

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

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE
National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Технології в
машинобудуванні**

№ 6 (1282) 2018

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
«KhPI». Series: Techniques in
a machine industry**

No. 6 (1282) 2018

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2018

Kharkiv
NTU "KhPI", 2018

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2018. — № 6 (1282) 2018. — 140 с. — ISSN 2079-004X.

Видання присвячене освітленню досягнень в галузі машинобудування. Мета видання полягає у публікації оригінальних досліджень, які теоретично досліджують та вдосконалюють технологічні процеси виготовлення деталей машин і складання виробів, технологічного обладнання та оснащення, із приділенням особливої уваги: методам механічної обробки, їх стабільності і надійності; формуванню точності й якості поверхонь деталей машин; моделюванню, проектуванню й оптимізації технологічних процесів; організаційно-технологічним проблемам гнучкого виробництва; автоматизації операцій механоскладального виробництва; створенню, управлінню та діагностиці технологічних і мехатронних систем; інтегрованим та комп'ютерним технологіям в машинобудуванні; проблемам створення систем підтримки життєвого циклу виробу машинобудування; фізико-механічним та нанотехнологіям в машинобудуванні.

Для науковців та фахівців в галузі технологій машинобудування, викладачів вищої школи, аспірантів і студентів.

This issue is devoted to clarify achievements in the mechanical engineering. The purpose of the edition is publishing original researches which explore theoretically and improve the engineering processes of machines parts manufacturing and products assembly, equipment, jigs and fixtures with paying special attention to stability and reliability of machining methods; assurance of accuracy and quality of surfaces; modeling, design and optimization of machining processes; organizational and technical problems of flexible production; automation of operations of mechanical assembly production; creation, management and diagnostics of technological and mechatronic systems; integrated and computer technologies in engineering; design problems of systems for supporting the life cycle of a machine-building product; physical-mechanical technologies and nanotechnologies in mechanical engineering.

The edition is intended for scientists and specialists of mechanical engineering, lecturers, post-graduate students and students.

Державне видання.

Свідцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого наказом МОН України від 21.12.2015 № 1328 «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року»

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://web.kpi.kharkov.ua/tmms/ru/vestnik-ntu-hpi/>

Засновник

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Головний редактор

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Заст. головного редактора

Марченко А. П., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Секретар

Горбунов К. О., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Редакційна колегія серії

Відповідальний редактор:

Пермяков О.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заступник відповідального редактора:

Клочко О.О., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар:

Басова Є.В., к-т техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Антонюк В.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Добротворський С.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Кальченко В.В., д-р техн. наук, проф., ЧНТУ, Україна

Кане М.М., д-р техн. наук, проф., Білоруський НТУ, Білорусь

Ковальов В.Д., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Мироненко Є.В., д-р техн. наук, проф., ДДМА, Україна

Пасічник В.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сизий Ю.А., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Сталінський Д.В., д-р техн. наук, проф., ДП УкрНТЦ «ЕНЕРГОСТАЛЬ», Україна

Степанов М.С., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Фадєєв В.А., д-р техн. наук, проф., ПАТ «ФЕД», Україна

Хавін Г.Л., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шелковий О.М., д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПІ», Україна

Editor-in-chief

Sokol Ye. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Marchenko A. P., dr. tech. sc., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Secretary

Gorbunov K. O., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff

Associate editor:

Permiakov A.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor:

Klochko A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary:

Basova Ye. V. PhD, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Antonyuk V.S., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Dobrotvorskiy S.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kalchenko V.V., prof., ChNTU, Ukraine

Kane M.M. , prof., Belarusia NTU, Belarus

Kovalev V.D., prof., DSEA, Ukraine

Mironenko Ye.V., prof., DSEA, Ukraine

Pasichnyk V.A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

Syzyi Yu.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Stalinskyi D.V., prof., Ukraine

Stepanov M.S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Fadiev V.A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Khavin G.L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shelkovyi O.M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 5 від 25 травня 2018 р.

К. В. СЛІПЧЕНКО, І. А. ПЕТРУША, В. З. ТУРКЕВИЧ

**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СВН КОМПОЗИТІВ ЗІ ЗВ'ЯЗКАМИ НА ОСНОВІ
КАРБІДІВ ТІ, СR, V В УМОВАХ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ТОЧІННЯ AISI 316L**

Досліджено механічні властивості та експлуатаційні характеристики різального матеріалу на основі кубічного нітриду бору зі зв'язками у виді карбідів перехідних металів (Ti, Cr, V), алюміній був введений в шихту якості гетеру. Композити одержано шляхом термобаричного спікання в апараті високого тиску типу тороїд. Виявлено, що зразки спечені в температурному інтервалі 2000-2150°C демонструють найвищу зносостійкість в умовах високошвидкісного точіння нержавіючої сталі AISI 316L.

Ключові слова: точіння, карбідів, титан, ванадій, хром, сталь, обробка, високий тиск, твердість.

Е. В. СЛИПЧЕНКО, И. А. ПЕТРУША, В. З. ТУРКЕВИЧ

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВН КОМПОЗИТОВ СО СВЯЗКАМИ НА ОСНОВЕ
КАРБИДОВ ТI, СR, V В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТОЧЕНИЯ AISI 316L**

Исследовано механические свойства и эксплуатационные характеристики режущего материала на основе кубического нитрида бора со связками в виде карбидов переходных металлов (Ti, Cr, V), алюминий был введен в шихту качестве гетера. Композиты получено путем термобарического спекания в аппарате высокого давления типа тороид. Обнаружено, что образцы полученные в температурном интервале 2000-2150 °C демонстрируют самую высокую износостойкость в условиях высокоскоростного точения нержавеющей стали AISI 316L.

Ключевые слова: точение, карбиды, титан, ванадий, хром, сталь, обработка, высокое давление, твердость.

K. V. SLIPCHENKO, I. A. PETRUSHA, V. Z. TURKEVICH

**PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF CBN COMPOSITES WITH BINDERS BASED ON
CARBIDES OF TI, CR, V IN CONDITIONS OF HIGH-SPEED MACHINING OF AISI 316L**

In current paper, we report on mechanical properties and wear resistance of high pressure high temperature (HPHT) sintered cutting tool materials based on cBN with carbides of transition metals Ti, Cr, V used as binders. Initial mixtures of compositions were chosen with 60 vol.% of cBN, 35 vol.% of binder phase and 5 vol.% of Al. Aluminum was introduced into the starting mixture as an oxygen getter. Sintering were conducted in HPHT toroid type apparatus under pressure of approx. 7.7 GPa and in the temperature range of 1600-2450°C. Elastic properties were measured using the ultrasonic pulse-echo technique. The highest tool wear resistance is demonstrated by the tools sintered at 2000-2150°C during machining of AISI 316L. It was found that samples sintered in the temperature range of 2000-2150 °C demonstrate the highest wear resistance while machining of stainless steel AISI 316L.

Keywords: turning, carbides, titanium, vanadium, chromium, steel, performance, high pressure, hardness.

Вступ. В умовах лезової обробки матеріал різальної кромки зазнає комплексного впливу високих стискаючих напружень, сил різання та температур, що призводить до зносу останньої. Підвищення швидкості різання індукує зростання температури в контактній зоні інструмент-оброблюваний матеріал до 1000-1100 °C [1]. Підвищення температури знижує міцність матеріалу заготовки і тим самим збільшує його пластичність [2]. Серед типових моделей зносу є утворення шару нагромадження матеріалу на різальній кромці, знос по задній поверхні інструменту, утворення лунок на передній поверхні, утворення проточин на різальних кромках, пластична деформація, термічне розтріскування, викришування та механічне руйнування різальної кромки. Основними механізмами зносу різальної кромки є адгезія, абразивне стирання, хімічний знос, та руйнування поверхні [3-5].

Групою французьких вчених [6] досліджено взаємозв'язок швидкості різання, типу різального інструменту та його параметрів (розміру зерен 2-8 мкм, фазового складу 50-90 % cBN) з терміном служби та механізмами зносу в умовах високошвидкісного точіння Inconel 718. У випадку використання різального інструменту на основі cBN найкращу зносостійкість та тривалість служби демонструють зразки з вмістом cBN від 45% до 60% (BL група) при швидкостях різання від $v_c = 250$ м/хв до $v_c = 300$ м/хв. Матеріал зв'язуючої фази є основним параметром впливу на зносостійкість інструментарію. Підвищення

вмісту cBN з 65% до ≤ 80 % призводить до зниження терміну служби інструменту з 9,6 хв до 2,8 хв в середньому. В умовах точіння сталі AISI 4340 ($v_c = 100$ м/хв, $f = 0.1$ мм/об) для інструменту cBN зі зв'язками TiC та Al_2O_3 основним механізмом зносу є абразивний знос різального матеріалу твердими частинками карбідів з матеріалу заготовки [7].

В умовах безперервного точіння сталі AISI 4340 (56 HRC) комерційними різальними інструментами CBN7015 групи BL та CBN7025 групи BH (Sandvik Coromant) механізм зносу різальної кромки, також змінюється зі зміною швидкості різання [8-9]. Основними механізмом зносу при $v_c = 150$ м/хв є абразивне стирання, що доповнюється дифузійним, а при $v_c = 270$ м/хв деградація різальної кромки відбувається за дифузійним механізмом.

При точінні загартованої сталі AISI 8620 (50 HRC) в умовах - безперервного, переривчастого і повністю перерваного точіння різальним інструментом з cBN (CNGA120408 S01225 SE групи BH) при низьких та середніх швидкостях різання $v_c = 90$ м/хв, $v_c = 140$ м/хв відбувається абразивне стирання, а при підвищенні v_c до 200 м/хв за рахунок підвищення температури в зоні різання індукується механізм адгезійного зносу [10].

Механізм зносу та деструкції різальних інструментів на основі cBN в широкому ряді умов точіння сталей AISI D2, AISI H11, 35NiCrMo16, AISI 52100 (54 HRC) залежить не лише від хімічної

композиції cBN, а й від матеріалу та властивостей зв'язуючої фази [11-14].

Мета роботи. Досліди вплив температури спікання на фізико-механічні властивості cBN композитів зі зв'язками на основі карбідів Ti, Cr, V та їхню зносостійкість в умовах високошвидкісного точіння нержавіючої сталі AISI 316L.

Методика експерименту. Склад вихідних сумішей та розмір фракції компонентів шихти для спікання наведено в таблиці 1. Вихідні порошки карбиду ванадію було подрібнено з використанням планетарного млина Fritsch (Pulverisette 6 classic line) Середній розмір часток порошку після розмелювання складав 1,8 мкм. Гомогенізацію полідисперсних сумішей здійснено в гравітаційному змішувачі в середовищі ізопропилового спирту в продвж 3 годин. Після просушки готова шихта для спікання поміщалась в графітовий нагрівач та піддавалась термічній обробці у вакуумі (10^{-6} мбар, 2 год) з метою усунення надлишкового кисню.

Таблиця – 1 Композиційний склад вихідних сумішей для спікання

Система	Співвідношення компонентів, об.%
cBN-TiC-Al	60:35:5
cBN-Cr ₃ C ₂ -Al	60:35:5
cBN-VC-Al	60:35:5

Керамо-матричні композити виготовлено шляхом термобаричного спікання в апараті високого тиску АВТТ-30 при тиску $p = 7.7$ ГПа в інтервалі температур 1600-2450 °C [15]. Спечені зразки для досліджень доводились до розмірів стандарту різального інструменту згідно з RNGN090300T ($d = 9,52$ мм, $h = 3,18$ мм) методом механічного шліфування по плоскій та боковій поверхні алмазними дисками. Щільність спеченого композиту вимірювали прямим методом, який ґрунтується на вимірюванні маси та об'єму зразків, що визначається їхніми розмірами. Для розрахунку пружних модулів виміряно розповсюдження поздовжньої та перпендикулярної швидкості звуку в зразках на приладі Olympus 38DL Plus. Мікро індентування проведено за Вікерсом на мікротвердомірі THV-30MDX – навантаження на індентор складало 1 кг у випадку вимірювання мікротвердості та 5 кг у випадку вимірювання тріщиностійкості, витримка при заданому навантаженні - 15 с.

Випробування різальної здатності композитів на основі cBN проведено на токарному верстаті Torshälla CNC (Швеція) в умовах поздовжнього безперервного високошвидкісного точіння з використанням масляного охолоджувача. Різальний інструмент закріплювали в стандартний тримач CRSNL3225P09 для круглих різальних пластин (SECO Tools). В якості типового матеріалу аустенітного класу було обрано нержавіючу сталь AISI 316L (88 HRB). Умови різання

відповідали умовам фінішної обробки швидкість різання $v_c = 300$ м/хв, швидкість подачі $f = 0.15$ мм/об та глибина різу $a_p = 0.3$ мм залишалися постійними. Деградацію різальної кромки композиту по задній поверхні (VB) після точіння оцінено з використанням стерео мікроскопу Olympus SZX7.

Результати та їх обговорення. Формування структури полікристалічних матеріалів в умовах спікання в значній мірі обумовлено реакціями та процесами, що мають місце в початковій стадії ущільнення порошкової шихти в АВТ при кімнатній температурі. Щільність порошкової суміші для спікання за результатами денсиметрії після первинної обробки в умовах прикладення тиску ($p = 7,7$ ГПа) за відсутності впливу температурного поля ($T = 20$ °C) становить 2,85 г/см³ для системи cBN-TiC-Al, 3,5 г/см³ – cBN-Cr₃C₂-Al та 4,22 г/см³ в зразку системи cBN-VC-Al. В умовах прикладення температурного поля та тиску відбувається підвищення густини компакту на 23-25% при $T_{сп.} = 1600$ °C. Щільність зразків отриманих в умовах термобаричного спікання при температурах $T_{сп.} \geq 1850$ °C не має тенденції до зростання. Можна припустити, що починаючи з $T_{сп.} = 1850$ °C досягається максимальне ущільнення компакту, яке обумовлене щільністю вихідних компонентів (рис. 1).

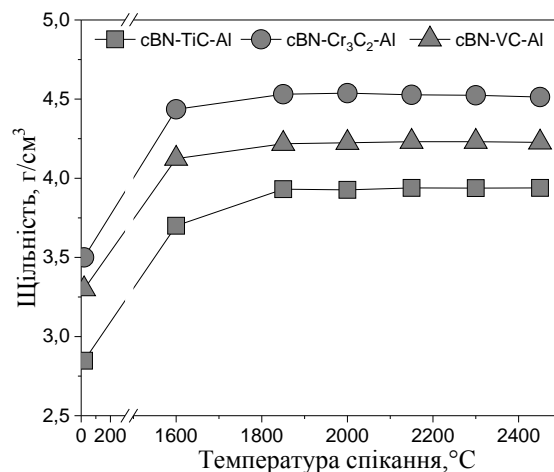


Рис. 1 – Залежність щільності композитів від температури спікання

Вимірювання поздовжньої (V_l) та поперечної (V_t) швидкості розповсюдження ультразвуку виконували в центральній частині зразків (три виміри) після термобаричного спікання в температурному інтервалі 1600-2450 °C виконувалося у частотному діапазоні 20-30 МГц з інструментальною похибкою 0,01 % на часовому інтервалі 10 мкс. Встановлено, що модуль Юнга та модуль зсуву композитів в системі cBN-TiC-Al практично не змінюються в ході термобаричних експериментів в діапазоні температур 1850-2450 °C. Виявлено, що температурні залежності пружних характеристик спечених композитів корелюють між собою (рис. 2, рис. 3). В системі зі зв'язкою у виді карбід хрому спершу спостерігається зростання пружних модулів в температурному інтервалі 1600-1850 °C, за рахунок впливу термобаричної дії та

відсутності взаємодії між компонентами суміші. При $T_{\text{сп.}} = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, модуль Юнга та модуль зсуву залишаються на тому ж рівні, що й при $T_{\text{сп.}} = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 545 ГПа та 233 ГПа відповідно. При підвищених температурах спікання $T_{\text{сп.}} = 2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $T_{\text{сп.}} = 2450\text{ }^{\circ}\text{C}$ має місце відпал дефектів кристалічної структури та поступове зростання пружних властивостей композиту (рис. 2, рис. 3).

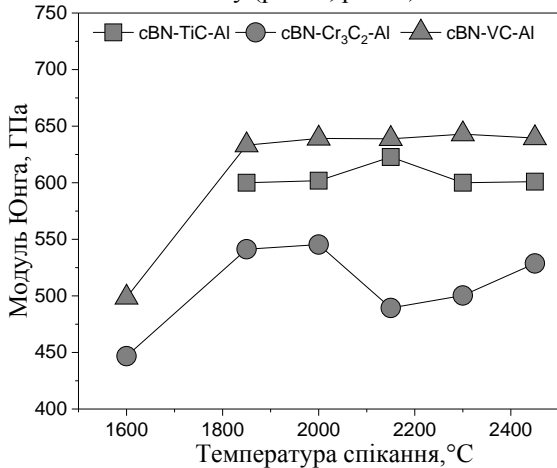


Рис. 2 – Залежність модулю Юнга композитів від температури спікання

Підвищення пружних модулів в системі з карбідом ванадію виявлено в діапазоні температур $T_{\text{сп.}} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $T_{\text{сп.}} = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так значення модулю Юнга зростає з 498 ГПа до 633 ГПа, модуль зсуву змінюється з 216 ГПа до 273 ГПа. Наступне підвищення температур спікання не змінює значень пружних модулів, вони залишаються на тому ж рівні.

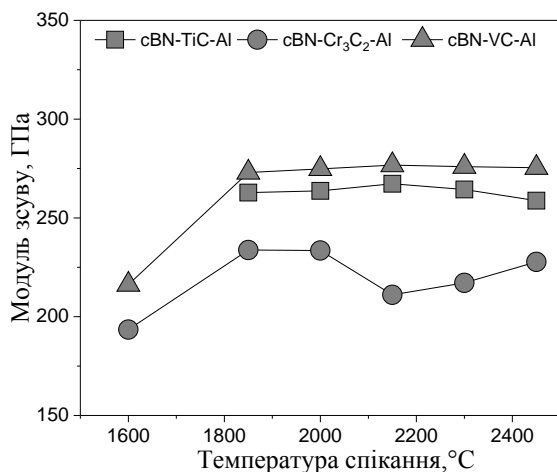


Рис. 3 – Залежність модулю зсуву композитів від температури спікання

З підвищенням температури спікання мікротвердість композитів системи cBN-TiC-Al стрімко зростає (рис. 4). Найнижче значення мікротвердості 32 ГПа виявлено в зразку спеченому при $T_{\text{сп.}} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$, яке пов'язане з присутністю мікропор в структурі композиту та відсутністю сформованих міжфазних границь. Підвищення температури спікання сприяє ущільненню композитів, формуванню міжфазних границь і як результат

стрімкому зростанню мікротвердості, максимальне значення якої становить 46 ГПа при $T_{\text{сп.}} = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$. В процесі термобаричного спікання при $T_{\text{сп.}} > 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбувається хімічна взаємодія компонентів з утворенням дибориду титану та нітриду алюмінію, а також має місце рекристалізаційний відпал структурних дефектів, в результаті чого мікротвердість композитів знижується до значень 39 ГПа при $T_{\text{сп.}} = 2450\text{ }^{\circ}\text{C}$. В системі cBN-Cr₃C₂-Al (60:35:5 об.%) при підвищенні температури спікання від $T_{\text{сп.}} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $T_{\text{сп.}} = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігається зростання мікротвердості з 21 ГПа до 35 ГПа, яке обумовлене збільшенням щільності композиту за рахунок дії, як температурного поля, так і тиску без взаємодії компонентів. При $T_{\text{сп.}} = 2150\text{ }^{\circ}\text{C}$ спостерігається взаємодія компонентів з утворенням фаз дибориду хрому та нітриду алюмінію, що ймовірно призводить до зниження твердості композиту - 33 ГПа.

