента(-ов) оснащения в отношении задействованного(-ных) в приеме другого элемента(-ов) технологического оснащения, оборудования или детали (табл. 1).

Таблица 1 – Структурно-реляционное обеспечение технологических приемов

Технологический прием	Характеристики начального состояния	Характеристики целевого состояния	Изменяемые отношения
Установить деталь в приспособлении	Деталь в зоне установки: 1. ориентировка случайная; 2. сопряжений детали с приспособлением нет	Деталь установлена: 1. ориентирована относительно приспособления ; 2. установочные поверхности детали и приспособления сопряжены	$YR^{ito,id}$ , $SM^{ito,id}$ $INC^{ito,id}$
Закрепить деталь в приспособлении	Деталь установлена в приспособлении: 1. Зажимной элемент не на поверхности зажима; 2. Зажимной элемент не передает нагрузку	Деталь зафиксирована: 1. Зажимной элемент на поверхности зажима; 2. Зажимной элемент передает достаточную нагрузку на опорные поверхности детали	$SM^{ito,id}$ , $FFF^{its,id}$

Технологический прием, в общем случае, можно определить как процесс, соединяющий начальное и целевое состояния технологического комплекса на уровне использования группы функций технологического оснащения, совместная или последовательная реализация которых, обеспечивает выполнение элементов технологического перехода (отдельно: базирование, закрепление, снятие, подвод, измерение и т.д. ).

Наряду с группами упорядоченных действий по функциональной активизации средств реализации технологической операции необходимо принять во внимание и мероприятия организационного характера, связанные

с восстановлением относительного порядка на рабочем месте (например, действия по возвращению инструмента в места постоянного и временного хранения). Наличие этих мероприятий продиктованы необходимым уровнем эргономической рациональности в ходе достижения оптимальных затрат энергии, времени и информационной нагрузки. Как правило, в ходе реализации вспомогательного процесса, комплексы этих действий чередуются с комплексами фаз функциональной активизации применения элементов технологического оснащения. При этом необходимо учесть, что в процессе работы места хранения вспомогательного инструмента мигрируют вслед за местами его применения.

Так, например, гаечный ключ, с соответствующей ему функцией: «Приложить момент к гайке (головке болта, винта) размером 16×18» может быть задействован в нескольких местах приспособления. В связи с чем, у него может быть как минимум 4 места хранения: постоянного – в инструментальном шкафу, промежуточного – на станине станка, или на шкафу возле места установки, оперативного – непосредственно возле места его применения (их может быть более двух). Если рабочий последовательно производит наживление - накручивание – затягивание 2-х и более гаек, то фазовый ряд выглядит примерно так:

На рис. 1 видно как сходятся процессы активизации гайки и гаечного ключа в общей для них фазе «Затянуть гайку». Также видны элементы организационного восстановления, заключающиеся в снятии и перемещении ключа в место оперативного хранения.

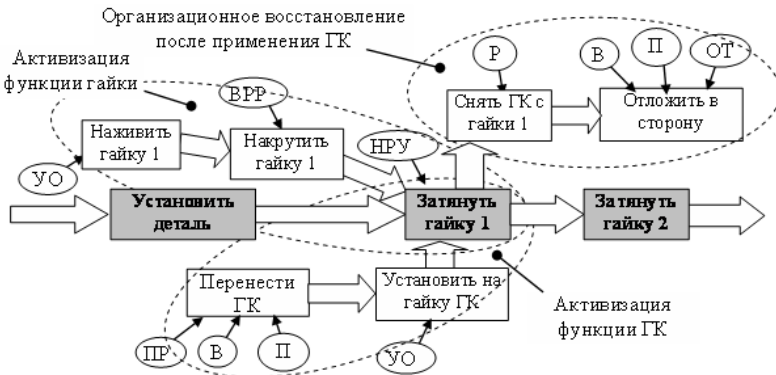


Рис.1 – Взаимодействие рядов фазовых преобразований при активизации элементов оснащения: ГК - «гаечный ключ» и «гайка»:

■ - ключевые элементы приемов: «Установить деталь», «Закрепить»; ○ - микроэлементы-действий: «В» - взять, «П» - переместить в пространстве, «УО» - установить в отверстие; «ВРР» - вращать рукой, «НРУ» - нажать рукой с усилием, «Р» - разъединить, «ОТ» - отпустить

Количественное описание отношений между объектами рабочего места дискретизировано с помощью нечетких переменных, ряды значений к которым были найдены с учетом характера изменений этих отношений и зонами работы исполнителя на рабочем месте (табл. 2). Параметры отношений имеют качественное определение в виде названия одного из значений (терма) лингвистической переменной ( $Lp_{i3}$ ), где  $i3 = 1..n3$ , где  $n3$  – множество значений лингвистических переменных, определенных на множестве действительных значений базовой переменной ( $b$ ), согласно значениям степеней принадлежности к соответствующему интервалу численных значений базовой переменной ( $\mu(b)_{i3}$ ):

$$r_{i3}^{io} = (\mu(b)_{i3}, Lp_{i3}^k), \quad (1)$$

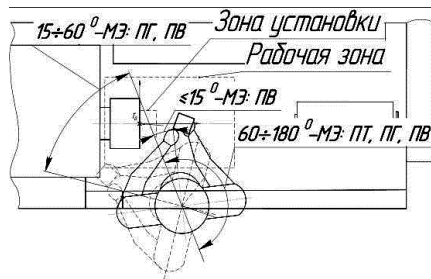


Рис. 2 – Зависимость функциональной сложности от значения параметра отношения как  $YR$

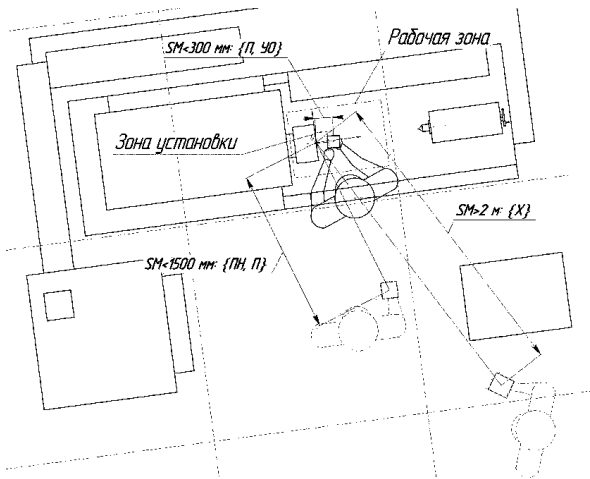


Рис. 3 – Зависимость функциональной сложности вспомогательного процесса от значения параметра отношения  $SM$

Таблица 2 – Фрагмент таблицы соответствия значений лингвистических переменных диапазонам базовых переменных

Лингвистическая переменная	Номер лингвистической переменной			
	1	2	3	4
Ориентирование субъекта относительно оперативной зоны СОР	Совпадение (нечеткое) $Y < 30^0$ СОР <sub>1</sub> (ПТ не обязательно)	В секторе $Y < 90^0$ СОР <sub>2</sub> (ПТ)	В секторе $Y < 180^0$ СОР <sub>3</sub> (ПН и ПТ)	В секторе $Y < 270^0$ СОР <sub>4</sub> (ПН и ПТ и ПН)
Расстояния между субъектом и объектом $S^r$ горизонтальной плоскости	Непосредственное в расположении: рука в $S^r_1 d < 25\text{мм}$ от объекта (ПР).	Оперативная досягаемость: рука в $S^r_2 d < 550\text{мм}$ от объекта (ПР).	Рядом: субъект в $S^r_3 d < 1,5\text{м}$ от объекта (зоны) (ПН и ПР).	Далеко: субъект в $S^r_4 d < 5\text{м}$ от объекта (зоны) (Х и ПР)
Расстояния между субъектом и объектом $S^b$ вертикальной плоскости	Непосредственное в расположении: рука в $S^b_1 d < 25\text{мм}$ от объекта (ПР).	Допустимая досягаемость: рука в $S^b_2 d < 550\text{мм}$ от объекта (ПР).	Максимальная досягаемость: рука в $S^b_3 d < 750\text{мм}$ от объекта (ПР).	За пределами досягаемости субъекта: в $S^b_4 d < 2\text{м}$ от объекта (зоны) (НК(НП) и ПР, с помощью подставки, лестницы.)

Интервалы значений отношений заданы в виде выпуклых нормальных нечетких множеств с кусочно-непрерывной функцией принадлежности, заданных на положительном подмножестве действительных чисел. Обобщенная формула расчета функций принадлежности:

$$\mu_{i3}^{io}(b_{i3}) = \left[ 1 + \left( \frac{b_{i3} - (xint_{i3}^{io} + \Delta int_{i3}^{io})}{Lint_{i3}^{io} - (-1)^{jint} \cdot \Delta int_{i3}^{io}} \right)^{(zP_{i3}^{io})_{jint}} \cdot e^{(z\mu_{i3}^{io})_{jint}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где  $b_{i3}$  - значение параметра базовой переменной;

$xint_{i3}^{io}$  - расположение ядра  $i3$ -го подинтервала ( $i3 = \overline{1, n3}$ ) рассматриваемого  $io$ -го отношения, совпадающее с его областью целевого значения изменяемого параметра: для микроэлементов ориентирования:

$$xint_{i3}^{io} = \frac{(b_{i3}^k + b_{i3}^0)}{2}; \quad (3)$$

$Lint_{i3}^{io}$  - длина подинтервала рассматриваемого  $io$ -го отношения:



$$Lint_{i3}^{io} = \frac{|b_{i3}^k - b_{i3}^0|}{2}, \quad (4)$$

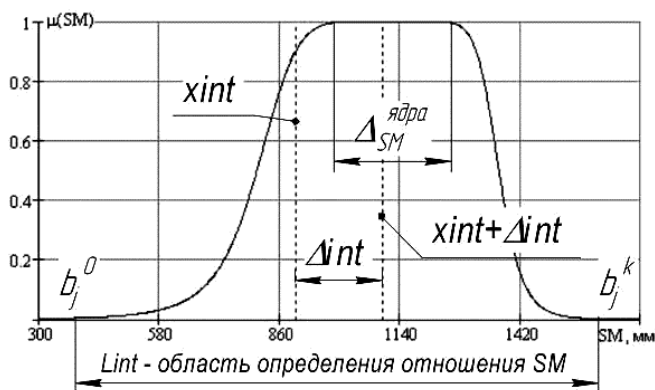


Рис. 4 – Сечение функции принадлежности, соответствующее терму  $Lp_2^{SM}$  лингвистического значения переменной  $SM$ ;  $b_{i3}^k$ ,  $b_{i3}^0$  – начальная и конечная границы  $i3$ -го подинтервала изменений параметра отношения соответственно;  $\Delta int_{i3}^{io}$  – смещение расположения ядра  $io$ -го отношения на  $i3$ -ем интервале;

$\left(zp_{i3}^{io}\right)_{jint}$  – элемент матрицы, характеризующей толерантность  $i3$ -го подинтервала относительно определенных на нем микроэлементов

вспомогательного процесса, пропорционален величине  $\Delta kl_{i3}^{io}$

$\left(2 \leq \left(zp_{i3}^{io}\right)_{jint} \leq 30\right)$ ;  $\left(zu_{i3}^{io}\right)_{jint}$  – характеристика четкости границ степени

принадлежности  $\left(1 \leq \left(zu_{i3}^{io}\right)_{jint} \leq 12\right)$ .

Спецификой микроэлементов технологической операции, реализуемой исполнителем является обеспечение механических преобразований, для которых важен непосредственный контакт между функциональными элементами и объектами воздействия. Поэтому ось симметрии функции принадлежности должна быть смещена в сторону минимума диапазона базовой переменной для пространственных отношений ("SM", "YR").

$$\Delta int_{i3}^{io} = -\frac{Lint_1^{io}}{2(b_{i3}^k - b_{i3}^0)} \cdot Lint_{i3}^{io}. \quad (5)$$

Для изменения параметров отношений силового поля ("FF") важна определенность в выборе свойств оснащения, которые связаны с средствами реализации микроэлементов технологической операции. При реализации микроэлементов ("Ī Ī È", "Ī Ī Ī ") важна более точная дифференциация в середине диапазона:  $6 \leq b^{FF}, \hat{e}\hat{c}\hat{n} \leq 12$ , а при реализации микроэлементов ("Ī Ī Ī", "ĀĀĀ ") - в области максимума интервала базовой переменной:  $12 \leq b^{FF}, \hat{e}\hat{c}\hat{n}$ .

$$\Delta int_{i3}^{io} = \begin{cases} \frac{Lint_3^{io}}{2(b_{i3}^k - b_3^0)} \cdot Lint_{i3}^{io}, & \text{if } i3 \leq 4 \\ \frac{Lint_6^{io}}{2(b_{i3}^k - b_6^0)} \cdot Lint_{i3}^{io}, & \text{if } 4 < i3 \end{cases} \quad (6)$$

При регламентации отношений структурного характера, таких как: степень свободы объекта ("DDF", "INC"), состояние подсистем технологического комплекса ("SSH", "CS"), важно достижение точного соответствия терму лингвистической переменной, поэтому смещения показателя  $\Delta int_{i3}^{io}$  от оси симметрии быть не должно -  $\Delta int_{i3}^{io} = 0$

Параметр, характеризующий величину ядра функции принадлежности  $\Delta kl_{i3}^{io}$ , связан с величиной показателя степени  $(zp_{i3}^{io})_{jint}$  и зависит от уровня микроэлементной заполненности интервала. Чем больше микроэлементов может быть задействовано в его пределах, тем меньше должен быть размер ядра функции принадлежности. То есть величина ядра влияет на уровень дифференциации выбора микроэлемента.

$$(zp_{i3}^{io})_{jint} = 2 \cdot \text{ceil} \left( \frac{N_{Me_{i3}^{io}}}{N_{Me_{i3}^{io}}^{\max}} \right), \quad (7)$$

где  $N_{Me_{i3}^{io}}$  и  $N_{Me_{i3}^{io}}^{\max}$  - количества микроэлементов задействованных на данном интервале заданного отношения и максимальное количество микроэлементов, задействованных на одном из интервалов базовой переменной данного отношения.

Показатель степени  $(zu_{i3}^{io})_{jint}$ , характеризующий четкость границ функции принадлежности, изменяется в зависимости от необходимости ужесточения дифференциации в окрестностях некоторой границы (как правило цели реализации микроэлемента). При помощи  $(zu_{i3}^{io})_{jint}$  в

комбинации с  $(zP_{i3}^{io})_{jint}$  можно относительно четко определять, соответствующую лингвистической переменной, некоторую достаточно малую область значений базовой переменной. Условия реализации конкретного микроэлемента, соответствующих заданному терму лингвистической переменной, определены свойствами и состоянием функциональных элементов рабочего места, регламентируемых группой термов. Поэтому показатель четкости границ степени принадлежности пропорционален совокупности термов базовых переменных группы характеристик условий реализации:

$$(zu_{i3}^{io})_{jint} = \frac{1}{n^{\bar{a}\bar{b}}} \sum_{i^{\bar{a}\bar{b}}=1}^{n^{\bar{a}\bar{b}}} \mu \left( (b_{i^{\bar{a}\bar{b}}}^{io})_{i3} \right)^k \frac{(b_{i^{\bar{a}\bar{b}}}^{io})_{i3}^k}{\Delta (b_{i^{\bar{a}\bar{b}}}^{io})_{i3}}, \quad (8)$$

где  $n^{\bar{a}\bar{b}}$  - количество термов свойств функциональных элементов в группе;

$\mu (b_{i^{\bar{a}\bar{b}}}^{io})$  - функция принадлежности  $i^{\bar{a}\bar{b}}$ -го свойства определенному интервалу базовой переменной  $b_{i^{\bar{a}\bar{b}}}^{io}$ ;

$(b_{i^{\bar{a}\bar{b}}}^{io})_{i3}^k$  - базовая переменная группы по  $io$ -му отношению, соответствующая концу интервала;

$\Delta (b_{i^{\bar{a}\bar{b}}}^{io})_{i3}$  - длина  $i3$ -го интервала группы.

Подобная структура связи лингвистических переменных с базовыми численными значениями отношений позволяет управлять синтезом микроструктуры рабочего процесса, что способствует более точному учету производственные потребности конкретной рабочей ситуации.

**Выводы.** Таким образом создана кусочно-непрерывная функция принадлежности базовой переменной отношений, регламентирующих применение определенных технологических микроэлементов-действия, которая позволяет учесть обеспечение механических преобразований, состояние подсистем технологического комплекса, определенность в выборе свойств оснащения и цели реализации микроэлемента.

**Список литературы:** 1. Тимофеев Ю.В. Аналитический подход к оценке временных характеристик рабочего места станочника. / Тимофеев Ю.В., Шелковой А.Н., Рузметов А.Р., Концур С.А. // Високи технології в машинобудуванні: моделювання, оптимізація, діагностика: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». Вип. 1(5) – Харків, 2002 р. – С. 370 – 376. 2. Рузметов А.Р. Определение оптимально потенциальной микроструктуры технологических переходов. С. 44–49 // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. - №1. – С.140 - 144. 3. Шелковой А.Н., Приходько О.Ю., Рузметов А.Р. Методика адаптации типового вспомогательного технологического перехода к условиям рабочей среды. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових

праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. - №4. – С. 156 - 160. **4. Шелковой А.Н., Приходько О.Ю., Рuzmetov A.P.** Методика адаптации типового вспомогательного технологического перехода к условиям рабочей среды. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. - №4. – С. 156 - 160. **5. Должиков В.П.** Разработка технологических процессов механо- обработки в мелкосерийном производстве: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 324 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Timofiev Y.V., Ruzmetov AR, Kontsur SA* The analytical approach to the evaluation of the temporal characteristics of the workplace machinist. *Visoki tehnologii in mashinobuduvanni: modelyuvannya, optimizatsiya, diagnostika: Zbirnik Naukova Pracuj NTU "KhPI."* Vip. 1 (5) - Kharkiv, 2002 p. - P. 370 - 376. 2. *Ruzmetov AR* Determination of the optimal potential of microstructure technology transition. P. 44-49 // *News Natsionalno tehnichno universitetu "Harkivsky politehnichny institut."* Zbirnik Naukova Pracuj. *Tematichnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni.* - Kharkiv: NTU "KhPI" .- 2007. - No1. - P.140 - 144. 3. *Silk AN, Prikhodko OY, Ruzmetov AR* Methods of adapting the model auxiliary process of transition to work environmentP. *News Natsionalno tehnichno universitetu "Harkivsky politehnichny institut."* Zbirnik Naukova Pracuj. *Tematichnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni.* - Kharkiv: NTU "KhPI" .- 2008. - No4. - P. 156 - 160. 4. *Silk A.N., Prikhodko O.Y., Ruzmetov A.R.* Methods of adapting the model auxiliary process of transition to work environmentP. *News Natsionalno tehnichno universitetu "Harkivsky politehnichny institut."* Zbirnik Naukova Pracuj. *Tematichnost vipusk: Tehnologii in mashinobuduvanni.* - Kharkiv: NTU "KhPI" .- 2008. - No4. - P. 156 - 160. 5. *Dolzhiikov VP* Development of technological processes of mechanochemical treatment in small-scale production: Textbook. - Tomsk: Izd TPU, 2003. - 324 p.

*Поступила (received) 20.10.2014*

## УДК 621.86

**О. В. ГРИГОРОВ**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**О. В. СТЕПОЧКИНА**, асп. НТУ «ХПИ»

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА С ПЕРЕКОСОМ

В статье рассматриваются особенности программы, предназначенной для исследовательских и инженерных расчетов, объектом которых является кран мостового типа, движущийся с забеганием одной из опор. Обосновывается важность учета параметров приводов механизма передвижения. Предложен подход, позволяющий задавать и контролировать основные параметры элементов привода. Особое внимание уделено обеспечению возможности быстрого перезадаания кинематической схемы в среде MS Excel.

**Ключевые слова:** перекося крана, краны мостового типа, механизм, математическая модель, MS Excel, кинематическая схема, структура данных.

**Постановка проблемы.** Движение крана сопровождается поворотами и деформациями конструкции в горизонтальной плоскости. При этом имеет место сложное взаимодействие элементов приводов и металлоконструкции. Также важны процессы, происходящие в зоне контакта колес с рельсами.

---

© О.В. Григоров, О.В. Степочкина

В данной работе рассматриваются особенности работы приводов механизмов передвижения мостовых кранов. Аспекты моделирования металлоконструкции рассмотрены в публикации [1].

Повышенное внимание к элементам механизмов объясняется, прежде всего, тем, что они достаточно часто являются объектами модернизации. В последнее время модернизации механизмов получили широкое распространение. При этом также обычно обновляется система управления; техническое задание может включать требования изменения скорости и ускорения. Выбор комплектующих производится с учетом накопленного опыта эксплуатации и пожеланий технического персонала.

Оптимальное техническое предложение должно быть обосновано расчетом. Расчет включает проверки при различных состояниях, в том числе в нештатных ситуациях. На стадии бизнес-проекта чаще всего требуется сравнительный анализ приводов разных производителей. Многократные пересчеты существенно повышают трудоемкость проектно-конструкторских работ. Отклонения параметров от оптимума (например, по причине ступенчатости типоразмерных рядов) могут иметь следствием увеличение стоимости, массы, нагрузок и т.д.

При этом корректный учет явлений, сопровождающих движение с перекосом, обычно невозможен. Как следствие, имеются жалобы на работу механизмов кранов с отношением пролета к базе более 4-5. Обычное игнорирование расчета сопротивлений отдельно для каждой из сторон в этом случае приводит к занижению мощности двигателей. Но с другой стороны излишняя мощность также нежелательна, поскольку следствием являются повышенные нагрузки, действующие в горизонтальной плоскости.

Актуальной задачей является уточненное моделирование движения крана с перекосами с возможностью контроля и варьирования параметров приводов. Модель должна представлять собой программу, выполненную в среде MS Excel, которую можно использовать не только как инструмент исследования, но и для инженерных расчетов.

Далее рассматривается подмодель, предназначенная для расчетов механизмов крана.

**Анализ последних достижений.** К настоящему времени выполнено значительное число исследований процесса движения крана с перекосом. Результаты в обобщенном виде содержатся в ряде отраслевых расчетных норм ([3], [4]). Влияние перекосных нагрузок при выборе элементов механизмов обычно ограничивается учетом коэффициента ребордного трения, величина которого изменяется в пределах от 1,1 до 2. Различие механических характеристик двигателей не принимается во внимание.

Благодаря внедрению частотно регулируемых приводов, появилась возможность создания серийных антиперекосных систем управления, включающих датчики зазора между боковыми поверхностями реборд и рельсами, а также систем синхронизации движения сторон, что во многом снимает вопрос. Однако широкое применение этих решений сдерживается их

высокой стоимостью. Также не снят вопрос корректного выбора мощности двигателей.

### **Нерешенные части общей проблемы.**

Интерес представляет моделирование работы приводов как части общего процесса движения, сопровождающегося нерегулярными толчками, динамическими эффектами, с наличием нескольких устойчивых форм.

Одним из главных требований к модели является приспособленность к инженерным расчетам. Для этого необходимо обеспечить полноту и наглядность представления данных, легкость задания параметров, возможность описания объектов, имеющих разную структуру, например, механизмов с различной кинематической схемой.

В последнем случае имеется сложность принципиального характера, которая при автоматизации вычислений выходит на первый план. Для успешного решения этой задачи требуется управление структурой данных на рабочем листе электронной таблицы с учетом передачи информации таким же образом, как передаются нагрузки в цепочке звеньев механизмов. При этом необходимо учесть направленность этих потоков, а также возможность их распараллеливания.

**Основной материал.** Известны многочисленные решения, основанные на применении таблиц Excel (вопросы строительной механики, использование метода конечных элементов [6, 7], сопротивление материалов [8], теория механизмов и машин [2], детали машин [8], САПР [5] и т.д.).

Практически, без исключения, ядром таких приложений является код, написанный на языке VBA (роль Excel ограничена вводом-выводом данных). Это необходимо для коммерческих программ, т.к. позволяет защитить код. Однако в результате теряется важное качество электронных таблиц: наглядность расчета и доступность его для анализа. Соответственно, снижается доверие к подобным программам, ограничивается область их использования для решения ответственных задач. Существенным недостатком также является сложность, а чаще невозможность перестройки схемы механизма.

Мы разрабатывали противоположный подход: основные вычисления были выполнены на рабочих листах, а код VBA, практически, был исключен.

Наибольшее внимание уделено структурной составляющей задачи, возможности быстрой перестройки кинематической схемы механизма, а также схемы его нагружения.

Применен следующий принцип. Каждому элементу привода соответствует объект-столбец на рабочем листе кинематической схемы. Набор столбцов, ограниченный слева и справа пустыми столбцами образует модель привода. Модель включает ячейку-переключатель режимов разгона/торможения двигателем и торможения тормозом. Модель в режиме разгона/торможения двигателем – представлена на рис.1. Значения величин на этом рисунке отображены для случая конкретного расчета и далее по тексту не рассматриваются.

Формирование схемы производится перемещением, удалением, дублированием столбцов. На листе имеется резервная коллекция элементов, не учитываемых в расчете. Для этого они отделены от рабочей зоны пустым столбцом.

Используются столбцы-элементы нескольких видов: передающие момент (например, муфта), преобразующие момент (редуктор, открытая зубчатая пара), преобразующие движение (колесо).

Столбцы, соответствующие активным элементам (двигатель, тормоз) не удаляются. Они, в числе прочего, используются для определения направленности энергетических потоков и связанной с ними направленности приведения физических величин. Ссылки на столбец-тормоз и столбец-двигатель имеют в большей степени логический смысл.

На рис. 2 показаны некоторые влияющие ячейки для отдельного элемента-столбца (часть строк для наглядности скрыта). Как видно, имеются три разновидности связей:

- 1). с ячейками другого листа (некоторые параметры удобно задавать на листе общих исходных данных.);
- 2). с ячейками столбца-двигателя и столбца-тормоза;
- 3). с ячейками соседних столбцов.