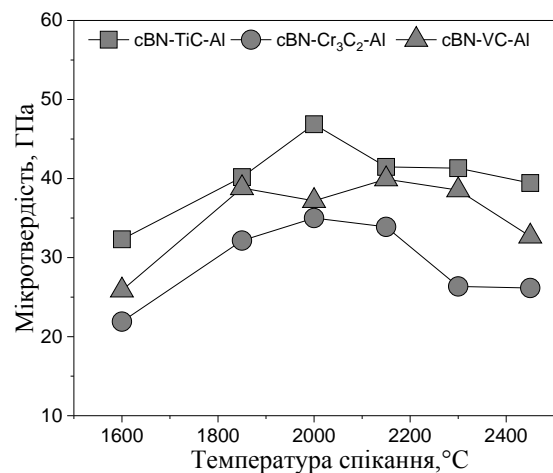


Рис. 4 – Залежність мікротвердості композитів від температури спікання

Подальше зниження твердості при $T_{\text{сп.}} = 2300\text{ }^{\circ}\text{C}$ пов'язане з відпалом дефектів кристалічної структури. Значення мікротвердості композитів системи cBN-VC-Al зростають з 25,9 ГПа при $T_{\text{сп.}} = 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ до 38,8 ГПа при $T_{\text{сп.}} = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$. Як вже відзначалось раніше при $T_{\text{сп.}} = 1850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ущільнення композиту відбулося повною мірою, що позитивно впливає на мікротвердість композитів. При $T_{\text{сп.}} = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ мікротвердість композиту знижується, але при цій же температурі спостерігається максимальне значення тріщиностійкості композиту - 5 МПа·м^{1/2} (рис. 5).

Значення тріщиностійкості композитів системи cBN-TiC-Al в температурному інтервалі 1600-2000 °C залишається майже не змінним 6,1 МПа·м^{1/2}, зниження тріщиностійкості композитів відбувається при тій же температурі що й зниження мікротвердості при $T_{\text{сп.}} = 2150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до значень 5,3 МПа·м^{1/2}. В системі з карбідом хрому тріщиностійкість композитів практично не змінюється з підвищенням температури спікання та залишається на рівні 5,5 – 6 МПа·м^{1/2}.

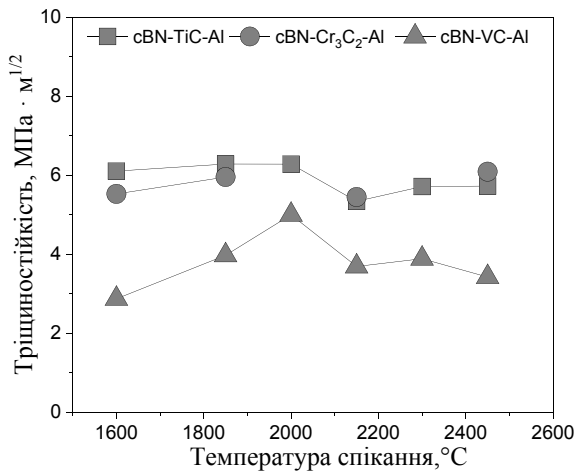


Рис. 5 – Залежність тріщиностійкості композитів від температури спікання

В умовах випробування різальної здатності зразків системи cBN-TiC-Al спечених при $T_{сп.} = 1850$ °C та $T_{сп.} = 2000$ °C знос різальної кромки значно нижче ніж у зразків отриманих при вищих температурах спікання, 37 мкм та 25 мкм відповідно. Знос різальної кромки в зразках, які отримані при температурах $T_{сп.} \geq 2150$ °C збільшується та стає максимальним при $T_{сп.} = 2300$ °C ($VB = 55$ мкм). Таку поведінку зразків можна пояснити нижчою стійкістю до ударного навантаження різальної кромки в процесі прикладення сили різання та входження різальної кромки в контакт з матеріалом заготовки (рис.6).

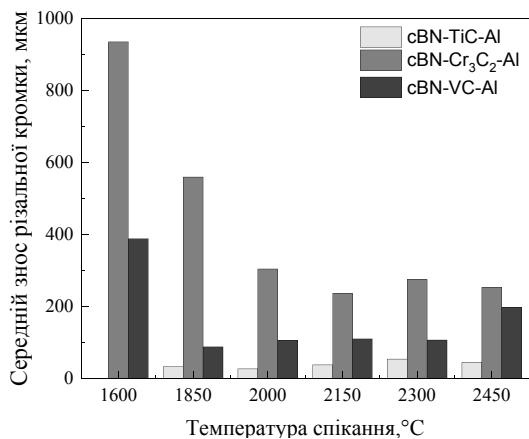


Рис. 6 – Середній знос різальної кромки по задній поверхні при в умовах точіння сталі AISI 316L $v_c = 300$ м/хв

Випробування ріжучої здатності композитів системи cBN-Cr₃C₂-Al в умовах точіння нержавіючої сталі AISI 316L виявили, що середній знос різальної кромки у зразках спечених при $T_{сп.} = 1600-1850$ °C найвищий (рис. 6). Ймовірно це пов'язано з тим, що процеси спікання та формування міжфазних границь при даних температурах спікання не пройшли в повній мірі, мікротвердість композитів є нижчою ніж у зразків отриманих при $T_{сп.} \geq 1850$ °C.

Результати тестування різальної здатності композитів системи cBN-VC-Al виявили, що зразки даної системи спечені в температурному інтервалі

$T_{сп.} = 2000-2300$ °C демонструють середній знос різальної кромки в межах 100 - 110 мкм при швидкості точіння $v_c = 300$ м/хв. Високу ступінь зносу різальної кромки виявлено в зразку $T_{сп.} = 1600$ °C, що пов'язано з низькими фізичними та механічними властивостями даного зразку.

Аналізуючи оптичні зображення різальних кромок зразків, а саме профілі зносу після високошвидкісного точіння, виявлено, що відбувається механічне зношування різальної кромки по задній поверхні (рис.7), слідів хімічної взаємодії не виявлено.

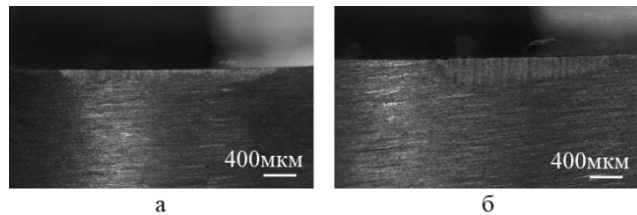


Рис. 7 – Оптичне зображення різальних кромок композитів $T_{сп.} = 2150$ °C а – система cBN-Cr₃C₂-Al, б - cBN-VC-Al

Дослідження виконано в рамках European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme проект Flintstone2020 (грант № 689279) та Visby Scholarship від Swedish Institute (грант № 02757/2016).

Висновки

Механічні властивості досліджуваних композитів зазнають суттєвого зростання в температурному інтервалі 1600-1850°C, досягаючи максимальних значень в діапазоні температур 2000-2150 °C. Подальше підвищення температури спікання супроводжується відпадом дефектів структури та зниженням мікротвердості композитів. З огляду на пружні та механічні властивості композитів систем cBN-TiC-Al, cBN-Cr₃C₂-Al, cBN-VC-Al встановлено, що оптимальним температурним інтервалом термобаричного спікання за умов прикладення тиску $p = 7,7$ ГПа є діапазон температур 2000-2150 °C.

Встановлено, що в умовах високошвидкісного точіння нержавіючої сталі AISI 316L зразки спечені в температурному інтервалі 2000-2150°C демонструють найвищу зносостійкість.

Список литературы

1. Добротворский С.С. Моделирование процесса высокоскоростного фрезерования закалённых сталей методом конечных элементов / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, С.А. Щучев// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2012. – №55. – С. 20-27
2. Abukhshim N. A., Mativenga P. T. and Sheikh M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, vol. 46, no. 7–8, pp. 782–800. doi: 10.1016/j.ijmactools.2005.07.024.
3. Klocke F. *Manufacturing processes 1: turning, milling, drilling*, RWTHeidn, 2011. 504 p. doi: 10.1007/978-3-642-11979-8.
4. Yume J. A. O. and Kwon P. Y. Tool wear mechanisms in machining', *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 2007, vol. 2, no. 3/4, p. 316–334. doi: 10.1504/IJMMM.2007.015469.

5. Huang Y., Chou Y. K. and Liang S. Y. CBN tool wear in hard turning: A survey on research progresses, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007, vol. 35, iss. 5–6, pp. 443–453. doi: 10.1007/s00170-006-0737-6.
6. Costes J. P., Guillet Y., Poulachon G. and Dessoly M. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, vol. 47, iss. 7, pp. 1081–1087. doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.09.031.
7. Luo S. Y., Liao Y. S. and Tsai Y. Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools, *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, vol. 88, is. 1, pp. 114–121. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00376-8.
8. Lin H. M., Liao Y. S. and Wei C. C. Wear behavior in turning high hardness alloy steel by CBN tool, *Wear*. 2008, vol. 264, iss. 7–8, pp. 679–684. doi: 10.1016/j.wear.2007.06.006.
9. De Godoy V. A. A. and Diniz A. E. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools, *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, iss. 6, pp. 1014–1025. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.01.002.
10. Dogra M., Sharma V., Sachdeva A. and Suri N. M. Tool life and surface integrity issues in continuous and interrupted finish hard turning with coated carbide and CBN tools, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012, vol. 226, iss. 3, pp. 431–444. doi: 10.1177/0954405411418589.
11. Poulachon G., Moisan A. and Jawahir I. S. Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools, *Wear*. 2001, vol. 250–251, iss. 1–12, pp. 576–586. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00609-3.
12. Poulachon G., Bandyopadhyay B. P., Jawahir I. S., Pheulpina S. and Seguína E. Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels, *Wear*. 2004, vol. 256, iss. 3–4, pp. 302–310. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00414-9.
13. Poulachon G., Alberta A., Schluraffa M. and Jawahir I. S. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005, vol. 45, iss. 2, pp. 211–218. doi: 10.1016/j.ijmactools.2004.07.009.
14. Poulachon G., Bandyopadhyay B. P., Jawahir I. S., Pheulpina S. and Seguína E. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003, vol. 43, iss. 2, pp. 139–144. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00170-0.
15. Petrusha I. A., Osipov A. S., Nikishina M. V., Smirnova T. I., Mel'niichuk Yu. A. and Klimczyk P. Preventive action of silicon nitride at HT-HP sintering of cubic boron nitride, *Journal of Superhard Materials*. 2015, vol. 37, iss. 4, pp. 222–233. doi: 10.3103/S1063457615040024.
16. Petrusha I. A., Osipov A. S., Nikishina M. V., Smirnova T. I., Mel'niichuk Yu. A. and Klimczyk P. Preventive action of silicon nitride at HT-HP sintering of cubic boron nitride, *Journal of Superhard Materials*. 2015, vol. 37, iss. 4, pp. 222–233. doi: 10.3103/S1063457615040024.
17. Poulachon G., Moisan A. and Jawahir I. S. Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools, *Wear*. 2001, vol. 250–251, iss. 1–12, pp. 576–586. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00609-3.
18. Poulachon G., Bandyopadhyay B. P., Jawahir I. S., Pheulpina S. and Seguína E. Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels, *Wear*. 2004, vol. 256, iss. 3–4, pp. 302–310. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00414-9.
19. Poulachon G., Alberta A., Schluraffa M. and Jawahir I. S. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005, vol. 45, iss. 2, pp. 211–218. doi: 10.1016/j.ijmactools.2004.07.009.
20. Poulachon G., Bandyopadhyay B. P., Jawahir I. S., Pheulpina S. and Seguína E. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003, vol. 43, iss. 2, pp. 139–144. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00170-0.
21. Petrusha I. A., Osipov A. S., Nikishina M. V., Smirnova T. I., Mel'niichuk Yu. A. and Klimczyk P. Preventive action of silicon nitride at HT-HP sintering of cubic boron nitride, *Journal of Superhard Materials*. 2015, vol. 37, iss. 4, pp. 222–233. doi: 10.3103/S1063457615040024.
22. Klocke F. *Manufacturing processes 1: turning, milling, drilling*, RWTHedition, 2011. 504 p. doi: 10.1007/978-3-642-11979-8.
23. Yume J. A. O. and Kwon P. Y. Tool wear mechanisms in machining', *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. 2007, vol. 2, no. 3/4, p. 316–334. doi: 10.1504/IJMMM.2007.015469.
24. Huang Y., Chou Y. K. and Liang S. Y. CBN tool wear in hard turning: A survey on research progresses, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007, vol. 35, iss. 5–6, pp. 443–453. doi: 10.1007/s00170-006-0737-6.
25. Costes J. P., Guillet Y., Poulachon G. and Dessoly M. Tool-life and wear mechanisms of CBN tools in machining of Inconel 718', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, vol. 47, iss. 7, pp. 1081–1087. doi: 10.1016/j.ijmactools.2006.09.031.
26. Luo S. Y., Liao Y. S. and Tsai Y. Y. Wear characteristics in turning high hardness alloy steel by ceramic and CBN tools, *Journal of Materials Processing Technology*. 1999, vol. 88, is. 1, pp. 114–121. doi: 10.1016/S0924-0136(98)00376-8.
27. Lin H. M., Liao Y. S. and Wei C. C. Wear behavior in turning high hardness alloy steel by CBN tool, *Wear*. 2008, vol. 264, iss. 7–8, pp. 679–684. doi: 10.1016/j.wear.2007.06.006.
28. De Godoy V. A. A. and Diniz A. E. Turning of interrupted and continuous hardened steel surfaces using ceramic and CBN cutting tools, *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, iss. 6, pp. 1014–1025. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.01.002.
29. Dogra M., Sharma V., Sachdeva A. and Suri N. M. Tool life and surface integrity issues in continuous and interrupted finish hard turning with coated carbide and CBN tools, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2012, vol. 226, iss. 3, pp. 431–444. doi: 10.1177/0954405411418589.
30. Poulachon G., Moisan A. and Jawahir I. S. Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools, *Wear*. 2001, vol. 250–251, iss. 1–12, pp. 576–586. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00609-3.
31. Poulachon G., Bandyopadhyay B. P., Jawahir I. S., Pheulpina S. and Seguína E. Wear behavior of CBN tools while turning various hardened steels, *Wear*. 2004, vol. 256, iss. 3–4, pp. 302–310. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00414-9.
32. Poulachon G., Alberta A., Schluraffa M. and Jawahir I. S. An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005, vol. 45, iss. 2, pp. 211–218. doi: 10.1016/j.ijmactools.2004.07.009.
33. Poulachon G., Bandyopadhyay B. P., Jawahir I. S., Pheulpina S. and Seguína E. The influence of the microstructure of hardened tool steel workpiece on the wear of PCBN cutting tools, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003, vol. 43, iss. 2, pp. 139–144. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00170-0.
34. Petrusha I. A., Osipov A. S., Nikishina M. V., Smirnova T. I., Mel'niichuk Yu. A. and Klimczyk P. Preventive action of silicon nitride at HT-HP sintering of cubic boron nitride, *Journal of Superhard Materials*. 2015, vol. 37, iss. 4, pp. 222–233. doi: 10.3103/S1063457615040024.

References (transliterated)

1. Dobrotvorskiy S.S., Basova Ye.V., Shchuchev S.A. *Modelirovanie protsessy vyisokoskorostnogo frezerovaniya zakal'nykh staley metodom konechnykh elementov* [Modeling the process of high-speed milling of hardened steels by the finite element method]. *Open information and computer integrated technologies*. 2012, no 55, pp. 20-27.
2. Abukhshim N. A., Mativenga P. T. and Sheikh M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining', *International Journal of*

Поступила (received) 01.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сліпченко Катерина Вячеславівна (Сліпченко Екатерина Вячеславовна, Slipchenko Kateryna Vyacheslavivna) – аспірант, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (м. Київ); тел.: (044) 379-14-46; e-mail:kateslipchenko@gmail.com

Петруша Ігор Андрійович (Петруша Игорь Андреевич, Petrusha Igor Andriiovych) – доктор технічних наук, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, провідний науковий співробітник, Київ, Україна, e-mail:dialab@ism.kiev.ua

Туркевич Володимир Зіновійович (Туркевич Владимир Зиновьевич, Turkevich Volodymir Zinoviiovich) – доктор хімічних наук, академік НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, завідувач відділу, Київ, Україна, <https://orcid.org/0000-0002-1441-4269>, e-mail: vturk@ism.kiev.ua

М.М. ПІДГАЄЦЬКИЙ, К.К. ЩЕРБИНА

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ СТАЛОСТІ ПРУЖНО-ГВИНТОВОГО ХОНУ

У статті розглядається процес деформації пружно-гвинтового хону в осьовому напрямку з дослідженням різного конструктивного виконання замкненого гвинтового пазу. На підставі дослідження виведені математичні моделі деформації вигину геометричної вісі пружно-гвинтового хону при статичних навантаженнях в умовах додаткового опору пружним деформаціям. Для перевірки отриманих математичних моделей проведено дослідження твердотільної моделі, на основі методу кінцевих елементів в середовищі SolidWorks Simulation з визначенням оптимальної конструкції пружно-гвинтового хону.

Ключеві слова: пружно-гвинтовий хон, пружно-деформована оболонка, твердо тільна модель, деформація геометричної вісі.

М.М. ПОДГАЕЦКИЙ, К.К. ЩЕРБИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ УПРУГО ВИНТОВОГО ХОНА

В статье рассматривается процесс деформаций упруго-винтового хона в осевом направлении с исследованием разных вариаций конструктивного выполнения замкнутого винтового паза. На основании исследования выведены математические модели деформации изгиба геометрической оси упруго-винтового хона при статических нагрузках в условиях дополнительного сопротивления упругим деформациям. Для проверки полученных математических моделей проведено исследование твердотельной модели, на основе метода конечных элементов в среде SolidWorks Simulation с определением оптимальной конструкции упруго-винтового хона.

Ключевые слова: упруго-винтовой хон, упруго-деформируемая оболочка, твердотельная модель, деформация геометрической оси.

М.М. PIDGAETSKIY, K.K. SHCHERBINA

STUDY OF LONGITUDINAL STABILITY OF HELICAL HONE

The article discloses the deformation process of helical hone in the axial direction in order to determine deviations of the tool relative axis, which directly influences the generating line of the hole under treatment. The first stage presented theoretical research of the locked ends of the helical groove in the elastic deformed cover which leads to the resistance to the resilient deformations. As a result of the research we developed mathematical models of the axis deformation of the elastic deformed cover. The models indicate the presence of deviations. In order to check the mathematical models we studied a solid model on the basis of finite elements method in the SolidWorks Simulation that proved the mathematical models. On the basis of the results we held updating of the elastic deformed cover with relieving the locked helical groove by application of the relieving circular grooves at both sides. The optimality of the construction has been proved by the research in SolidWorks Simulation.

Key words: helical hone, elastic deformed cover, solid model, deformation of geometric axis.

Вступ. Сучасні конструкції деталей гідравлічних машин мають прецизійні отвори з переривчастими поверхнями, що призводить до ускладнення отримання необхідної геометричної форми та шорсткості. У більшості випадків фінішною операцією обробки таких прецизійних отворів є процес хонінгування, тому актуальним питанням є підвищення ефективності даного процесу переривчастих та прецизійних отворів, а саме забезпечення точності розмірів, геометричної форми та зниження шорсткості за рахунок покращення показників алмазно-абразивного інструменту.

Аналіз стану питання. На основі проведеного дослідження існуючих алмазно-абразивних інструментів (хонінгувальна головка та алмазна розвертка) для обробки отворів [1,2,3] виявлено ряд недоліків.

По-перше, хонінгувальна головка не дозволяє чітко відреагувати на зміну сили різання, яка пов'язана з геометричними відхиленнями оброблюемого отвору, як в повздовжньому, так і в поперченому перерізі. Даний негативний ефект пов'язаний з наявністю статичного та кінематичного тертя в ланках хонінгувальної головки [4]. Також, обробка шліцевих та переривчастих отворів малих діаметрів призводить до ускладнення конструкції хонінгувальної головки та обмежень по величині діаметру оброблюемого отвору [4].

По-друге алмазна розвертка не дозволяє використання її в умовах автоматизованого виробництва, що обумовлено ручним налаштуванням

необхідного розміру на обробку та вимагає постійного контролю за процесом зношування.

Існуючі методи розв'язання задачі. Для вирішення обумовлених проблем була запропоновано пружно-гвинтовий хон [5], який дозволяє усунути наведені вище недоліки існуючого алмазно-абразивного інструменту за рахунок використання пружних деформацій для збільшення величини радіального розміру та розміщення алмазно-абразивних брусків під кутом 45°. Але в запропонованій конструкції пружно-гвинтового хону існує ряд не вирішених питань, а саме форма деформації геометричної вісі.

Мета дослідження. Визначення осьової деформації пружно-гвинтового хону при різних конструктивних його виконаннях.

Теоретичне дослідження пружних деформацій. Дослідження будемо проводити для пружно-деформуємої оболонки (ПДО), яка виступає корпусом пружно-гвинтового хону.

Для проведення дослідження необхідно прийняти ряд припущень та умовностей, в тому числі:

- дію додаткового опору пружним переміщенням, що імітується веденням уявного стержня, який поєднує кінцівки полого гвинтового тіла;

- стержень розміщується в зоні, яка створює додатковий опір пружним деформаціям повздовж геометричної вісі полого гвинтового тіла;

- жорсткість уявного стержня приймається більшою за жорсткість гвинтового полого тіла за

межами стержня;- одностороннє розміщення уявного стержня розглядається у випадку розміщення його по один бік від геометричної осі тіла. При цьому обумовлений стержень розглядається, як двохопорний, з навантаженням та моментами вигину, котрі діють в його опорах (кінцівках);

- симетричне розміщення уявного стержня розглядається у випадках його розміщення по обидва боки від геометричної осі тіла. При цьому

обумовлений стержень розглядається як двохопорний, з навантаженням та моментами вигину, котрі діють в його опорах (кінцівках);

- поперечний переріз ПДО в кожній точці вздовж його геометричної осі має різну форму і, відповідно, площину, тому теоретичне визначення опору навантаженням, які впливають на сталість по відомим методикам неможливе. Таким чином, доцільно віднести дану задачу до статично невизначених. Для її вирішення необхідно використати методику моделювання із застосуванням програмного продукту SolidWorks Simulation та використати дані моделювання для визначення фактичних пружних переміщень ПДО.

- теоретичне дослідження пружних деформацій ПДО проводиться на підставі умовної деформації геометричної осі ПДО в залежності від дії моменту вигину на кінцівки полого гвинтового тіла.

Розглянемо дію навантажень та моментів вигину при пружній деформації ПДО при односторонньому розміщенні умовного стержня (рис.1).

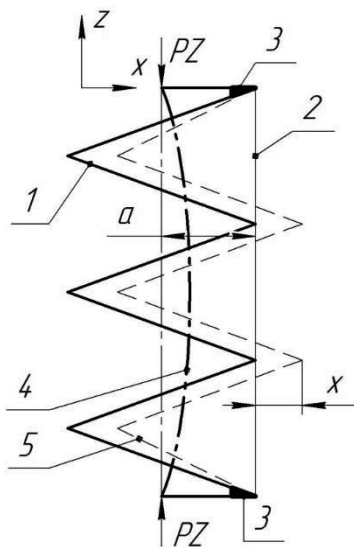


Рис.1 – Схема навантаження ПДО при односторонньому розміщенні уявного стержня; 1 – гвинтове тіло; 2 – уявний стержень; 3- замикаючі кінцівки гвинтового тіла; 4 - пружна деформація геометричної осі ПДО; 5 – пружна деформація гвинтового тіла ПДО; а – плече геометричної осі ПДО; PZ – осьова сила.

Навантаження буде створюватися дією осьової сили PZ, яка діє на обидва кінці гвинтового тіла. Моменти вигину, які виникають на замикаючих кінцівках ПДО викличуть пружну деформацію геометричної осі.

Деформація вигину геометричної осі представляє собою синусоїду, а саме одну її напівхвилю, та буде

характеризуватися рівнянням:

$$x = \frac{2PZa}{\sigma EJ} \left(\frac{z^3}{l} - lz \right) \quad (1)$$

де: PZ – осьова сила ;

E – модуль пружності ПДО;

σ – межа міцності ПДО;

J – момент інерції попереднього переміщення.

Пружна деформація геометричної осі викличе еквідистанту пружну деформацію гвинтового тіла. Як видно із схеми (рис.1) одностороння пружна деформація гвинтового тіла не прийнятна внаслідок нерівномірного навантаження бокових поверхонь гвинтового тіла при експлуатації.

Розглянемо дію навантажень та моментів вигину при пружній деформації ПДО при опозитно віссесиметричному розміщенні умовного стержня (рис.2).

Навантаження буде створюватися дією осьової сили PZ, яка діє на обидва кінці гвинтового тіла. Моменти вигину, які виникають на замикаючих кінцівках ПДО викличуть пружну деформацію геометричної осі.

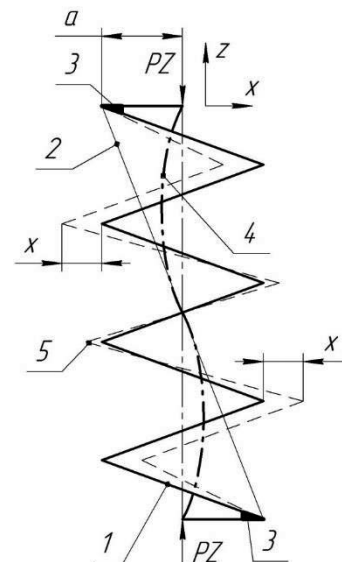


Рис.2 – Схема навантаження ПДО при віссесиметричному розміщенні уявного стержня; 1 – гвинтове тіло; 2 – уявний стержень; 3- замикаючі кінцівки гвинтового тіла; 4 - пружна деформація геометричної осі ПДО; 5 – пружна деформація гвинтового тіла ПДО; а – плече геометричної осі ПДО; PZ – осьова сила;

Деформація вигину геометричної осі представляє собою синусоїду з двома напівхвилями із зміною фази посередині довжини та буде характеризуватися рівнянням:

$$x = \frac{2PZa}{\sigma EJ} \left(2 \frac{z^3}{l} - 3z^2 + lz \right) \quad (2)$$

де: PZ – осьова сила ;

E – модуль пружності ПДО;

σ – межа міцності ПДО;

J – момент інерції попереднього переміщення.

Як видно із схеми (рис.2), синусоїдальний принцип деформації геометричної вісі сприяє еквідистантній деформації гвинтового тіла. При цьому деформація має двобічний симетричний характер, при якій також можуть виникати нерівномірні навантаження бокових поверхонь гвинтового тіла.

Дослідження деформації ПДО при однобічному розміщенні кінцівок виявило, що дія моментів вигину викличе пружну деформацію геометричної вісі у вигляді однієї напівхвилі синусоїди, що призведе до еквідистантної деформації ПДО. Отриманий вид деформації не прийнятний при експлуатації ПДО.

Дослідження деформації ПДО при опозитно віссесиметричному розміщенні кінцівок виявило, що дія моментів вигину викличе пружну деформацію геометричної вісі у вигляді двох напівхвиль синусоїди із зміною фази посередині довжини, що призведе до еквідистантної деформації ПДО. Такий вид деформації також не прийнятний при експлуатації ПДО.

Для підтвердження або спростування отриманих теоретичних припущень по визначенню деформації ПДО проведемо дослідження в програмному середовищі SolidWorks Education Edition 2012 [6].

Побудуємо 3D моделі ПДО різних варіантів конструктивного виконання (рис.3). Приведено ПДО з однобічними кінцями (рис.3, а) та ПДО з опозитно віссесиметричними кінцями (рис.3, б). Різне просторове розміщення кінцівок повинно забезпечити різні види деформації при навантаженні в напрямку вісі Z.

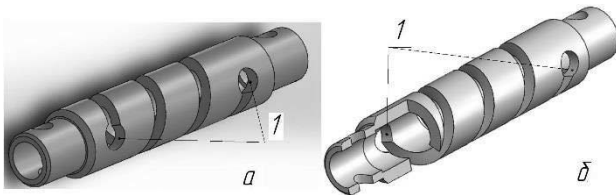


Рис.3 – 3D моделі ПДО різних варіантів конструктивного виконання: а - ПДО з однобічними кінцівками гвинтового пазу; б - ПДО з опозитно віссесиметричними кінцівками гвинтового пазу; 1 – кінцівка гвинтового пазу.

Для ПДО різного конструктивного виконання проведемо аналіз на визначення напружень (див. рис.4) та деформації (див. рис.5).

Отримані результати по визначенню напруження в елементах ПДО вказують на те, що напруження однакове по всій довжині деформації робочих витків і знаходиться для ПДО з однобічним розміщення кінцівок замкненого гвинтового пазу в межах 600 МПа, а для ПДО з опозитно віссесиметричними кінцівками замкненого гвинтового пазу в межах 620 МПа

Максимальне значення отриманого напруження по Von Mises 1103 МПа. для ПДО з однобічними кінцівками замкненого гвинтового пазу та ПДО з опозитно віссесиметричними кінцівками напруження по Von Mises 1164 МПа. Тобто, утворений контактний тиск буде рівний по всій довжині алмазно-абразивних брусків, котрі розташовуються на зовнішній циліндричній поверхні. Отримані напруження не перевищують граничних значень міцності ПДО.

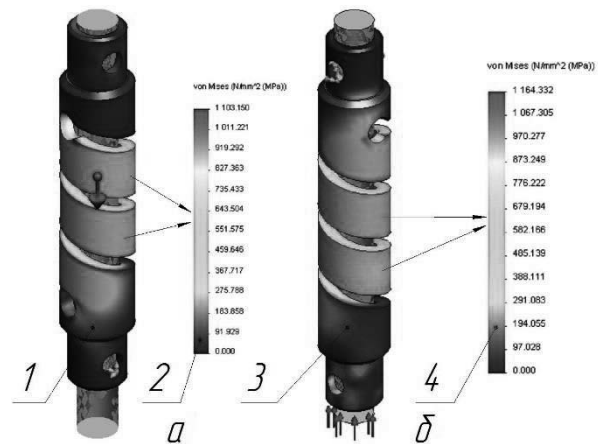


Рис.4 – Номінальне статичне навантаження ПДО різних варіантів конструктивного виконання; а - з однобічними кінцівками гвинтового пазу; б - з опозитно віссесиметричними кінцівками гвинтового пазу; 1 – ПДО з однобічними кінцівками гвинтового пазу; 2 – напруження в МПа ПДО з однобічними кінцівками гвинтового пазу; 3 – ПДО з опозитно віссесиметричними кінцівками гвинтового пазу; 4 – напруження в МПа ПДО з опозитно віссесиметричними кінцівками гвинтового пазу.

Утворена екстремальна деформація ПДО, яка знаходиться в межах 1,28 умовних одиниць в системі SolidWorks Simulation з однобічними кінцівками замкненого гвинтового пазу вказує на те, що в процесі деформації виникає вигин в сторону протилежну від уявної лінії, що зв'язує кінцівки пазу.

Екстремальна деформація ПДО, яка знаходиться в межах 1,28 умовних одиниць в системі SolidWorks Simulation з опозитно віссесиметричними кінцівками в процесі деформації має дзеркальний характер, тобто суміжні витки відхиляються опозитно один до одного.

Обумовлені види деформації приведених ПДО є неприйнятним у зв'язку з нерівномірністю збільшення радіального розміру в діаметральній площині, що відповідає отриманим теоретичним припущенням.

Внаслідок значного впливу розміщення кінцівок замкненої гвинтової канавки на форму пружної деформації, можна зробити припущення про можливість впливу форми кінцівок на характер обумовлених деформацій.

Попередні теоретичні дослідження ПДО показали можливість пружних деформацій вигину в залежності від конструктивного виконання. Але ці теоретичні та комп'ютерні дослідження не надають відповіді на питання: яким чином вилучити вигин ПДО при осьових навантаженнях.

Наявність замкненого наскрізного гвинтового паза дозволяє віднести процес деформацій ПДО до тих, які відбуваються в умовах невеликого навантаження [7 с.528...530].

Постає питання: яким чином при наявності замкненого гвинтового паза зменшити вплив стиснення на умови деформації, враховуючи те, що наявність звільнення від стисненого стану неможливо через конструктивні особливості ПДО?

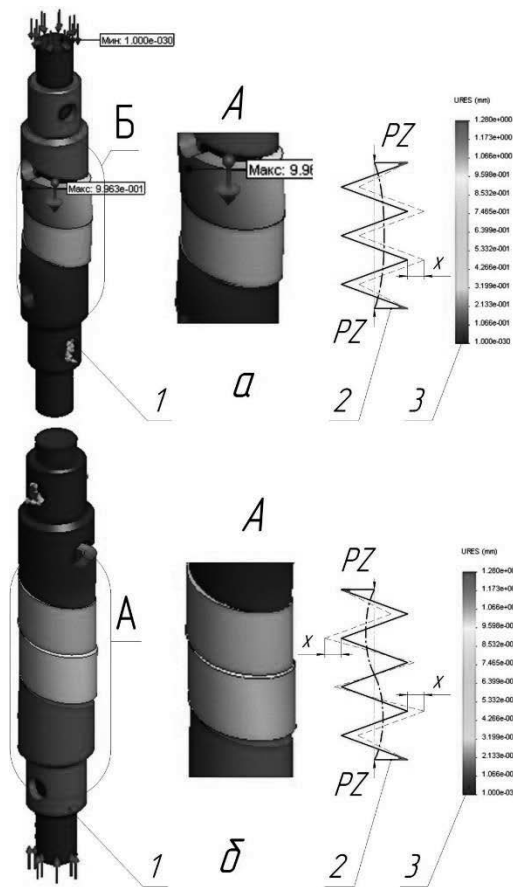


Рис.5 – Екстремальне статичне навантаження ПДО різних варіантів конструктивного виконання; а - ПДО з однібічними кінцівками б - ПДО з опозитно віссесиметричними кінцівками; 1 – ПДО; 2 – теоретична схема деформації; 3 – відносна величина осової деформації в системі SolidWorks Simulation.

Найбільш прийнятним способом зменшення впливу стиснення може бути введення конструктивного елемента, який провокує концентрацію напружень в зоні кінцівок гвинтового тіла. Як відомо із ряду робіт [8], концентратори напружень знижують міцність елементів деталі і створюють таким чином умови для пружних деформацій в визначених межах. В даному випадку найбільш доцільно виконати концентратор у вигляді кільцевої канавки, з якою спряжується замкнений гвинтовий паз.

Таким чином, можна висловити гіпотезу, що спосіб введення концентраторів напружень у вигляді розвантажувальної кільцевої канавки може забезпечити зменшення впливу сил стиснення та виникнення напружень вигину.

Для підтвердження цієї гіпотези проведемо дослідження ПДО з розвантажувальними канавками в програмному продукті SolidWorks Simulation.

Побудуємо твердотільну модель ПДО з розвантажувальними канавками наведена на рис.6.

Проведемо дослідження ПДО з розвантажувальними канавками на напруження (рис.7) та деформацію (рис.8).

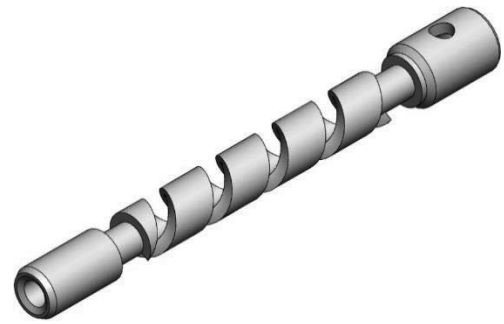


Рис.6 – Твердотільна модель ПДО з розвантажувальними канавками

Отримане статичне напруження ПДО з розвантажувальними канавками є рівномірним по всій поверхні витків, що забезпечить створення рівномірного контактного тиску на оброблену поверхню і знаходиться в межах 235 МПа для робочих витків, а для вхідного і вихідного витка в межах 78 МПа.

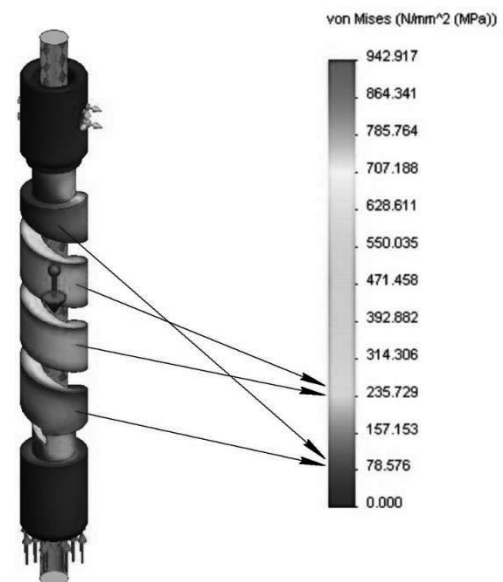


Рис. 7 – Номінальне статичне навантаження ПДО з розвантажувальними канавками

Отримана деформація ПДО є рівномірною для робочих витків, а деформація для вхідного і вихідного витка менша, що дозволяє зменшити руйнування алмазно-абразивних брусків при врізанні (рис.8). Було визначено відсутність вигину витків при деформації повздовж власної вісі, що підтверджує діаметральний вид.

Таким чином, конструктивне введення кільцевих канавок і з'єднання їх з гвинтовим пазом сприяє усуненню асиметричних деформацій, що підтверджується перевіркою теоретичних припущень в програмному продукті SolidWorks Simulation.