Для создания связей последнего типа мы воспользовались техникой специальных ссылок «всегда на соседнюю ячейку». В результате обеспечена целостность схемы при любых манипуляциях со столбцами. Указанный принцип объединения столбцов в общую расчетную зону представляется наиболее наглядным и естественным, поскольку столбцы, как и элементы привода, взаимодействуют только с соседними объектами.

Приведение оборотов (скоростей), угловых ускорений (ускорений) и моментов (сил) выполнено к каждому элементу, что важно при выборе комплектов.

Ячейки имеют несколько видов форматирования. Подчеркнуты значения в ячейки, связанные с соседними столбцами; заливкой выделены ячейки, связанные с данными на другом листе. Предусмотрена зона динамических комментариев, поясняющих смысл формул в активной ячейке. Текст комментариев, находящийся в скрытых ячейках, доступен для редактирования. Отдельные строчки с символами ">>>" или "<<<" используются для отображения направленности энергетических потоков и соответственно, последовательности приведения параметров.

Двухмерность рабочего листа является фундаментальным преимуществом электронной таблицы, но так же создает определенные сложности, поскольку любой расчет приобретает геометрический смысл, и требуется повышенное внимание к компоновке ячеек. Важным требованием является максимальная упорядоченность данных, поэтому мы стремились к однородности и регулярности структуры рабочей зоны.

	A	B	C	F	G	H	I	J	K	L
3		Параллельные элементы		Rot	Rot	Rot	Rot	Rot	RotTrans	Trans
6		Вид движения		1	1	1	1	1	1	1
10		К-т разъединения/объединения силовых потоков	$Z/Z_{\text{влияющ}}$	1	1	1	1	1	1	1
11		<b>ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ</b>	<b>Схема элементов &gt;&gt;&gt;</b>							
12		<b>Передаточное число; КПД элемента</b>		Тормоз Муфта	Муфта	Двиг.	Муфта	Редуктор	Колесо	Конечная балка
13		Передаточное число элемента	$U_{\text{эл}}$	1	1	1	1	27,60	2,82	1
14		Задаваемое передаточное число		1	1	1	1	27,60	2,82	1
15		КПД элемента		1	0,995	1	0,995	0,960	1	1
16		<b>РАСЧЕТ</b>								
17		<b>РАЗГОН/ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ</b>								
18		<b>1 Угловая скорость (скорость) - приведение от двигателя</b>								
19		Угловая скорость (скорость) вых. звена элемента	$\omega_2$ (1/с)	<< $\omega$	<< $\omega$	< $\omega$	$\omega$	$\omega$	$\omega$	$\omega$
20		Обороты выходного звена элемента	$n_2$ об/мин	153	153	153	153	5,55	(1,970)	(1,970)
21		<b>2 Момент инерции (масса) - приведение к двигателю/тормозу</b>		1463	1463	1463	1463	53	<<	<< m
22		Приведение к двигателю/тормозу	$J_{\text{пр}} (m_{\text{пр}})$ кг·м <sup>2</sup> (кг)	>>	>>	>J	<<J	<<	<<	<<
23		J (m) выходного звена элемента	$J_2 (m_2)$ кг·м <sup>2</sup> (кг)	0,01	0,04	1,65	1,24	1,21	(0,82)	(6,998)
24		<b>3 Суммарн. момент (сила), передаваемый эл-том</b>	$M_2 (F_2)$ Н·м (Н)	0,013	0,024	0,377	0,024	0,024	-290	-7 532
25		<b>3.1 Статический момент (сила) - приведение к двигателю/тормозу</b>		-3	-8	<b>386</b>	>M	<<	<<	<< P
26		Приведенный к выходному звену элемента	$M_{2\text{ст}} (F_{2\text{ст}})$ Н·м (Н)	>>	>>	>>	>>	>>	>>	>>
27		Приведенный к входному звену элемента	$M_{1\text{ст}} (F_{1\text{ст}})$ Н·м (Н)			379	-7	-185	(-521)	(-521)
28		Момент (сила), прилож. к выходному звену элемента	$M_{2\text{эл}} (F_{2\text{эл}})$ Н·м (Н)			379	-7	-185	(-521)	(-521)
29		<b>3.2 Угловое ускорение/замедление</b>	$\epsilon_{\text{в}} (a_{\text{в}})$ 1/с <sup>2</sup> (м/с <sup>2</sup> )	229,95	230	229,95	230	8,33	(2,96)	(2,96)
30		<b>3.3 Угловое замедление (реж. тормож. тормозом)</b>	$\epsilon_{\text{т}} (a_{\text{т}})$ 1/с <sup>2</sup> (м/с <sup>2</sup> )	M >>	M >>	>M	<< M	<<	<<	<< P
31		<b>3.4 Динамический момент (сила), приведенный к двигателю/тормозу</b>		-2,90	-8	-379	-283	-7347	(-20 697)	(-20 697)
32		Действующие на выходное звено элемента	$M_{2\text{дин}} (F_{2\text{дин}})$ Н·м (Н)	-2,90	-8	-379	-284	-7347	(-20 697)	(-20 697)
33		Приведенные к входному звену элемента	$M_{1\text{дин}} (F_{1\text{дин}})$ Н·м (Н)	-2,90	-8	-379	-284	-7347	(-20 697)	(-20 697)
34		Приложенные к выходному звену элемента	$M_{2\text{дин эл}} (F_{2\text{дин эл}})$ Н·м (Н)	-2,90	-8	-379	-284	-7347	(-20 697)	(-20 697)
35										
36										

Область столбцов, соответствующих элементам механизма

Рис.1. – Модель механизма передвижения в режиме разгона/торможения двигателем



	A	F	G	H
6		Rot	Rot	Rot
10	К-т разъединения/объединения силовых потоков	1	1	1
11	<b>ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ</b>			
12	<b>Передаточное число; КПД элемента</b>	Тормоз	Муфта	Двиг.
13	Передаточное число элемента	1	1	1
14	Задаваемое передаточное число	1	1	1
15	КПД элемента	1	0,995	1
16	<b>РАСЧЕТ</b>			
17	<b>РАЗГОН/ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕМ</b>			
18	<b>1 Угловая скорость (скорость) - приведение от двигателя</b>	<< $\omega$	<< $\omega$	< $\omega$ >
19	Угловая скорость (скорость) вых. звена элемента	153	153	153
20	Обороты выходного звена элемента	1463	1463	1463
21	<b>2 Момент инерции (масса) - приведение к двигателю/тормозу</b>	J >>	>>	>J<
22	Приведение к двигателю/тормозу	0,01	0,04	4,65
23	J (m) выходного звена элемента	0,013	0,024	0,377

Рис. 2. – Влияющие диапазоны для двух ячеек: F23 и G22.

Это одна из причин того, что вычисления для режимов разгона и торможения двигателем, а также при торможении тормозом выполняются по общим формулам в одних и тех же ячейках, хотя при необходимости их несложно разнести по разным ячейкам.

Модели приводов включены в общую модель крана в движении, однако они имеют самостоятельную ценность, и могут использоваться отдельно, например, для расчетов механизма передвижения, подъема или поворота крана – с минимальными изменениями.

Предложенный подход может быть использован для анализа различных объектов с переменной структурой.

**Выводы.** В статье рассматриваются особенности программы, предназначенной для моделирования процесса передвижения кранов мостового типа с перекосом. Программа должна быть применимой как для исследований, так и для инженерных расчетов, выполняемых на стадии проектирования новых кранов, а также для реконструируемых кранов, находящихся в эксплуатации. Подробнее рассматривается подмодель механизма передвижения мостового крана. В данной подмодели реализована возможность изменения кинематической схемы и определения кинематических, статических и динамических параметров для каждого элемента, что обеспечивает надежность, простоту и наглядность вычислений.

**Список использованных источников:** 1. Григоров О.В. Инженерные и информационные аспекты решения задачи о передвижении кранов мостового типа в среде MS Excel / Григоров О.В., Степочкина О.В. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ "ХПІ" – 2014р. - №7

(1050) – с. 6-12. **2.** Даценко А.Ф., Белоконев И.М. и др. Инженерная механика. Автоматизированные расчеты механизмов и машин в системе Microsoft Excel: Учебник / Даценко А.Ф., Белоконев И.М., Коломиец Л.В., Свиарев Ю.Н. – Одеса: СтандартЪ, 2006. – 320с. **3.** СТО 24.09-5821-01-93 Краны грузоподъемные промышленного назначения. Нормы и методы расчёта элементов стальных конструкций. **4.** ОСТ 24.090.72 – 83. Нормы расчета стальных конструкций мостовых и козловых кранов. - М., 1983. - 92 с. **5.** Шаргород А.Ю., Ложкин Г.В. Применение электронных таблиц для автоматизации управления данными CAD-систем / А.Ю. Шаргород, Г.В. Ложкин // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2012. – Выпуск 158 – С. 15-17. **6.** Daily Download 6: Working with FEA programs: <http://newtonexcelbach.wordpress.com/2012/09/22/daily-download-6-working-with-fea-programs/> **7.** ExcelFEM\_3D (for Excel 2007 & Excel 2010): <http://www.excelcalcP.com> **8.** Mechanical, Industrial and Technical Calculations: <http://www.mitcalc.com>

**Bibliography (transliterated):** 1. Grigorov O.V., Stepanchikina O.V. *Inzhenernye i informacionnye aspekty reshenija zadachi o peredvizhenii kranov mostovogo tipa v srede MS Excel. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu "KhPI". Zbirnik naukovih prac'. Serija: Novi rishennja v suchasnih tehnologijah.* –Kharkov: NTU "KhPI" – 2014r. - No7 (1050) – P. 6-12. 2. Dashhenko A.F., Belokonev I.M. i dr. *Inzhenernaja mehanika. Avtomatizirovannye raschety mehanizmov i mashin v sisteme Microsoft Excel: Uchebnik* – Odesa: Standart, 2006. – 320P. 3. SТО 24.09-5821-01-93 *Krany gruzopodjomnye promyšlennogo naznachenija. Normy i metody raschjota jelementov stal'nyh konstrukcij.* 4. OСТ 24.090.72 – 83. *Normy rascheta stal'nyh konstrukcij mostovyh i kozlovyh kranov.* - Moscow, 1983. - 92 P. 5. Shargorod A.Ju., Lozhkin G.V. *Primenenie jelektronnyh tablic dlja avtomatizacii upravlenija dannymi CAD-sistem. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija i pribory avtomatiki.* – 2012. – Vypusk 158 – P. 15-17. 6. Daily Download 6: Working with FEA programs: <http://newtonexcelbach.wordpress.com/2012/09/22/daily-download-6-working-with-fea-programs/> 7. ExcelFEM\_3D (for Excel 2007 & Excel 2010): <http://www.excelcalcP.com> 8. Mechanical, Industrial and Technical Calculations: <http://www.mitcalc.com>.

Поступила (received) 15.10.2014

## УДК 621.91

**О. В. КОТЛЯР**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

### **БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ**

Розглянуті питання багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів виготовлення корпусних деталей в умовах багатомономенклатурного виробництва. Розроблено конкуруючі варіанти технологічних процесів та систему критеріїв оптимізації. Проведено порівняльний аналіз критеріїв оптимальності і визначено найвигідніший варіант технологічного процесу в залежності від виробничих умов.

**Ключові слова:** корпусна деталь, багатомономенклатурне виробництво, технологічний процес, критерії оптимальності, інтенсивність формоутворення, інтенсивність прибутку.

**Вступ.** У сучасному машинобудуванні найбільша частка деталей, які отримують обробкою різанням, випускається в умовах багатомономенклатурного

© О.В. Котляр, 2014

виробництва, що характеризується нестабільністю номенклатури й обсягів випуску продукції. У розвинених країнах частка машинобудівної продукції, яка випускається у цих умовах досягає 75–80%. Багатономенклатурне виробництво характеризується широкою номенклатурою виробів, різноманітністю технологічних операцій та маршрутів обробки, частим переналадженням обладнання, а також складною організацією виробництва.

Сучасний рівень розвитку техніки характеризується розмаїттям та підвищеною складністю конструкції виробів машинобудування, в результаті чого кількість вузлів механізмів і деталей істотно збільшується, ускладнюються функціональні зв'язки, посилюються вимоги щодо виготовлення та складання. Ця тенденція призводить до ускладнення структури технологічних процесів (ТП) виготовлення деталей і вузлів виробів та підвищення трудомісткості проектування ТП, що відображається в певній послідовності виконання операцій механообробки, термообробки і т.д.

Робота підприємств в умовах ринкової економіки висуває на перший план необхідність забезпечення високої якості виробу при відносно низькій його вартості. Це у свою чергу призводить до підвищення вимог щодо точності виготовлення деталей та вузлів, визначає необхідність застосування дорогого обладнання та оснастки, що в остаточному підсумку є причиною збільшення витрат і подовження часу на конструкторсько-технологічну підготовку виробництва.

**Постановка проблеми.** Для сучасного машинобудування характерні наступні основні тенденції:

- збільшення змінюваності випуску виробів через швидке розширення споживчого ринку;
- підвищення надійності та експлуатаційних характеристик виробів, зниження витрат на експлуатацію і ремонт;
- підвищення вимог до якості виробів, деталей і оброблених поверхонь.

Основним засобом підвищення якості виробів, скорочення термінів їх розроблення, забезпечення точності та стабільності виготовлення, а також забезпечення мінімальної собівартості є вдосконалення технічної підготовки виробництва за рахунок розвитку систем технологічного проектування, бо технологічне проектування – це головне завдання технічної підготовки виробництва, яке становить майже половину її трудомісткості.

Ефективне технологічне проектування може здійснюватися тільки на методичній основі оптимізації ТП, що базується на техніко-економічних принципах, які дозволяють розробляти та впроваджувати найбільш раціональні ТП із множини конкуруючих варіантів.

Згідно із цими принципами, обробка деталей повинна здійснюватися з найменшою трудомісткістю та мінімальною собівартістю за умови її виготовлення в необхідній кількості та в терміни, встановлені календарними виробничими планами. Реалізація вказаних вимог забезпечується багатоваріантністю проектування, у ході якого формуються альтернативні з технічних позицій варіанти та вибирається найвигідніший з них.

При традиційному проектуванні питання пошуку оптимального рішення найчастіше не є пріоритетним через те, що кількість детально проаналізованих варіантів невелика, а їх оцінювання виконується на основі інтуїції та досвіду проектувальника і лише в окремих випадках – порівнянням найбільш простих кількісних критеріїв.

Сьогодні завдання вибору оптимальних технологічних рішень стало вельми актуальним. Це обумовлено, з одного боку, неможливістю іншими засобами вдосконалити технологію, а з іншого – потенційними можливостями сучасної комп'ютерної техніки. Таким чином, є сприятливі умови для розвитку і впровадження автоматизації технічної підготовки виробництва, у тому числі, для автоматизації проектування ТП механічної обробки деталей методами багатокритеріальної оптимізації. Відкрилися нові можливості для спрямованого пошуку ефективних технологічних рішень в області структурного та параметричного проектування технологічних систем.

Автоматизація проектування ТП потребує перегляду методів рішення багатьох завдань проектування у тому числі оптимізаційних, розроблення способів їх формалізації, кількісного опису та вибору критеріїв оптимальності. Як стимул для розроблення формальних методів пошуку технологічних рішень, автоматизація проектування сприяє застосуванню цих методів і у неавтоматизованому проектуванні.

**Мета дослідження.** Формування конкуруючих варіантів ТП обробки корпусної деталі та визначення оптимального з них на підставі багатокритеріальної оптимізації.

**Матеріали досліджень.** Згідно з типовими маршрутами обробки та в залежності від конструктивно-технологічних особливостей і величини виробничої партії корпусні деталі можуть оброблятися на різних типах фрезерних, свердильних, розточувальних та шліфувальних верстатів з ручним керуванням і з ЧПК при використанні як стандартної, так і спеціальної технологічної оснастки.

Визначальний вплив на вибір типу верстата має величина виробничої партії деталей та її конструктивно-технологічні особливості (максимальні довжина, ширина, висота та вимоги по точності і шорсткості поверхонь), а також спосіб отримання заготовки (прокат, паковка, штамповка чи відливка). Різноманіття металорізальних верстатів, на яких можлива обробка деталі та способів отримання заготовки призводить до зростання числа конкуруючих варіантів ТП. Наприклад, для корпусної деталі, що наведена на рис. 1 і виготовлена з алюмінієвого сплаву АК6 можна сформувати щонайменше чотири узагальнених варіанти ТП (табл. 1).

Ефективність функціонування підприємства визначається на підставі комплексного та системного дослідження показників його діяльності, при якому проводиться їх співставлення та визначення взаємозв'язків. Основними показниками діяльності підприємства є: продуктивність праці, максимальний прибуток, собівартість та конкурентоспроможність продукції, інтенсивність та ефективність використання фінансових ресурсів, матеріало- і

енергомiсткiсть продукцiї, рентабельнiсть, фондомiсткiсть, фондoviддача, коефiцiєнт використання обладнання та iн.

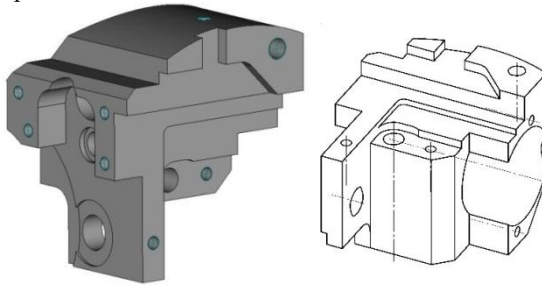


Рис. 1 – Деталь «Корпус»

Прогресивний розвиток техніки і технологій та підвищення конкуренції визначають необхідність інтенсифікації виробництва, яка передбачає підвищення продуктивності обробки, ефективності використання матеріальних, енергетичних і фінансових ресурсів, якості продукції, а також скорочення строків технологічної підготовки виробництва.

Таблиця 1 – Варіанти технологічного процесу обробки деталі

Номер варіанту ТП	Спосіб отримання заготовки	Тип обладнання
1	Прокат	Універсальне з ручним керуванням
2	Відливка	Універсальне з ручним керуванням
3	Прокат	3 ЧПК
4	Відливка	3 ЧПК

Таким чином, визначення найвигіднішого варіанту ТП обробки деталі слід проводити на підставі системи критеріїв, яка сприяє інтенсифікації виробництва і характеризує організаційно-технологічну структуру машинобудівного виробництва та дозволяє найбільш точно визначити область ефективного застосування технологічного обладнання [1].

В якості критерію оптимальності, який характеризує організаційно-технологічну структуру виробництва і відображає його технологічні аспекти діяльності доцільно використовувати інтенсивність формоутворення, а для оцінки економічних аспектів діяльності будь-який з наступних: інтенсивність маржинального прибутку, інтенсивність прибутку, прибуток, собівартість обробки та приведені витрати.

Основним критерієм, що дозволяє охарактеризувати виробничу діяльність підприємства, пов'язану з виготовленням деталі є продуктивність. Продуктивність обробки впливає на більшу частину показників роботи підприємства, зокрема, на собівартість продукції та прибуток від її реалізації. Збільшення продуктивності та інтенсивності обробки є найбільш суттєвим фактором зниження собівартості продукції. Так, за даними фірми SANDVIK COROMANT підвищення швидкості

різання твердосплавними пластинами на 20% дозволяє зменшити собівартість обробки на 15%, тоді як зменшення витрат на РІ на 30% зменшує собівартість лише на 1%. Тому, найбільш раціональним напрямком збільшення ефективності виробництва є підвищення продуктивності та інтенсивності обробки за рахунок використання сучасних ріжучих матеріалів провідних світових виробників та спеціальних конструкцій ріжучих і допоміжних інструментів, що забезпечують паралеельну концентрацію технологічних переходів.

Продуктивність обробки адекватно характеризує системний критерій "інтенсивність формоутворення"  $W$ , мм/хв, який на відміну від показника "штучна продуктивність" має абсолютний характер і дозволяє оцінити продуктивність різних типів металорізальних верстатів і верстатних систем при обробці різноманітних деталей. Цей показник має ієрархічну структуру, що відповідає структурі технологічної системи і показнику "штучна продуктивність". Ієрархічна структура показника інтенсивності формоутворення складається з технологічної, циклової та нормативної інтенсивності формоутворення. Технологічна  $W_T$  інтенсивність формоутворення (хвилинна подача) враховує тільки значення режимів різання та дозволяє визначити основний час обробки, а циклова  $W_{Ц}$  і нормативна  $W_N$  інтенсивності формоутворення враховують також внутрішньоциклові та позациклові втрати часу і відповідно дозволяють визначити час циклу роботи верстата та норму часу обробки деталі. Для оцінки продуктивності обробки деталей на різних типах металорізальних верстатів доцільно використовувати нормативну інтенсивність формоутворення.

Цільова функція для визначення нормативної інтенсивності формоутворення має вигляд:

$$W_N = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} W_{Tij} \frac{t_{Oij}}{T_{штij} + T_{пзj} / N_d + \tau_j} \right),$$

де  $W_{Tij}$  – технологічна інтенсивність формоутворення  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, мм/хв;  $T_{штij}$  – норма штучного часу обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;  $t_{Oij}$  – основний час обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;  $T_{пзj}$  – підготовчо-заклучний час, пов'язаний з обробкою партії деталей на  $j$ -му верстаті, хв;  $N_d$  – величина виробничої партії деталей, шт;  $\tau_j$  – резерв часу, необхідний для відновлення працездатності  $j$ -го верстата у разі випадкової відмови верстата або РІ, з метою підвищення імовірності виконання виробничого завдання, хв.

Критерій собівартості охоплює широке коло витрат і, поряд з витратами часу, враховує витрати матеріалізовані в засобах виробництва (амортизація обладнання, електроенергія, допоміжні матеріали та ін.) [2].

Собівартість продукції визначається двома основними методами:

- 1) Методом повного розподілення витрат;
- 2) Методом часткового розподілення витрат.

При визначенні собівартості методом повного розподілення витрат (*Absorption Costing*) всі виробничі витрати (постійні та змінні) враховуються у собівартості виготовленої продукції і пропорційно розподіляються між реалізованою продукцією і продукцією, що не була реалізована і залишилася на складі. За рахунок врахування постійних витрат цей метод забезпечує високий рівень собівартості, що зменшує конкурентоздатність продукції.

В останні десятиріччя набув розповсюдження метод часткового розподілення витрат – система "дайрект-костінг" (*Direct Costing*), згідно з якою собівартість продукції розраховується тільки з урахування перемінних витрат, що залежать від обсягу виробництва. Постійні витрати не включаються у розрахунок собівартості, а відраховуються з усього обсягу прибутку, який отриманий у продаж планово проміжку часу. Це викликано тим, що завоювання та утримання ринків можливо при реалізації більш дешевої продукції на підставі зниження її собівартості і отримання прибутків за рахунок більших обсягів продажу.

Система "дайрект-костінг" дає можливість встановити взаємозв'язки між витратами та обсягами виробництва, а саме прогнозувати собівартість та прибуток в залежності від них. У системі "дайрект-костінг" виділяють поняття маржинального прибутку, який визначається різницею між доходом та перемінними витратами і фактичного прибутку, що розраховується шляхом відрахування з маржинального прибутку постійних витрат. Зміна маржинального прибутку дозволяє виявити більш рентабельні вироби і вплинути на асортимент продукції. Тому, використання системи "дайрект-костінг" на вітчизняних підприємствах є необхідною умовою забезпечення їх сталого розвитку та конкурентоздатності.

У відповідності до вище зазначеного цільова функція для визначення величини технологічної собівартості деталі по методу повного розподілення витрат має вигляд:

$$C_T = C_3 + \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{(C_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{yB} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3_{Pj} + C_{Ej} \right) + S_{II},$$

де  $C_3$  – ринкова ціна заготовки, грн;  $C_{PIij}$  – ціна комплекту PI для обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, грн;  $m$  – кількість металорізальних верстатів, що задіяні при обробці деталі, шт;  $p_j$  – кількість оброблюваних поверхонь деталі на  $j$ -му верстаті, шт;  $K_{yB}$  – коефіцієнт випадкової втрати PI (приймається 1,1);  $T_{ij}$  – стійкість комплекту PI для обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;  $t_{Oij}$  – основний час обробки  $i$ -ї поверхні на  $j$ -му верстаті, хв;

$z_{ij}$  – кількість граней багатогранної непереточуваної пластини PI, шт;  $C_{Cij}$  – відповідно витрати на переточування або зміну багатогранної пластини PI, грн;  $3_{Pj}$  – заробітна плата основних і допоміжних робітників з нарахуваннями на  $j$ -му верстаті, грн;  $C_{Ej}$  – вартість електроенергії, що витрачена на обробку деталі на  $j$ -му

верстаті, грн;  $T_{шткj}$  – норма штучно-калькуляційного часу обробки деталі на  $j$ -му верстаті, хв;  $S_{II}$  – величина постійних витрат, що припадають на одну деталь, грн.

При визначенні технологічної собівартості деталі по методу часткового розподілення витрат не враховуються постійні витрати, таким чином, цільова функція для визначення величини технологічної собівартості деталі по методу часткового розподілення витрат має вигляд:

$$C_{TM} = C_{I3} + \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{(C_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{VB} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3p_j + C_{Ej} \right).$$

В якості узагальнюючого економічного критерію оптимальності ТП використовуються річні приведені витрати, які на відміну від собівартості, враховують ще економічну ефективність капітальних вкладень:

$$П = C + E_n \cdot K,$$

де  $C$  – собівартість обробки річної виробничої програми;

$K$  – величина капітальних вкладень;

$E_n$  – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень,  $E_n = 0.1$ .

$$C = C_T \cdot N_p,$$

де  $C_T$  – технологічна собівартість виготовлення деталі, грн.

$N_p$  – річна виробнича програма випуску деталей, шт.

Недоліком критеріїв собівартості та приведених витрат є те, що вони визначають оптимальний варіант ТП по мінімуму витрат на виробництво продукції, тоді як в мовах сучасної економіки метою діяльності підприємств є одержання максимального прибутку. В свою чергу мінімальна собівартість продукції ще не гарантує її конкурентоздатність і отримання прибутку, необхідного для розвитку підприємства.

Прибуток займає лідируюче положення в ієрархії цілей виробничої організації. Як економічна мета він характеризує фінансовий результат підприємницької діяльності підприємств[3]. Прибуток є показником, що найбільш повно відображає ефективність виробництва, продуктивність праці, рівень собівартості, якість продукції та ін. Разом з тим, прибуток впливає на зміцнення комерційної діяльності, інтенсифікацію виробництва та є джерелом забезпечення внутрішньогосподарських потреб підприємств. За рахунок прибутку здійснюється фінансування заходів науково-технічного і соціально-економічного розвитку. Так, наприклад, 89% американських компаній різних галузей економіки ставлять на перше місце серед цілей своєї діяльності саме отримання прибутку. Тому основною метою кожного підприємства є одержання якомога більшого прибутку.

Величина прибутку залежить від ринкової ціни продукції та її собівартості. В умовах ринкової економіки ціна продукції визначається під дією ринкових факторів, основними з яких є попит та пропозиція і не залежить від технологічних особливостей виготовлення деталей. Тому,



основним фактором, який залежить від ТП виготовлення деталі і впливає на величину прибутку підприємства залишається собівартість.

На ціну, собівартість та прибуток підприємств впливають зміни в податковій, митній та іншій політиці держави. Таким чином, в умовах нестабільної економічної та соціально-політичної ситуації найбільш значимою фінансовою метою підприємства є одержання максимального прибутку в найбільш короткий строк. Цій меті у повній мірі відповідає критерій "інтенсивність маржинального прибутку"  $I_{II}$ , грн/хв, який відображає величину одержуваного маржинального прибутку від реалізації продукції, що припадає на одиницю часу, витраченого на її виробництво.

Цільова функція для визначення інтенсивності маржинального прибутку, тобто при визначенні собівартості деталі по методу часткового розподілення витрат має вигляд:

$$I_{IM} = \frac{C_d - C_3 - \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{(C_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{yB} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3p_j + C_{Ej} \right)}{\sum_{j=1}^m T_{шпкj}}$$

де  $C_d$  – ринкова ціна деталі, грн;

Цільова функція для визначення інтенсивності прибутку при розрахунку собівартості деталі по методу повного розподілення витрат має вигляд:

$$I_{II} = \frac{C_d - C_3 - \left( \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{(C_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{yB} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3p_j + C_{Ej} \right) + S_{II} \right)}{\sum_{j=1}^m T_{шпкj}}$$

Відповідно розрахунок величини прибутку та маржинального прибутку виконується за наступними залежностями:

$$\Pi = C_d - C_3 - \left( \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{(C_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{yB} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3p_j + C_{Ej} \right) + S_{II} \right),$$

$$\Pi_M = C_d - C_3 - \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^{p_j} \frac{(C_{PIij} + C_{Cij} / z_{ij} + 1) \cdot K_{yB} \cdot t_{Oij}}{T_{ij} \cdot z_{ij}} + 3p_j + C_{Ej} \right).$$

**Результати досліджень.** Для сформованих варіантів ТП обробки корпусної деталі (рис. 1) на рис. 2-4 наведено порівняльний аналіз розглянутих техніко-економічних критеріїв в залежності від величини виробничої партії деталей. На рис. 2-4: 1, 2, 3, 4 – варіанти ТП обробки деталі (табл. 1); а – розрахунок собівартості обробки методом повного розподілення

витрат; б - розрахунок собівартості обробки методом часткового розподілення витрат

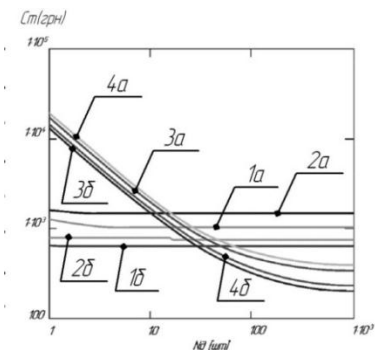


Рис. 2 – Залежності собівартості обробки від величини виробничої партії деталей

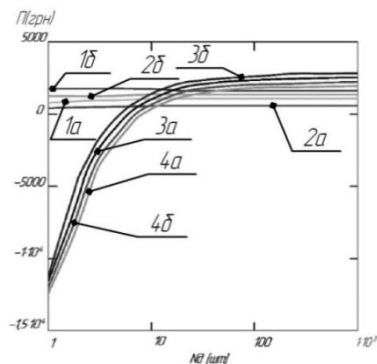


Рис. 3 – Залежності прибутку від величини виробничої партії деталей

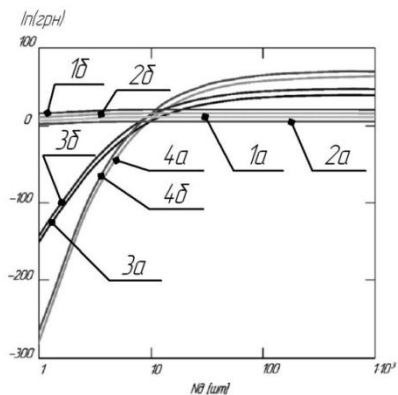


Рис. 4 – Залежності інтенсивності прибутку від величини виробничої партії деталей

Як бачимо, використання в якості техніко-економічного критерію прибутку, дозволяє зменшити величину критичної програми випуску деталей для випадків обробки деталі на верстатах з ЧПК у порівнянні з собівартістю обробки, а інтенсивність прибутку ще більше зменшує цю величину. Так, наприклад, собівартість виготовлення деталі на верстатах з ЧПК буде найменшою при величині виробничої партії більше 50-ти деталей ( графіки 3б та 4 б на рис. 2), а найбільший прибуток можна отримати при величині виробничої партії 27 деталей ( графіки 3а та 3б на рис. 3), тоді як максимальна інтенсивність прибутку буде спостерігати вже при 19 деталях у виробничій партії ( графіки 4а та 4 б на рис. 4). Також слід зазначити, що при такій виробничій партії деталей критерій інтенсивності прибутку дозволяє з економічної точки зору обробляти на верстатах з ЧПК заготовки, отримані різними методами лиття, тоді як максимальний прибуток буде одержаний при виготовленні заготовок з прокату. Таким чином, використання критерію інтенсивності прибутку дозволяє розширити межі ефективного застосування верстатів з ЧПК та заготовок, отриманих різними методами лиття.

Вибір оптимального ТП з урахуванням кількох показників здійснюється шляхом багатокритеріальної оптимізації. Необхідність багатокритеріальної оптимізації ТП пов'язана з тим, що окремі критерії не можна звести один до іншого і вони перебувають між собою в складному взаємозв'язку, який характеризується їх суперечливістю [4].

Для розглянутих варіантів ТП обробки корпусної деталі (табл. 1) була проведена багатокритеріальна оптимізація ТП методом вагових коефіцієнтів з використанням різних критеріїв оптимальності. Результати дослідження наведені у табл. 2.

Визначення собівартості методом часткового розподілення витрат дозволяє розширити межі ефективного застосування як верстатів з ЧПК, так і верстатів з ручним керуванням.

Таблиця 2 – Результати визначення оптимального варіанту технологічного процесу

Критерії оптимальності	Варіант технологічного процесу		
	Величина виробничої партії деталей		
Інтенсивність формоутворення та собівартість виготовлення, визначена методом повного розподілення витрат	№1 1 - 12	№3 13 - 24	№4 25 - 1000
Інтенсивність формоутворення та собівартість виготовлення, визначена методом часткового розподілення витрат	№1 1 - 34	№3 35 - 42	№4 43 - 1000
Інтенсивність формоутворення та інтенсивність прибутку	№1 1 - 11	№3 12 - 19	№4 21 - 1000
Інтенсивність формоутворення та інтенсивність маржинального прибутку	№1 1 - 8	№3 9 - 13	№4 14 - 1000

## **Висновки.**

1. Визначення оптимальних технологічних процесів обробки корпусних деталей доцільно проводити на підставі багатокритеріальної оптимізації з використанням критеріїв оптимальності, які відображають технологічні та економічні аспекти діяльності підприємства.

2. Використання в якості критеріїв оптимальності інтенсивності формоутворення та інтенсивності маржинального прибутку дозволяє розширити межі ефективного застосування металорізального обладнання.

3. Для підвищення економічної ефективності металорізального обладнання розрахунок собівартості обробки доцільно проводити методом часткового розподілення витрат.

**Список літератури:** 1. Многокритериальная оптимизация технологических систем механической обработки / Карпусь В. С., Котляр А. В. // Вестник машиностроения. – М.: Машиностроение, 2013. – № 6. – С. 76 - 83. 2. Савицька Г.В. Економічний аналіз діяльності підприємства. – Київ: Знання, 2007. – 668 с. 3. Алексеева М.М. Планирование деятельности фирмы. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 248 с. 4. Антушев Г.С. Методы параметрического синтеза сложных технических систем. – М.: Наука, 1989. – 88 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Karpus, V. E., Kotliar A. V. "Mnogokriterialnaja optimizacija tehnologicheskikh sistem mehanicheskoi obrabotki". Moscow. Vestnik machinostroenija. No. 6. 2012. 76-83. Print. 2. Savitskaja G. V. Ekonomichnij analiz djialnosti pidpriemstva. Kiev. Znannja. 2001. Print. 3. Aleksejeva M. M. Planirovanie dejatel'nosti firmu. Moscow. Finansu i statiatika. 2001. Print. 4. Antuchev G. P. Metodu parametricheskogo sinteza slojnuch tehniceskikh sistem. Moscow. Nayka. 1989. Print.

*Надійшла (received) 20.10.2014*

## **УДК 658.512**

**О.І. КОНДРАТЮК**, канд. техн. наук., доц. УПА, Харків;  
**А.О. СКОРКІН**, асистент УПА, Харків

### **РОЗРОБКА ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР ЗБОРКИ СКЛАДНИХ МАШИНОБУДІВНИХ ВИРОБІВ**

Велику питому вагу в загальному об'ємі складальних операцій займають операції по збірці типових з'єднань, що характеризуються високим рівнем монотонності праці, повторюваності робочих рухів, а також які не вимагають високої кваліфікації працівника. Виходячи з цього в даній роботі розглянуті принципи розробки організаційно-технологічних структур системи дрібносерійної зборки складних машинобудівних виробів на основі комплексного аналізу існуючих методів розробки структур збирання для дрібносерійного збирання. Зроблені висновки, щодо вибору раціональних структур зборки для конкретних умов та виду машинобудівних виробів

**Ключові слова:** технологічний процес складання, складальна одиниця, точність, робоче місце.

---

© О.І. Кондратюк, А.О. Скоркін, 2014

**Вступ.** Продуктивність праці в складальному виробництві залежить від ряду суб'єктивних чинників і її рівень має тенденцію періодичної зміни. Відповідно до цього потрібна корекція виробничих завдань і розробка організаційно-технічних заходів для забезпечення необхідної тривалості, що до випуску продукції.

**Постановка задачі:** Технологічний процес складання містить дії з установки і утворення з'єднань деталей, складальних одиниць у виріб. При цьому враховується доцільна техніко-економічна послідовність отримання виробу (рис. 1).



Рис. 1 – Інформаційна схема технологічної операції складання виробу

Якість складальної одиниці характеризується точністю відносного руху або розташування деталей в складальній одиниці, силовим замиканням, натягом в нерухомих з'єднаннях, проміжком в рухливих з'єднаннях, якістю прилягання поверхонь і іншими.

**Основний зміст:** Під складальною операцією розуміється процес безпосереднього формування складальної одиниці. Він, як правило, включає орієнтацію, з'єднання, регулювання і закріплення (фіксацію) деталей і складальних одиниць. Складання з'єднань умовно можна розділити на зборку з натягом і без натягу.

Зборка з натягом здійснюється або методом пластичної деформації, або тепловим методом. У свою чергу, тепловий метод реалізується за допомогою нагріву деталі, що охоплює, або охолодженням охоплюваної деталі.

Інформаційний зміст технології, залежно від участі технологічно значимих чинників, можна розділити на рівні:

*Постійні чинники:*

- специфіка операції - набір типових методик складання (джерело інформації - карта інструкції);
- організація робочого місця (джерело інформації - технологія, планування робочого місця);
- основне устаткування - конфігурація, габаритні розміри, розташування робочої зони, методика управління устаткуванням (зміна режимів роботи), специфіка зміни встановлюваного на ній оснащення, розташування органів управління і їх параметри (джерело інформації - технічна документація (паспорт, експлуатаційна інструкція і таке інше);

*Умовно постійні чинники:*

- пристосування - маса, конфігурація, габаритні розміри, способи його установки, кріплення, технологічні базові поверхні (елементи), елементи кріплення (джерело інформації - технічна документація (паспорт, експлуатаційна інструкція пристосування і таке інше);
- основний і допоміжний інструмент - маса, конфігурація, габаритні розміри, спосіб установки, функціональне призначення, методика використання (джерело інформації - технічна література, документація);
- засоби вимірювання - маса, конфігурація, габаритні розміри, функціональне призначення, методика використання (джерело інформації : паспорт, технічна література, документація);

*Змінні чинники:*

- стани "деталь – комплект – підвузол – вузол - виріб" - параметри деталей, що з'єднуються: маса, конфігурація, габаритні розміри; параметри базових і кріпильних поверхонь (джерело інформації - технологічний процес, складальні креслення, креслення деталей, технічні вимоги);
- - положення основного інструменту відносно поверхонь і деталей, що з'єднуються (джерело інформації - технологічний процес, робоча програма).

Таким чином, можна вважати, що будь-який елементарний складальний технологічний процес, в контексті реалізації внутрішньо операційної технології, своєю появою зобов'язаний збігу певних обставин технологічного, організаційного, технічного й ергономічного характеру. Тому представляється доцільним ввести ієрархічне розбиття множини властивостей об'єктів робочого місця на базові фізичні, геометричні характеристики і технічні, технологічні властивості.

При цьому, технологічний процес, як ініціатор виділення технічних властивостей, вносить логіку у взаємодію об'єктів робочого середовища через комбінації відповідних характеристик, які, у свою чергу, залежать від значимих, в тому або іншому ступені, чинників складального процесу.

Рівень побудови структури роботи з урахуванням принципової можливості реалізації руху в певному напрямі, де враховується величина протидії виконавчим одиницям (м'язам) діючих (силових) і статичних навантажень (маси, показників міцності). Параметри, що задовольняють можливості реалізації руху і здатність навантаження конструкцій предметів при маніпуляціях з ними (показники міцності) можна виразити таким чином (1):

$$\begin{cases} F_{\text{move}} \times k_T > F_{\text{reac}}, \\ m_o < m_{\text{max}}, \\ F_{\text{static}} < \frac{\sigma_{\text{max}} \times S_{\text{travers}}}{n}, \end{cases} \quad (1)$$

де:  $F_{\text{move}}$  – сила, що забезпечує рух, Н;

$k_T$  – коефіцієнт тертя;

$F_{\text{reac}}$  – реакція поверхні, Н;

$m_o$  - маса об'єкту, кг;

$m_{max}$  – маса, що максимально допустима для підйому, кг;

$F_{static}$  – статичне зусилля, що розвивається при маніпуляціях з предметом, Н;

$\sigma_{max}$  – гранична допустима напруга матеріалу конструкції предмета (при стискуванні, розтягуванні), Н/мм<sup>2</sup>;

$S_{travers}$  – площа поперечного перерізу предмета, мм<sup>2</sup>;

$n$  – коефіцієнт запасу міцності.

2. Рівень побудови процесу з урахуванням особливостей фізичних характеристик вузлів, деталей та їхніх поверхонь. Наявність поверхні, стабільність її динамічних характеристик (швидкість і спрямованість руху), величина притуплення (радіус кривизни : 1 0,1 мм - «притуплена», < 0,1 мм - гостра кромка) температура (> 51<sup>0</sup> С - дуже гаряча, 51<sup>0</sup> ÷ 41<sup>0</sup> С - гаряча, 34<sup>0</sup> ÷ 30<sup>0</sup> С нормальна, < 10<sup>0</sup> С холодна і таке інше).

3. На рівні пристосування виконавця до робочого простору в ході виконання основних і допоміжних переходів, мають значення характеристики опорних, настановних поверхонь: лінійна величина поверхні - протяжність, мм; кут її нахилу по відношенню до сусідньої – ухилу, град.; чи представляє вона виступ (западину), мм; показник площинної (радіус кривизни : >1000 мм - «плоска», 1000.50 мм - «крива», 50.1 мм - «скруглення»), показники шорсткості поверхні, вібрації і таке інше.

4. Рівень дистанційного орієнтування в системі розташування поверхонь, що переміщуються і стаціонарних об'єктів робочого місця в просторових коридорів, способи розміщення елементарних поверхонь (координати об'єктів всередині робочого місця, в робочій зоні, розташування орієнтуючих елементів) і відстані між ними.

5. На рівні технічної взаємодії об'єктів необхідно визначити відповідні властивості предметів складального процесу - властивості, що визначають можливість взаємодії, суб'єкта і предметів складальної операцій, суб'єкта і інструментів при зміні стану технічних підсистем. Інструмент, предмет або інша технічна підсистема на робочому місці надає інформацію до інформаційної і функціональної моделі, пов'язаної з елементами процесу складання в такій послідовності (рис. 2).

6. Для умов реалізації технологічного процесу складання в технологічних зонах (зонах зберігання деталей, технологічного оснащення і інструментів, установки, базування, закріплення, транспортування виробу і таке інше) - мають значення властивості, що визначають способи взаємодії технічних підсистем.

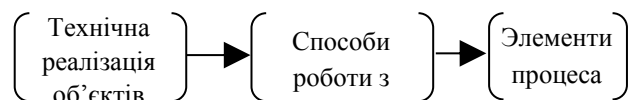


Рис. 2 – Схема відповідності технічних властивостей елементам процесу

Для вирішення кожного, з перелічених вище, завдань використовуються способи, засновані на технічній реалізації цих об'єктів.

**Висновки.** Запропоновані нові принципи проектування організаційно-технологічної структури системи дрібносерійної зборки складних машинобудівних виробів, пов'язані із застосуванням багаторівневого підходу до моделювання процесу складання на засадах логіко-лінвістичного опису моделі її елементів.

**Список літератури:** 1. Андрющенко В.А. Следящие системы автоматизированного сборочного оборудования. / В. А. Андрющенко// Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. - 246 с. 2. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения / Б.М. Базров// Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2005. - 736 с. 3. Балабанов А.Н. Краткий справочник технолога-машиностроителя. / А.Н. Балабанов // - М.: Изд-во стандартов, 1992. - 464 с. 4. Балакшин Б.С. Теория и практика технологии машиностроения. / Б.С. Балакшин // М.: Машиностроение, 1982. - 367 с. 5. Вартанов М.В. Обеспечение технологичности конструкции изделий при их многоуровневом преобразовании в структуру процесса автоматизированной сборки / М.В. Вартанов //Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специалностям: 05.02.08 – технология машиностроения, 05.13.06 – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям). Москва, - 2005. – 419с.

**Bibliography (transliterated)** 1. Andriushchenko V.A. Sledjashhie sistemy avtomatizirovannogo sborochnogo oborudovaniya. Leningrad: Mashinostroenie. Leningr. otd-nie, 1979. - 246 P. 2. Bazrov B.M. Osnovy tehnologii mashinostroeniya. Uchebnik dlja vuzov. Moscow: Mashinostroenie, 2005. - 736 P. 3. Balabanov A.N. Kratkij spravochnik tehnologa-mashinostroitelja. - Moscow: Izd-vo standartov, 1992. - 464 P. 4. Balakshin B.P. Teorija i praktika tehnologii mashinostroeniya. Moscow: Mashinostroenie, 1982. - 367 P. 5. Vartanov M.V. Obespechenie tehnologichnosti konstrukcii izdelij pri ih mnogourovnevom preobrazovanii v strukturu processa avtomatizirovannoj sborki. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehniceskikh nauk po speciestjam: 05.02.08 – tehnologija mashinostroeniya, 05.13.06 – avtomatizacija i upravlenie tehnologicheskimi processami i proizvodstvami (po otrasljam). Moscow, - 2005. – 419P.

*Поступила (received) 04.10.2014*

**УДК 658.52.011.56**

*А. А. КЛОЧКО*, д-р техн. наук, профессор НТУ «ХПИ»

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗУБООБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ КОЛЕС ОДНОШПИНДЕЛЬНОЙ И ДВУХШПИНДЕЛЬНОЙ СХЕМОЙ РЕЗАНИЯ**

Для чистовой зубообработки колес крупного модуля предложен метод прерывистого обката с использованием дисковых немодульных фрез (размеры фрезы не зависят от модуля), оснащенных керамическими пластинками и специальных фрезерных суппортов с одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания с учетом обеспечения всех основных установочных движений скоростных немодульных дисковых фрез. Метод прерывистого обката используется на зубострогальных и зубошлифовальных станках и обладает тем преимуществом, что в момент рабочего хода инструмента заготовка колеса неподвижна или совершает незначительный поворот, т.е. обработка протекает, по сравнению с методом обкатки с обеспечением наибольшей контактной жесткости инструмента и определяет способность поверхностных слоев зубчатых колес, находящихся в контакте с режущей кромкой инструмента, обеспечивать процесс резания.

© А.А. Ключко, 2014



**Ключевые слова:** зубообработка, схемы резания, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, одношпиндельные и двухшпиндельные супорты

**Введение.** Для чистовой обработки закаленных колес на станках мод. 5А342, 5343, фирмы «МААГ» разработаны две конструкции специальных фрезерных суппортов: одношпиндельная, где в качестве станочной линии зацепления пары инструмент – деталь используется нормаль к эвольвентам, расположенная горизонтально, профильный угол зубьев инструмента- дисковой фрезы близок к  $\alpha_u = 0^\circ$ . Фреза в первоначальный момент обработки расположена со смещением относительно оси колеса на расчетное расстоянии [1, 3, 5]. Обработка правой и левой боковых поверхностей зубьев колеса осуществляется отдельно, обработка ведется за два прохода; двухшпиндельная, реализующая схему резания при одновременной обработке обеих боковых поверхностей зубьев колеса с использованием двух дисковых фрез, расположенных с наклоном на угол  $\alpha_p = 20^\circ$ . Профильный угол зубьев фрезы равен  $\alpha_p = 0^\circ$ .

**Основная часть.** Одношпиндельный суппорт рис. 1 и рис. 2 состоит из опорной плиты 1, шпинделя 2, оправки 3, шпонки торцевой 4, крепежных винтов 5, электродвигателя 7, клиноременной передачи 8. Дисковая фреза 6 закрепляется консольно на того, какую сторону зубьев необходимо обработать, на суппорте у станавливают фрезу леворежущую или праворежущую.

В процессе обработки дисковая фреза совершает возвратно-поступательное движение вверх-вниз, аналогично движению зубострогальной гребенки. После обработки одной боковой поверхности всех зубьев колеса на суппорте меняется, например, леворежущая фреза на праворежущую, изменяется направление вращения и ход колеса на обратные и производится обработка другой боковой поверхности зубьев.

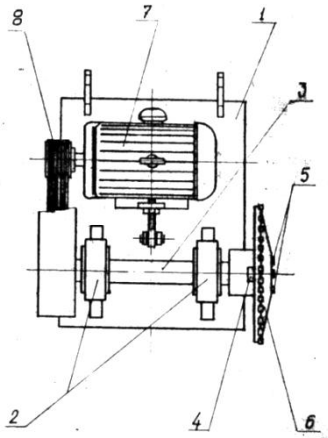


Рис. 1 – Принципиальная схема одношпиндельного спецсуппорта к зубострогальному станку фирмы «МААГ»

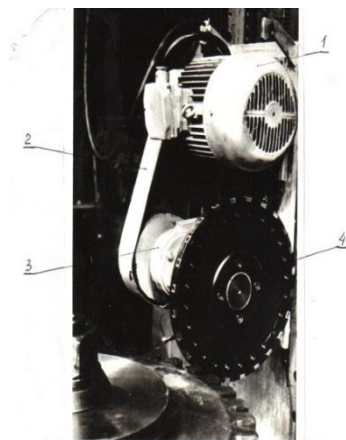


Рис. 2 - Рабочая конструкция одношпиндельного спецсуппорта к зубостругальному станку фирмы «МАОГ»: 1 - электродвигатель; 2 - клиноременная передача; 3 - шпиндель; 4 - дисковая фреза, оснащенная керамикой

Двухшпиндельный суппорт состоит из двух шпиндельных головок (рис. 3), каждая из которых имеет независимый привод и наклонена на угол  $\alpha_0 = 20^\circ$ . Левая головка неподвижно закреплена на установочной плите. Правая головка перемещается в направляющих при помощи ходового винта в направлении, параллельном движению заготовки.

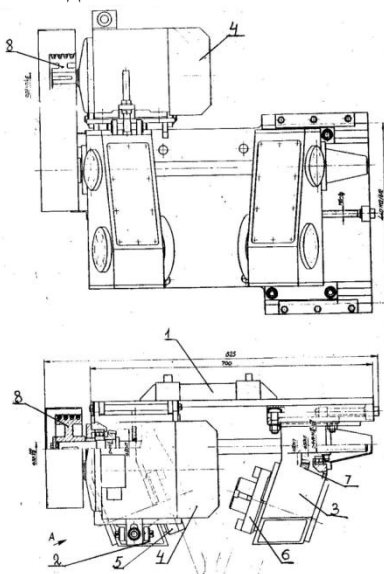


Рис. 3 – Принципиальная конструкция двухшпиндельного спецсуппорта к зубостругальному станку

Дисковые фрезы  $\phi 40$  мм приводятся во вращение электродвигателями мощностью  $P = 1,5$  кВт посредством червячных пар с передаточным отношением  $u = 4,75$ . Частота вращения дисковых фрез составляет 300 об/мин. Расстояние между дисковыми фрезам выбирается в зависимости от модуля обрабатываемого зубчатого колеса и изменяется в пределах от 75 мм до 150 мм. В качестве смазки червячной пары применяется нелегированное масло цилиндрическое марки 52 по ГОСТ 6411-76 [2, 4].