ПДО з розвантажувальними канавками відповідає вимогам при експлуатації при хонінгуванні отворів внаслідок зменшення впливу стиснення на зону пружних деформацій, що забезпечило відсутність впливу повздовжньої вісі.

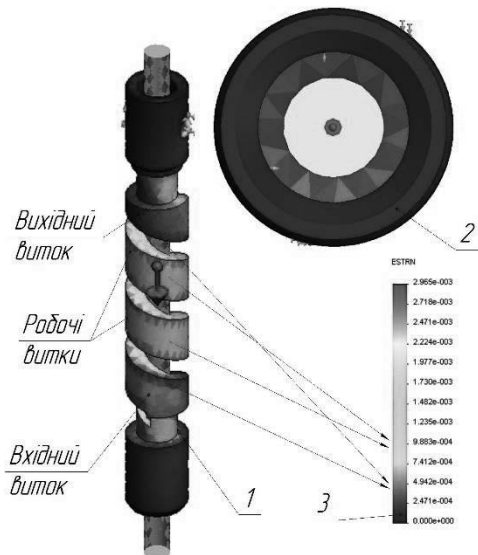


Рис. 8 – Екстремальна статичне навантаження ПДО з розвантажувальними канавками
1 – ПДО з розвантажувальними канавками; 2 – діаметральний вид ПДО з розвантажувальними канавками; 3 – деформація ПДО з розвантажувальними канавками пазом в умовних одиницях ESTRN (еквівалентна деформація);

Висновки. В результаті проведеного теоретичного дослідження деформації геометричної вісі було виявлено, що отримана форма деформації є неприйнятною. На підставі цього були проведені дослідження на побудованих твердотільних моделях в програмному продукті SolidWorks Simulation. В результаті чого було виявлено:

- наявність впливу розміщення кінцівок гвинтового пазу на деформацію повздож вісі;
- ПДО при односторонньому розміщенні кінцівок номінальне статичне навантаження становить 600 МПа, а екстремальне - 1103 МПа і має односторонню форму вигину;
- ПДО при опозитно віссесиметричному розміщенні кінцівок номінальне статичне навантаження становить 620 МПа, а екстремальне - 1162 МПа і має синусоїдальну форму.
- комп'ютерним моделюванням ПДО підтверджена гіпотеза про вплив концентратора напружень у вигляді кільцевої канавки на вилучення деформації вигину ПДО.
- утворена при навантаженні геометрична форма ПДО з розвантажувальними канавками відповідає вимогам експлуатації при хонінгуванні отворів внаслідок зменшення впливу стиснення на виникнення пружних деформацій вигину.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Подгаєцький Михайло Матвійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Технології машинобудування» Центральноукраїнського національного технічного університету, м. Кропивницький; тел.: (050) 488-01-14; e-mail: podgaitskymm@gmail.com

Щербина Кирил Костянтинович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Технології машинобудування» Центральноукраїнського національного технічного університету, м. Кропивницький; тел.: (099) 476-35-64; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1665-7686>, e-mail: kir2912s@gmail.com

Список літератури

1. Куликов С.И., Ризванов Ф.Ф., Романчук В.А., Ковалевский С.В. *Прогрессивные методы хонингования*. - М.: Машиностроение, 1983. – 334 с.
2. Фрагин И. Е. *Новое хонингование* - М.: Машиностроение, 1980. – 95 с.
3. Богородицкий Н.Н., Чубаров К.К., Лебедев Б.А. *Технологическое оснащение хонингования*. - Л. Машиностроение 1984. – 237 с.
4. Підгаєцький М.М., Щербина К.К. Динамічний аналіз традиційних систем регулювання радіального розміру в процесі хонінгування отворів. *Вісник Хмельницького національного університету: Технічні науки*. – Хмельницький.: ХНУ 2014 - №3 (213) с.134-138
5. Осадчий С.И., Подгаецкий М.М., Щербина К.К. Безинерционная система регулирования радиального размера в процессе хонингования отверстий. *Вестник Пермского Национального Исследовательского Политехнического Университета «Машиностроение, материаловедение»*. – Пермь.: ПНИПУ.- 2014 – Т.16 №1. с 7-16.
6. Алямовский А.А. *Инженерный расчет в SolidWorks Simulation* М.: ДМК Пресс. 2010. 462с.
7. Петраков Ю.В., Драчев О.И. *Теория автоматического управления технологическими системами* – М.: Машиностроение, 2009. – 336 с.
8. Беляев Н.М. *Сопротивление материалов*. Изд-8е – М.: Машиностроение, 1953. – 608 с.

References (transliterated)

1. Kulikov, S.I., Rizvanov, F.F., Romanchuk, V.A., Kovalevskiy, S.V. (1983), *Progressive methods of honing [Progresivnye metody honingovaniya]*, Mashinostroenie, Moscow, 334 p.
2. Fragin, I.E. (1980), *The new honing [Novoe honingovanie]*, Mashinostroenie, Moscow, 95 p.
3. Bogoroditskiy, N.N., Chubarov, K.K., Lebedev, B.A. (1984), *The technological equipment of honing [Tehnologicheskoe osnashchenie honingovaniya]*, Mashinostroenie, 237 p.
4. Pidhaietskiy, M.M., Shcherbina, K.K. (2014), "The dynamic analysis of traditional schemes of regulation of the radial size in the course of a honing of openings", *Herald of Khmelnytskyi national university: Technical sciences* ["Dynamichnyi analiz tradytsiinykh system rehulivannia radialnoho rozmiru v protsesi khoninhuvannia otvoriv"], *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu: Tekhnichni nauky*, KhNU, Khmelnytskyi, No. 3 (213), P. 134-138
5. Osadchii, S.I., Podgaetskii, M.M., Shcherbina, K.K. (2014), "Without inertia system regulation of the radial size in the course of honing", *Bulletin of Perm national research polytechnic university. Mechanical engineering, materials science* ["Bezinerctionnaia sistema regulirovaniia radialnogo razmera v protsesse khoningovaniia otverstii"], *Vestnik Permskogo Natsionalnogo Issledovatel'skogo Politehnicheskogo Universiteta «Mashinostroenie, materialovedenie»*, PNIPIU, Perm, Vo.16, No.1, P. 7-16.
6. Aliamovskii, A.A. (2010), *An engineering calculation in SolidWorks Simulation [Inzheneryi raschet v SolidWorks Simulation]*, DMK Press, Moscow, 462 p.
7. Petrakov, Yu.V., Drachev, O.I. (2009), *Theoretical automatic control of the technological systems [Teoriia avtomaticheskogo upravleniia tekhnologicheskimi sistemami]*, Mashinostroenie, Moscow, 336 p.
8. Beliaev, N.M. (1953), *The strength of materials, 8th ed. [Soprotivlenie materialov, Izd. 8e]*, Mashinostroenie, Moscow, 608 p.

Поступила (received) 05.10.2017

О.Ф. ЄНІКЄЄВ, Ф.М. ЄВСЮКОВА, О.В. СУБОТІН, О.Ю. ПРИХОДЬКО

АНАЛІЗ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Запропоновано методику синтезу апаратних засобів керування параметрами технологічних процесів. Отримано модель виконуючого механізму верстату та на основі принципу керування за відхиленням побудовано структурну схему системи. Проведено математичне моделювання компонент системи керування та в результаті аналізу структурної схеми отримано передатну функцію. Розроблено інформаційну технологію аналізу частотних характеристик системи керування з використанням середовища Matlab. Комп'ютерним моделюванням отримано амплітудні частотні характеристики, годограф Найквіста, перехідну та імпульсну перехідну характеристики, а також визначено запас стійкості системи за амплітудою. Доведено, що використання розроблених методик підвищує продуктивність процесу синтезу апаратних засобів

Ключові слова: апаратні засоби, продуктивність, математичне та комп'ютерне моделювання.

А.Ф. ЕНИКЕЕВ, Ф.М. ЕВСЮКОВА, О.В. СУБОТИН, О.Ю. ПРИХОДЬКО

АНАЛИЗ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Предложена методика синтеза аппаратных средств управления параметрами технологических процессов. Получена модель исполнительного механизма станка и на основе принципа управления по отклонению построена структурная схема системы. Проведено математическое моделирование компонент системы управления и в результате анализа структурной схемы получена передаточная функция. Разработана информационная технология анализа частотных характеристик системы управления с использованием среды Matlab. Компьютерным моделированием получены амплитудно-частотные характеристики, годограф Найквиста, переходная и импульсная переходная характеристики, а так же установлен запас устойчивости системы по амплитуде. Доказано, что применение разработанных методик повышает производительность процесса синтеза аппаратных средств.

Ключевые слова: аппаратные средства, производительность, математическое и компьютерное моделирование.

A. YENIKIEIEV, F. YEVSUKOVA, O. SUBOTIN, O. PRIHODKO

ANALYSIS ANALYSIS OF FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SYSTEMS OF AUTOMATIC CONTROL OF PARAMETERS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

A technique for the synthesis of hardware for controlling the parameters of technological processes is proposed. The model of the machine's executive mechanism is obtained and a structural diagram of the system is constructed on the basis of the deviation control principle. Mathematical modeling of control system components was carried out and as a result of analysis of the structural scheme a transfer function was obtained. An information technology for analyzing the frequency characteristics of a control system using the Matlab environment has been developed. Computer-aided simulation produced amplitude-frequency characteristics, the Nyquist travel graph, transient and impulse response characteristics, as well as a margin of stability of the system. It is proved that the application of the developed techniques increases the productivity of the hardware synthesis process.

Keywords: hardware, performance, mathematical and computer modeling.

Вступ. Системи автоматичного керування (САК) параметрами технологічних процесів скорочують час обробки поверхні деталі та забезпечують задану шорсткість [1]. Методика побудови апаратних засобів САК із відповідними метрологічними характеристиками та продуктивністю передбачає використання сучасних програмних середовищ та пакетів програм, які суттєво спрощують процедуру виконання відповідних розрахунків. Середовище Matlab [2] розв'язує задачі моделювання САК та її окремих компонент, досліджує точність та швидкодійу обробки вхідної інформації в умовах дії випадкових завад.

Постановка проблеми. Логарифмічну амплітудну частотну характеристику використовує інформаційна технологія синтезу апаратних засобів. Побудова математичних моделей компонент враховує фактор невизначеності, який обумовлено дією завад та похибками вимірювань вхідних сигналів. Можливості, які надає середовище Matlab, дозволяють виконати еквівалентні перетворення структурної схеми САК, встановити її особливі точки, побудувати та дослідити відповідні характеристики, скласти та дослідити схему комп'ютерного моделювання процесу перетворення

інформації.

Моделювання компонент САК. Методика синтезу апаратних засобів САК параметрами технологічних процесів складається з таких процедур:

- розробляємо математичні моделі компонент із використанням перетворення Лапласа;
- на основі інформаційного підходу визначаємо смугу нечутливості первинного перетворювача вхідного сигналу навколо номінальної характеристики перетворення;
- визначаємо передатну функцію САК в результаті перетворень її структурної схеми;
- досліджуємо частотні характеристики САК. Спрощення моделі забезпечується за рахунок погашення коренів чисельника та знаменника передатної функції, а також у відкиданні коренів другого порядку малості;
- моделюємо завади компонент та за допомогою методики підсумовування випадкових складових встановлюємо смугу невизначеності вихідного сигналу САК;
- синтез пристрою обробки вхідного сигналу виконуємо на основі мінімізації квадратичного

критерію якості із застосуванням еталонної моделі САК;

- встановлюємо математичну модель вхідного сигналу САК та визначаємо його частотне подання;
- за допомогою теореми про згортку визначаємо вихідний сигнал, який використовуємо в якості прогнозованого при аналізі ефективності апаратних засобів обробки інформації;
- будуємо схему комп'ютерного моделювання процесів перетворення інформації апаратними засобами САК. У результаті аналізу вихідного сигналу робимо висновок про продуктивність та точність її апаратних засобів.

При побудові апаратних засобів у якості виконуючих механізмів (ВМ), які змінюють технологічні параметри процесів механічної обробки поверхонь деталей, знайшли застосування двигуни постійного або змінного струму. Миттєва швидкість обертання є вихідним сигналом, який можливо використати при побудові апаратних засобів зворотного зв'язку. Поведінка двигуна постійного струму у перехідних режимах роботи описується такою системою інтегро-диференціальних рівнянь [3]

$$\left. \begin{aligned} U &= c_1 \Omega + RI + L \frac{dI}{dt} \\ J \frac{d\Omega}{dt} &= M_1 - M_2 \\ \varphi &= \int \Omega dt \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де c_1 – коефіцієнт противо-ЕРС; U – напруга керування; L , R , I – відповідно індуктивність, опір обмотки та струм якорю; Ω , φ – відповідно миттєва швидкість та кут оберту двигуна; M_1 , M_2 – відповідно обертальний та момент навантаження; J – момент інерції.

В операторній формі при нульових початкових умовах рівняння (1) руху двигуна постійного струму набувають такого вигляду

$$\left. \begin{aligned} U &= c_1 \Omega + I(R + pL) \\ Jp\Omega &= c_2 I - M_2 \\ p\varphi &= \Omega \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де c_2 – коефіцієнт моменту.

У системі рівнянь (2) враховано те, що

$$M_1 = c_2 I.$$

Розв'язання системи рівнянь (2) дає таке

$$\frac{U}{c_1} = \frac{JRL}{c_1 c_2 R} p^2 \Omega + \frac{JR}{c_1 c_2} p \Omega + \Omega - \frac{R}{c_1 c_2} \left(1 + \frac{L}{R} p \right) M_2,$$

або

$$kU = \left(T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1 \right) \Omega - \frac{M_2}{F} (T_1 p + 1), \quad (3)$$

де для двигуна типу СЛ281 маємо наступне: $k = k_1 k_2 = 0.87 * 25.39 = 22.1$ – коефіцієнт перетворення; $F = c_1 c_2 / R = 0.0018$ – коефіцієнт демпфування; $T_1 = L/R = 0.00043$ с, $T_2 = JR / (c_1 c_2) = 0.011$ с – відповідно електромагнітна та механічна постійні часу.

Передатну функцію двигуна постійного струму за керуючим впливом отримуємо з виразу (3), враховуючі при цьому $M_2 = 0$

$$W_1(p) = \frac{\Omega}{U} = \frac{k}{T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1}. \quad (4)$$

Або у вигляді послідовного з'єднання електромагнітного та механічного ланцюгів

$$W_1(p) = \frac{k_1 k_2}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}. \quad (5)$$

Передатну функцію двигуна постійного струму за збурювальним впливом отримуємо з виразу (3), враховуючі при цьому $U = 0$

$$W_2(p) = \frac{T_1 p + 1}{F(T_1 T_2 p^2 + T_2 p + 1)}. \quad (6)$$

Або у вигляді послідовного з'єднання елементарних ланцюгів

$$W_2(p) = \frac{1}{F(T_2 p + 1)}. \quad (7)$$

Вирази (5) та (7) використано при розробці структурної схеми САК повздовжньою подачею токарного верстату (рис. 1). В основу її побудови покладено принцип керування за відхиленням. Цю схему складено з таких елементів: вузол порівняння; давач закону зміну величини повздовжньої подачі (З); обчислювальний блок (ОБ); ξ – збурювальний вплив, який діє на вихідний сигнал САК; МДМ-підсилювач; давач струму (ДС). Виконаємо розробку математичних моделей компонент та аналіз структурної схеми САК з метою отримання виразу для передатної функції.

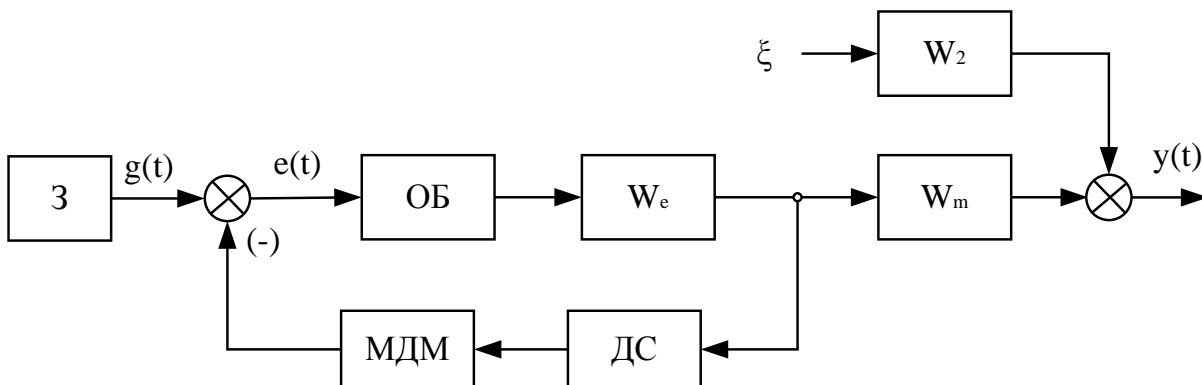


Рис. 1 – Структурна схема САК повздовжньою подачею токарного верстату

ОБ виконує порівняння миттєвої швидкості обертання з оптимальним значенням, яке задає блок З, а також формує керуючий вплив для ВМ. Обчислювальні процедури займають деякий проміжок часу, тривалість якого розраховується на підставі кількості команд керуючої програми та тактової частоти системного генератора. Тому ОБ при виконанні вказаних обчислювальних процедур подаємо у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням. Вихідний сигнал ОБ є керуючим впливом, який корегує роботу двигуна постійного струму. Тому навантаження на відповідну лінію з'єднання подаємо у вигляді електромагнітного ланцюга. На підставі проведеного аналізу та із урахуванням виразу (5) подання передатної функції ОБ має наступний вигляд

$$W_3(p) = \frac{k_1 k_3 e^{-p\tau_3}}{T_1 p + 1}, \quad (8)$$

де $\tau_3 = 0.0001 C$ – запізнення ОБ, k_3 – коефіцієнт перетворення.

З урахуванням того, що $e^{p\tau_3} \approx 1 + p\tau_3$, передатна функція ОБ після математичних перетворень набуває такого вигляду

$$W_3(p) = \frac{k_1 k_3}{(p\tau_3 + 1)(pT_1 + 1)}. \quad (9)$$

Коефіцієнт перетворення ОБ визначаємо на підставі такої умови нормування

$$k_1^2 k_2 k_3 = 1. \quad (10)$$

Інформація про оптимальні значення повздовжньої подачі інструменту розташована у базі даних мікроконтролеру. Тому блок З подаємо у вигляді пропорційного ланцюга із такою передатною функцією

$$W_4(p) = 1. \quad (11)$$

Специфіка роботи блоків ДС та МДМ у складі САК токарним верстатом дозволяє подати їх у вигляді пропорційного ланцюга із запізненням. Передатна функція такого ланцюга має наступний вигляд [3]

$$W_5(p) = k_5 e^{-p\tau_5}, \quad (12)$$

де $k_5 = 27.669$, $\tau_5 = 0.0002 C$.