На рис. 4 показана принципиальная конструкция одношпindelного спецсуппорта к станку мод. 5А342. Суппорт состоит из основания 1, присоединяемого к колонне станка, поперечной траверсы 2, на которой размещена инструментальная каретка 3 с индивидуальным приводом 4 и дисковой фрезой 5. Тангенциальное перемещение  $V_m$  траверсы 2 осуществляется с помощью ходового винта 6, а возвратно-поступательные перемещения вверх-вниз каретки 3 с инструментом осуществляются с помощью высокомоментного электродвигателя и шариковой винтовой пары (ШВП) 8.

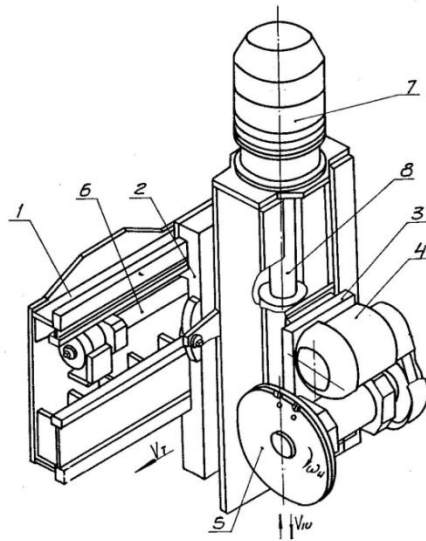


Рис. 4 – Принципиальная конструкция одношпindelного спецсуппорта к вертикально-зубофрезерному станку мод. 5А342

Отличительными особенностями спецсуппорта к станку мод. 5343 являются (рис. 5) наличие двух шпинделей 1 и 2, расположенных по отношению к основанию 3 под углом  $\alpha_0 = 20^\circ$ , и увеличенная длина направляющих траверсы 4, позволяющая обработать зубчатые колеса с

длиной зуба  $b = 1500$  мм.

Каждая из двух дисковых фрез 5 и 6 имеет индивидуальные приводы 7 и 8, а расстояние между ними регулируется с помощью установочных винтов 9 и 10. Суппорт позволяет обрабатывать улучшенные и закаленные зубчатые колеса с модулем зубьев до  $m=50$  мм, углом наклона зубьев до  $\beta=15^\circ$  и наружным диаметром до  $D_a=3000$  мм.

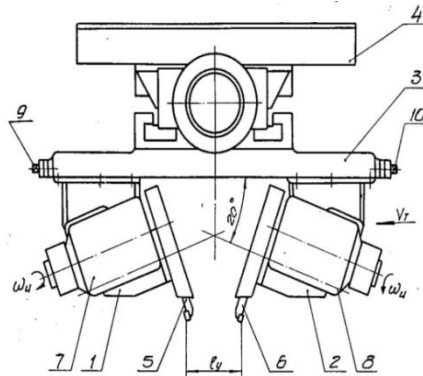


Рис. 5 – Принципиальная конструкция двухшпиндельного спецсуппорта к зубофрезерному станку мод. 5343

Оба суппорта предназначены для чистовой обработки закаленных колес и приводных шестерен рудо- и углеразмольных мельниц взамен зубошлифования и с целью исключения кооперации производства или приобретения импортного дорогостоящего зубошлифовального оборудования.

**Выводы.** Для обеспечения высокопроизводительной обработки закаленных крупномодульных колес на зубофрезерных станках мод. 5А342, 5343, зубострогальных станков «МААГ» необходимо применение специальных одно и двухшпиндельных суппортов, обеспечивающих качество и точность зубообработки.

**Список литературы:** 1. Тимофеев Ю. В. Новая технология скоростной обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес специальными дисковыми фрезами / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вип. 118. – С. 139–144. 2. Шелковой А. Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ : зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210. 3. Пат. 2082567 Российская Федерация, МКИ В23 F 5/00. Зубообрабатывающий станок / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печень, А. А. Клочко, Г. Н. Руин, С. П. Налетов, Н. И. Аристархов, В. Д. Коротков, Н. А. Лобанов, А. В. Кузнецов. – № 92009350 ; заявл. 01.12.92 ; опубл. 27.06.97, Бюл. № 18. – 6 с. : ил. 4. Технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Е. В. Мироненко // Вісник Донецького

Национального технического университета: сб. науч. пр. Серия: Машиностроение и машиностроение. – Донецк : ДНТУ, 2013. – № 1 (10) (2013). – С. 131–140. 5. Клочко А. А. Области оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. А. Клочко, Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 332–343.

**Bibliography (transliterated):** 1. Timofeev, U.V., A.A. Klochko and V. F. Shapovalov. *New technology high-speed machining of hardened gears coarse-grained special disc cutter* P. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinopriladobuvannyya that transport." -Sevastopol, 2011. - VIP. 118. -P. 139-144. 2. Shelkovoy A.N., E.V. Mironenko and A.A. Klochko. *General principles of modeling the optimal control parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gear* P. News SevNTU: ST. ScienceP. pr. Series "Mashinopriladobuvannyya that transport." - Sevastopol, 2013. - Vip. 140. - P. 203-210. 3. V.F. Shapovalov, et al. Pat. 2082567 Russian Federation, B23 MKI F 5/00. *Gear Machine* / - No 92009350; appl. 01/12/92; publ. 27.06.97, Bul. No 18. -6 P. : yl. 4 Timofeev U.V., et al. *Technological bases ensure productivity, accuracy and quality gear treatment quenched coarse-grained gear* P. News of Donetsk Natsionalnogo tehnicnogo universitetu: ST. ScienceP. pr. Seriya: Mashinobuduvannyya i mashinoznavstvo. - Donetsk: DNTU, 2013. - No 1 (10) (2013). - P. 131-140. 5. Klochko A.A., U.V Timofeev and A. N., Shelkovoy. *Fields optimal. control the parameters of precision, quality and performance gear treatment quenched coarse-grained gear* P. Reliable tools and optimization of technological systems: Sat. scientific. tr. - Kramators'k: DGMA, 2012. - Vol. 32. - P. 332-343.

*Поступила (received) 07.10.2014*

## УДК 621.9.15

**Е.В. МИРОНЕНКО**, д-р. техн. наук, проф. ДГМА, Краматорск;  
**С.Л. МИРАНЦОВ**, канд. техн. наук, доц. ДГМА, Краматорск;  
**Д.Г. КОВАЛЕВ**, ассистент, ДГМА, Краматорск

### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЯЖЕЛОГО КАРУСЕЛЬНОГО СТАНКА

Предлагаются модель технологической системы тяжелого карусельного станка. Рассмотрена структурная модель динамической системы со сборным инструментом для тяжелых станков в целом и отдельно ее составляющие элементы. Предложена расчетная схема системы «ползун - инструмент». Представлен имитационная модель поведения технологической системы, которая реализована в программной среде Simulink MatLab. Сделаны выводы о динамических свойствах режущего инструмента при заданных условиях обработки.

**Ключевые слова:** карусельный станок, инструмент, модель, ползун, резание, алгоритм.

**Введение.** Характерной особенностью эксплуатации режущего инструмента и назначения элементов режима резания на тяжелых карусельных станках является то, что на различных операциях существуют большие отличия в жесткости и, особенно, виброустойчивости технологической системы. Производительность механической обработки на тяжелых станках, в частности на карусельных станках, определяется множеством факторов. Одним из факторов, ограничивающих

---

© Е.В. Мироненко, С.Л. Миранцов, Д.Г. Ковалев, 2014

производительность, являются процессы, возникающие в технологической системе при обработке. К таковым относятся случайные погрешности и колебания, возникающие на операциях черного и чистового точения и растачивания.

Одной из ряда причин, вызывающих колебания в технологической системе карусельного станка при точении и растачивании является большой вылет ползуна, а также недостаточная жесткость сборной конструкции инструмента, что приводит к снижению жесткости технологической системы.

Для аналитических исследований динамических явлений, возникающих в процессе резания на тяжелых карусельных станках, предложена структурная и математическая модель технологической системы.

Данная модель основана на результатах анализа конструкций и конструктивных особенностей ряда тяжелых карусельных станков с диаметрами планшайбы  $D = (6300 \dots 12000)$  мм. В частности для построения модели были рассмотрены станки моделей 1532, 1565, 1570, 1580Л, используемые в условиях ПАО «ЭМСС» и ПАО «НКМЗ» для обработки крупногабаритных корпусных деталей массой  $m = 20000$  кг (рис. 1).



Рис. 1 – Крупногабаритные корпусные детали обрабатываемые на тяжелых карусельных станках в условиях ПАО «ЭМСС» и ПАО «НКМЗ»: а – наружная обработка, крупногабаритной корпусной детали; б – растачивание корпусной детали

**Основная часть.** При исследованиях динамических явлений чаще всего используется модель замкнутой динамической системы, в которую входит процесс резания, эквивалентная упругая система (ЭУС) станка, а также учитывается фазовая характеристика изменения силы резания [1].

При обработке резанием на тяжелых карусельных станках заготовки, как правило, являются жесткими. Размеры заготовки и инструмента определяются типоразмером станка, который можно принять за косвенный показатель средней жесткости и виброустойчивости технологической системы.

В данной статье для построения модели технологической системы тяжелых карусельных станков, расчета и анализа динамических явлений предлагается структурная модель, включающая в себя сборный инструмент

как отдельную упругую подсистему инструмента, включенную параллельно ЭУС станка. Структурная модель динамической системы со сборным инструментом для тяжелых карусельных станков представлена на рис. 2.

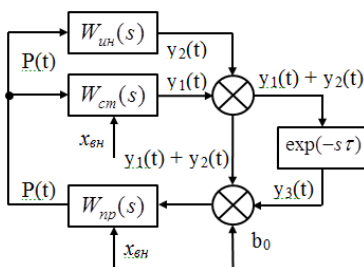


Рис. 2 – Структурная модель динамической системы со сборным инструментом для тяжелых станков

где  $W_{ин}(s)$  - передаточная функция подсистемы инструмента;

$W_{ст}(s)$  - передаточная функция эквивалентной упругой системы станка

$W_{мп}(s)$  - передаточная функция процесса резания.

Рассмотрим составляющие элементы структуры. Технологическая система тяжелого карусельного станка «портал - ползун - инструмент – заготовка», может быть представлена расчетной схемой, которая имеет вид, представленный на рис. 3.

Для построения расчетной схемы и модели использовались следующие допущения:

- технологическая система рассматривается как замкнутая процессом резания совокупность элементов с сосредоточенными массами, соединёнными между собой линейными упругими и диссипативными связями;
- все упругие деформации и перемещения элементов технологической системы, возникающие при действии составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  происходят в упругих элементах системы;
- с учетом массы и габаритов обрабатываемой детали и габаритов обрабатываемой детали, последняя рассматривается как абсолютно жесткий элемент технологической системы;
- режущий инструмент рассматривается как подсистема, состоящая из корпуса, блока, режущего элемента (режущей пластины) и элементов механического закрепления, соединенными между собой линейными упругими и диссипативными связями.

Анализ ранее проведенных экспериментальных исследований жесткости несущих систем тяжелых карусельных станков [6] показывает, что амплитуда колебаний системы «ползун - инструмент» многократно превышают амплитуду колебаний элементов несущей системы станка.

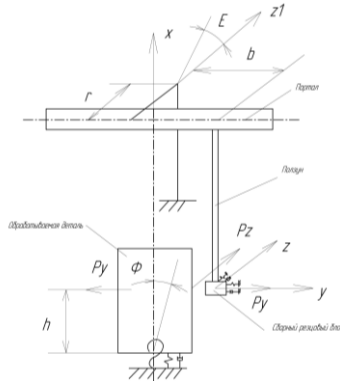


Рис.3 – Расчетная схема технологической системы «портал-ползун-инструмент-заготовка»

В связи с этим расчетную схему технологической системы можно рассматривать в более простом виде, а именно в виде подсистемы «ползун-инструмент», как показано на рис. 4.

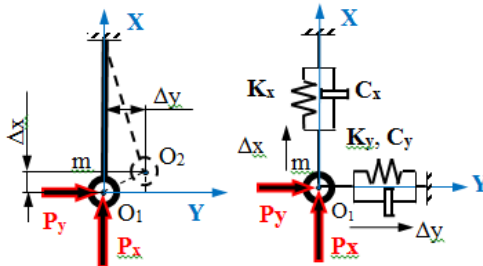


Рис. 4 – Расчетная схема технологической системы карусельного станка

В представленной на рис. 4 расчетной схеме системы «ползун - инструмент», ползун идеализируется вертикально расположенной защемленной невесомой балкой с сосредоточенной на конце массой  $m$ . Под действием периодически изменяющихся составляющих силы резания сосредоточенная на конце балки масса  $m$  совершает продольные и поперечные колебания относительно положения равновесия  $O_1$ . При этом упругие перемещения определяются величинами  $\Delta x$  и  $\Delta y$ . Жесткость системы в направлении осей координат  $X$  и  $Y$  будет определяться выражениями

$$K_x = \frac{EF}{l}; K_y = \frac{EJ}{3l^3}; \quad (1)$$

где  $l, E$  – длина балки и модуль упругости первого рода соответственно;  $F, J$  – площадь поперечного сечения и момент инерции соответственно.



Коэффициенты демпфирования  $C_x$  и  $C_y$  обуславливаются наличием сил трения в подвижных соединениях системы ползуна и наличием вязкого трения в материале, из которого ползун изготовлен. С учетом наличия в рассматриваемой системе сборной конструкции инструмента и обрабатываемой на станке детали, расчетная схема технологической системы может быть представлена в структурном виде, как показано на рис. 5.

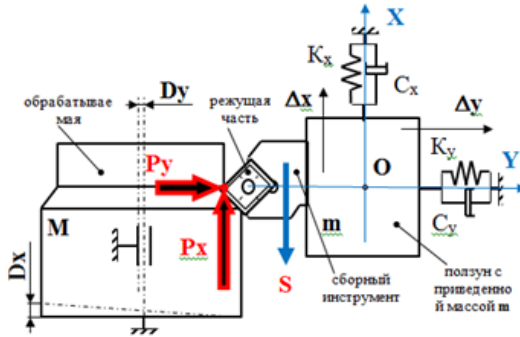


Рис. 5 – Структурная расчетная схема технологической системы тяжелого карусельного станка

Выполнив подстановку выражений, определяющих кинетическую энергию системы и выражения для обобщенных сил в уравнение Лагранжа, получим уравнения движения элементов рассматриваемой динамической системы.

Силу резания и ее составляющие рассматриваем как величину, зависящую от физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента, а также толщины  $a(t)$  и ширины срезаемого слоя  $b(t)$  [1].

$$P(t) = K \cdot a(t) \cdot b(t)$$

где  $K$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров инструмента,  $\text{H}/\text{m}^2$ ;  $a(t)$ ,  $b(t)$  – соответственно толщина срезаемого слоя и ширина срезаемого слоя, определяемые заданной глубиной резания и подачей инструмента, мм.

При колебаниях в технологической системе, которые возникают при точении, упругие перемещения инструмента и элементов технологической системы относительно обрабатываемой детали, что приводит соответственно, к изменению толщины  $a(t)$  и ширины  $b(t)$  среза.

Рассмотрим изменение площади срезаемого слоя при точении и растачивании на карусельном станке, вызванное упругими перемещениями элементов технологической системы относительно обрабатываемой детали (рис.6).

С учетом выражений (2) получаем зависимости, определяющие изменение составляющих силы резания  $P_x(t)$  и  $P_y(t)$  в процессе колебаний инструмента:

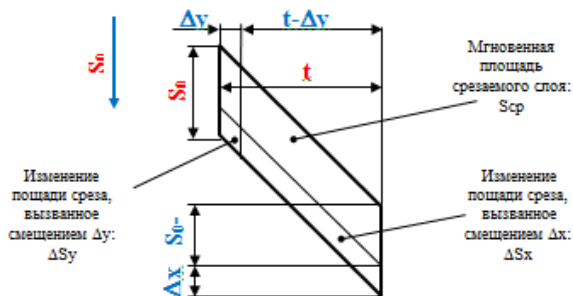


Рис. 6 – Схема изменение площади среза при точении и растачивании на карусельном станке, вызванное колебаниями инструмента по осям X и Y

$$P_x(t) = \frac{K_{px}}{\sin \varphi} K_p(t) [S_0 + \Delta D_x \cdot \sin(\omega t + q_0) - x(t) - x(t - \tau)] [t - y(t) - y(t - \tau)]; \quad (3)$$

$$P_y(t) = \frac{K_{py}}{\sin \varphi} K_p(t) [t_0 + \Delta D_y \cdot \sin(\omega t + q_0) - y(t) - y(t - \tau)] [S_0 - x(t) - x(t - \tau)];$$

где  $\Delta D_x, \Delta D_y$  – соответственно, неточность установки детали по осям координат, мм;

$K_p(t)$  – коэффициент, определяющий изменение сил резания из-за случайных погрешностей, возникающих при обработке

$\omega$  – частота вращения обрабатываемой детали, рад/с;

$q_0$  – начальная фаза вращения детали, рад;

$\tau$  – время одного оборота детали, с;

Для пучения уравнений, описывающих движение элементов сборного резца, примем, что составляющие силы резания приложены к центру масс пластины, а крутящими моментами, возникающими в результате перенесения точки действия сил, будем пренебрегать. Силы трения между элементами механического крепления, которые действуют на режущий элемент, пропорциональны скорости перемещения, а силы упругости пропорциональны самим перемещениям [2].

В силу конструктивных особенностей режущих частей сборных резцов перемещение центра масс пластины складывается из двух перемещений  $\xi$  и  $\psi$ , векторы которых не совпадают с направлениями осей X и Y глобальной системы координат. Для устранения этого неудобства и облегчения получения уравнений, описывающих колебания режущей пластины инструмента введем дополнительно локальную систему координат  $\Xi - \Psi$ , которая повернута относительно глобальной системы координат на угол  $\varphi$  таким образом, что ось  $\Xi$  будет параллельна главной режущей кромке пластины, а ось  $\Psi$  – перпендикулярна главной режущей кромке.

Предлагаемая расчетная схема сборного инструмента представлена на рис. 7. [2]

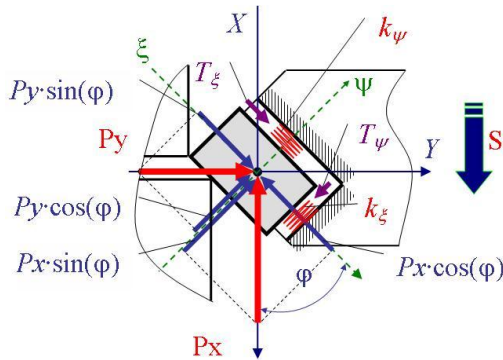


Рис 7 – Расчетная схема сборного реза

Где  $P_x, P_y$  – осевая и радиальная составляющие силы резания;

$P_{x_{\xi}}, P_{x_{\psi}}, P_{y_{\xi}}, P_{y_{\psi}}$  – проекции осевой и радиальной составляющих силы резания, рассматриваемые в локальной системе координат

$\Xi - \Psi; k_{\xi}, k_{\psi}$  – коэффициенты жесткости крепления режущей пластины в направлении локальных осей координат

$\Xi$  и  $\Psi; T_{\xi}, T_{\psi}$  – силы трения, действующие на режущую пластину и рассматриваемые в локальной системе координат.

Рассматривая движение элементов реза, необходимо определить связь между перемещениями и проекциями действующих сил в глобальной и локальной системах координат.

Выразим величины  $F_{\xi}$  и  $F_{\psi}$  через значения осевой и радиальной составляющих силы резания  $P_x$  и  $P_y$ , в результате получим исходную систему дифференциальных уравнений в виде:

$$\begin{cases} m\ddot{\xi} + c_{\xi}\dot{\xi} + k_{\xi}\xi = P_x \cos(\varphi) + P_y \sin(\varphi) \\ m\ddot{\psi} + c_{\psi}\dot{\psi} + k_{\psi}\psi = -P_x \sin(\varphi) + P_y \cos(\varphi) \end{cases} \quad (4)$$

С использованием полученных выражений, (2,3,4,5) описывающих процесс резания, движение элементов ЭУС и подсистемы сборного инструмента в процессе колебаний [3], система дифференциальных уравнений, описывающая движение элементов технологической системы тяжелого карусельного станка принимает вид (5).

Для решения системы уравнений (10) и выполнения моделирования удобно воспользоваться одним из численных методов решения систем дифференциальных уравнений с программной реализацией на ЭВМ [5].

С этой целью модель технологической системы тяжелого карусельного станка реализована в пакете Simulink MatLab виде структурной модели процесса (рис.8).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 m\ddot{x}_{cm}(t) + C_x \dot{x}_{cm}(t) + K_x x_{cm}(t) = P_x(t); \\
 m\ddot{y}_{cm}(t) + C_y \dot{y}_{cm}(t) + K_y y_{cm}(t) = P_y(t); \\
 T_{11}^2 \ddot{\xi}(t) + T_{12} \dot{\xi}(t) + \xi(t) = (P_x(t) \cos(\varphi) + P_y(t) \sin(\varphi)) / k_{\xi}; \\
 T_{21}^2 \ddot{\psi}(t) + T_{22} \dot{\psi}(t) + \psi(t) = -(P_x(t) \sin(\varphi) + P_y(t) \cos(\varphi)) / k_{\psi}; \\
 P_x(t) = \frac{K_{px}}{\sin \varphi} K_p(t) [S_0 + \Delta D_x \cdot \sin(\omega t + q_0) - x(t) - x(t - \tau)] [t - y(t) - y(t - \tau)]; \\
 P_y(t) = \frac{K_{py}}{\sin \varphi} K_p(t) [t_0 + \Delta D_y \cdot \sin(\omega t + q_0) - y(t) - y(t - \tau)] [S_0 - x(t) - x(t - \tau)]; \\
 y_{ин}(t) = -\xi(t) \sin(\varphi) + \psi(t) \cos(\varphi); \\
 x_{ин}(t) = -\xi(t) \cos(\varphi) - \psi(t) \sin(\varphi); \\
 x(t) = x_{cm}(t) + x_{ин}(t); \\
 y(t) = y_{cm}(t) + y_{ин}(t);
 \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $x_{cm}(t)$ ,  $y_{cm}(t)$  – соответственно, упругие перемещения элементов ЭУС станка, определяемые в системе координат  $X - Y$ ;

$x_{ин}(t)$ ,  $y_{ин}(t)$  – соответственно, упругие перемещения, возникающие в подсистеме сборного инструмента, определяемые в системе координат  $X - Y$ ;

$\xi(t)$ ,  $\psi(t)$  – соответственно, упругие перемещения, возникающие в подсистеме сборного инструмента, определяемые в локальной системе координат  $\Xi - \Psi$ ;

$x(t)$ ,  $y(t)$  – соответственно, суммарные упругие перемещения элементов, определяемые в системе координат  $X - Y$ ;

В приведенной на рис. 8 модели приняты следующие обозначения:

- *Constant6*, *Constant7* – соответственно подача инструмента  $S_0$ , мм/об и заданная глубина резания  $t$ , мм;
- *Sine Wave0*, *Sine Wave1* – блоки функций, моделирующих радиальное биение детали в следствии неточности ее установки в патроне, мм;
- *Constant1*, *Constant4* – блоки, задающие время одного оборота детали, для моделирования движения инструмента по «следу», с;
- *Variable Time Delay1*, *Variable Time Delay2* – блоки передаточных функций  $W_{x\tau}(s)$ ,  $W_{y\tau}(s)$  определяющие запаздывание, возникающее вследствие движения режущей кромки по следу предыдущего прохода;
- *Constant2*, *Constant3* – соответственно значения удельных значений составляющих силы резания  $K_{py}$ ,  $K_{px}$ , Н;
- *Uniform Random Number0*, *Uniform Random Number1* – блоки функций, моделирующие возникновение случайных погрешностей в технологической системе при обработке  $\Delta K_p$ ;
- $Wx1(s)_{\text{эус}}$ ,  $Wy1(s)_{\text{эус}}$  – блоки передаточных функций ползуна, определяющие упругие перемещения  $\Delta x$  и  $\Delta y$  в зависимости от действующего значения составляющих силы резания;
- $Wx1(s)_{\text{инс}}$ ,  $Wy1(s)_{\text{инс}}$  – блоки передаточных функций сборного инструмента, определяющие упругие перемещения  $\Delta x$  и  $\Delta y$  в зависимости от действующего значения составляющих силы резания.

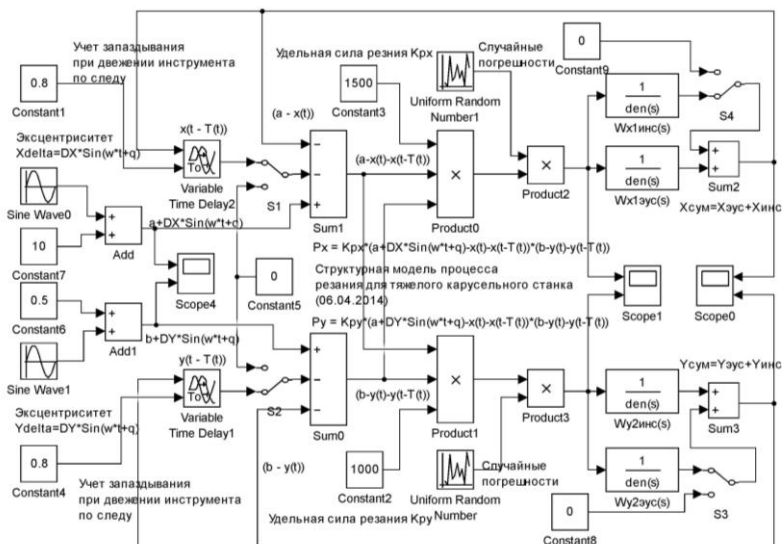


Рис. 8 – Структурная модель процесса точения на тяжелом карусельном станке с учетом сборной конструкции инструмента

Кроме описанных функциональных элементов, в структуре использованы блоки, реализующие математические операции суммирования, вычитания и умножения (*Sum*, *Product*), управляемые пользователем ключи для замыкания и размыкания цепей структуры, а также блоки визуализации выходных величин *Scope0* – перемещения инструмента  $\Delta x(t)$  и  $\Delta y(t)$ ; *Scope0* – составляющих силы резания  $P_x(t)$  и  $P_y(t)$ .

Процесс моделирования и вычислений динамических характеристик технологической системы выполняется в следующем порядке:

- задается время, в течении которого производится моделирование динамических процессов, возникающих в технологической системе;
- задаются исходные данные: глубина резания  $t_0$ , мм (блок *Constant7*); подача инструмента  $S_0$ , мм/об (*Constant6*); неточность установки детали  $D_x$ ,  $D_y$ , мм (*Sine Wave0*, *Sine Wave1*); время одного оборота детали, с (*Constant1*, *Constant4*); удельные значения составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ , Н/мм<sup>2</sup> (*Constant2*, *Constant3*), коэффициенты случайных погрешностей (*Uniform Random Number0*, *Uniform Random Number1*);
- определяются текущие значения составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ , причем при помощи переключателей *S1* и *S2* можно включить/выключить подачу сигнала, определяющего фазовую характеристику процесса резания, а числовые значения сил контролировать при помощи блока визуализации сигналов *Scope1*;
- определение упругих перемещения элементов технологической системы

тяжелого карусельного станка, путем численного интегрирования передаточных функций  $W_{x1}(s)_{эус}$ ,  $W_{y1}(s)_{эус}$  ЭУС станка и подсистемы сборного инструмента  $W_{x1}(s)_{инс}$ ,  $W_{y1}(s)_{инс}$ , причем подсистему сборного инструмента можно исключить из вычислительного процесса при помощи переключателей  $S3$  и  $S4$ , а результаты вычислений визуализируются блоком *Scope0*;

В качестве примера на рис. 9 приведены графики перемещения инструмента  $\Delta x(t)$  и  $\Delta y(t)$  в процессе обработки и изменение составляющих силы резания  $P_x(t)$  и  $P_y(t)$ .

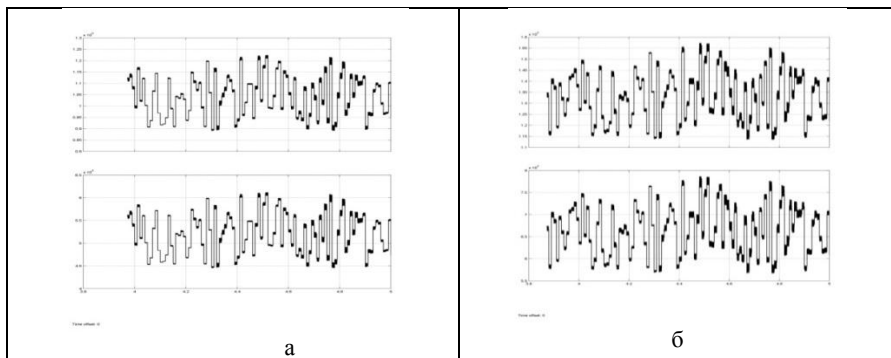


Рис. 9 – Расчетная виброграмма перемещения инструмента  $\Delta x(t)$  и  $\Delta y(t)$ : а -  $t=18\text{мм}$   $s=0,5\text{мм/об}$   $l=9350\text{мм}$ ; б -  $t=18\text{мм}$   $s=1,0\text{мм/об}$   $l=9350\text{мм}$ .

Моделирование относительных колебаний с целью сравнения уровней относительных колебаний резца при резании выполнялось с разными режимами резания применительно к следующим условиям представленными в табл. 1

Таблица 1 – Режимы резания при моделировании измерений относительных колебаний

№ варианта	Режимы резания				Вылет ползуна	
	t мм	Подача S		n об/мин		Vрез. м/мин
		мм/об	мм/мин			
1	12	0,5	5,6	11,8	38,4	9350
2	12	1,0	11,8			
3	14	0,5	5,6			
4	14	1,0	11,8			
5	18	0,5	5,6			
6	18	1,0	11,8			

**Выводы.** 1. В работе предложена структурная модель технологической системы тяжелых карусельных станков отличительной особенностью которой является наличие подсистемы сборного инструмента. 2. Для моделирования

динамических явлений при обработке на тяжелых карусельных станках предложена математическая модель и имитационная модель учитывающая основные технологические параметры влияющие на процесс резания при обработке крупногабаритных деталей на тяжелых карусельных станках. 3. Имитационная модель поведения технологической системы реализована в программной среде Simulink MatLab.

**Список литературы:** 1. Повышение виброустойчивости карусельного станка 1532. Отчет, М., ЭНИМС, 1980. 2. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Под редакцией. *И.А. Биргера и Я.Г. Пановко*. т.3. М., «Машиностроение», 1968. 3. *Грановский Г.И.* Обработка результатов экспериментальных исследований резания металлов. - М.: Машиностроение, 1982. - 112 с. 4. *Душинский В.В., Кравченко С.Г.* Моделирование и оптимизация в машиностроении - К.: УМК ВО, 1992. - 304 с. 5. *Евтушенко К.Г., Мазурик В.П.* Программное обеспечение систем оптимизации. - М.: Знание, 1999. - 48 с. 18. 6. Пуш А. В. Моделирование и мониторинг станков и станочных систем // СТИН. -2000. - №9. - С. 12.

**Bibliography (transliterated):** 1. Increased vibration resistance LATHES 1532. The report , Moscow, ENIMS , 1980. 2. Strength , stability, vibration. Handbook in three volume P. Edited by . *I.A. Birger and Y.G. Panovko* . V.3 . Moscow, "Engineering" , 1968. 3. *Granovsky G.I.* Processing of the results of experimental studies of metal cutting . - Moscow: Mechanical Engineering , 1982. - 112 p. 4. *Duschinsky V.V., Kravchenko P.G.* Simulation and optimization in engineering - Kiev: UMK VO , 1992. - 304 p . 5. *Yevtushenko K.G., V.P. Mazurik* Software systems optimization. - Moscow: Knowledge , 1999. - 48 p. 6. Push A. C. Modeling and monitoring machines and systems. STIN. -2000. No. 9. - P. 12.

*Поступила (received) 24.10.2014*

**УДК 658.8.01: 005.21**

***Е.В. КАМЧАТНАЯ-СТЕПАНОВА***, аспирантка, «НТУ «ХПИ»;  
***Ю. А. КЛОЧКО***, к.э.н., зав. каф. менеджмента ДИТМ МНТУ, Краматорск;  
***Н.Г. СИКЕТИНА***, ассистент, «НТУ «ХПИ»

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКИХ СТРАТЕГИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Обосновано стратегическое планирование как необходимый элемент деятельности машиностроительного предприятия в сфере повышения эффективности его деятельности. Применение аппарата синергетической теории в работе машиностроительного предприятия позволяет определить масштаб синергетического эффекта. Сделаны выводы о возможности достижения большей эффективности целостной системы, чем сумма эффектов взаимодействия отдельных подсистем и элементов, за счет использования синергетического подхода к стратегическому планированию деятельности предприятия.

**Ключевые слова:** планирование, стратегия, машиностроение, синергия, синергетический подход.

**Введение.** Исследования экономических процессов, происходящих в современных производственно-экономических системах, свидетельствуют об

© Е.В. Камчатная-Степанова, Ю. А. Клочко, Н. Г. Сикетина, 2014

нелинейном, неравновесном характере. Это доказывают перманентные кризисы, экономические подъемы и спады, рецессии и депрессии на внутренних и международных рынках. Итак, экономическое развитие возникает не только в форме количественного возрастания, но и в виде качественных трансформаций, которые происходят в динамической среде.

Экономическое развитие Украины в значительной мере зависит от состояния промышленности, ее способности удовлетворять как потребности в промышленной продукции внутри страны, так и на экспорт.

На эффективность работы промышленного предприятия и соответственно его конкурентоспособность, прежде всего, влияет себестоимость и критерии качества продукции [1, 2]. На ее формирование оказывают влияние технические, технологические, экономические и социальные факторы, действие которых обусловлено состоянием внешней и внутренней маркетинговой среды. Достижения в области компьютерных технологий позволяют автоматизировать процессы сбора и обработки информации по изменению экономической ситуации, прогнозировать ее дальнейшее развитие, определять ее влияние на технико-экономическую эффективность функционирования предприятия, моделировать различные варианты разрешения возникших трудностей, определять наиболее целесообразные мероприятия, обеспечивающие достаточную эффективность организации производства и сбыта продукции в условиях конкурентной среды. Повышение эффективности производства достигается на основе оптимизации использования ресурсов и сбалансированности процессов производства и рыночного спроса [3].

**Постановка проблемы.** Для машиностроительного предприятия наиболее типичными показателями эффективности его деятельности являются: прирост прибыли, снижение себестоимости продукции, экономия энергии, материалов [4]. Проведение маркетинговых исследований машиностроительного комплекса выявило несоответствие вышеупомянутых целевых показателей требованиям, диктуемым рынком. Ощутимого повышения эффективности производства можно достичь на основе оптимизации использования ресурсов, сбалансированности процессов производства и рыночного спроса. Поэтому возникает необходимость в поиске новой парадигмы развития этих процессов. Такая парадигма должна опираться на целостный синергетический подход к процессу производства и реализации продукции. В связи с вышесказанным, возникает необходимость применения на отечественных машиностроительных предприятиях синергетического подхода.

**Целью** статьи является обоснование использования синергетического подхода к стратегическому планированию на машиностроительном предприятии.

**Методология.** Исследованию проблем разработки системно-синергетического подхода и маркетинговых стратегий предприятий посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых, среди которых можно отметить: Я.Г.



Берсуцкого, В.-Б. Занга, С.П. Капицу, Н.Н. Лепу, Ю.Г. Лысенко, Г.Г. Малинецкого, Г. Хакена и других [5-10].

Машиностроение Украины — крупная отрасль обрабатывающей промышленности Украины. В 2013 году объём реализации продукции машиностроения Украины составил 109 млрд гривен (около \$13 млрд), что составляло 14,7% объёма реализации в обрабатывающей промышленности.

В современных условиях формирование оптимального удельного веса машиностроения в составе промышленного комплекса имеет большое значение в ускорении экономического развития Украины. Это обусловлено тем, что машиностроительное предприятие в процессе функционирования обеспечивает достижение совокупности определенных величин экономических показателей, характеризующих объемы производства, его структуру, распределение продукции, доведение ее до потребителя.

Экономическая стабильность Украины в большей мере зависит от развития промышленной промышленности, ее способности удовлетворять потребности страны в промышленной продукции. По данным Государственного комитета статистики, в январе-июне 2014 года наблюдался очередной спад промышленного производства — на 18% к аналогичному периоду 2013 г. Как показывает статистика, наибольшее снижение производства зафиксировано в транспортном машиностроении (-32,5%). Особенно это касается производства железнодорожного транспорта (-55,3%). Поэтому первостепенным направлением реформирования промышленной отрасли Украины должен стать стратегический принцип, базирующийся на бизнес-плане, который должен разрабатываться по каждому отдельно взятому предприятию, объединению. В условиях рыночной экономики существенно возрастает роль такой процедуры стратегического планирования, как прогнозирование. Это связано с тем, что рыночная экономика отличается постоянными колебаниями конъюнктуры, которые непосредственно отражаются на доходах каждого субъекта [11]. Чтобы не допускать крупных, подчас непоправимых ошибок, нужно оценивать возможные альтернативы рыночной динамики, поведения контрагентов и конкурентов на внутреннем и внешнем рынках. Именно поэтому стратегическое планирование становится необходимым элементом формирования рыночной стратегии и тактики на любом уровне хозяйствования. Ранее стратегическое планирование занимало основное место в плановой деятельности предприятия, придя на смену долгосрочному планированию. Долгосрочные цели предприятия в стратегическом планировании перестали быть простым отражением условий текущей деятельности, а оказываются результатом анализа изменений во внешней и внутренней среде предприятия. Главное отличие стратегического планирования от долгосрочного (в среднем 10-12 лет) - его вариативность, разработка альтернативных версий развития будущего предприятия [12].

Стратегическое планирование состоит из ряда взаимосвязанных сценариев. Стратегическое планирование выступает исходным пунктом при обосновании проектов долгосрочных программ и планов [13]. Это связано с тем, что многие

процессы, охватывающие программы и планы и выступающие в качестве важнейших факторов воспроизводства (спрос на продукцию на внутреннем и внешнем рынках, динамика производства машиностроительной продукции), имеют чрезвычайно высокую степень неопределенности [14]. Поэтому можно лишь прогнозировать их динамику и воздействие на социально-экономическое развитие страны в целом. Процесс стратегического планирования на предприятиях промышленной промышленности Украины можно разделить на две основные стадии: разработка стратегии деятельности организации (стратегическое планирование) и определение тактики реализации выработанной стратегии (тактическое или оперативное планирование).

В целом концепция стратегического развития предполагает разработку методологически реалистичного подхода к развитию промышленности на перспективу. В связи с этим, при разработке стратегического плана развития машиностроительного предприятия возникает необходимость использования синергетического подхода.

Синергетика – новый подход к познанию эволюционных кризисов, нестабильности и хаоса и овладению методами нелинейного управления сложными системами, находящимися в состоянии неустойчивости [7, 9].

Синергетика в переводе с латинского означает – “совместно действующий”, “содействие”, “сотрудничество”. Действительно, процесс самоорганизации связан, прежде всего, с понятием “диссипативной структуры”, то есть структуры, спонтанно возникающей в открытых неравновесных системах. Если в состоянии равновесия элементы этой структуры ведут себя независимо один относительно другого, то под влиянием энергетического взаимодействия с окружающей средой они переходят в неравновесное состояние и начинают действовать согласованно, вследствие чего между ними возникает общее (когерентное) взаимодействие и корреляционные связи, появляется диссипативная структура. Особенностью ее является повышенная чувствительность к внешним воздействиям, а изменения во внешней среде становятся фактором генерации и отбора разнообразных структурных конфигураций. В свою очередь, понятие “диссипативной структуры” [9] наполняется реальным содержанием в зависимости от сущности категорий “связи” в целом и “экономические связи” - в частности. Связи – это то, что соединяет в единую системную целостность отдельные объекты, явления, свойства, признаки и др. В результате этого связи определяют развитие и функционирование процессов и выступают как определенный “порядок”. Устойчивые и существенные связи, формирующие порядок, получают качества структуры и законов композиции (построения). Связи существуют между системами и подсистемами, самими подсистемами, подсистемами и их внутренними элементами, отдельными элементами и т.д. Различают связи первого порядка (функционально необходимые, то есть те, без которых система существовать не может) и второго порядка (которые стабилизируют деятельность системы, значительно улучшают ее качество).

**Выводы.** С учетом вышесказанного, синергетический подход к стратегическому планированию производственно-экономической системы означает обеспечение достижения большей эффективности целостной системы, чем сумма эффектов взаимодействия отдельных подсистем и элементов, используя при этом аппарат экономико-математического моделирования, как один из методов исследования экономических систем.

Современные условия хозяйствования требуют применения экономико-математических методов анализа организационно-управленческих проблем, имея при этом четкое представление о той роли, которую играют эти методы в деятельности рассматриваемого предприятия.

**Список литературы:** 1. Варес А.Ю. Стратегический маркетинг как средство повышения конкурентоспособности / А. Ю.Варес // Новое в экономической кибернетике: (Сб. науч. ст.) Под общ. ред. Ю.Г. Лысенко; Донецкий нац. ун-т. / Модели и методы стратегического управления. - Донецк: ДонНУ, 2001. - №2. - С. 79-86. 2. Василенко В.Н. Экономическое регулирование производственной деятельности в промышленных предприятиях: теория, методика, практика / В. Н. Василенко. - К: Наукова думка, 1995. - 179 с. 3. Градов А.П. Стратегия и тактика управления предприятия / А. П. Градов, Б. И. Кузин. - СПб.: Спец. Лит., 1996. - 510 с. 4. Цацулин А.Н. Ценообразование в системе маркетинга / А. Н. Цацулин. - М.: Филинь, 1997. -295с. 5. Берсуцкий Я.Г. Модели и алгоритмы принятия управленческих решений / ИЭП НАН Украины / Я.Г. Берсуцкий, Н.Н. Лепя, Н.Г. Гузы др. - Донецк, 1998. - 307 с. 6. Занг В.-Б. Синергетическая экономика: Время и перемены в нелинейной экономической теории / В.-Б.Занг. - М.: Мир, 1999. - 335 с. 7. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего / С.П. Капица - М.: Эдиториал, 2001.-228 с. 8. Лысенко Ю.Г. Модели управления хозрасчетным промышленным предприятием / Ю.Г. Лысенко - М.: Финансы и статистика, 1991. - 208 с. 9. Малинецкий Г.Г. Синергетическая парадигма: Многообразие поисков и подходов / Г.Г. Малинецкий - М.: Юнити, 2000. - 536 с. 10. Хакен Г. Синергетика. Пер. с англ. В.И. Емельянова / Г. Хакен - М.: Мир, 1980. - 404 с. 11. Гохберг Ю.А. Формирование стратегии достижения высокой конкурентоспособности предприятия / Ю.А. Гохберг // Экономист. - 2001. - N12. - С. 74-79. 12. Зайцев В.И. Стратегическое планирование. Учебное пособие / В.И. Зайцев - М.: ЭКМОС, 1998. - 440 с. 13. Marketing management. Strategies and program P. P. Guiltinan., G.W. Paul. McGrawHill, inc. - 1994. - 475 p. 14. Идрисов А.Б. Стратегическое планирование и анализ эффективности инвестиций // А.Б. Идрисов - М.: Филинь, 1998. - 272с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Vares A.Ju. "Strategicheskij marketing kak sredstvo povyshenija konkurentosposobnosti" Novoe v jekonomicheskoy kibernetike: (Sb. nach. st.) Ed. Ju.G. Lysenko; Donekij nac. un-t. / Modeli i metody strategicheskogo upravlenija. - Donetsk: DonNU (2001) - No 2 :79-86. Print 2. Vasilenko V.N. "Jekonomicheskoe regulirovanie proizvodstvennoj dejatel'nosti v promyshlennyh predpriyatiyah: teorija, metodika, praktika". - Kiev: Naukova dumka, 1995. Print. 3. Gradov A.P. and B.I. Kuzin "Strategija i taktika upravlenija predpriyatija" Spb.: Spec. Lit., 1996. Print. 4. Caculin A.N. Cenoobrazovanie v sisteme marketinga Moscow: FilinNo, 1997. Print. 5. Bersuckij Ja.G/ et al. Modeli i algoritmy prinjatija upravlencheskih reshenij - Donetsk, 1998. Print. 6. Zang V.-B. Sinergeticheskaja jekonomika: Vremja i peremeny v nelinejnoj jekonomicheskoy teorii - Moscow : Mir, 1999. Print. 7. Kapica P.P. Sinergetika i prognozy budushhogo - Moscow: Jeditorial, 2001, Print. 8. Lysenko Ju.G. Modeli upravlenija hozraschetnym promyshlennym predpriyatiem - Moscow: Finansy i statistika, 1991. Print. 9. Malineckij G.G. Sinergeticheskaja paradigma: Mnogoobrazie poiskov i podhodov - Moscow: Juniti, 2000. Print. 10. Haken G. Sinergetika. Per. s angl. V.I. Emel'janova - Moscow : Mir, 1980. Print. 11. Gohberg Ju.A. "Formirovanie strategii dostizhenija vysokoj konkurentosposobnosti predpriyatija" Jekonomist (2001) - No12. : 74-79. Print 12. Zajcev V.I. Strategicheskoe planirovanie. - Moscow.: JeKMOS, 1998. Print. 13. Marketing management. Strategies and program P. P. Guiltinan and G.W. Paul. McGrawHill, inc. - 1994. Print. 14. Idrisov A.B. "Strategicheskoe planirovanie i analiz jeffektivnosti investicij " - Moscow: Filin', 1998. Print.

*Надійшла (received) 25.10.2014*

**Э. А. СИМСОН**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ», Харьков;  
**С. А. НАЗАРЕНКО**, канд. техн. наук, старш. научн. сотр. НТУ «ХПИ»;  
**И. Д. ПРЕВО**, вед. научн. сотр. ИГ «УПЭЖ», Харьков.

## **МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ НАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

На единой научно-методологической основе рассмотрены численные методы анализа и оптимизации высоконагруженных элементов некоторых технологических систем. Математическое моделирование процесса раскатки кольца подшипника проводилось с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в постановке объемного напряженно-деформированного состояния в рамках инкрементального смешанного подхода Лагранжа-Эйлера. Представлена динамическая модель сонотрода для ультразвуковой системы технологического назначения.

**Ключевые слова:** математическая модель, оптимизация, технологические системы, высоконагруженные элементы, методы анализа, раскатка, сонотрод, инструмент.

**Постановка проблемы.** Создание новых и улучшение имеющихся технологических процессов, усложнение конструктивных форм; необходимость комплексного моделирования сложных составных устройств, создания достоверной цифровой модели прототипов и проведения виртуальных испытаний, приближенных к условиям эксплуатации, обуславливают потребность в разработке новых и совершенствовании существующих методик расчета и оптимизации технологических систем [1, 2, 3]. Целью работы являлась разработка научно обоснованных численно-аналитических методов анализа и оптимизации высоконагруженных элементов некоторых технологических систем.

**Исследования по оптимизации** элементов механико-технологических систем начинают с постановки задачи и разработки метода поиска оптимального решения. Постановка задачи охватывает задачу анализа математической модели элементов технологической системы, критерий цели, варьируемые параметры, ограничения.

Задача оптимизации элементов механико-технологических систем состоит в определении варьируемых переменных, относящихся к допустимой области и максимизирующих (минимизирующих) функционал качества (критерий цели). Нелинейная целевая функция элементов технологической системы являет собой суперпозицию критериев качества, при этом в качестве весовой функции применяются неопределенные множители Лагранжа.

На проектные переменные могут накладываться как функциональные ограничения типа равенств и неравенств, неявным образом сужающие область варьирования, так и явные двусторонние ограничения, задаваемые из конструктивно-технологических представлений. Подобные ограничения могут иметь и стохастическую постановку.

Значения функционалов элементов технологической системы определяются из решения задач анализа, описываемых уравнениями состояния. Структуру уравнений, характеризующих математические связи между искомыми  $u$  и заданными  $h$  величинами, обуславливает состав элементов технологической системы, граничные условия, нагрузки, тип исследуемого процесса и условия сопряжения. Задачи анализа элементов технологических систем можно классифицировать и по ключевым качествам: особенности анизотропии материала; физические закономерности деформирования; формы разрешающих уравнений и численные методы расчета. Функция (вектор)  $U$  переменных состояния элементов механико-технологической системы, образующих пространство решений, может включать напряжения, температуры, перемещения, деформации и т. д..

При решении задач оптимизации элементов технологических систем в качестве варьируемых переменных  $h$  рассматриваются физико-механические свойства материалов, геометрические параметры (распределения толщины; конфигурация граничного контура, вырезов, срединной поверхности); сосредоточенных жесткостей и масс; численности, величины и области приложения управляющих нагрузок и т. д.. Выбор класса проектных переменных (вектор дискретных параметров, кусочно-непрерывные функции, непрерывные функции) во многом обуславливает метод оптимизации и оптимальное решение.

**Критерий качества** элементов технологической системы представляет математическую формулировку цели оптимизации, зависящей от условий эксплуатации и функционального предназначения. Качество элементов технологических систем описывается определенными функционалами, характеризующимися, как правило, нелинейными зависимостями от параметров состояния и варьируемых переменных. К основным показателям качества элементов механико-технологических систем относятся производительность, энергоемкость, максимальные напряжения, материалоемкость, надежность, долговечность, технологичность, удельная стоимость единицы продукции и т. д.. Наличие большого числа критериев качества приводит к противоречивым требованиям на этапе проектирования. При рассмотрении многокритериальных задач наиболее распространенным является определение множества Парето компромиссных решений.

Выбор эффективного **метода оптимизации** элементов технологических систем является завершающей ступенью проведения исследования. Методы математического программирования подразделяются на линейные и нелинейные (обладают наибольшей универсальностью), геометрические, динамические, технологии случайного поиска и прочее.

Эффективные методы первого порядка (градиентный, проекции градиента, сопряженных градиентов, их модификации и многие другие) используют информацию о градиенте функционалов качества технологических систем. В этих методах, базируясь на локальных свойствах функций, описывающих критерий

качества и ограничения, реализуется численный поиск улучшающего направления. Проект в данном направлении модифицируется на подходящую величину шага.

В методе последовательной линеаризации, обнаруживающем обширный потенциал, как по эффективности, так и универсальности, на произвольном шаге исполняется следующий комплект ступеней вычислений: решение исходной и сопряженной задач; вычисление функциональных производных по варьируемым параметрам; построение зоны линеаризации; решение задачи линейного программирования. Реализация методов второго порядка связана как с трудностями вычисления второй производной критерия качества и функциональных ограничений, так и возможностью быстрой сходимости оптимизационного процесса.

Следующий класс методов оптимизации приводит решение задачи оптимизации к удовлетворению соответствующих условий оптимальности. При использовании непрямых методов на каждой итерации проектирования удовлетворяются условия оптимальности без применения локальных свойств функционалов качества и ограничений. К ним имеют отношение классические методы теории оптимального управления и вариационного исчисления. Методы неприменимы при наличии ограничений типа неравенств и в случае негладких или разрывных варьируемых функций. Условия оптимальности в форме принципа максимума Понтрягина функционируют с ограничениями типа неравенств. Кроме классической континуальной постановки нужно разрабатывать дискретный принцип максимума для конечно элементных моделей технологических систем.

**Задача анализа элементов технологических систем**, как правило, сводится к решению систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Возможности классических методов, основывающихся на решении системы уравнений в частных производных краевых задач математической физики, ограничены.