З урахуванням смуги (Δ_1) нечутливості навколо номінальної характеристики перетворення маємо таку передатну функцію блоків ДС та МДМ

$$W_5(p) = \Delta_1 k_5 e^{-p\tau_5}. \quad (13)$$

Похибка обробки вхідного сигналу блоками ДС та МДМ знаходить свій кількісний прояв у змінах вихідного коду. Її кількісну оцінку отримано у роботі [4] на основі статистичної обробки дослідних даних

$$\Delta_1 = \sigma \sigma = 0.036142$$

Передатна функція блоків ДС та МДМ після математичних перетворень набуває такого вигляду

$$W_5(p) = \frac{\Delta_1 k_5}{1 + p\tau_5}. \quad (14)$$

В результаті аналізу структурної схеми та математичних перетворень отримано передатну функцію САК токарним верстатом у такому вигляді

$$W(p) = \frac{W_1(p)W_3(p)}{1 + W_e(p)W_3(p)W_5(p)}. \quad (15)$$

Після встановлення передатної функції САК токарним верстатом перейдемо до розробки інформаційної технології аналізу її частотних характеристик.

Інформаційна технологія. Розрахунок частотних характеристик САК виконуємо у по командному режимі. Відповідні передатні функції компонент САК токарним верстатом є вихідними даними для середовища Matlab. Їх подаємо у такому вигляді

$$\begin{aligned} W1 &= \text{tf}([k], [T1 * T2 \ T2 \ 1]) \\ W_e &= \text{tf}([k1], [T1 \ 1]) \\ W3 &= \text{tf}([k1 * k2], [\tau_3 * T1 \ \tau_3 + T1 \ 1]) \\ W5 &= \text{tf}([\Delta_1 * k5], [\tau_5 \ 1]). \end{aligned}$$

Можливості середовища Matlab дозволяють визначити передатну функцію САК токарним верстатом. Для її розрахунку скористаємось наступним виразом

$$W = W1 * W3 / (1 + W_e * W3 * W5).$$

У результаті пошуку нулів та полюсів передатної функції (команди zero та pole) отримали данні, які наведено у таблиці 1. Аналіз її даних дозволяє зробити наступні висновки:

- умові стійкості САК задовольняють усі корні характеристичного рівняння;
- корінь вісім впливає на початок перехідного процесу оскільки малий за величиною;
- корні чисельника та знаменника передатної функції, які приблизно зіпали за величиною, скорочуються
- САК без втрат точності подається такою передатною функцією

$$W(p) = \frac{1}{(T_6 p + 1)(T_4^2 p^2 + 2\xi T_4 p + 1)}, \quad (16)$$

де постійні часу T_4 та T_6 визначаються за допомогою другого, четвертого та п'ятого коренів характеристичного рівняння.

Таблиця 1 – Нулі та полюси передатної функції

zero	pole
ans = 1.0e+04 *	ans = 1.0e+04 *
-1.0000	-1.0000
-0.5000	-0.9963
-0.2326	-0.5260
-0.2326	-0.2214 + 0.0679i
	-0.2214 - 0.0679i
	-0.2326
	-0.2231
	-0.0095

Інформаційна технологія розрахунку у середовищі Matlab частотних характеристик САК складається із наступних обчислювальних процедур:

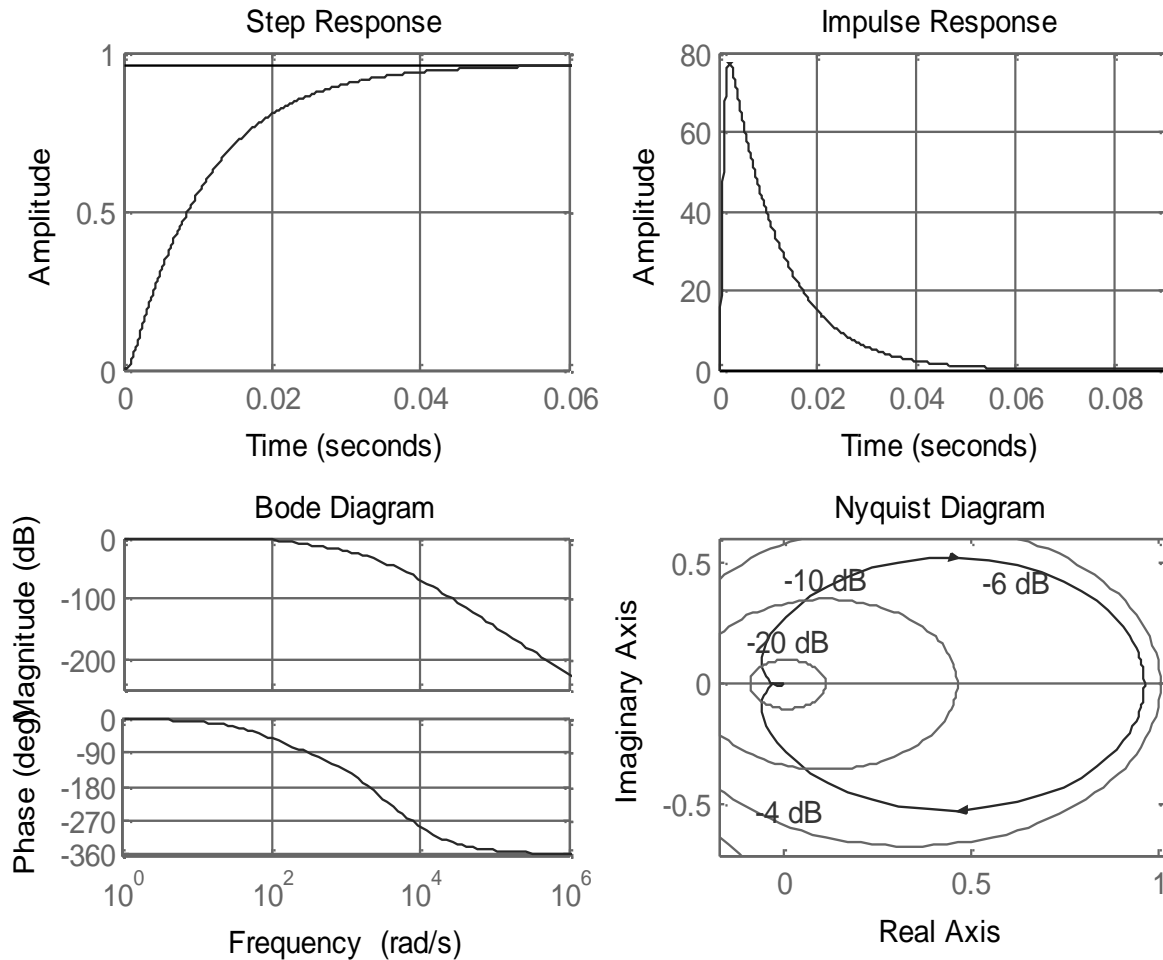


Рис. 2 – Частотні характеристики САК

- за допомогою команди `bode(W)` будуються логарифмічні амплітудні та фазочастотні характеристики;
- за допомогою команди `nyquist(W)` визначаємо годограф Найквіста;
- за допомогою команди `margin(W)` розраховуємо запас стійкості САК за амплітудою;
- перехідна характеристика САК будується за допомогою команди `step(W)`;
- імпульсна перехідна характеристика САК будується за допомогою команди `impulse(W)`;
- аналогічні результати розрахунку отримуємо використовуючи команду `ltiview(w)`, із відповідними налаштуваннями в меню «Plot Configuration» (рис. 2).

Для подальшого синтезу пристроїв обробки сигналів використовуються логарифмічна амплітудна частотна характеристика:

- виконується її лінеаризація;
- будується бажана характеристика;
- різниці між ними дає логарифмічну характеристику регулятора;
- визначається передатна функція регулятора; розраховується передатна функція САК із регулятором.

Висновок. На основі математичної моделі двигуна постійного струму розроблено систему автоматичного керування повздовжньою подачею токарного верстату. Побудовано математичні моделі її компонент та у результаті статистичної обробки дослідних даних з використанням інформаційного підходу встановлено швидкісну похибку вимірювань струму виконуючого механізму. Розроблено методику та інформаційну технологію аналізу частотних характеристик систем автоматичного керування у середовищі Matlab. Встановлено, що використання розроблених методики та інформаційної технології підвищує продуктивність процесу синтезу апаратних засобів керування параметрами технологічних процесів.

Список литературы

1. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. Краматорск: ДГМА, 2001. 160 с.
2. Лазарев Ю.П. Моделирование процессов и систем в Matlab: Учебный курс. С.Пб.: Питер; К.: Изд. группа ВHV, 2005. 512 с.
3. Еникеев А.Ф., Євсюкова Ф.М., Шищенко Л.А. Анализ эффективности аппаратных средств управления поперечной подачей шлифовального круга. Вестник национального технического университета «ХПИ». 2015. № 4. С. 132 – 137.
4. Єнікєєв О.Ф., Зиков І.С. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга. Вестник Национального

технічного університету «ХПИ». Харків: №57, 2008. С. 87–93.

References (transliterated)

1. Yenikieiev A.F. *Optimalnoe upravlenie tehnologicheskim processom almaznogo shlifovaniya*. [Optimal management by the technological process of the diamond polishing.]. Kramatorsk: DGMA, 2001. – 160 p.
2. Lazarev Yu.P. *Modeling of processes and systems in Matlab: Training course*. [Modeling of processes and systems in Matlab] - S.Pb.: Peter; K.: Publ. group BHV, 2005. - 512 p.
3. Yenikieiev A.F., Yevsiukova F.M., Shushenko L.A. *The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel* [The analysis of the efficiency of hardware control of the longitudinal feed of the grinding wheel] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 4, pp. 132-137.
4. Yenikieiev O.F., Zikov I.S. *Syntezy tsyfrovoho rehuliatora poperechnoi peredachi shlifovalnoho kruga* [Synthesis of digital regulator of transversal transmission of the grinding circle] *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2008, no. 57, pp. 87-93.

Поступила (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Єнікєєв Олександр Фанилович (Еникеев Александр Фанилович, O. Yenikieiev) – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень, тел.: (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, (063)-205-93-97, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8633-3233>, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Євсюкова Фатима Магометбійвна (Евсюкова Фатима Магомедбиевна, F. Yevsiukova) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9764-4106>, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru

Суботін Олег Володимирович (Субботин Олег Владиирович, O. Subotin) – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів, тел.: (066)-789-77-80, (093)-399-07-93, e-mail: o.v.subotin@ukr.net

Приходько Ольга Юрїївна (Приходько Ольга Юрьевна, O. Prihodko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6452-0465>, e-mail: olmurakami@mail.ru;

А. И. ГЕРМАШЕВ, В. А. ЛОГОМИНОВ, Е. Б. КОЗЛОВА, В. А. КРИШТАЛЬ

ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Основной особенностью процесса обработки тонкостенных деталей является прерывистый характер фрезерования, вызванный малыми радиальными и осевыми глубинами резания. Именно это является основополагающим фактором, влияющим на качество поверхности при фрезеровании. Рассмотрены основы формирования профиля обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенных деталей. Исследован характер колебательного движения тонкостенной детали при различных скоростных условиях обработки. Предложена расширенная схема поведения системы в различных скоростных условиях обработки. Показано, как эти особенности связаны с параметрами качества обработанной поверхности. Экспериментально доказано, что при обработке тонкостенных деталей именно вынужденные колебания вносят доминирующий вклад в формирование профиля обработанной поверхности, как в скоростной зоне появления регенеративных автоколебаний, так и при высокоскоростной обработке. Автоколебания способствуют снижению качества обработки в определенном скоростном диапазоне, но их негативное влияние может быть многократно усилено резонансными явлениями. Параметры профиля обработанной поверхности зависят от размаха колебаний точки врезания относительно положения равновесия детали.

Ключевые слова: тонкостенная деталь, упругая система, регенеративные автоколебания, высокоскоростная обработка, точка врезания, амплитуда.

А. І. ГЕРМАШЕВ, В. О. ЛОГОМІНОВ, О. Б. КОЗЛОВА, В. О. КРИШТАЛЬ

ОСНОВЫ ФОРМУВАННЯ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ

Основною особливістю процесу обробки тонкостінних деталей є переривчастий характер фрезерування, пов'язаний з малими радіальними і осевими глибинами різання. Саме це є основним чинником, що впливає на якість поверхні при фрезеруванні. Розглянуто основи формування профілю обробленої поверхні при фрезеруванні тонкостінних деталей. Досліджено характер коливального руху тонкостінної деталі при різних швидкісних умовах обробки. Запропоновано розширена схема поведінки системи в різних швидкісних умовах обробки. Показано, як ці особливості пов'язані з параметрами якості обробленої поверхні. Експериментально доведено, що при обробці тонкостінних деталей саме вимушені коливання вносять домінуючий внесок в формування профілю обробленої поверхні, як в швидкісній зоні появи регенеративних автоколивань, так і в умовах високошвидкісної обробки. Автоколивання сприяють зниженню якості обробки в певному швидкісному діапазоні, але їх негативний вплив може бути багаторазово посилено резонансними явищами. Параметри профілю обробленої поверхні залежать від розмаху коливань точки врізання щодо положення рівноваги деталі.

Ключові слова: тонкостінна деталь, пружна система, регенеративні автоколивання, високошвидкісна обробка, точка врізання, амплітуда.

A. I. GERMASHEV, V. A. LOGOMINOV, Y. B. KOZLOVA, V. A. KRISHTAL

BASES FOR FORMING THE PROCESSED SURFACE WHEN MILLING THIN-WALL PARTS

The main feature of the processing of thin-walled details is the intermittent nature of milling, caused by small radial and axial depths. This is the fundamental factor affecting the quality of the surface during milling. The fundamentals of formation of the profile of the machined surface for milling thin-walled parts are considered. The nature of the vibrational motion of a thin-walled component under different high-speed processing conditions is studied. An extended scheme of the system behavior under various high-speed processing conditions is proposed. It is shown how these features are related to the quality parameters of the treated surface. It has been experimentally proved that when processing thin-walled parts of a complex shape, it is the forced oscillations that make the dominant contribution to the formation of the profile of the treated surface, both in the high-speed zone of the appearance of regenerative self-oscillations and in high-speed processing. Self-oscillations contribute to a decrease in the quality of processing in a certain high-speed range, but their negative effect can be repeatedly amplified by resonant phenomena. The parameters of the profile of the treated surface depend on the amplitude of the oscillation of the insertion point relative to the equilibrium position of the workpiece.

Keywords: thin-walled part, elastic system, regenerative self-excited oscillation, high-speed processing, point of tooth entrance, amplitude.

Введение. Фрезерование тонкостенных деталей является одним из новейших этапов в истории резания металлов [1-2]. Возможности такого метода формообразования поверхности, производительность и эксплуатационные преимущества изготавливаемых деталей, вывели его на одну из лидирующих позиций по популярности среди процессов механической обработки. Использование тонкостенных элементов деталей наиболее широко распространено в авиакосмической отрасли, где одновременно предъявляются как повышенные требования к низкой массе и прочности конструкций, так и к качеству обрабатываемых поверхностей. Изготовление подобных деталей осуществляется путем удаления до 90% припуска заготовки, что диктует острую необходимость в высокой производительности данного процесса [2].

Проблемы, стоящие на пути получения оптимальной геометрической формы и качества поверхности детали, можно разделить на три группы.

Первой, общепринятой в зарубежной и отечественной литературе, является автоколебания (в англоязычной литературе « chatter »), возникающие в процессе резания, и ведущие к периодическому изменению силы резания, положения инструмента и/или детали, существенному ухудшению качества поверхности и повышенному износу инструмента. Для снижения негативного влияния автоколебаний была разработана «регенеративная теория», позволяющая рассчитать границу устойчивости системы при определенной частоте вращения шпинделя. Свое начало подход берет в 50-х годах XX века и основывается на укладке регенеративных волн на поверхности резания. Подавляющее большинство

исследователей склоняется именно к такому способу снижения вибраций при резании.

Ко второй группе можно отнести отклонение обработанной поверхности от номинального профиля (в англоязычной литературе «surface location error»), вызванное недостаточной динамической жесткостью инструмента и/или детали, что приводит к их периодическому отклонению в процессе стабильного резания. Такой подход используется значительно реже, хотя, по мнению авторов, он является более приемлемым для фрезерования тонкостенных сложно-профильных деталей.

В третью группу проблем следует объединить вопросы, связанные с биением инструмента, погрешностью позиционирования, износом инструмента температурными взаимодействиями и т.д.

Если последнюю группу проблем можно устранить высокой культурой производства, то первые две требуют специального исследования и могут быть решены только при условии использования современных достижений науки, реализация которых требует диагностики детали перед каждым технологическим переходом, а также учет особенностей обработки.

Выявление основополагающих факторов, влияющих на качество поверхности при фрезеровании тонкостенных деталей, требует ясного понимания особенностей процесса обработки, основной из которых является прерывистый характер фрезерования, вызванный малыми радиальными и осевыми глубинами. При высокоскоростном фрезеровании тонкостенных деталей процесс происходит в условиях возбуждения упругой системы (УС) детали вынужденными колебаниями, а на малых скоростях на вынужденные накладываются регенеративные автоколебания [3].

Характер колебательного движения тонкостенной детали при различных скоростных условиях обработки. Скоростной диапазон фрезерного станка разделен на две зоны, которые определяют условия фрезерования тонкостенной детали. В данной статье предложена расширенная схема возможного поведения системы в различных скоростных условиях обработки (рис. 1).

При фрезеровании тонкостенных деталей, ввиду прерывистости обработки, важным параметром, который определяет возможность существования автоколебательного процесса, является соотношение времени резания - $t_{рез}$ и периода автоколебаний детали - $T_{ак}$. Если время резания больше периода регенеративных автоколебаний детали, система имеет возможность совершать автоколебания и в зависимости от величины этого соотношения на поверхности резания формируется различное количество волн. При этом качество обработанной поверхности определяется величиной регенеративных автоколебаний - $R_{ак}$, так как часть волнистой поверхности, оставленная предыдущим зубом фрезы, остается на поверхности резания и формирует профиль обработанной поверхности (рис. 2).

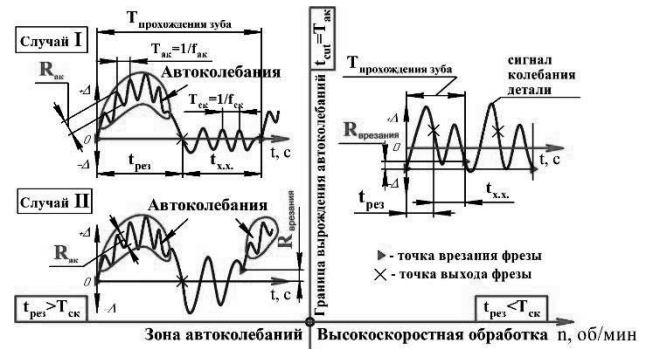


Рис. 1 – Общий вид закона движения тонкостенной детали при различных скоростных условиях обработки



Рис. 2 – Формирование обработанной поверхности тонкостенной детали в условиях регенеративных автоколебаний

В работе [4] приводится методология оценки уровня регенеративных автоколебаний детали и показано, что величина автоколебаний имеет высокую связь с параметром шероховатости обработанной поверхности (коэффициент парной корреляции для встречного фрезерования составляет 0,94, а для попутного 0,87). Такой анализ применим для случая 1 (рис. 1).