Краевая задача может быть приведена к вариационной форме при помощи умножения исходного уравнения в частных производных на произвольную виртуальную функцию  $z$  из пространства гладких «обобщенных перемещений», удовлетворяющих краевым условиям, и последующего интегрирования по частям. Например, для случая статики задача приводится к вариационному уравнению, справедливому для всех кинематически допустимых функций  $z$  :

$$a_h(y, z) \equiv (\overline{A}_h y, z) = (f, z) \quad (1)$$

или в случае контактного взаимодействия тел с гладкими поверхностями к вариационному неравенству:

$$(\overline{A}_h y, z - y) \geq (f, z - y), \quad \forall z \in G, \quad (2)$$

где  $\overline{A}$  – расширение по Фридрихсу оператора краевой задачи;  $a_h(y, z)$  – соответствующая положительно определенная и непрерывная билинейная

форма,  $(f, z)$  - линейная силовая форма,  $G$  – множество, задаваемое условиями непроникновения.

Вариационные задачи или неравенства приводятся к проблеме минимизации функционалов. Для случая (1) ищется безусловный минимум, а для случая (2) – минимум на множестве  $G$  в пространстве функций  $U$ . Соотношения метода конечных элементов (МКЭ), считающегося наиболее мощной, универсальной и распространенной технологией расчета, приводят к матричной алгебраической проблеме.

**Математическое моделирование технологических систем.** Раскатка относится к методам обработки металлов давлением и основана на использовании свойств пластичности материалов. Для технологий раскатки, связанных с формоизменением деформируемых тел, конечным этапом теоретических исследований является решение соответствующей контактной задачи теории пластичности элементов механико-технологических систем.

Рассмотрим модель технологической системы изготовления кольца подшипника, состоящей из контактирующих между собой на общих участках поверхности конструктивных элементов: оправки, заготовки кольца, ролика. Характерной особенностью процесса является сложное напряженное состояние в связи с наличием постоянно смещающегося по спирали к периферии заготовки локального очага деформации и присутствием внеконтактной деформации. В процессе раскатки одновременно увеличивается диаметр отверстия и наружный диаметр поковки за счет уменьшения толщины ее стенки.

Жесткость деформируемого тела заготовки кольца намного меньше жесткости контактирующих с ней твердых материалов оправки и ролика. Поэтому заготовка кольца рассматривалась как упруго-вязко-пластично деформируемое тело, оправка и ролик привода как абсолютно жесткие тела, т. е. контактная задача с проскальзыванием может рассматриваться как жестко-податливая.

Математическое моделирование процесса раскатки проводилось с помощью МКЭ в постановке объемного напряженно-деформированного состояния в смешанной формулировке для приращения давлений и скоростей в рамках инкрементального подхода Лагранжа-Эйлера (ALE). Учет свойств материалов раскатного инструмента и заготовки осуществлялся при поддержке диаграмм деформирования для характерных скоростей деформирования.

Параметры процесса раскатки были заданы в соответствии с операционной картой. Решение нестационарной задачи деформирования (раскатки) кольца с целью определения контактных давлений в паре оправка-заготовка приведено на рис. 1. Для определения влияния изменения скорости подачи на напряжения, возникающие в инструменте, и его стойкость были проведены численные эксперименты с варьированием поступательной скорости оправки (рис. 2).

В отличие от машиностроительных конструкций технологические системы вибрационной техники проектируются на работу в резонансе как основном функциональном режиме. Проектирование ультразвуковых систем связано с рассмотрением конструкции: «генератор – преобразователь – концентратор –

инструменты – наконечники – среда». Применение объемных КЭ позволяет описывать элементы систем пространственной формы и трехмерного электрического и напряженно-деформированного полей.

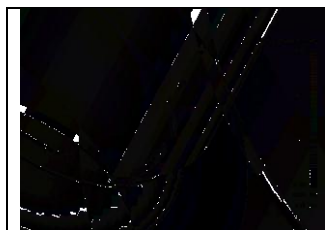


Рис. 1 – Контактные давления в паре оправка-кольцо, МПа

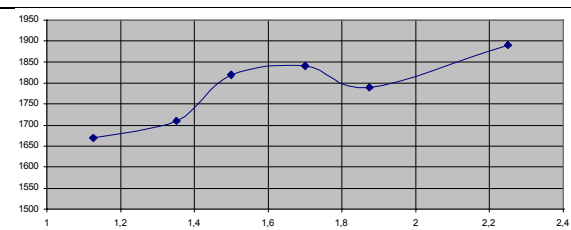


Рис. 2 – Зависимость интенсивности напряжений, Мпа, от скорости прокатных слазок, мм/сек

Электрические колебания ультразвуковой частоты, вырабатываемые генератором, преобразуются в механические колебания сварочного инструментально-волновода в свариваемый материал. Часть энергии механических колебаний переходит в тепловую. Это приводит к нагреву зоны контакта соединяемых деталей до температур вязко-текучего состояния. Для обеспечения надлежащих условий ввода механических колебаний и создание тесного контакта свариваемых поверхностей прикладывается давление между волноводом и опорой.

Для ультразвуковой сварки, резки и заделки используются сонотроды, являющиеся пассивными резонансными элементами системы и предназначенные для передачи волновой энергии от преобразователя к поверхностям деталей. Их конфигурации отличаются разнообразием, обусловленным широкой номенклатурой свариваемых изделий. На этапе проектирования сонотродов надо обеспечить настройку конструкции (с учетом автоподстройки генератора) в “рабочий резонанс”, отстроившись от паразитных частот  $\omega^-$  и  $\omega^+$

$$\omega_p \leq \omega^* + \Delta\omega^*, \quad \omega_p \geq \omega^* - \Delta\omega^*, \quad \omega^- \leq \omega^* - \Delta\omega, \quad \omega^+ \geq \omega^* + \Delta\omega.$$

В зависимости от способа ввода колебаний в изделие резонансная мода движения должна характеризоваться однородным распределением нормальной или касательной составляющей перемещений на излучающей ультразвук поверхности, что связано с качеством получаемого шва. К дополнительным требованиям относятся максимизация коэффициента полезного действия установок; заданный коэффициент усиления перемещений на рабочем торце, циклическая прочность, низкий уровень потерь энергии на внутреннее трение; габаритные, компоновочные и конструктивные ограничения и другое. Примеры результатов расчета форм перемещений и полей интенсивностей динамических напряжений (представлены тоновой заливкой) ножевого сонотрода, соответствующих различным собственным частотам, представлены на рис. 3 и 4.



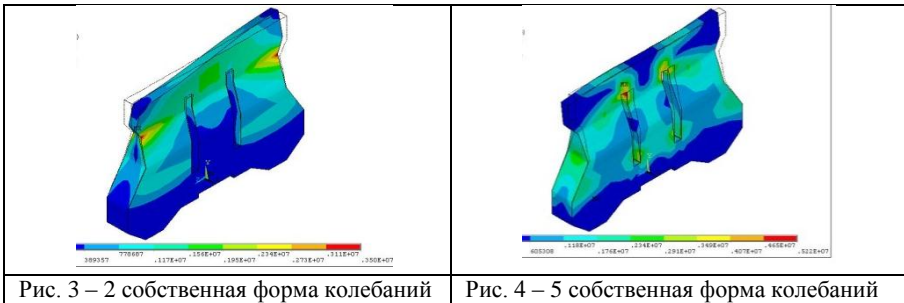


Рис. 3 – 2 собственная форма колебаний

Рис. 4 – 5 собственная форма колебаний

**Выводы.** Проведенные исследования показали, что численный метод анализа МКЭ достоверно воссоздает технологические процессы ультразвуковой сварки и раскатки. Дальнейшим направлением исследований является использование современных методов оптимизации и анализа чувствительности сложных конечно элементных моделей при поиске оптимальных параметров технологических процессов обработки.

**Список литературы:** 1. Тимофеев Ю.В., Фадеев В.А., Степанов М.С., Назаренко С.А. Обобщенная структура жизненного цикла машиностроительного производства и его изделий // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків, НТУ «ХПІ». – 2009. – № 1. – С. 86 – 95. 2. Flager F. Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building / F Flager, B Welle, P Bansal, G Soremekun, J Haymaker // Journal of Information Technology in Construction (ITcon). – 2009. – Vol. 14. – P. 595 – 612. 3. Li M. Optimal uncertainty reduction for multi-disciplinary multi-output systems using sensitivity analysis / M. Li; J. Hamel; S. Azarm // Structural & Multidisciplinary Optimization. – 2010. – Vol. 40. P. 77 – 96.

**Bibliography (transliterated):** 1. Timofeev, Ju. V., et al. "Obobshhennaja struktura zhiznennogo cikla mashinostroitel'nogo proizvodstva i ego izdelij." Kharkov. *Visnik NTU «KhPI»*. No. 1. 2009. 86–95. Print. 2. Flager, F., et al. "Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building." *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*. Vol. 14. 2009. 595–612. Print. 3. Li, M., J. Hamel and S. Azarm. "Optimal uncertainty reduction for multi-disciplinary multi-output systems using sensitivity analysis." *Structural & Multidisciplinary Optimization*. Vol. 40. 2010. 77–96. Print.

Поступила (received) 20.10.14

УДК 621.9.025

**Ю. Г. ГУЦАЛЕНКО**, ст. науч. сотр., НТУ «ХПІ»

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ РЕЙТИНГОВОЙ ОЦЕНКИ НИТРИДБОРНЫХ СВЕРХТВЕРДЫХ КОМПОЗИТОВ

Рассматривается проблема сравнения эксплуатационных возможностей инструментальных материалов в условиях использования каждого из них в своей рекомендуемой области и в своей системе нормативных режимов резания и нормативной

© Ю.Г. Гуцаленко, 2014

стойкости. Предложена аналитическая модель и выполнен расчет рейтинговой оценки для стандартной группы сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора.

**Ключевые слова:** кубический нитрид бора, сверхтвердые композиты, эксплуатационные возможности, рейтинговая оценка

**Введение и постановка задачи.** Синтетические сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора, открытого в 1957 году *Робертом Венторфом* для американской многоотраслевой корпорации *Дженерал Электрик*, и в нынешнем веке продолжают оставаться топ-уровневым товаром инструментального назначения на мировом рынке техники и технологий механической обработки [1].

Поданная преподнесенным данной статье заголовком задача рейтинговой оценки эксплуатационных возможностей инструментальных материалов возникает, в частности, при выборе объектов обработки для формирования баз данных экспертных систем поддержки внедрения в промышленность новых и перспективных технологий механической обработки, в современном ряду которых достойное место занимает алмазно-искровое шлифование [2].

Конкретным посылом к такому исследованию в данном случае послужила разработка экспертной системы прогнозирования шероховатости труднообрабатываемых материалов после алмазно-искрового шлифования. Эта разработка является составляющей задания на выполнение в НТУ «ХПИ» в 2013-2014 гг. темы М2240 «Разработка технических решений специальной модернизации универсальных станков и технологических баз данных для алмазно-искрового шлифования труднообрабатываемых материалов» (номер государственной регистрации 0113U000425).

В рамках этой разработки, преимущественно исследующей технологические возможности метода алмазно-искрового шлифования применительно к формообразованию украинских режущих пластин (АТП, разработчик – Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины), возникла необходимость обоснованного выбора некоторого базового представителя среди нитридборных сверхтвердых композитов как потенциальной технологической альтернативы алмазным, наиболее очевидной в особенности в обработке сталей, химический состав которых роднит с алмазом углерод в различных аллотропах, и это родство привносит известные ограничения теплофизической природы в технологические возможности механического контакта алмаза при резании стали. В открытых источниках информации такая постановка задачи или данные, прямо удовлетворяющие разрешению задачи в такой постановке, отсутствуют.

В выполняемой разработке априорно постулируется приоритетность стандартных баз данных.

**Стандартные основы и концепция модели.** Межгосударственный стандарт [3] рассматривает применение семи основных нитридборных сверхтвердых композитов (табл. 1). В соответствие каждой из этих инструментальных альтернатив стандартом [3] оговорена рекомендуемая область применения.

Таблица 1 – Исходные данные ([3]) и результаты рейтинговых расчетов

Условия испытаний и рассчитываемые показатели		Марка композита						
		01, 02	05	06	10Д	11	Томал-10	
Твердость обрабатываемой стали, HRC <sub>3</sub>	Нижн. граница	63	54	63	59	61	56	
	Верхн. граница	61	52	61	57	56	50	
Процесс резания	Характер					С ударом		
	Скорость ( $v$ ), м/мин				75	60	110	90
	Подача ( $S_o$ ), мм/об		0,20	0,15	0,10	0,07		0,10
	Глубина ( $t$ ), мм		0,8	2,0	0,5	0,4	0,5	1,0
Стойкость, мин	Средняя, $T_{cp}$		20	15	40	30	60	50
	95%-ная, $T_{95\%}$		8	6	16	12	24	20
Расчетные относительные оценки	$k_Q$		0,53	1	0,17	0,07	0,24	0,4
	$k_T$		0,33	0,25	0,67	0,5	1	0,83
	$k_W$		0,53	0,75	0,33	0,11	0,73	1

Выбор конкретной марки одним из объектов исследований шероховатости после алмазно-искрового шлифования в ряду других нитридных альтернатив алмазным инструментальным материалам следует связывать с эксплуатационными предпочтениями. О них можно судить, например, по стандартному регламенту испытания пластин на стойкость [3]. Из этого регламента следует (табл. 1), что при одной и той же частоте  $n_o$  (об/мин) вращения шпинделя обрабатываемой детали (конкретно угловая скорость подачи [3] не оговаривается) в испытаниях рассматриваемых нитридных режущих пластин «свой» норматив стойкости каждая марка должна обеспечивать с некоторой «своей» производительностью обработки, определенной строго оговоренными режимами проведения испытаний. Значения подачи  $S_o$  ( $n_o = const$ ) в табл. 1 приведены для испытаний пластин круглой формы, при работе с многогранными пластинами эти значения уменьшаются против табличных с коэффициентом пропорциональности от 0,5 (для пластин правильной трехгранной формы) до 0,75 (для квадратных пластин).

Граничные значения заданных режимами резания производительностей обработки в проведении стойкостных испытаний композитов в рассматриваемой группировке, даже при исключении из сравнительного рассмотрения режимных условий осуществления процесса резания с ударом (в испытании композита 10Д), для безударных рабочих процессов отличаются почти в 6 раз (в сопоставлении для композитов 05 и 06, см. табл. 1).

Несмотря на то, что объекты обработки композитов 05 (наиболее производительного) и 06 (наименее производительного из рекомендуемых к работе без удара) отличают соответственно наиболее низкая и наиболее высокая твердость, логику «чем ниже твердость обрабатываемой стали, тем выше производительность ее обработки нитридным композитом» в нашем

рассмотрении разрушает испытательская практика композитов 01 и 02 в обработке сталей столь же высокого диапазона по твердости, что определен и наименее производительному из безударно работающих композиту 06. Заданная производительность резания в стойкостных испытаниях композитов 01 и 02 (см. табл. 1) превосходит определенную композитам 11 и Томал-10 в обработке существенно менее твердых сталей соответственно более чем в 2 раза и на четверть, т. е. весьма значимо.

Следовательно, стандартная практика стойкостных испытаний по [3] весьма затрудняет ясный учет твердости обрабатываемого материала (стали) в построении расчетной модели функционального рейтинга рассматриваемых нитридных композитов. Поэтому, исходя из проведенного предварительного анализа и из постановочно принятой приоритетности именно стандартных баз данных [3] в определении взаимосвязей расчетной модели, учетом твердости обрабатываемого материала в ней пренебрегаем.

Однако, поскольку установленный [3] регламент проведения испытаний на стойкость исходит из неравных нормативов стойкости для рассматриваемых нитридных композитов, см. табл. 1, то приведенная там же (табл. 1) информация о результатах расчета относительной номинальной производительности

$$k_Q = Q_i / Q_{\max}, \quad (1)$$

где

$$Q = v S_o n_o t, \quad (2)$$

т. е.  $Q \sim v S_o t$  при  $n_o = \text{const}$ , недостаточна для интегральной оценки сравнительной работоспособности рассматриваемых композитных пластин между сменами.

В качестве такой оценки обратимся к относительному съему припуска  $k_W$ , произведенному за нормативный период стойкости  $T$  (мин), средний или на 95% гарантированный пластинам в партиях, чьи представители прошли испытания (табл. 1):

$$k_W = W_i / W_{\max}, \quad (3)$$

где

$$W = Q \cdot T. \quad (4)$$

С учетом (1) и (2), после аналогично (1) введения

$$k_T = T_i / T_{\max}, \quad (5)$$

получаем:

$$k_W = k_Q \cdot k_T. \quad (6)$$

**Рейтинг.** В табл. 1 представлены результаты расчетов  $k_T$  и  $k_W$ . Полученные из расчетной модели (6) результаты после ранжирования отражают функциональный рейтинг рассматриваемых нитридных композитов по критерию максимума ожидаемого съема рекомендуемой к обработке стали. Рейтинговый ряд из семи рассмотренных нитридных сверхтвердых композитов представляет следующую последовательность (в порядке убывания расчетных значений

рейтинговой оценки; см. табл. 1): 1) композит Томал-10; 2) композит 05; 3) композит 11; 4-5) композиты 01 и 02; 6) композит 06; 7) композит 10Д.

**Выводы.** 1. Предложена опирающаяся на стандартную методику стойкостных испытаний режущих пластин из сверхтвердых материалов аналитическая модель (6) рейтинговой оценки работоспособности лезвийных инструментов. 2. Разработка реализована на примере группы композитов из нитридных сверхтвердых материалов (композиты 01, 02, 05, 06, 10Д, 11, Томал-10) с использованием баз данных режимов резания и нормативов их стойкостных испытаний по межгосударственному стандарту ([3]). 3. Из аналитической модели (6) рейтинговой оценки рассматриваемых по [3] нитридных сверхтвердых композитов и результатов расчетов по ней (табл. 1) предпочтение первого порядка в исследовательской и последующей промышленной практике заслуживает композит Томал-10.

**Список литературы:** 1. Инструменты из сверхтвердых материалов : [Справочник] / Под. ред. Н. В. Новикова и С. А. Клименко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с. 2. Гуцаленко Ю. Г. Исторический опыт и современные перспективы алмазно-искрового шлифования / Ю. Г. Гуцаленко // Техника и технологи : пути инновационного развития : Сб. науч. тр. 4-ой междунар. науч.-практ. конф. 30 июня 2014 г., посвящ. 50-летию Юго-Зап. гос. ун-та, г. Курск, Россия. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 264–270. 3. Пластины режущие сменные из сверхтвердых материалов. Технические условия : ГОСТ 28762-90 [Межгос. стандарт]. Введ. 1991-07-01. – Переизд. – М. : Стандартинформ, 2005. – 25 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bogatyreva, G. P., et. al. *Instrumenty iz sverhtverdyh materialov*. Ed. N. V. Novikov and S. A. Klimenko. 2nd ed. Biblioteka instrumental'shika. Moscow, Mashinostroenie, 2014, 608 p. Print. 2. Gutsalenko, Yu. G. "Istoricheskij opyt i sovremennye perspektivyalmazno-iskrovogo shlifovanija" *Tehnika i tehnologii: puti innovacionnogo razvitija*. Proceedings. The 4th scientific-practical conference dedicated to the 50th anniversary of the Southwest State University. June 30, 2014. Kursk, Russia. 264–270. Print. 3. *Plastiny rezhushhie smennye iz sverhtverdyh materialov. Tehnicheskie usloviya*. GOST 28762-90. Moscow, Standartinform, 2005, 25 p. Reprint.

*Поступила (received) 10.10.2014*

## РЕФЕРАТИ

УДК 658.52.011.56

**Анализ схем резания и технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных колес / Ю.В. Тимофеев, О.М. Шелковий, С.В. Міроненко, О.О. Клочко, А.М. Кравцов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 7-19. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.**

Взаємозв'язок теоретичної залежності швидкості різання від різних технологічних факторів, фізико-механічних властивостей матеріалів інструменту і загартованого зубчастого колеса дозволяє здійснювати вибір раціональних схем зубообробки. Розроблено схеми різання та технологічного оснащення при інтенсивній і високоякісній зубообробці з використанням методу чисельного моделювання процесу формоутворення поверхневого шару, що дозволило отримати напружено-деформований стан поверхневого шару оброблюваного зубчастого колеса, інструменту та стружки та розроблено рекомендації щодо вибору технологічного регламенту обробки.

**Ключові слова:** схеми різання, технологічні чинники, якість поверхні, загартовані крупномодульних зубчасті колеса, чисельне моделювання.

УДК 621.91

**Дослідження силових характеристик при послідовно-паралельній обробці отворів комбінованим осевим інструментом / М.С. Степанов, М.С. Іванова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 19-25. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

Досліджена осьова складова сили різання і крутний момент при послідовно-паралельній схемі різання комбінованим осевим інструментом. Досліджений вплив кількості ступенів комбінованого осевого інструмента на сумарні силові навантаження та характер їх зміни при збільшенні кількості одночасно працюючих ступенів інструмента. Зроблено висновок про доцільну кількість одночасно працюючих ступенів комбінованого осевого інструмента.

**Ключові слова:** комбінований осевий інструмент, режими різання, осьова сила різання, крутний момент, відведення стружки.

УДК 621.9.044

**Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях / С.С. Доброворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская и др. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 25-31. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.**

Розглянуто алгоритм реалізації технології виготовлення якісної і точної машинобудівної продукції з важкооброблюваних матеріалів на базі сучасних CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Наведено особливості обробки загартованих сталей. Обґрунтовано перспективи енергетичного підходу до визначення області існування технологічних режимів високошвидкісної обробки матеріалів.

**Ключові слова:** технологія обробки, високошвидкісна обробка, CAD/CAE/CAM/CAPP-системи, труднооброблювані матеріали, енергетичний підхід, режими обробки.

УДК 621:519

**Розширення функціональних можливостей верстатних комплексів за рахунок моніторингу процесу механічної обробки / Н.Р. Веселовська, О.А. Пермяков / Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 31-37. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.**

Основна ідея роботи полягає в розробці принципово нового підходу до моніторингу верстатного комплексу механічної обробки, сутність якого полягає в організації методики керування процесом механічної обробки на основі єдиного інтегрованого інформаційного середовища адаптованого до універсального комплексу комп'ютерного моделювання Matlab/Stateflow та Matlab/Simulink, при структурному поданні всіх складових процесу механічної обробки та

моделювання як інструменту розв'язання задачі, що розширює функціональні можливості верстатних комплексів.

**Ключові слова:** верстатний комплекс, функціональні можливості, моніторинг, калібрування обладнання, процес механічної обробки, інформаційний, матеріальний та енергетичний потоки, багатопільові та багатокординатні верстати, верстати з паралельною кінематикою.

УДК 621.92

**Изменения глубины обдирочного шлифования, вызываемые кривизной проката и прерывистой поверхностью круга / А. Ю. Сизий, Д. В. Сталинский, К. М. Помазан // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 38-48. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.**

У статті представлена модель динамічної системи обдирного шліфування (ДСОШ) з впливом на неї кривизною прокату та переривчастою поверхнею шліфувального круга. Аналіз моделі ДСОШ виконаний на комп'ютері та за допомогою амплітудно-частотної характеристики системи. Цей аналіз дозволяє призначати умови обдирного шліфування для досягнення вимог до якості прокату після обдирного шліфування.

**Ключові слова:** обдирне шліфування, динаміка, моделювання, шліфувальний круг, прокат.

УДК 378.147

**Дифференциация международных стандартов в процессе подготовки производства / Е.В. Набока, М.Э.Колесник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 49-53. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X**

В роботі проведено аналіз стандартів ISO та надано рекомендації щодо застосування при будь-яких видах машинобудівного виробництва, у всіх організаціях незалежно від виду діяльності, розміру організації та продукції, що поставляється (послуг). Виявлено взаємозв'язок між основними стандартами якості продукції. Запропоновано вимоги, які можуть застосовуватися для розробки системи якості виготовлення продукції.

**Ключові слова:** стандарт, сертифікація, якість, управління, виробництво.

УДК 621.9

**Моделирование технологических процессов обработки корпусных деталей с применением управляющих сетей Петри / О.Ю.Приходько, С.Е.Слипенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 53-58. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X**

У статті розглядається інтерпретація управляючих мереж (SN), яка побудована на основі безпечних мереж Петрі (SPN). На прикладі завдання про ефективне використання виробничих ресурсів продемонстровані можливості SN, проведено порівняння з моделями на основі безпечних мереж.

**Ключові слова:** мережі Петрі, імітаційне моделювання, деталь, макроперехід, мітка, алгоритм, управляємі переходи.

УДК 621.92

**Разработка модели напряженного-деформированного состояния «абразивное зерно-связка» / А. Н. Ушаков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С.59-65. – Бібліогр.: 1 назв. – ISSN 2079-004X**

У статті виконаний аналіз існуючих форм абразивних зерен. Розроблено тривимірну модель силового напруженого стану у якій зв'язка представлена у вигляді містків зв'язку циліндричної форми, а саме зерно представлено у вигляді комбінованої форми. Ця модель дозволяє виконати комплексне дослідження із застосуванням засобів обчислювальної техніки для вдосконалення технологічних процесів виготовлення й експлуатації шліфувальних кругів.

**Ключові слова:** параметр, процес, шліфування, зерно, зріз, модель.

УДК 621.874

**Дослідження напружено-деформованого стану металлоконструкцій мостових кранів з різними конструкціями механізму пересування / Губський С. О. // Вісник НТУ «ХП». Серія:**

Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 65-74. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-004X.

Проведено порівняння впливу різних конструкцій механізму пересування мостових кранів на напружено-деформований стан їх металоконструкцій. Досліджено вітчизняну конструкцію механізму пересування крана на «викатних» буксах Харківського заводу «ПТУ» та фірми «КОНЕКРЕЙНС УКРАЇНА». Ресурс металоконструкції останнього крана буде менш залежати від його механізму пересування завдяки конструктивним та технологічним рішенням в самому механізмі.