При высокоскоростной обработке тонкостенных деталей, когда время резания - $t_{рез}$ становится меньше периода автоколебаний детали - $T_{ак}$ система не имеет возможности совершить даже одного колебательного движения за время одного реза, при этом, наличие волн на поверхности резания не наблюдается. Отсутствует ли автоколебательный процесс или на поверхности резания остается малая фракция волны с точностью сказать, основываясь на имеющихся у авторов экспериментальных данных, нельзя, но можно утверждать, что если незначительная доля волны и существует, то ее недостаточно для возбуждения автоколебаний, способных повлиять на качество обработки.

Таким образом, при относительно высоких скоростях, с точки зрения регенеративных автоколебаний, резание является устойчивым (в англоязычной литературе «stable cutting»). Однако, высокоскоростное фрезерование тонкостенных элементов деталей все равно является одной из сложнейших операций при обработке резанием ввиду возникновения вибраций. Следовательно, первопричиной этого являются не автоколебания.

На рис. 1 показано, что при высокоскоростной обработке тонкостенных деталей процесс резания сменяется свободным движением детали, во время которого деталь совершает свободные затухающие колебания. Ввиду относительно высоких скоростей деталь не успевает прийти в состояние покоя за время

холостого хода и последующее врезание зуба фрезы происходит в колеблющуюся деталь. В этот момент фаза свободных колебаний детали определяет ее положение относительно положения равновесия. Таким образом, снятие припуска может осуществляться при различных положениях детали, и оно может многократно изменяться в течение обработки.

Так как положение инструмента ввиду высокой жесткости является неизменным в направлении колебательного движения детали, то в зависимости от ее отклонения в момент врезания зуба фрезы может происходить как уменьшение, так и увеличение фактической радиальной глубины a_e (рис. 3). При этом наблюдается, соответственно, недостаточное удаление припуска или же зарез детали. Как уже было отмечено, положение детали в момент начала резания может многократно изменяться в течение обработки, что приводит к появлению волн на поверхности и существенному ухудшению ее качества (рис. 4).

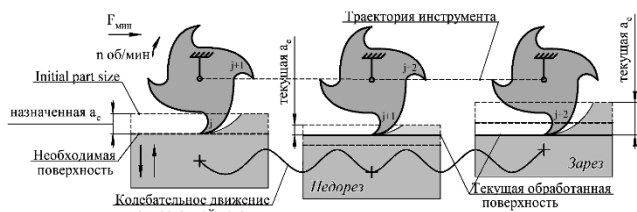


Рис. 3 – Формирование обработанной поверхности тонкостенной детали при высокоскоростной обработке

Методика экспериментального определения условий обработки при высокоскоростном фрезеровании тонкостенных деталей будет описана в дальнейших работах авторов. Основой методики является оценка величины отклонения точки врезания относительно положения равновесия детали – $R_{\text{врезания}}$. Результаты экспериментальных исследований показывают, что положение детали в момент начала резания определяет шероховатость обработанной поверхности.

При обработке тонкостенных элементов деталей для обеспечения высокой производительности стремятся к использованию фрез с максимально возможным количеством зубьев. Чем больше количество зубьев, тем меньше время холостого хода. В связи с этим, существуют и достаточно распространены, такие условия обработки, когда скорость резания не велика, фрезерование происходит в условиях возникновения регенеративных автоколебаний и деталь не успевает прийти в состояние покоя перед врезанием. Такая ситуация изображена на рис. 1 (случай 2). Тогда, на закономерности, установленные для обработки с автоколебаниями, накладываются особенности, характерные для высокоскоростной зоны, то есть, качество обработанной поверхности зависит не только от параметров автоколебаний, но и от отклонения точки врезания относительно положения равновесия детали.

Экспериментальный стенд и условия проведения исследований. Для изучения процесса

фрезерования сложно-профильных тонкостенных деталей предложен стенд, изображенный на рис. 4. Детальная информация по стенду изложена в работах [5, 6]. Захватное устройство представляет собой массивное основание, которое устанавливается на столе фрезерного станка и служит для надежного крепления упругого элемента (тонкостенной пластины). На пластине жестко закрепляется обрабатываемый образец. При фрезеровании, в результате действия силы отжима, происходит перемещение образца, величину которого измеряют датчиком по изменению зазора - Δ .

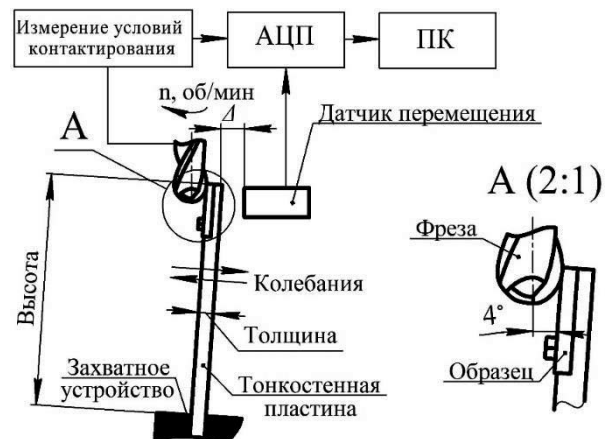


Рис. 4 - Стенд для проведения экспериментальных исследований

Конструкция стенда была доработана системой измерения условий контактирования инструмента с деталью [7, 8]. К измерительному стенду подводится низковольтный источник питания. При контакте зуба фрезы с обрабатываемым образцом электрический сигнал передается через подвижный токосъемник на АЦП. Запись сигнала с токосъемника и сигнала перемещения образца осуществляется одновременно, что дает возможность их высокоточного совмещения.

Система измерения наличия контакта между фрезой и инструментом является принципиальным элементом экспериментального стенда для изучения процесса прерывистого резания, так как позволяет разделять осциллограмму колебания детали на процесс резания и холостой ход.

Экспериментальные исследования проводили на фрезерном станке с ЧПУ Nigon CX10. В качестве упругого элемента была использована консольно-защемленная пластина (материал Ст65Г) толщиной $h = 8$ мм и шириной $b = 60$ мм, вылет пластины составлял 80 мм. На свободном конце пластины был жестко закреплён образец (материал Ст3), который обрабатывался твердосплавной концевой сферической 6-и зубой фрезой (угол наклона винтовой режущей кромки $w = 30^\circ$). Величина наклона оси инструмента относительно заготовки - 4° . Частота собственных колебаний УС тонкостенной детали составляла $f_{\text{ск}} = 725$ Гц, коэффициент демпфирования $\xi = 0,03$, жесткость $C = 2400$ Н/мм.

Во всех экспериментах осевая глубина резания

составляла $a_r = 1$ мм, радиальная глубина $a_e = 0,5$ мм, подача на зуб $S_z = 0,05$ мм/зуб, направление подачи – попутное. Смазывающе-охлаждающая технологическая среда не применялась.

Результаты экспериментальных исследований, дискуссия. Для верификации вышеописанной информации была проведена одна серия экспериментов с замером динамики фрезерования в скоростном диапазоне от $n = 500$ об/мин до $n = 10000$ об/мин. Шаг изменения частоты вращения шпинделя составлял 100 об/мин. После фрезерования было выполнено профилографирование обработанной поверхности и замер параметра шероховатости R_a . Анализируемым параметром процесса обработки являлся размах колебания точки врезания относительно положения равновесия детали – $R_{\text{врезания}}$. На рис. 5 показано, каким образом изменяется данный параметр в зависимости от частоты вращения шпинделя n и характерные условия возникновения максимальных значений.

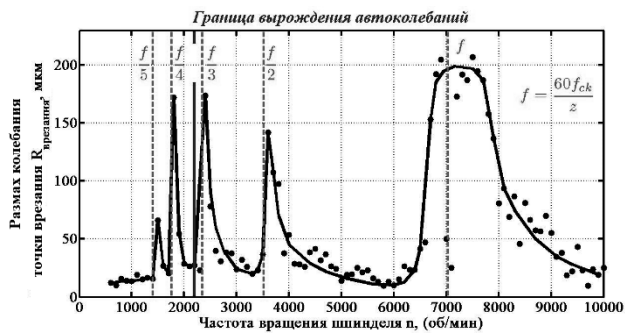


Рис. 5 – Размах колебаний точки врезания при различных скоростных условиях обработки

Наибольший размах точки врезания наблюдали при частоте возбуждения системы равной частоте собственных колебаний, а также в два, три, четыре и пять раз меньше нее. Это явления вызвано условием резонанса и связано с возбуждением системы с зубцовой частотой или ее высшими гармониками, которыми насыщен частотный спектр прерывистого фрезерования. Такое поведение УС тонкостенной детали является закономерным в условиях прерывистого резания и более детально будет описано в дальнейших работах авторов.

Именно размах колебания точки врезания относительно положения равновесия детали – $R_{\text{врезания}}$ определяет качество обработки, и чем меньше это значение, тем ниже параметр шероховатости R_a . При виброустойчивом режиме обработки, когда достигнуто наименьшее значение размаха точки врезания, качество поверхности ограничивается точностью изготовления и позиционирования инструмента.

На рис. 6 на примере фрагмента осциллограммы колебания детали показано, как изменяется положение точки врезания и каким образом это отражается на качестве обработанной поверхности.

Всплески размаха точки врезания можно также наблюдать и в зоне появления автоколебаний (рис. 5),

то есть, резонансные явления имеют место и в этой скоростной зоне

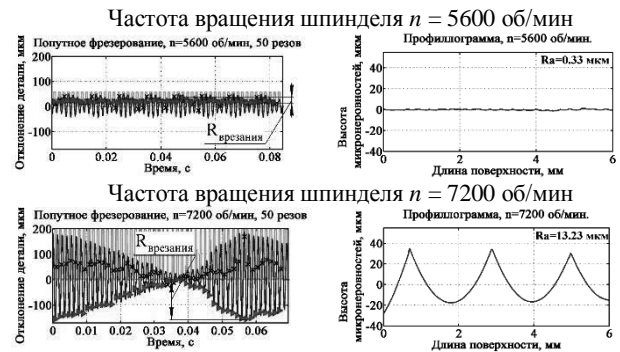


Рис. 6 – Внешний вид обработанной поверхности при различном месторасположении точки врезания (высокоскоростная обработка)

Использование многозубого инструмента способствует увеличению частоты возбуждения системы пропорционально количеству зубьев фрезы, при этом, скорость резания остается неизменной. То есть, процессы возбуждения автоколебаний протекают аналогично вне зависимости от количества зубьев, а возбуждение системы происходит низшей гармоникой при большем числе зубьев фрезы. При этом, чем ниже гармоника, тем выше ее амплитуда, а соответственно и амплитуда колебания детали.

На практике сокращение времени холостого хода обеспечивает относительно высокие колебания при начале срезания припуска последующим зубом фрезы. А при резонансных явлениях, амплитуды колебания детали дополнительно усиливаются. Таким образом, в процесс формирования поверхности свой вклад вносит местоположение точки врезания. А так как обработка происходит в зоне автоколебаний, то и их параметры существенно влияют на формообразование обработанной поверхности.

На рис. 7 приведены фрагменты колебательного движения детали в условиях возбуждения автоколебаний и профилограммы обработанной поверхности.

Рассматриваемые поверхности характеризуются низким качеством обработки, вызванным автоколебаниями. Однако, при режимах фрезерования, где величина точки врезания относительно низка ($n = 1100$ об/мин, $n = 2000$ об/мин), профиль характеризуется малыми неровностями, которые сформированы исключительно автоколебаниями. При этом, в условиях фрезерования, где наблюдали пиковые значения размаха колебаний точки врезания ($n = 1500$ об/мин, $n = 1800$ об/мин), шероховатость поверхности существенно выше и характеризуется периодическими волнами высокой амплитуды. Это свидетельствует о различной радиальной глубине фрезерования, вызванной нестабильностью положения детали в момент начала резания зубом фрезы. То есть, микронеровности малой частоты и высокой амплитуды вызваны размахом точки врезания, а высокой частоты и малой амплитуды – автоколебаниями.

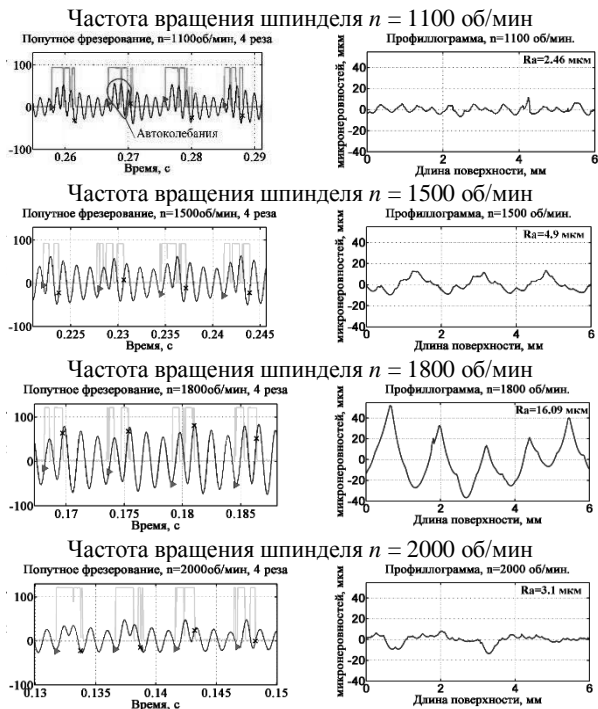


Рис. 7 – Внешний вид обработанной поверхности при различном месторасположении точки резания (зона автоколебаний)

Выводы. При фрезеровании тонкостенных элементов деталей скоростной диапазон фрезерного станка с точки зрения возбуждения автоколебаний можно разделить на две зоны. Первая зона – низкоскоростная. В ней проходит обработка, когда время резания больше периода автоколебаний. При этом на поверхности резания можно наблюдать появление регенеративных волн. Вторая – зона высокоскоростной обработки. В ней время резания меньше периода автоколебаний и деталь не имеет возможности их совершать.

Расположение границы вырождения автоколебаний зависит от множества факторов, среди которых можно выделить режимы резания и ЧСК УС тонкостенной детали. Расчет этого параметра приведен в работе [9]. Как в зоне появления автоколебаний, так и в высокоскоростной зоне возбуждение системы всегда происходит в условиях вынужденных колебаний, связанных с прерывистостью процесса обработки.

В зоне появления автоколебаний формообразование обработанной поверхности определяется либо исключительно параметрами автоколебаний, либо, в случае использования многозубого инструмента и повышения зубцовых частот, совокупностью факторов, обусловленных величиной автоколебаний и положением детали в момент начала врезания очередного зуба фрезы. Причем, положение детали имеет определяющее значение. Учитывая факт использования фрез с большим количеством зубьев в условиях производства, последний вариант является более распространенным.

При высокоскоростном фрезеровании

формирование профиля обработки зависит от размаха колебаний точки резания относительно положения равновесия детали. Существенное увеличение данного параметра наблюдается при резонансных явлениях, когда частота возбуждения упругой системы тонкостенной детали или ее высшие гармоники равны частоте собственных колебаний детали.

При использовании многозубых фрез при обработке тонкостенных деталей именно вынужденные колебания вносят доминирующий вклад в формирование профиля обработанной поверхности, как в скоростной зоне появления регенеративных автоколебаний, так и при высокоскоростной обработке. При этом параметром, характеризующим состояние системы, является изменение положения детали в момент начала резания зубом фрезы. Стоит отметить, что автоколебания, безусловно, способствуют снижению качества обработки в определенном скоростном диапазоне, но их негативное влияние может быть многократно усилено резонансными явлениями.

Список литературы

1. Добротворский С.С., Басова Е.В., Кононенко С.Н. Усовершенствование технологии фрезерования деталей с неравномерной жесткостью. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Харьков. Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т»*, 2016. №72. С. 105–111.
2. Добротворський С.С., Басова Є.В., Кононенко С.М. Технологічне забезпечення високошвидкісного фрезерування деталей з нерівномірною жорсткістю при управлінні величиною припуску. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017) : матеріали тез доповідей VII міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів , 24–27 квіт. 2017 р.) : у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]*. – Чернігів ЧНТУ, 2017. Т. 1. С. 102-103
3. Внуков Ю. Н., Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Зубарев А. Е. Методология экспериментального исследования закона движения (вибраций) тонкостенной детали при концевом фрезеровании. *Вестник МГТУ «Станкин»*. Москва. МГТУ, 2015. № 3 (34). С. 15–23.
4. Внуков Ю. Н., Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Каморкин П. А. Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харьков. НТУ «ХПІ», 2015. № 10. С. 3–13.
5. Стенд для дослідження коливальних при кінцевому циліндричному фрезеруванні тонкостінних елементів деталей: пат. 94974 Україна: МПК (2006) G01N11/00; G01M7/02. № 201405981; заявл. 02.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 23. 4 с.
6. Внуков Ю. Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей при концевом фрезеровании. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харьков. НТУ «ХПІ», 2011. № 80. С. 32–37.
7. Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б., Внуков Ю. Н. Устройство для исследования условий контактирования инструмента с деталью при цилиндрическом фрезеровании тонкостенных деталей. *Инженерия поверхности и реновация изделий : тезисы доклада XV Международной научно-технической конференции (г. Затока, 01–05 июня 2015 г.)*. Киев, 2015. С. 45–47.
8. Внуков Ю. Н. Гермашев А. И., Дядя С. И., Козлова Е. Б. Методика определения условий контактирования инструмента с тонкостенной деталью при ее концевом фрезеровании. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Харьков. НТУ «ХПІ», 2015. № 85. С. 48–55.
9. Vnukov Y. N., Germashev A. I., Logominov V. A., Krishtal V. A. Possibilities of using stability lobe diagram for stability prediction of

high speed milling of thin-walled details. *Mechanics and Advanced Technologies*. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 2017. Vol. 79. pp. 41–48.