**Ключові слова:** мостовий кран, механізм пересування, металоконструкція, букса, колесо, навантаження.

УДК 621.9

**Забезпечення ефективності повітряно-плазмового різання тонколистового металу / Д. О. Міненко, В. О. Іванов, І. Г. Гончаренко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 74-81. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-004X.**

Розглянуто основні критерії забезпечення якості повітряно-плазмової різки сталі. Запропоновано залежність для визначення режимів повітряно-плазмової різки тонколистового металу за умов забезпечення необхідної якості розрізу та максимальної продуктивності обробки з урахуванням оптимального співвідношення продуктивності плазмової різки з трудомісткістю подальшої механічної обробки.

**Ключові слова:** ефективність, повітряно-плазмове різання, швидкість переміщення, товщина металу, сила струму, ґрат, якість.

УДК 621.9.048

**Новий спосіб нітроцементации сталевих поверхностей /Н.В. Тарельник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 81-86. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

Запропонований новий спосіб нітроцементации сталевих деталей, що включає електроерозійне легування (ЕЕЛ) вуглецем у поєднанні з іонним азотуванням (ІА), при цьому ІА здійснюють до або після операції ЕЕЛ впродовж часу, достатнього для насичення металу азотом на глибину зони термічного впливу.

**Ключові слова:** нітроцементация, електроерозійне легування, іонне азотування, поверхневий шар, зміцнення.

УДК 681.518.3

**Розподілена комп'ютерна система підвищення ефективності процесу алмазного шліфування / О.Ф. Єнікєєв, Ф.М. Євсюкова, Л.О. Шищенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 86-98. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

На основі методів безпосереднього цифрового та покоординатного управління, ієрархічного принципу та непрямих вимірів амплітуди мікронерівностей розроблено концепцію побудови комп'ютерної системи для підвищення ефективності алмазного шліфування в умовах неповної інформації. Запропоновано метод та апаратні засоби для компенсації кінематичної похибки первинних перетворювачів миттєвої швидкості.

**Ключові слова:** концепція, архітектура, структурно-логічна організація, методи підвищення точності.

УДК 621.923

**Повышение эффективности финишной струйно-абразивной обработки мелких деталей / А.А. Андихай // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 98-105. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.**

У статті розроблені узагальнюючі емпіричні математичні моделі параметрів абразивної обробки деталей затопленими струменями, які дозволяють за критеріями найменшої шорсткості поверхні і найбільшої продуктивності визначити раціональні параметри обробки. Встановлено, що в процесі



обробки відбувається округлення кромek деталей, усуваються задирки, сліди корозії і різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях, утворюється однорідна матова поверхня з шорсткістю в межах  $Ra = 0,8 - 1,25$  мкм зі зміцнюючим наклепом (стискаючими напруженнями глибиною 5 - 6 мкм), істотно зменшується трудомісткість обробки.

**Ключові слова:** абразивна обробка, абразивні зерна, дрібні деталі, стиснене повітря, сопло Лавала, шорсткість поверхні, продуктивність обробки.

УДК 621.923

**Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 106-111. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Приведено аналітичне рішення про умови зменшення технологічної собівартості обробки і можливості реалізації високошвидкісного різання. Показано, що швидкість різання обмежена екстремумом (мінімумом) собівартості обробки. Збільшити швидкість різання і реалізувати умови високошвидкісної обробки можна за рахунок підвищення стійкості різального інструменту шляхом застосування більш міцних і зносостійких інструментальних матеріалів і покриттів інструментів, які характеризуються низьким коефіцієнтом тертя.

**Ключові слова:** високошвидкісна обробка, інструментальний матеріал, собівартість обробки, швидкість різання, температура різання, продуктивність обробки.

УДК 620.178:539.4

**Исследование сопротивления усталости цапф задних мостов специальных транспортных средств / В. К. Лобанов, Г. И. Пашкова** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 112-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.

У роботі виконано дослідження опору втомі цапф заднього моста транспортного засобу «Дозор» різних варіантів виготовлення. Показано, що оптимальними є випробування деталей при спільній дії вигину і крутіння. Встановлено, що місце з'єднання цапфи з насадкою є менш навантаженим і напруженим, ніж шліці і зона кріплення цапфи до корпусу.

**Ключові слова:** транспортний засіб, задній міст, цапфа, опір втомі.

УДК 621.9(075.8)

**Узагальнений приклад структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу / В.В. Ступницький** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 116-129. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X

В статті описаний приклад структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу оброблення деталей прес-форм. Функцією мети такої оптимізації є забезпечення інтегрального критерію, що забезпечить зносостійкість, контактну жорсткість, втомну міцність та корозійну стійкість виробів в умовах їх потенційної експлуатації. В статті наведена методика досліджень та алгоритм оптимізації.

**Ключові слова:** функціонально-орієнтований технологічний процес, оптимізація, залишкове напруження, втомна міцність, корозійна стійкість, коефіцієнт тертя, САЕ-система.

УДК 621.91

**Трещинообразование при сверлении полимерных композиционных материалов / Г. Л. Хавин** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 129-139. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2079-004X

Розглянуто задачу визначення величини і глибини розташування тріщини розшарування при свердленні полімерних багатшарових композитів. Враховуючи анізотропію властивостей матеріалу, припускається, що тріщина розшарування має еліптичну форму, і значення більшої вісі трактується як максимальна довжина тріщини. Використовуючи емпіричне уявлення фактора розшарування, як функцію режимних параметрів обробки, надано модель локального руйнування. Одержане співвідношення пов'язує глибину появи максимальної тріщини розшарування і значення її довжини. Надані кількісні залежності довжини тріщини від частоти обертання і подачі.

**Ключові слова:** тріщина розшарування, фактор розшарування, полімерні композити.

УДК 621.002

**Методика определения функций принадлежности в системе проектирования микроструктуры технологического процесса/ А.Р. Рузметов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 139-147. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

Представлена методика вирішення проблеми оптимізації витрат допоміжного часу, пов'язаних з машинно-ручною роботою в системі многостаночного виробничого комплексу напівавтоматичного обладнання. Для більш детального відображення особливостей проведення операції є доцільним використання мікроелементного синтезу робочого процесу за допомогою керованих функцій приналежності. Це сприяє більш точному обліку виробничих потреб конкретної робочої ситуації.

**Ключові слова:** технологічне оснащення, технологічний прийом, технологічний перехід, технічна інструкція, фаза функціональної активізації, лінгвістична змінна.

УДК 621.86

**Моделирование перемещения мостового крана с перекосом / О. В. Григоров, О. В. Степочкина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 147-153. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X**

У статті розглядаються особливості програми, яка призначена для дослідницьких і інженерних розрахунків, об'єктом якої є кран мостового типу, що рухається із забіганням однієї з опор. Обґрунтовується важливість урахування параметрів приводів механізму пересування. Запропонований підхід, що дозволяє задавати та контролювати основні параметри елементів механізму пересування. Особлива увага приділена забезпеченню можливості швидкого перезавдання кінематичної схеми в середовищі Excel.

**Ключові слова:** перекіс крану, крани мостового типу, механізм, математична модель, MS Excel, кінематична схема, структура даних.

**УДК 621.91**

**Багатокритеріальний вибір оптимальних технологічних процесів обробки корпусних деталей / О. В. Котляр // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 153-163. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X**

Розглянуті питання багатокритеріальної оптимізації технологічних процесів виготовлення корпусних деталей в умовах багатомономенклатурного виробництва. Розроблено конкуруючі варіанти технологічних процесів та систему критеріїв оптимізації. Проведено порівняльний аналіз критеріїв оптимальності і визначено найвигідніший варіант технологічного процесу в залежності від виробничих умов.

**Ключові слова:** корпусна деталь, багатомономенклатурне виробництво, технологічний процес, критерії оптимальності, інтенсивність формування, інтенсивність прибутку.

УДК 658.512

**Разработка организационно-технологических структур сборки складных машинобудованных изделий / О.Л.Кондратьев, А.О.Скоркин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С.163-167. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X**

Велику питому вагу в загальному об'ємі складальних операцій займають операції по збірці типових з'єднань, що характеризуються високим рівнем монотонності праці, повторюваності робочих рухів, а також які не вимагають високої кваліфікації працівника. Виходячи з цього в даній роботі розглянуті принципи розробки організаційно-технологічних структур системи дрібносерійної зборки складних машинобудованих виробів на основі комплексного аналізу існуючих методів розробки структур збирання для дрібносерійного збирання. Зроблені висновки, щодо вибору раціональних структур зборки для конкретних умов та виду машинобудованих виробів

**Ключові слова:** технологічний процес складання, складальна одиниця, точність, робоче місце.

УДК 658.52.011.56

**Технологические особенности зубообработки закаленных колес одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания / А.А. Ключко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в**

машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 167-172. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X

Для чистової зубообробки коліс великого модуля запропоновано метод переривчастого обкату з використанням дискових немодульних фрез (розміри фрези не залежать від модуля), оснащених керамічними пластинками і спеціальних фрезерних супортів з одношпіндельної і двушпіндельної схемою різання з урахуванням забезпечення всіх основних установних рухів швидкісних немодульних дискових фрез. Метод переривчастого обкату використовується на зубострогальних і зубошліфувальних верстатах і має перевагу, що в момент робочого ходу інструменту заготівля колеса нерухома або здійснює незначний поворот, тобто обробка здійснюється порівняно з методом обкатки із забезпеченням найбільшою контактної жорсткості інструмента й визначає здатність поверхневих шарів зубчастих коліс, що знаходяться в контакті з ріжучою кромкою інструменту, забезпечувати процес різання

**Ключові слова:** зубообробки, схеми різання, загартовані крупномодульних зубчасті колеса, одношпіндельні та двошпіндельні супорта

УДК 621.9.15

**Построение модели эквивалентной упругой системы тяжелого карусельного станка / Е. В. Мироненко, С. Л. Миранцов, Д. Г. Ковалёв // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 172-182. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X**

Пропонуються модель технологічної системи важкого карусельного верстата. Запропоновано розрахункову схему системи « повзун - інструмент ». Зроблено висновки про динамічні своїтвх ріжучого інструменту при заданих умовах обробки .

**Ключові слова :** карусельний верстат, інструмент , модель , повзун , різання , алгоритм.

УДК 658.8.01: 005.21

**Использование синергетических стратегий производственно-экономических систем / Е. В. Камчатная-Степанова, Ю. А. Клочко, Н.Г. Сикетина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 182-186. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X**

Стратегічне планування як необхідний елемент діяльності машинобудівного підприємства у сфері підвищення ефективності його діяльності. Зроблено висновки про можливості досягнення більшої ефективності цілісної системи, ніж сума ефектів взаємодії окремих підсистем та елементів завдяки використанню синергетичного підходу до стратегічного планування діяльності підприємства.

**Ключові слова:** планування, стратегія, машинобудування, синергія, синергетичний підхід.

УДК 621. 9

**Методы анализа и оптимизации нагруженных элементов технологических систем / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, И. Д. Прево // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 187-192. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.**

На единой научно-методологической основе рассмотрены численные методы анализа и оптимизации высоконагруженных элементов некоторых технологических систем. Математическое моделирование процесса раскатки кольца подшипника проводилось с помощью метода конечных элементов в постановке объемного напряженно-деформированного состояния в рамках инкрементального смешанного подхода Лагранжа-Эйлера. Представлена динамическая модель сонотрода для ультразвуковой системы технологического назначения.

**Ключевые слова:** математическая модель, оптимизация, технологические системы, высоконагруженные элементы, методы анализа, раскатка, сонотрод, инструмент.

УДК 621.9.025

**Аналитическая модель и расчет рейтинговой оценки нитридных сверхтвёрдых композитов / Ю. Г. Гуцаленко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 192-196. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.**

Розглядається проблема порівняння експлуатаційних можливостей інструментальних матеріалів в умовах використання кожного з них у своїй рекомендованій області і в своїй системі нормативних режимів різання і нормативної стійкості. Запропоновано аналітичну модель і виконаний розрахунок рейтингової оцінки для стандартної групи надтвердих композитів на основі кубічного нітриду бору.

**Ключові слова:** кубічний нітрид бору, надтверді композити, експлуатаційні можливості, рейтингова оцінка.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 658.52.011.56

**Анализ схем резания и технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных колес.** / Ю.В. Тимофеев, А.Н. Шелковой, Е.В. Мироненко, А.А. Ключко, А.Н. Кравцов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 7-19. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Взаимосвязь теоретической зависимости скорости резания от различных технологических факторов, физико-механических свойств материалов инструмента и закаленного зубчатого колеса позволяет осуществлять выбор рациональных схем зубообработки. Разработаны схемы резания и технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке с использованием метода численного моделирования процесса формирования поверхностного слоя, что позволило получить напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя обрабатываемого зубчатого колеса, инструмента и стружки и разработаны рекомендации по выбору технологического регламента обработки.

**Ключевые слова:** схемы резания, технологические факторы, качество поверхности, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, численное моделирование.

УДК 621.91

**Исследование силовых характеристик при последовательно-параллельной обработке отверстий комбинированным осевым инструментом** / М.С. Степанов, М.С. Иванова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 19-25. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.

Исследована осевая составляющая силы резания и крутящий момент при последовательно-параллельной схеме резания комбинированным осевым инструментом. Исследовано влияние количества ступеней комбинированного осевого инструмента на суммарные силовые нагрузки и характер их изменения при увеличении количества одновременно работающих ступеней инструмента. Сделан вывод о целесообразном количестве одновременно работающих ступеней комбинированного осевого инструмента.

**Ключевые слова:** комбинированный осевой инструмент, режимы резания, осевая сила резания, крутящий момент, отвод стружки.

УДК 621.9.044

**Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях** / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, Л.Г. Добровольская и др. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 25-31. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-004X.

Рассмотрен алгоритм реализации технологии изготовления качественной и точной машиностроительной продукции из труднообрабатываемых материалов на базе современных CAD/CAE/CAM/CAPP-систем. Приведены особенности обработки закаленных сталей. Обоснованы перспективы энергетического подхода для определения области существования технологических режимов высокоскоростной обработки материалов.

**Ключевые слова:** технология обработки, высокоскоростная обработка, CAD/CAE/CAM/CAPP-системы, труднообрабатываемые материалы, энергетический подход, режимы обработки.

УДК 621.519

**Расширение функциональных возможностей станочных комплексов на основе мониторинга процесса механической обработки / Н.Р. Веселовская, А.А. Пермяков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 31-37. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-004X.**

Предложен принципиально новый подход к моделированию процессов механической обработки на станочных комплексах, суть которого состоит в использовании структурных представлений составляющих процесса и реализации концепции методики управления этим процессом на основе единой интегрированной информационной среды, адаптированной к универсальному комплексу компьютерного моделирования Matlab/Stateflow и Matlab/Simulink.

**Ключевые слова:** станочный комплекс, функциональные возможности, мониторинг, калибровка оборудования, процесс механической обработки, информационный, материальный и энергетический потоки, многоцелевые и многокоординатные станки, станки с параллельной кинематикой.

УДК 621.92

**Изменения глубины обдирочного шлифования, вызываемые кривизной проката и прерывистой поверхностью круга / А. Ю. Сизый, Д. В. Сталинский, К. М. Помазан // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 38-48. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.**

В статье представлена модель динамической системы обдирочного шлифования (ДСОШ) с воздействием на нее кривизной проката и прерывистой поверхностью шлифовального круга. Анализ модели ДСОШ выполнен прямым моделированием на компьютере и посредством амплитудно-частотной характеристики системы. Этот анализ позволяет назначать условия обдирочного шлифования для достижения требований к качеству проката после обдирочного шлифования.

**Ключевые слова:** обдирочное шлифование, динамика, моделирование, шлифовальный круг, прокат.

УДК 378.147

**Дифференциация международных стандартов в процессе подготовки производства / Е.В. Набока, М.Э. Колесник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 49-53. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X**

В работе проведен анализ стандартов ISO и даны рекомендации по применению при любых видах машиностроительного производства, во всех организациях независимо от вида деятельности, размера организации и поставляемой продукции (услуг). Выявлена взаимосвязь между основными стандартами качества продукции. Предложены требования, которые могут применяться для разработки системы качества изготовления продукции.

**Ключевые слова:** стандарт, сертификация, качество, управление, производство.

УДК 621.9

**Моделирование технологических процессов обработки корпусных деталей с применением управляющих сетей Петри / О.Ю. Приходько, С.Е. Слипченко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 53-58. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X**

В статье рассматривается интерпретация управляющих сетей (SN), которая построена на основе безопасных сетей Петри (SPN). На примере задачи об эффективном использовании производственных ресурсов продемонстрированы возможности SN, проведено сравнение с моделями на основе безопасных сетей Петри.

**Ключевые слова:** сети Петри, имитационное моделирование, деталь, макропереход, метка, алгоритм.

**Разработка модели напряженного-деформированного состояния «абразивное зерно-связка» / А. Н. Ушаков // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 59-65. – Бібліогр.: 1 назв. – ISSN 2079–004X**

В статье выполнен анализ существующих форм абразивных зерен. Разработана трехмерная модель силового напряженного состояния в которой связка представлена в виде мостиков связи цилиндрической формы, а само зерно представлено в виде комбинированной формы. Эта модель позволяет выполнить комплексное исследование с применением средств вычислительной техники для усовершенствования технологических процессов изготовления и эксплуатации шлифовальных кругов.

**Ключевые слова:** врезное шлифование, шлифовальный круг, зерно, связка, модель.

УДК 621.874

**Исследование напряжено-деформированного состояния металлоконструкций кранов с различными конструкциями механизмов передвижения / Губский С. А. // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 65-74. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-004X.**

Проведено сравнение влияния различных конструкций механизма передвижения мостовых кранов на напряжено-деформированное состояние их металлоконструкций. Исследованы отечественная конструкция механизма передвижения крана на «выкатных» буксах Харьковского завода «ПТУ» и фирмы «КОНЕКРЭЙНС УКРАИНА». Ресурс металлоконструкции последнего крана будет менее зависеть от его механизма передвижения благодаря конструктивным и технологическим решениям в самом механизме.

**Ключевые слова:** мостовой кран, механизм передвижения, металлоконструкция, букса, колесо, нагрузки.

УДК 621.9

**Обеспечение эффективности воздушно-плазменной резки тонколистового металла / Д. А. Миненко, В. А. Иванов, И. Г. Гончаренко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 74-81. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2079-004X.**

Рассмотрены основные критерии обеспечения качества воздушно-плазменной резки стали. Предложена зависимость для определения режимов воздушно-плазменного резания тонколистового металла при условии обеспечения необходимого качества разреза и максимальной производительности обработки с учетом оптимального соотношения производительности плазменной резки с трудоемкостью дальнейшей механической обработки.

**Ключевые слова:** эффективность, воздушно-плазменная резка, скорость перемещения, толщина металла, сила тока, грат, качество.

УДК 621.9.048

**Новый способ нитроцементации стальных поверхностей / Н.В. Тарельник // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 81-86. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

Предложен новый способ нитроцементации стальных деталей, включающий электроэрозионное легирование (ЭЭЛ) углеродом в сочетании с ионным азотированием (ИА), при этом ИА осуществляют до или после операции ЭЭЛ в течение времени, достаточного для насыщения металла азотом на глубину зоны термического влияния.

**Ключевые слова:** нитроцементация, электроэрозионное легирование, ионное азотирование, поверхностный слой, упрочнение.

УДК 681.518.3

**Распределенная компьютерная система повышения эффективности процесса алмазного шлифования / А.Ф. Еликеев, Ф.М. Евсюкова, Л.А. Шищенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 86-98. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

На основе методов непосредственного цифрового и покоординатного управления, иерархического принципа и косвенных измерений амплитуды микронеровностей разработана концепция построения компьютерной системы для повышения эффективности алмазного шлифования в условиях неполной информации. Предложен метод и аппаратные средства для компенсации кинематической погрешности первичных преобразователей мгновенной скорости.

**Ключевые слова:** концепция, архитектура, структурно-логическая организация, методы повышения точности.

УДК 621.923

**Повышение эффективности финишной струйно-абразивной обработки мелких деталей / А. А. Андилахай // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 98-105. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.**

В статье разработаны обобщающие эмпирические математические модели параметров абразивной обработки деталей затопленными струями, которые позволяют по критериям наименьшей шероховатости поверхности и наибольшей производительности определить рациональные параметры обработки. Установлено, что в процессе обработки происходит скругление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и разные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 - 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями глубиной 5 – 6 мкм), существенно уменьшается трудоемкость обработки.

**Ключевые слова:** абразивная обработка, абразивные зерна, мелкие детали, сжатый воздух, сопло Лаваля, шероховатость поверхности, производительность обработки.

УДК 621.923

**Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки / Ф.В. Новиков, О.С. Кленов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 106-111. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

Приведено аналитическое решение об условиях уменьшения технологической себестоимости обработки и возможности реализации высокоскоростного резания. Показано, что скорость резания ограничена экстремумом (минимумом) себестоимости обработки. Увеличить скорость резания и реализовать условия высокоскоростной обработки можно за счет повышения стойкости режущего инструмента путем применения более прочных и износостойких инструментальных материалов и покрытий инструментов, характеризующихся низким коэффициентом трения.

**Ключевые слова:** высокоскоростная обработка, инструментальный материал, себестоимость обработки, скорость резания, температура резания, производительность обработки.

УДК 620.178:539.4

**Исследование сопротивления усталости цапф задних мостов специальных транспортных средств / В. К. Лобанов, Г. И. Пашкова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 112-115. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.**

В работе выполнено исследование сопротивления усталости цапф заднего моста транспортного средства «Дозор» различных вариантов изготовления. Показано, что оптимальными являются испытания деталей при совместном действии изгиба и кручения. Установлено, что место соединения цапфы с насадкой является менее нагруженным и напряженным, чем шлицы и зона крепления цапфы к корпусу.

**Ключевые слова:** транспортное средство, задний мост, цапфа, сопротивление усталости.

УДК 621.9(075.8)

**Обобщенный пример структурно-параметрической оптимизации функционально-ориентированного технологического процесса / В.В. Ступницкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 116-129. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-004X.**

В статье описан пример структурно-параметрической оптимизации функционально-ориентированного технологического процесса обработки деталей пресс-форм. Целевой функцией

такой оптимизации является обеспечение интегрального критерия, обеспечивающего износостойкость, контактную жесткость, усталостную прочность и коррозионную стойкость изделий в условиях их потенциальной эксплуатации. В статье приведена методика исследований и алгоритм оптимизации.

**Ключевые слова:** функционально-ориентированный технологический процесс, оптимизация, остаточное напряжение, усталостная прочность, коррозионная стойкость, коэффициент трения, CAF – система.

УДК 621.91

**Трещинообразование при сверлении полимерных композиционных материалов / Г. Л. Хавин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 129-139. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2079-004X.**

Рассмотрена задача определения величины и глубины залегания трещины расслоения при сверлении полимерных многослойных композитов. Учитывая анизотропию свойств материала, предполагается, что трещина расслоения имеет эллиптическую форму, и значение большей оси трактуется как максимальная длина трещины. Используя эмпирическое представление фактора расслоения, как функции режимных параметров обработки, представлена модель локального расслоения. Полученное соотношение связывает глубину появления максимальной трещины расслаивания и значение ее длины. Представлены количественные зависимости длины трещины от частоты вращения и подачи.

**Ключевые слова:** трещина расслоения, фактор расслаивания, полимерные композиты.

УДК 621.002

**Методика определения функций принадлежности в системе проектирования микроструктуры технологического процесса / А.Р. Рузетов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 139-147. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

Представлена методика решения проблемы оптимизации затрат вспомогательного времени, связанных с машинно-ручной работой в системе многостаночного производственного комплекса полуавтоматического оборудования. Для более детального отображения особенностей проведения операции целесообразно использование микроэлементного синтеза рабочего процесса с помощью управляемых функций принадлежности. Это способствует более точному учету производственных нужд конкретной рабочей ситуации.

**Ключевые слова:** технологическое оснащение, технологический прием, технологический переход, техническая инструкция, фаза функциональной активизации, лингвистическая переменная.

УДК 621.86

**Моделирование перемещения мостового крана с перекосом / О. В. Григоров, О. В. Степochкина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 147-153. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.**

В статье рассматриваются особенности программы, предназначенной для исследовательских и инженерных расчетов, объектом которых является кран мостового типа, движущийся с забеганием одной из опор. Обосновывается важность учета параметров приводов механизма передвижения. Предложен подход, позволяющий задавать и контролировать основные параметры элементов привода. Особое внимание уделено обеспечению возможности быстрого перезадаания кинематической схемы в среде MS Excel.

**Ключевые слова:** перекося крана, краны мостового типа, механизм, математическая модель, MS Excel, кинематическая схема, структура данных.

**УДК 621.91**

**Многокритериальный выбор оптимальных технологических процессов обработки корпусных деталей / А. В. Котляр // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 153-163. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079-004X.**

Рассмотрены вопросы многокритериальной оптимизации технологических процессов изготовления корпусных деталей в условиях многономенклатурного производства. Разработаны конкурирующие варианты технологических процессов и систему критериев оптимизации. Проведен



сравнительный анализ критериев оптимальности и определен наивыгоднейший вариант технологического процесса в зависимости от производственных условий.

**Ключевые слова:** корпусная деталь, многономенклатурное производство, технологический процесс, критерии оптимальности, интенсивность формообразования, интенсивность прибыли.