References (transliterated)

1. Dobrotvorskiy S., Basova Ye., Kononenko S. Uovershenstvovanie tekhnologii frezerovaniya detalej s neravnomernoj zhestkost'yu [Improving the technology of milling parts with uneven rigidity] *Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii: sb. nauch. tr.* [Open information and computer integrated technologies: a collection of scientific papers]. Kharkov, 2016, No 72, pp.105-111.
2. Dobrotvorskiy S., Basova Ye., Kononenko S. [Technological support of high-speed milling of parts with uneven low rigidity when controlling the size of the allowance] *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZLaTPS – 2017) : materialy tez dopovidei VII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Ch 1 (m. Chernihiv , 24–27 kvit. 2017 r.)* [Comprehensive assurance of the quality of technological processes and systems (KJYPPS - 2017): materials of abstracts of the VII international scientific and practical conference (Chernihiv, April 24-27, 2017).] Chernihiv, Chernihiv National Technological University Publ., 2017, pp. 102-103.
3. Vnukov Ju. N., Germashev A. I., Dyadya S. I., Zubarev A. E. Metodologija jeksperimental'nogo issledovaniya zakona dvizheniya (vibracij) tonkostennoj detali pri koncevom frezerovanii [Methodology of experimental research of law of motion (vibrations) of the thin-walled detail at the end-capping milling]. *Vestnik MGTU "Stankin"* [Vestnik MGTU "Stankin"]. Moscow, MGTU Publ., 2015, no 3 (34), pp. 15–23.
4. Vnukov Ju. N., Germashev A. I., Djadya S. I., Kamorkin P. A. Razrabotka metodiki ocenki urovnja avtokolebanij tonkostennoj detali pri ee koncevom frezerovanii [Development of methodology of estimation of level of self-excited oscillations of the thin-walled detail at her end-capping milling], *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 10, pp. 3–13.
5. Logominov V. O., Germeshev A. I., Dyad S. I., Kozlova O. B. *Ctend dlja doslidzhennja kolivan' pri kincevomu cilindrichnomu frezeruvanni tonkostinnih elementiv detale* [Casing for study of oscillations in finite cylindrical milling of thin-walled elements of parts]. Patent UA, no. 94974, 2006.
6. Vnukov Ju. N. Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkih detalej koncevymi frezami [Stand for the study of mechanical oscillations in the milling of ladder parts at the end milling], *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2011, no. 80. pp. 32–37.
7. Germashev A. I., Dyadya S. I., Kozlova Y. B., Vnukov Yu. N. Ustrojstvo dlja issledovaniya uslovij kontaktirovaniya instrumenta s detal'ju pri cilindricheskom frezerovanii tonkostennyh detalej [Device for studying the conditions of contacting the tool with a workpiece for cylindrical milling of thin-walled parts] *Inzhenerija poverhnosti i renovacija izdelij : teziy doklada XV Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii (01-05 ijunja 2015 r., Zatoka)* [Surface Engineering and Renovation of Products. Abstracts of the report of the XV Int. Sci. and Tech. Conf. (01-05 June 2015, Zatoka)]. Kiev Publ., 2015, pp. 45–47.
8. Vnukov Yu. N., Germashev A. I., Dyadya S. I., Kozlova Y. B. Metodika opredelenija uslovij kontaktirovaniya instrumenta s tonkostennoj detal'ju pri ee koncevom frezerovanii [Method for determining the conditions for contacting the tool with a thin-walled part at its end milling], *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 85. pp. 48–55.
9. Vnukov, Y. N., Germashev, A. I., Logominov, V. A., Krishtal, V. A. (2017), "Possibilities of using stability lobe diagram for stability prediction of high speed milling of thin-walled details", *Mechanics and Advanced Technologies. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*, vol. 79. pp. 41–48.

Поступила (received) 12.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гермашев Антон Ігоревич (Гермашев Антон Игоревич, Germashev Anton Igorevich) – кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет, старший науковий співробітник, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7385-1664>; e-mail: germashevanton@mail.ru.

Логомінів Віктор Олексійович (Логоминов Виктор Алексеевич, Logominov Victor Alekseevich) – кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри технології машинобудування, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8148-266X>; e-mail: logominov@rambler.ru.

Козлова Олена Борисівна (Козлова Елена Борисовна, Kozlova Yelena Borisovna) – кандидат технічних наук, Запорізький національний технічний університет, доцент кафедри технології машинобудування, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3478-5913>; e-mail: kozlova@zntu.edu.ua.

Кришталь Володимир Олександрович (Кришталь Владимир Александрович, Krishtal Vladimir Alexandrovich) – Державне підприємство «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро Прогрес» імені академіка О. Г. Івченка, начальник цеху, м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5609-8137>; e-mail: khristalvladimir@gmail.com.

Я.Н. ГАРАЩЕНКО**СЛОЖНОСТИ КОНТУРОВ ОБЛАСТЕЙ ПОСЛОЙНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ**

Представлено результаты исследования возможности оценки геометрической сложности контуров областей послойного формообразования изделия. Оценка сложности контура выполнялась на основе статистического анализа фрактальных размерностей контура получаемых при использовании различных по масштабу мер измерения длины контура. Выполнена программная реализация послойного анализа исходной триангуляционной 3D-модели. Апробация компьютерной системы выполнялась с использованием моделей промышленных изделий. В результате подтверждена возможность оценки геометрической сложности контуров на основе анализа статистических характеристик распределения их фрактальной размерности.

Ключевые слова: аддитивные технологии, технологическая подготовка, триангуляционная модель, геометрическая сложность, фрактальная размерность.

Я.М. ГАРАЩЕНКО**ОЦІНКА СКЛАДНОСТІ КОНТУРІВ ОБЛАСТЕЙ ПОШАРОВОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ**

Представлено результати дослідження можливості оцінки геометричної складності контурів областей пошарового формоутворення виробу. Оцінка складності контуру виконувалася на основі статистичного аналізу фрактальних розмірностей контуру одержуваних при використанні різних за масштабом мір для вимірювання довжини контуру. Виконана програмна реалізація пошарового аналізу вихідної триангуляційної 3D-моделі. Апробація комп'ютерної системи виконувалася з використанням моделей промислових виробів. В результаті підтверджена можливість оцінки геометричної складності контурів на основі аналізу статистичних характеристик розподілу їх фрактальної розмірності.

Ключові слова: адитивні технології, технологічна підготовка, триангуляційна модель, геометрична складність, фрактальна розмірність.

Y. GARASHCHENKO**EVALUATION OF COMPLEXITY OF FIELD CONTOURS OF LAYERED BUILDING BASED ON THE ANALYSIS OF FRACTAL DIMENSION**

The results of a study of the possibility of estimating the geometric complexity of contours in layered building of a product are presented. The contour complexity was evaluated on the basis of a statistical analysis of fractal dimension of the contour obtained using different scale measures. To determine the fractal dimension of the contour, measures commensurate with the geometric limitations of layered building were used. Such limitations exist because of layered building peculiarities and technological capabilities of used equipment. Software has been developed to implement a layer-by-layer analysis of the original triangulation 3D model. Approbation of the system was carried out on the basis of models of industrial products. As a result, the possibility of estimating the geometric complexity of the contours of the regions of layered shape formation is confirmed on the basis of an analysis of statistical characteristics of distribution of fractal dimension of the contours.

Keywords: additive manufacturing, technology planning, triangulated model, geometrical complexity, fractal dimension

Введение. На первом этапе технологической подготовки аддитивного производства (Additive Manufacturing) выполняется оценка технологичности конструкции, выбор стратегии изготовления, прогнозирование времени, себестоимости изготовления и качества изделия [1]. Предварительная оценка сложности изделия на основе анализа исходной 3D-модели является необходимым для рационального выбора стратегии изготовления и оборудования [2]. Особенность процессов аддитивных технологий приводит к потребности послойного анализа путем оценки сложности контуров областей формообразования.

Точность и эффективность процесса послойного построения зависит от ряда технологических параметров и сложности геометрии получаемых поверхностей изделия и, соответственно, сложности контуров областей формообразования. Точность формообразования при рассмотрении получаемого изделия в секущей плоскости, проходящей через координатную ось Z (направление построения) в основном определяется толщиной слоев материала и ориентацией поверхности [3-5]. Например, наклонные поверхности, нормали которых наклонены под небольшим углом к вектору направления построения,

будут иметь более выраженный «ступенчатый» вид. В плоскости XY точность формообразования зависит от более широкого ряда факторов. Сложность контура области формообразования является основным фактором, зависящим от геометрической сложности и взаимного расположения поверхностей изделия. При анализе контура это определяется по смежным углам между отрезками прямых и минимальным расстоянием между ними. Остальные факторы определяют геометрические ограничения выбранной технологии и оборудования:

- величина дискретности рабочей среды, например, для технологии SLS, DMD – размеры зерен исходного материала; для DLP – дискретность проецирования;

- точность рабочих движений (например, для технологий SLS, SLA это погрешности воспроизведения траектории перемещения пятна лазерного луча) которая, как правило, не является постоянной в пределах рабочего пространства установки, т. к. зависит от координат добавляемого материала;

- размеры образуемого (добавляемого) элементарного объема материала, для SLS и SLM зависят от размеров пятна лазерного луча, для FDM –

диаметра сопла экструдера.

Анализ литературных данных и постановка проблемы.

Сложность изделия будет определять сложность образуемого контура. Оценку сложности контура области формообразования необходимо выполнять с учетом существующих геометрических ограничений технологии и оборудования. Острые углы смежных элементов контура и узкие его места попадают под такие ограничения [11].

Экспериментальным исследованиям геометрических ограничений, т.е. определению предельно допустимых минимальных размеров различных элементов изделия, посвящено достаточно большое количество публикаций. В работах [6-8] для технологий SLM, SLS и FDM определены геометрические ограничения на такие элементы, как отверстия, цилиндры, тонкостенные стенки и начертания шрифтов. Например, в работах [9, 10] представлены результаты исследований для SLS по выявлению минимальных размеров элементов конструкции в зависимости от их ориентации.

Например, в работе [12] количественная оценка сложности производится по относительному периметру видимого контура с заданной точки.

В данной работе предлагается рассматривать фрактальную размерность контура как меру его геометрической сложности [13]. Сделано предположение, что правильный подбор масштаба M (соизмеримого с геометрическими ограничениями) для

определения фрактальной размерности контура позволит обоснованно выбирать технологию и оборудование для получения изделия.

Рассмотрена научная гипотеза о том, что статистический анализ распределения фрактальной размерности контуров областей послойного формообразования позволит научно-обоснованно определять их геометрическую сложность.

Целью работы – изучить возможности оценки сложности контуров областей формообразования на основе определения их фрактальной размерности с учетом геометрических ограничений выбранной технологии и оборудования.

Подсистема статистического послойного анализа 3D-модели изделия.

Реализация задачи перехода от исходной триангуляционной 3D-модели изделия к набору слоев (2D-контуров областей формообразования) выполнялась в рамках системы технологической подготовки материализации сложных изделий аддитивными технологиями, разработанной на кафедре "Интегрированные технологии машиностроения" НТУ "ХПИ". Данная система позволяет выполнять оценку эффективности решения задач технологической подготовки аддитивного производства на основе статистического анализа исследуемых признаков полигональной, воксельной и послойной модели изделия. Для решения поставленной задачи разработана подсистема послойного анализа. Экранная форма подсистемы представлена на рис. 1.

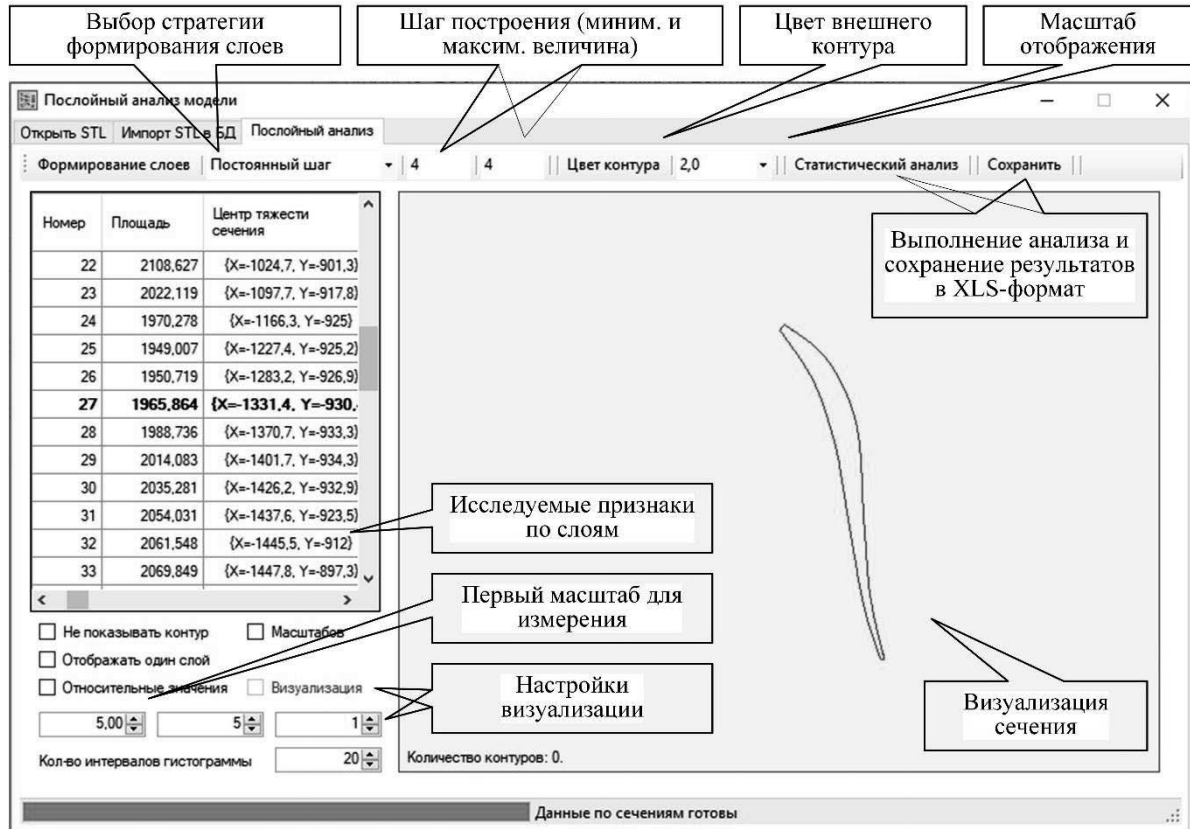


Рис. 1 – Экранная форма подсистемы послойного анализа 3D-модели

Разработанная подсистема представляет пользователю следующие основные возможности:

- формирование набора слоев с 2D-сечениями изделия (контурами областей формообразования) на основе полигональной модели (STL-файла) по заданной стратегии построения (с постоянным или переменным шагом);

- визуализация текущего слоя с учетом масштаба отображения;

- определение фрактальной размерности по заданному диапазону масштабов (области скейлинга) для измерения длины контура;

- статистический анализ и построение гистограмм распределения исследуемых признаков (углов наклона относительно оси Z нормалей граней в текущем слое и смежных углов между прямыми отрезками контура);

- сравнительный анализ по основным статистическим характеристикам (параметры выводятся в единую таблицу для всех слоев);

- вывод формы визуализации результатов анализа в виде плотности или интегральной функции вероятности.

Переход от исходной триангуляционной 3D-модели изделия к набору слоев выполняется по процедуре, разработанной с учетом существующих работ [14-16], реализующей стратегию с постоянным шагом построения.

Определение фрактальной размерности контура.

Набор слоев формируется путем рассечения триангуляционной 3D-модели изделия набором параллельных плоскостей. В результате образуются замкнутые контуры, состоящие из отрезков прямых. Такие отрезки получаются в результате пересечения треугольных плоских граней 3D-модели плоскостью перпендикулярной оси Z (задающей положение слоя материала). В большинстве случаев отрезки прямых относительно общей длины контура являются достаточно малыми. Поэтому типичная задача фрактальной геометрии по определению длины кривой линии с использованием меры заданной величины M (так называемого «масштаба измерения» [13]) вполне применима к контурам областей послойного формообразования. Результатом решения такой задачи является коэффициент фрактальной размерности D контура для определенной области скейлинга ΔM (интервала мер).

Учитывая теоретические предпосылки [17, 18] фрактальная размерность D количественно оценивает сложность контура как коэффициент изменения в деталях с изменением масштаба.

На практике обязательно существуют ограничения по минимальному и максимальному значению масштаба измерения M [19]. В данной работе ставилась задача оценки сложности контура с учетом заданных геометрических ограничений. Поэтому величина M используемой для определения размерности D задавалась в диапазоне значений таких геометрических ограничений.

Схема определения фрактальной размерности

контура на основе послойного анализа триангуляционной модели представлена на рис. 2.

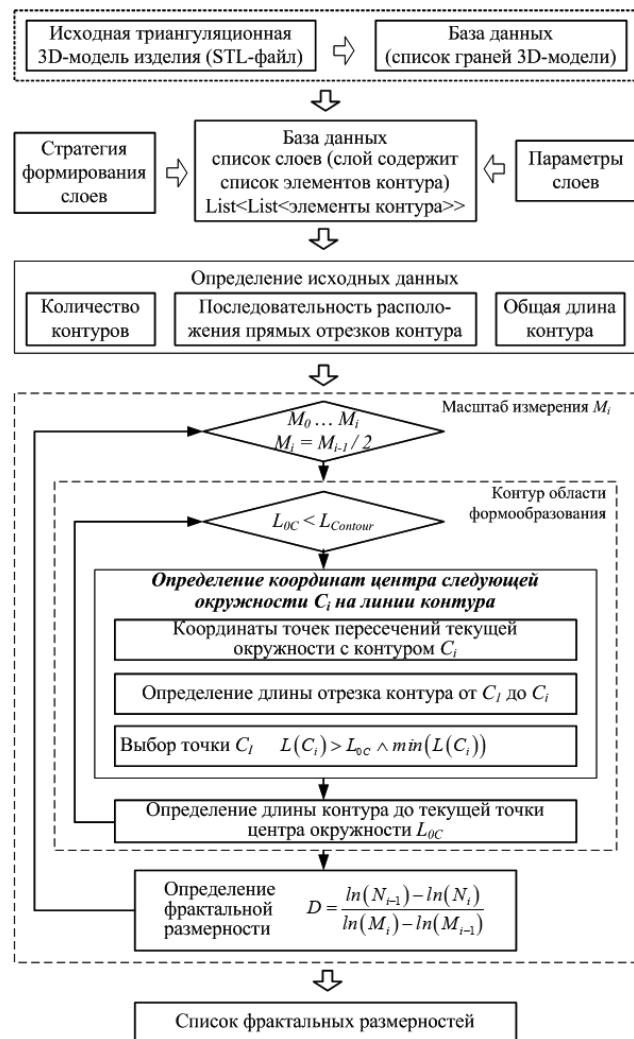


Рис. 2 – Схема расчета фрактальной размерности контуров

По данной схеме в процессе измерения длины контура L определялось минимальное количество масштабов N (мер измерения M), покрывающих полностью контур [13] (на рис. 3 показан пример визуализации процедуры измерения).

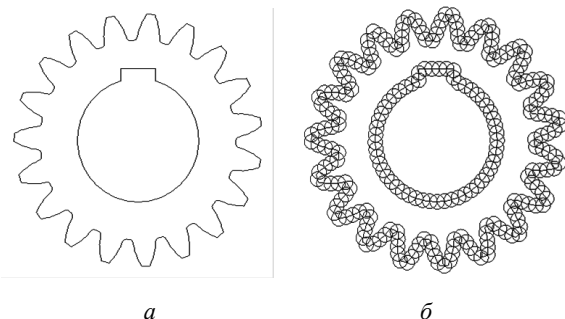


Рис. 3 – Визуальный анализ оценки фрактальной размерности контура сечения модели шестерни:

a – исходный контур; b – контур с наложением масштабов

При последовательном изменении масштаба

повторно осуществляется процесс измерения. Масштабом называют прямой отрезок с длиной M или окружность с радиусом M . Масштаб априори значительно меньше измеряемой длины контура ($M \ll L$). Количество N будет расти при уменьшении величины M (для полного покрытия контура требуется большее количество масштабов меньшего размера).

Фрактальная размерность определяется по следующей зависимости [13]:

$$D = \frac{\ln(N_{i-1}) - \ln(N_i)}{\ln(M_i) - \ln(M_{i-1})}, \quad (1)$$

где M_i – мера (радиус окружности) для i -го измерения длины контура;

N_i – число масштабов (окружностей с радиусом M_i) покрывающих контур.