УДК 658.512

**Разработка организационно-технологических структур сборки сложных машиностроительных изделий / О.Л.Кондратюк, А.О.Скоркин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 163-167. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

Большой удельный вес в общем объеме сборочных операций занимают операции по сборке типовых соединений, характеризующихся высоким уровнем монотонности труда, повторяемости рабочих движений, а также не требующих высокой квалификации работника. Исходя из этого в данной работе рассмотрены принципы разработки организационно-технологических структур системы мелкосерийной сборки сложных машиностроительных изделий на основе комплексного анализа существующих методов разработки структур сборки для мелкосерийной сборки. Сделанны вывод, по выбору рациональных структур сборки для конкретных условий и вида машиностроительных изделий

**Ключевые слова:** технологический процесс сборки, сборочная единица, точность, рабочее место.

УДК 658.52.011.56

**Технологические особенности зубообработки закаленных колес одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания / А.А. Ключко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 167-172. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-004X.**

Для чистовой зубообработки колес крупного модуля предложен метод прерывистого обката с использованием дисковых немодульных фрез (размеры фрезы не зависят от модуля), оснащенных керамическими пластинками и специальными фрезерными суппортами с одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания с учетом обеспечения всех основных установочных движений скоростных немодульных дисковых фрез. Метод прерывистого обката используется на зубострогальных и зубошлифовальных станках и обладает тем преимуществом, что в момент рабочего хода инструмента заготовка колеса неподвижна или совершает незначительный поворот, т.е. обработка протекает, по сравнению с методом обкатки с обеспечением наибольшей контактной жесткости инструмента и определяет способность поверхностных слоев зубчатых колес, находящихся в контакте с режущей кромкой инструмента, обеспечивать процесс резания.

**Ключевые слова:** зубообработка, схемы резания, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, одношпиндельные и двухшпиндельные суппорта

УДК 621.9.15

**Построение модели эквивалентной упругой системы тяжелого карусельного станка / Е. В. Мироненко, С. Л. Миранцов, Д. Г. Ковалёв, // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 172-182. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-004X.**

Предлагаются модель технологической системы тяжелого карусельного станка. Предложена расчетная схема системы «ползун - инструмент». Сделаны выводы о динамических свойствах режущего инструмента при заданных условиях обработки.

**Ключевые слова:** карусельный станок, инструмент, модель, ползун, резание, алгоритм.

УДК 658.8.01:005.21

**Использование синергетических стратегий производственно-экономических систем / Е. В. Камчатная-Степанова, Ю. А. Ключко, Н.Г. Сикетина // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 182-186. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-004X.**

Обосновано стратегическое планирование как необходимый элемент деятельности машиностроительного предприятия в сфере повышения эффективности его деятельности. Сделаны выводы о возможности достижения большей эффективности целостной системы, чем сумма эффектов взаимодействия отдельных подсистем и элементов, за счет использования синергетического подхода к стратегическому планированию деятельности предприятия

**Ключевые слова:** планирование, стратегия, машиностроение, синергия, синергетический подход.

УДК 621.9

**Методы анализа и оптимизации нагруженных элементов технологических систем / Э. А. Симсон, С. А. Назаренко, И. Д. Прево // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 187-192. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.**

На єдиній науково-методологічній основі розглянуті числові методи аналізу та оптимізації високо навантажених елементів деяких технологічних систем. Математичне моделювання процесу розкочування кільця підшипнику проводилося за допомогою метода скінчених елементів в постановці об'ємного напружено-деформованого стану в рамках інкрементального змішаного підходу Лагранжа-Ейлера. Представлена динамічна модель сонотроду для ультразвукової системи технологічного призначення.

**Ключові слова:** математична модель, оптимізація, технологічні системи, методи аналізу, високо навантажені елементи, розкочування, сонотрод, інструмент.

УДК 621.9.025

**Аналитическая модель и расчет рейтинговой оценки нитридных сверхтвердых композитов / Ю. Г. Гуцаленко Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХП», 2014. – № 42 (1085). – С. 182-196. – Бібліогр.: 3 назв. – ISSN 2079-004X.**

Рассматривается проблема сравнения эксплуатационных возможностей инструментальных материалов в условиях использования каждого из них в своей рекомендуемой области и в своей системе нормативных режимов резания и нормативной стойкости. Предложена аналитическая модель и выполнен расчет рейтинговой оценки для стандартной группы сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора.

**Ключевые слова:** кубический нитрид бора, сверхтвердые композиты, эксплуатационные возможности, рейтинговая оценка.

## ABSTRACTS

**Analysis of cutting patterns and technological equipment for intensive and high quality gear treatment quenched coarse-grained wheels / U.V.Timofeev, A.N Shelkovoy, E.V. Mironenko, A.A. Klochko, A.N. Kravtsov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 7-19. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.**

Relationship theoretical cutting speed depending on various technological factors, physical and mechanical properties of materials and tools of hardened gear enables the selection of rational schemes gear treatment. Schemes cutting and technological equipment for intensive and high quality gear treatment using the method of numerical simulation of the process of formation of the surface layer, thus yielding stress-strain state of the surface layer of machined gears, tool and chip and recommendations on the choice of technological rules processing.

**Keywords:** cutting scheme, technological factors, the quality of surface-hardened gears coarse-grained, numerical simulation.

**Research of force characteristics by a series-parallel hole-making operations with combined axial tool / M. P. Stepanov, M. P. Ivanova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 19-25. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.**

An axial component of cutting force and the torque at a series-parallel mode with combined axial tool was investigated. The influence of the number of steps of combined axial tool for total power loads and their

variation with an increase in the number of concurrent steps of tool was researched. The conclusion was made about a suitable number of concurrent steps of the combined axial tool.

**Key words:** combined axial tool, cutting conditions, axial cutting force, torque, chip removal.

**Improving competitiveness national mechanical-engineering production in modern terms / S.S. Dobrotvorsky, E.V. Basova, L.G. Dobrovolskaya et al.** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 25-31. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

The algorithm implementation technology of manufacturing high-quality and precision engineering products of hard materials based on advanced CAD/CAE/CAM/CAPP-systems was considered. The specialty of the hard-steels machining were described. The energy approach prospects to determine the region of technological modes existence of high-speed processing of materials were given.

**Keywords:** processing technology, high-speed machining, CAD/CAE/CAM/CAPP-system, hard materials, energy approach, treatment regimenP.

**Completion functional possibilities of machine-tool complexes on bases of monitoring process of tooling / N.R. Veselovskaja, A.A. Permjakov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 31-37. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-004X.

The basic idea of work is the development of principle new way of machine tools complex monitoring of tooling, which is aimed to organize the methods of tooling process control on the basis of the unique integrated informative environment of the computer design of Matlab/Stateflow and Matlab/Simulink adapted to the universal complex, at structural presented all of constituents of process of tooling and design, as instrument of decision of task which extends functional possibilities of machine-tool complexP.

**Keywords:** machine-tool complex, functional possibilities, monitoring, calibrations of equipment, process of tooling, informative, financial and power streams, multico-ordinate machine-tools, machine-tools with a parallel kinematicP.

**Changes depth roughing grinding caused curvature of rolled and discontinuous surface circle / Yu. A. Sizuy, D. V. Stalinskiy, Ye. M. Pomazan** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 38-48. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

In this article the model of the dynamic system of rough grinding (DSGR) with action on it by curvature of rolled product and by interruption surface of grinding wheel are offered. The analysis of DSRG model are fulfilled by right simulation in computer and by amplitude-frequency of the system. This analysis allow to call for conditions of rough grinding for achievement of requirement to quality rolled product after rough grinding.

**Keywords:** rough grinding, dynamic, modeling, grinding wheel, rolled.

**Differentiation of international standards in the preparation of the production / E.V.Naboka, M.E. Kolisnyk** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 49-53. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

The paper analyzes the ISO standards and recommendations for use in all types of engineering production, in all organizations, regardless of type of activity, size of the organization and delivered products (services). The interrelation between the main standards of product quality was detected. Proposed requirements, which can be used to develop a system of manufacturing quality productP.

**Keywords:** standard, certification, quality management, production.

**Modeling of technological processes of body parts using the control Petri nets / O.Yu. Prikhodko, S. Slipchenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 53-58. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

In article discusses interpretation of the Control Networks (SN), which is built on the basis of safe Petri nets (SPN). In the example of task about the effective use of production resources possibilities of SN are shown, comparing is conducted to the models on the basis of safe Petri netP.

**Keywords:** Petri nets, simulation, detail, label, algorithm.

**Developing a stress-strain model state of «an abrasive pellet-sheaf» / A.N.Ushakov** Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 59-65. – Bibliogr.: 1. – ISSN 2079-004X.

In a paper the assaying of existing shapes of abrasive pellets is made. The three-dimensional sample piece of a power tension in which the sheaf is presented in the form of bridges of link of the cylindrical shape is developed, and the pellet is presented in the form of the combined shape. This sample piece allows to execute complex probe with application of computer aids for improvement of master schedules of manufacture and maintenance of wheelP.

**Keywords:** grind, a wheel, a pellet, a sheaf, a sample piece.

**Research is strained - the deformed condition of a metalwork of cranes with various designs of mechanisms Movement / Gubskiy S . O.** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 65-74. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-004X.

Comparison of influence of various designs of the mechanism of movement of bridge cranes on the intense deformed condition of their metalwork is carried out. Are investigated a domestic design of the mechanism of movement of the crane on axle boxes of the Kharkov plant "PTU" and KONEKREYNS UKRAINE firm. The resource of a metal construction of the last crane will depend less on its mechanism of movement thanks to constructive and technological decisions in the mechanism.

**Keywords:** bridge crane, movement mechanism, metal construction, axle box, wheel, loadingP.

**Ensuring the effectiveness of air-plasma cutting of sheet metal / D.O. Minenko, V.O. Ivanov, I.G. Goncharenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 74-81. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

The main criteria for the quality assurance of air-plasma cutting steel were described. The dependence for determining the modes of air-plasma cutting of sheet metal was proposed, provided the required quality of the cutting and the maximum processing performance with the optimal combination of performance plasma cutting complexity further machining.

**Keywords:** efficiency, air-plasma cutting, moving speed, the thickness of the metal, current, burr, quality.

**New way of the steel surfaces ni-carbing /N.V. Terelnik** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 81-86. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-004X.

The new way of the steel parts ni-carbing, including electroerosive alloying (EEA) by carbon with a combination to ionic nitrogen hardening (INH) is offered, besides INH carry out up to or after operation EEA during time, sufficient for saturation of metal by nitrogen on depth of a thermal influence zone.

**Keywords:** a ni-carbing, an electroerosive alloying, ionic nitrogen hardening, surface layer, hardening.

**Distributive computer system increase of efficiency process of diamond grinding / O.Ienikiev, F.M. Yevsiukova, L.O. Shyshenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 86-98. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

It is developed the concept of building a computer system to improve the efficiency of diamond grinding in conditions of incomplete information on the basis of methods of direct and coordinate-wise management , hierarchical principle and indirect measurements of the amplitude of microroughnessP. It is suggested the method and hardware means to compensate the kinematic error of primary converters of instantaneous speed.

**Keywords:** concept, architecture, structurally logical organizations, methods of improving the accuracy.

**Improving the efficiency of finishing abrasive blasting of small parts / A. A. Andilayah** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 98-105. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X.

In the paper, we develop mathematical models generalizing the empirical parameters of the abrasive machining submerged jets, which allow for the smallest surface roughness criteria and maximum performance to determine rational processing parameterP. It is established that during the treatment the rounding of edges of parts, eliminates burrs, corrosion and different inhomogeneity on the treated surface forming a homogeneous

mat surface with a roughness in the range  $Ra = 0,8 - 1,25$  mm, with the reinforcing hardening (deep compressive stresses 5 - 6 microns), significantly reduced the complexity of processing.

**Keywords:** abrasion, the abrasive grains, fine detail, the compressed air, the Laval nozzle, surface roughness, processing performance.

**Theoretical justification conditions for increasing the efficiency of high-speed machining / F.V. Novikov, O.P. Klenov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 106-111. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

The analytical solution of the conditions to reduce the cost of processing and technological feasibility of high-speed cutting. It is shown that the cutting speed is limited by the extremum (minimum) cost of treatment. Increase cutting speed and to implement high-speed machining conditions can be achieved by increasing the resistance of the cutting tool through the use of more durable and wear-resistant tool materials and coatings instruments characterized by a low coefficient of friction.

**Keywords:** high-speed machining, tool material, the cost of processing, cutting speed, cutting temperature, processing performance

**Fatigue resistance study of rear axle trunnions of special vehicles / V. K. Lobanov, G. I. Pashkova** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 112-115. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-004X.

The study is related to the development of the special vehicle "Dozor". This work presents the researching of the fatigue resistance of rear axles trunnions for the vehicle "Dozor" from different variants of manufacturing. Totally, 20 different constructions of the trunnion, namely welded (11 variants) and mixed (9 variants) ones are examined. Universal testing machine, enabling to generate maximum static load of 500 kN and maximum cyclic load of 250 kN with an accuracy of  $\pm 1\%$  is used for testing. Working load is simulated using loading conditionP. It is shown that the test items are optimal under the combined action of bending and torsion. Examples of the tensometry results and final results of all tests are given. It was founded that the connection point of trunnion with nozzle is less loaded and less stressful than splines and zone, where trunnion is connected to the body. Approved test pattern for trunnion under the simultaneous action of the bending and torsional moments is recommended for further use in the development of technologies and standards in percentage check tests of trunnions in serial production for the purpose of intermittent monitoring of the level and stability of the quality of their manufacture.

**Keywords:** vehicle, rear axle, trunnion, fatigue resistance.

**A Generalized Example of Structural and Parametric Optimization of Functionally-Oriented Process / V.V.Stupnytskey** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P.116-129. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-004X.

The example of structural and parametric optimization of the functionally-oriented technological process machining of mold's parts is described in the article. The objective function is to provide such an optimization criterion integrated providing wear resistance, the contact stiffness, fatigue strength and corrosion resistance of products in terms of their potential exploitation. The article describes the research methodology and algorithm optimization.

**Keywords:** function-oriented process optimization, residual stress, fatigue strength, corrosion resistance, friction coefficient, CAF- system

**Cracking when drilling polymer composites / G. L. Khavin** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 129-139. – Bibliogr.: 26. – ISSN 2079-004X.

The problem of define the dimension and depth of interlayer delamination crack for drilling of polymeric reinforced multilayer composites is considered. Take account of anisotropic properties of material suppose crack delamination has elliptical shape and grater axis is maximal crack length. The empirical form of delamination factor using as function of mechanical treatment parameterP. The model of local delamination, which used of linear fracture mechanic and empirical formulation of delamination factor, is presented. The correlation of connect maximal crack delamination depth appeared and hers length is obtained. The numerical dependences between crack length and speed and feed are presented.

**Keywords:** crack delamination, delamination factor, polymer compositeP.

**Method of determining membership functions in system design of microstructure technology transition / A.R. Ruzmetov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 139-147. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

To improve the efficiency of operation of semiautomatic equipment in the conditions of multimachine system, it is necessary to provide relative synchronization of periods of work and service of all units of equipment. In solving this problem it is necessary more accurately determine costs of time required for the each of technological step. A significant part the working time of machining of cutting operation (about 40%) is occupied auxiliary operations using handmade. System microelements labor movements auxiliary technological process allows the most detailed display the characteristics of the operation and to implement its simulation. For the synthesis of microelement workflow expedient use of linguistic variables associated with basic numerical values relations via configurable membership function. This allows you to manage the synthesis of the microstructure of the working process, which promotes more precise account of industrial needs of the specific work situation.

**Keywords:** technological equipment, technology reception, technology transition, technical manuals, functional activation phase, linguistic variable.

**Modeling moving bridge crane with a warp / O.V. Grigorov, O.V. Stepochkina** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 147-153. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-004X.

Article is devoted to aspects of the bridge crane, moving with skew, mathematical modeling. The model is made as a program in an Excel environment, which can be used for the solution of research tasks, and also for engineering calculation. The mechanism submodel is considered. The examples proving practical importance of the mechanism elements specified modeling are given. The special attention is paid to architecture of data presentation on spreadsheet. Provides a method of mechanism kinematic scheme object-oriented description. Thus to each element of the drive there corresponds the separate column. Communications of data in columns are executed by the same principle, as well as mechanical communications between drive element. Restructuring of the kinematic scheme is made by adding, deleting, and moving columns without VBA programming. This provides reliability, simplicity and visibility, which is important for engineering calculation.

**Keywords:** crane skew, bridge type cranes, mechanism, mathematical model, MS Excel, kinematic scheme, data structure.

**Multicriterion choice of optimal technological processes treatment of cabinet-type details / A. V. Kotlyar** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P.153-163. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2079-004X.

The questions of multicriterion optimization technological processes of making cabinet-type details are considered in the conditions of multitop-level production. Worked out competitive variants of technological processes and system of criteria of optimization. The comparative analysis of criteria of optimality is conducted and the most optimal variant of technological process is certain depending on productive term.

**Keywords:** cabinet-type detail, multitop-level production, technological process, criteria of optimality, intensity of forming, intensity income.

**Development of organizational and technological structures of assembly of complex engineering products / O.L.Kondratyuk, A.O.Skorkin** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 163-167. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X..

Large proportion of the total assembly operations occupy assembly operations model compounds characterized by a high level of monotony of work, the frequency of occurrence of labor movements, as well as low-skilled worker. Proceeding from this, this paper discusses the design principles of organizational and technological structures of small-scale assembly of complex engineering products based on a comprehensive analysis of existing methods for developing small-scale assembly structures for assembly. The made conclusions on the choice of rational assembly structures for specific conditions and the type of engineering products

**Keywords:** workflow assembly, subassembly, accuracy, workplace.

**Technological features hardened wheel spindle gear treatment and duplex scheme cutting / A.A. Klochko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 167-172. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-004X.

For finishing gear wheels large module a method is proposed for intermittent rolling using modular disk cutters (size cutters do not depend on the module), equipped with ceramic plates and special milling calipers with one spindles and two spindle cutting scheme taking into account all the basic installation of the movements of high-speed mobile disk cutters. Method intermittent rolling is used for shaping and grinding machines and has the advantage that at the time of the stroke of the tool cutting wheel is stationary or makes a slight rotation, i.e., processing flows, compared with the method of running with the support of the greatest of the contact stiffness of the tool and determines the ability of the surface layers of gear wheels in contact with the cutting edge of the tool to provide a cutting action.

**Keywords:** gear treatment, cutting scheme, coarse-grained hardened gears, single and duplex caliper

**Building a model of equivalent elastic system of heavy vertical lathes / E. V. Mironenko, P.L. Mirantsov, D.G. Kovalev** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P.172-182. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-004X.

Offers a model of technological system of heavy vertical lathes. Proposed a design scheme of the system "slider - a tool". The conclusions about the dynamic svoystv cutting tool for given processing conditions.

**Keywords :** boring machine tool model slider cutting algorithm.

**The use of synergistic strategies of production and economic systems / E.V. Kamchatnova-Stepanova, Y.A. Klochko, N.G. Siketina** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P.182-186. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-004X.

There has been informed strategic planning as a necessary element of the activities of the machine building enterprise in improving the efficiency of its activities. To determine the scale of synergies application of the synergetic theory on machine building enterprise. Defined methodological principles of creation of positive synergistic effect on the process management of enterprise development machine building industry, namely, the necessity of the application of systematic and synergetic approach that allows to analyze the complex factors internal and external marketing environment and based on the assessment of the prospects for their further development to determine the mechanisms for managing development processes the enterprise. The conclusions about the possibility of achieving greater efficiency of complete system than the sum of the effects of the interaction of individual subsystems and components through the use of a synergistic approach to the strategic planning of the company

**Keywords:** planning, strategy, engineering, synergy, synergistic approach.

**A method of the analysis and optimization of construction elements of the technological systems / E. A. Simson, S. A. Nazarenko, I. D. Prevo** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 187-192. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

Mathematical model of construction elements of the technological system is presented. Structural optimization methods of high both geometric and physical informational content are suggested for complicated finite-element models, especially with design variables vector of high dimension, to minimize numbers of straight calculation procedure activation. Based on the current investigations two basic methods of optimization are developed. The first one uses an approximation of the problem in a finite dimensional space. The second one is based on setting the problem in a continuum space, in which the initial differential, integral, or variational equation describing the construction model is defined. The resolved equations of mathematical formulation are provided. Computation stages are investigated. In the three-dimensional formulation contact problem (distribution of normalized dynamic stresses) is solved numerically for the process of ring-rolling. The analysis of spectrum of frequencies and modes of vibrations of sonotrod of ultrasonic welding is conducted.

**Keywords:** mathematical modeling, tool, plastic deformation, sonotrod, ring-rolling, technological system, finite-element method, contact problem, modes of vibrations.

**Analytical model and the calculation of rating estimation for superhard boron nitride composites / Yu. G. Gutsalenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2014. – № 42 (1085). – P. 192-196. – Bibliogr.: 3. – ISSN 2079-004X.

The problem of comparing the operational capabilities of the tool materials in the conditions of use of each of them in their recommended area and its system of standard cutting conditions and regulatory stability is considered. Development is based on the database of the conditions and tool life norms for tests of the superhard materials under regulations the interstate standard 28762-90 that is applied in Ukraine. An analytical model and the calculation are made for the rating of the standard group of superhard composites based on cubic boron nitride. Preference for the proposed model as a reflection of adopted technological ideology is determined by amount (volume) of removed material for the cutting tool life. The highest rating is determined by the maximum material removal. The calculations on the model established the superiority of Tomal-10 composite over others. In the context of the research motive this composite is proposed as a base superhard boron nitride to develop an expert system for forecasting roughness on difficult to machine materials after diamond-spark grinding. The expert system is created in Ukraine within the framework of tasks for state research project 0113U000425.

**Keywords:** cubic boron nitride, superhard composites, operational capabilities, rating estimation.



## ЗМІСТ

<b>Тимофеев Ю.В.</b> 30 років завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів в Харківському політехнічному інституті, 65 років трудового стажу. Наш вчитель, науковець, прекрасна людина.....	3
<b>Тимофеев Ю.В., Шелковой А.Н., Мироненко Е.В., Клочко А.А., Кравцов А.Н.</b> Анализ схем резания и технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных колес.....	7
<b>Степанов М.С., Иванова М.С.</b> Дослідження силових характеристик при послідовно-паралельній обробці отворів комбінованим осьовим інструментом.....	19
<b>Добротворский С.С., Басова Е.В., Добровольская Л.Г. Мяслица А.К.</b> Повышение конкурентоспособности отечественного машиностроительного производства в современных условиях.....	25
<b>Веселовська Н.Р., Пермяков О.А.</b> Розширення функціональних можливостей верстатних комплексів за рахунок моніторингу процесу механічної обробки.....	31
<b>Сизый Ю.А., Сталинский Д.В., Помазан Е.М.</b> Изменения глубины обдирочного шлифования, вызываемые кривизной проката и прерывистой поверхностью круга.....	38
<b>Набока Е.В., Колесник М.Э.</b> Дифференциация международных стандартов в процессе подготовки производства.....	49
<b>Приходько О.Ю., Слипченко С.Е.</b> Моделирование технологических процессов обработки корпусных деталей с применением управляющих сетей Петри.....	53
<b>Ушаков А.Н.</b> Разработка модели напряженного-деформированного состояния «абразивное зерно-связка».....	59
<b>Губський С.О.</b> Дослідження напружено-деформованого стану металоконструкцій мостових кранів з різними конструкціями механізму пересування.....	65
<b>Міненко Д.О., Іванов В.О., Гончаренко І.Г.</b> Забезпечення ефективності повітряно-плазмового різання тонколистового металу.....	74
<b>Тарельник Н.В.</b> Новый способ нитроцементации стальных поверхностей....	81
<b>Єнікєєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Шищенко Л.О.</b> Розподілена комп'ютерна система підвищення ефективності процесу алмазного шліфування.....	86

<i>Андилахай А.А.</i> Повышение эффективности финишной струйно-абразивной обработки мелких деталей.....	98
<i>Новиков Ф.В., Кленов О.С.</i> Теоретическое обоснование условий повышения эффективности высокоскоростной обработки.....	106
<i>Лобанов В.К., Пащикова Г.И.</i> Исследование сопротивления усталости цапф задних мостов специальных транспортных средств.....	112
<i>Sturpnyskey V.V.</i> Generalized Example of Structural and Parametric Optimization of Functionally-Oriented Process.....	116
<i>Хавин Г.Л.</i> Трещенообразование при сверлении полимерных композиционных материалов.....	129
<i>Рузметов А.Р.</i> Методика определения функций принадлежности в системе проектирования микроструктуры технологического процесса.....	139
<i>Григоров О.В., Степочкина О.В.</i> Моделирование перемещения мостового крана с перекосом.....	147
<i>Котляр О.В.</i> Багатокритеріальний вибір оптимальних технологічних процесів обробки корпусних деталей.....	153
<i>Кондратюк О.Л., Скоркін А.О.</i> Розробка організаційно-технологічних структур зборки складних машинобудівних виробів.....	163
<i>Клочко А.А.</i> Технологические особенности зубообработки закаленных колес одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания.....	167
<i>Мироненко Е.В., Миранцов С.Л., Ковалев Д.Г.</i> Построение модели технологической системы тяжелого карусельного станка.....	172
<i>Камчатная-Степанова Е.В., Клочко Ю.А., Сикетина Н.Г.</i> Использование синергетических стратегий производственно-экономических систем.....	182
<i>Симсон Э.А., Назаренко С.А., Прево И.Д.</i> Методы анализа и оптимизации нагруженных элементов технологических систем.....	187
<i>Гуцаленко Ю.Г.</i> Аналитическая модель и расчет рейтинговой оценки нитриды борных сверхтвердых композитов.....	192
РЕФЕРАТИ.....	197
РЕФЕРАТЫ.....	203
ABSTRACTS.....	209

## ДЛЯ ПОДАТКІВ

---

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХП»**

**Збірник наукових праць**

Серія:  
Технології в машинобудуванні

№ 42 (1085)

Наукові редактори д-р техн. наук, проф. Ю.В. Тимофієв,  
д-р техн. наук, проф. О.О. Ключко  
Технічний редактор канд. техн. наук, ст. виклад. Є.В. Басова

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХП».  
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.  
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: vestms@lenta.ru.

Обл.-вид № 97–14.

Підп. до друку 04.12.2014 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік.-вид. арк. 10.  
Тираж 300 пр. Зам. № 2717. Ціна договірна.

---

Видавець і виготовлювач

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта  
видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

---

Отпечатано в типографії ООО «Цифра Принт»  
на цифровом комплексі Хехоx DocuTech 6135.

Свидетельство о Государственной регистрации А01 № 432705 от 3.08.2009 г.  
Адрес : г. Харьков, ул. Данилевского,30. Телефон : (057) 7861860.