В результате получаемый по зависимости (1) коэффициент D может принимать не целочисленное значение, характеризующее степень заполнения плоскости исследуемым контуром [20].

Сложность контура состоящего из отрезков прямых и соответственно фрактальная размерность будут зависеть от области скейлинга $\Delta M = M_{i-1} - M_i$. При измерении реального контура с использованием меры $M \rightarrow 0$ всегда длина $L = const$. В данном случае, исходя из зависимости (1) фрактальная размерность будет соответствовать евклидовой размерности контура $D = 1$. Но если учесть, что при уменьшении величины погрешности триангуляции САД-модели $\Delta_{тр} \rightarrow 0$ применительно к сложному изделию, (содержащего криволинейные поверхности) длина

контура увеличивается $L \rightarrow L_{идеал}$. Следовательно, фрактальная размерность контура, полученного путем рассечения плоскостью криволинейных поверхностей, всегда будет $D > 1$ (при условии, что величина меры не меньше минимального прямого отрезка контура).

Исследование возможностей оценки фрактальной размерности контуров выполнялось на примере тестовых моделей простых геометрических тел и промышленных изделий, представленных на рис. 4. Сечение моделей производилось по стратегии с постоянным шагом построения. Глубина слоя задавалась $h_L = 1$ мм. Такая завышенная величина h_L выбрана из соображений уменьшения вычислительного времени.

Первоначальная мера M_1 задавалась относительно длины контура $M_1 = \{L_c/10, L_c/5\}$ или в абсолютных значениях $M_1 = \{1, 2\}$ мм. Последующие величины мер задавались по убывающей геометрической прогрессии $M_i = q \cdot M_{i-1}$ со знаменателем $q = 2^{-1}$. Количество измерений длины контура выполнялось до 5-ти раз с целью получения более широкой области скейлинга ΔM .

Полученные результаты модельных расчетов приведены в табл. 1 и 2.

Полученные модельным путем коэффициенты D (табл. 1) соответствуют теоретическим предпосылкам. Контурные области формообразования для моделей куба, сферы, конуса, тора и цилиндра относятся к простым геометрическим формам, таким как квадрат, окружность, и т.д. (форма контура зависит от ориентации модели).

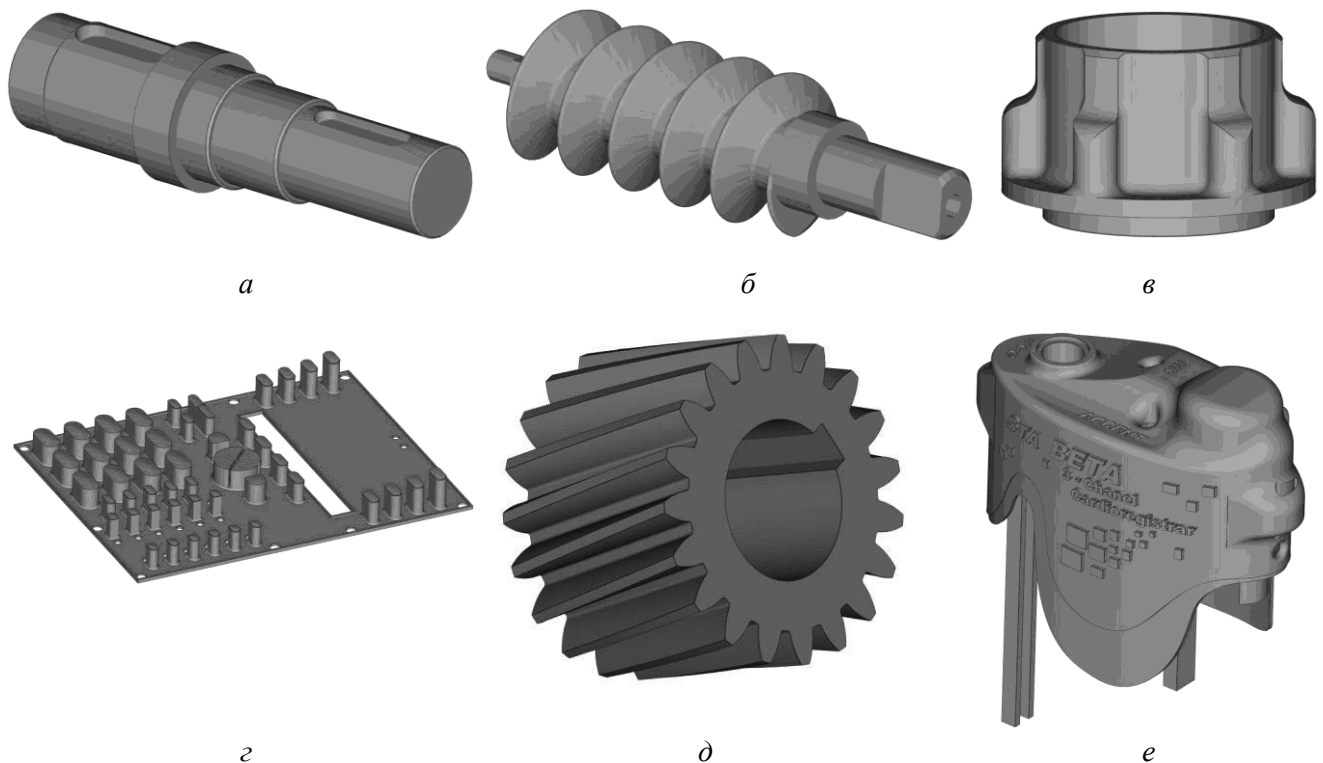


Рис. 4 – Тестовые 3D-модели: а – вал; б – шнек; в – корпус; г – панель; д – шестерня; е – крышка

Таблица 1 – Фрактальная размерность контуров сечений 3D-моделей простых геометрических форм

Модель (размеры, мм)	M_i , отн. значение	D_{Rel}	M_i , мм	D_{Abs}
Куб ($L = 100$)	$L_c / 10$	1.00÷1.15	2.0	1.00
	$L_c / 5$	1.00÷1.17	1.0	1.00
Сфера ($D = 100$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	0.99÷1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	0.99÷1.00
Конус ($D = 100$, $H = 100$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	0.99÷1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	0.99÷1.00
Тор ($D = 100$, $d = 10$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	0.99÷1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	0.99÷1.00
Цилиндр ($D = 100$, $H = 100$)	$L_c / 10$	1.00	2.0	1.00
	$L_c / 5$	1.00	1.0	1.00
Пружина (100x100x10)	$L_c / 10$	0.96÷1.15	2.0	0.99÷1.01
	$L_c / 5$	0.96÷1.15	1.0	0.99÷1.00

Таблица 2 – Фрактальная размерность контуров сечений 3D-моделей промышленных изделий

Модель (размеры, мм)	M_i , отн. значение	\bar{D}_{Rel}	M_i , мм	D_{Abs} (\bar{D}_{Abs})
Вал (64×64×138)	$L_c / 10$	1.05	2	1.01÷1.02 (1.01)
	$L_c / 5$	1.09	1	1.00÷1.02 (1.01)
Шнек (40×40×144)	$L_c / 10$	1.00	2	1.00÷1.04 (1.00)
	$L_c / 5$	1.00	1	1.00÷1.01 (1.00)
Корпус (210×210×125)	$L_c / 10$	1.03	2	1.00 1.05 (1.00)
	$L_c / 5$	1.02	1	1.000 1.01 (1.00)
Панель (152×196×20)	$L_c / 10$	1.02	2	1.00÷1.15 (1.04)
	$L_c / 5$	1.07	1	1.00÷1.11 (1.04)
Шестерня (86×86×60)	$L_c / 10$	1.12	2	1.01÷1.01 (1.01)
	$L_c / 5$	1.24	1	1.00÷1.01 (1.00)
Крышка (84 × 101 × 43)	$L_c / 10$	1.10	2	1.00÷1.12 (1.02)
	$L_c / 5$	1.11	1	1.00÷1.10 (1.01)

Поэтому для них фрактальная размерность получена равной Евклидовой размерности $D \approx 1$. Применительно к модели пружины наблюдаются более сложные контуры, в результате получены значения фрактальной размерности превышающие Евклидову $D > 1$. В этом случае исследуемый контур можно отнести к объектам фрактальной геометрии.

Использование относительных величин M позволяет получать фрактальную размерность независимо от масштаба контура. Такое обстоятельство позволяет выполнять сравнительный анализ контуров по их сложности. При задании абсолютных величин M появляется возможность оценивать контур с учетом геометрических ограничений технологического процесса.

Сравнительный анализ контуров по их сложности требует использования одного представительного показателя. В качестве такого принято среднеарифметическое значение фрактальных размерностей n -го контура \bar{D} , полученных при различных масштабах M_i в пределах области скейлинга.

Приведенные в табл. 2 результаты анализа фрактальной размерности контуров для моделей промышленных изделий подтверждают взаимосвязь сложности контура с коэффициентом \bar{D}_{Rel} . Исходя из

данных по коэффициенту \bar{D}_{Rel} для рассмотренных моделей шнек имеет наиболее простые по геометрии контуры областей формообразования. Модели шестерни и крышки имеют наиболее сложные контуры. Следовательно, данные модели имеют повышенные требования к технологическим возможностям оборудования для их изготовления. Под технологическими возможностями оборудования в данном контексте подразумеваются допустимые минимальные размеры элементов изделия [6-8].

Модельные исследования показали, что при превышении длины контура масштабом, т.е. $L_c \leq M$ (или при соизмеримых их величинах) тогда коэффициент $D < 1$.

Выполненный анализ значений D_{Abs} подтвердил существование взаимосвязи $D_{Abs} = f(M)$. Учитывая то, что явно наилучшее воспроизведение контура будет реализовываться для контура с фрактальной размерностью $D \approx 1$. Поэтому далее производится выявление такой взаимосвязи для оценки влияния геометрических ограничений на точность воспроизведения контура.

Взаимосвязь величины меры и фрактальной размерности контура.

Выявление влияния области скейлинга ΔM на фрактальную размерность D_{Abs} производилось на примере модели крышки. Для этой модели характерен достаточно сложный контур с минимальной повторяемостью длины прямых участков, что позволило минимизировать влияние кратного наложения масштабов измерения на этих участках.

Полученная зависимость $D_{Abs} = f(M)$ представлена на рис. 5.

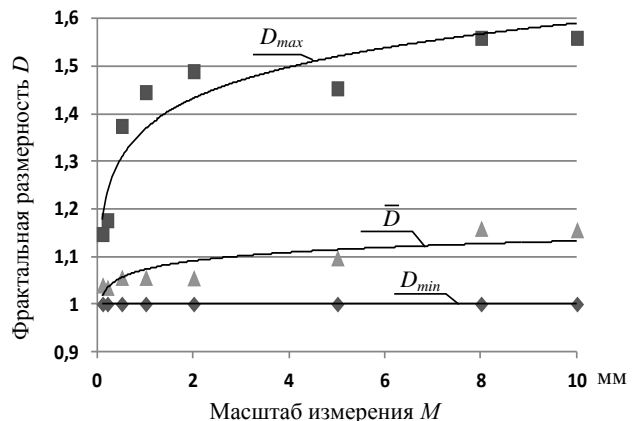


Рис. 5 – Зависимость фрактальной размерности контуров от масштаба измерения для модели крышки (рис. 4 е)

Модель крышки имеет минимальное значение фрактальной размерности $D_{Abs} = 1$ на всем интервале области скейлинга ΔM . Максимальное значение D_{Abs} изменяется в достаточно широком интервале значений – 1.147÷1.559. Среднее значение D_{Abs} в меньшем интервале значений – 1.034÷1.158.

Полученные закономерности взаимосвязи $D_{Abs} = f(M)$ для модели крышки (рис. 5) являются общими для рассмотренных моделей изделий. Во-

первых, увеличение M приводит к увеличению D_{Abs} . Во-вторых, имеются исключения для отдельных замеров, выпадающих из общей зависимости. Такая особенность является закономерностью, так как наблюдается для всех рассмотренных моделей промышленных изделий. Объяснением таким выпадением значений фрактальной размерности D_{Abs} может служить малая длина некоторых контуров или кратное накладывание меры на прямые участки контура. Такая особенность не позволяет выявить функциональной зависимости как общей, так и для отдельно взятой модели изделия. Соответственно при выборе технических характеристик оборудования необходимо модельным путем определять фрактальную размерность в области скейлинга ΔM , соответствующей диапазону значений геометрических ограничений. Исходя из выявленных закономерностей можно сделать предположение, что минимальное отклонение фрактальной размерности от Евклидовой ($\bar{D}_{Abs} \approx 1$) будет указывать на наиболее рациональный выбор технологии изготовления и оборудования для получения заданной 3D-модели.

Анализ полученных модельных данных показывает, что в общем для рассмотренных моделей среднее значение фрактальной размерности \bar{D}_n является вполне представительным для оценки сложности контура.

Выводы.

Статистический анализ распределения фрактальной размерности контуров областей послойного формообразования позволяет научно-обоснованно определять геометрическую сложность контуров областей послойного формообразования изделия.

Использование мер M , задаваемых относительно длины контура, позволяет получать фрактальную размерность независимо от масштаба контура. При таком подходе получаемые размерности D являются применимыми для выполнения сравнительного анализа сложности контуров.

Минимизация отклонения фрактальной размерности от евклидовой позволит определить область скейлинга, которая должна соответствовать рациональным значениям геометрических ограничений выбранной технологии и оборудования для материализации заданной 3D-модели.

Необходимо дальнейшее исследование возможностей оценки сложности контура области формообразования с использованием клеточного метода определения фрактальной размерности.

Список литературы

- Zhang Y., Bernard A. AM Feature and Knowledge Based Process Planning for Additive Manufacturing in Multiple Parts Production Context. *In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014. pp. 1259–1276. URL: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-099-Zhang.pdf> (дата обращения: 17.01.2018).
- Xie X. Design for manufacture and assembly. *Utah Dept Mech.*, 2003. 12 p. URL: <http://home.utah.edu/~u0324774/pdf/DFMA.pdf> (дата обращения: 17.01.2018).
- Byun H. S., Lee K. H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006. pp. 307–313. doi: 10.1007/s00170-004-2355-5.
- Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol*, 45, 2009. pp. 714–730. doi: 10.1007/s00170-009-2006-y.
- Левченко Д.А. *Применение технологии 3D печати при проектировании и прототипировании компрессорной техники* / Д.А. Левченко, В.А. Иванов, С.О. Шарапов [и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 4 (38). – С. 27–33.
- Thomas D. *The development of design rules for selective laser melting. Thesis (PhD)*. University of Wales, Cardiff, 2009. 318 p. URL: <http://hdl.handle.net/10369/913> (дата обращения: 18.01.2018).
- Adam G. A. O., Zimmer D. Design for additive manufacturing – element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7 (1), 2014. pp. 20–28. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.10.001.
- Kranz J., Herzog D., Emmelmann C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27, 2015. pp. 14001–14016. doi: 10.2351/1.4885235.
- Seepersad C. C., Govett T., Kim K., Lundin M., Pinero D. A designer's guide for dimensioning and tolerancing SLS parts. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX, 2014. pp. 921–931. URL: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-70-Seepersad.pdf> (дата обращения: 19.01.2018).
- Wegner A., Witt G. Design rules for laser sintering. *Journal of Plastics Technology*, 8 (3), 2012. pp. 252–277.
- Ranjan R., Samant R., Anand S. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach. *In: ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference. American Society of Mechanical Eng.*, 2015. pp. 1-10. doi: 10.1115/MSEC2015-9448.
- Psarra S., Grajewski T. Describing shape and shape complexity using local properties. *Proceedings, 3rd International Space Syntax Symposium 2001*. Atlanta, USA, 2001. pp. 28.1-28.16. URL: <http://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1320681> (дата обращения: 20.01.2018).
- Балханов В. К. *Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления* / Отв. ред. Ю.Б. Башкуев. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. – 224 с.
- Pandey P. M., Reddy N. V., Dhande S. G. Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, Issue: 5, 2003. pp. 274–288. doi: 10.1108/13552540310502185.
- Абдурайимов Л. Н. Адаптивное разделение на слои исходной 3D модели изделия в технологиях быстрого прототипирования и изготовления // *Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета*. Технические науки. - Симферополь: НИЦ КИПУ, 2009. Вып. 18. С. 15-20.
- Topcu O., Taşcıoğlu Y., Ünver H. Ö. A Method for Slicing CAD Models in Binary STL Format. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 2011. pp. 141-145.
- Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. Macmillan, 1983. 468 p.
- Albers A., Gerald A. L., Mandelbrot B. *In his own words // Mathematical people: profiles and interviews*. Wellesley, Mass: AK Peters, 2008. 214 p.
- Божокин С. В., Паршин Д. А. *Фракталы и мультифракталы*. Ижевск, 2001. 128 с.
- Falconer K. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. New York: Wiley, 2003. 366 p.

References (transliterated)

- Zhang Y., Bernard A. AM Feature and Knowledge Based Process Planning for Additive Manufacturing in Multiple Parts Production Context. *In Proceedings of 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014, pp. 1259–1276. Available at: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/sites/default/files/2014-099-Zhang.pdf> (accessed 17.01.2018).
- Xie X. Design for manufacture and assembly. *Utah Dept Mech.*, 2003,

- 12 p. Available at: <http://home.utah.edu/~u0324774/pdf/DFMA.pdf> (accessed 17.01.2018).
- 3 Byun H. S., Lee K. H. Determination of optimal build direction in rapid prototyping with variable slicing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2006, pp. 307–313. doi: 10.1007/s00170-004-2355-5.
 - 4 Canellidis V., Giannatsis J., Dedoussis V. Genetic-algorithm-based multi-objective optimization of the build orientation in stereolithography. *Int J Adv Manuf Technol*, 45, 2009, pp. 714–730. doi: 10.1007/s00170-009-2006-y.
 - 5 Levchenko D. A., Ivanov V. A., Sharapov S. O. et al. *Primenenie tehnologii 3D pechati pri proektirovanii i prototipirovanii kompressornoy tehniki* [Application of 3D printing technology in the design and prototyping of the compressor equipment]. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroenie*. 2014. No. 4 (38). – pp 27–33.
 - 6 Thomas D. *The development of design rules for selective laser melting. Thesis (PhD)*. University of Wales, Cardiff, 2009, 318 p. Available at: <http://hdl.handle.net/10369/913> (accessed 18.01.2018).
 - 7 Adam G. A. O., Zimmer D. Design for additive manufacturing – element transitions and aggregated structures. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7 (1), 2014, pp. 20–28. doi: 10.1016/j.cirpj.2013.10.001.
 - 8 Kranz J., Herzog D., Emmelmann C. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4. *Journal of Laser Applications*, 27, 2015, pp. 14001–14016. doi: 10.2351/1.4885235.
 - 9 Seepersad C. C., Govett T., Kim K., Lundin M., Pinero D. A designer's guide for dimensioning and tolerancing SLS parts. *Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, TX, 2014, pp. 921–931. Available at: <http://sffsymposium.engr.utexas.edu/Manuscripts/2012/2012-70-Seepersad.pdf> (accessed 19.01.2018).
 - 10 Wegner A., Witt G. Design rules for laser sintering. *Journal of Plastics Technology*, 8 (3), 2012, pp. 252–277.
 - 11 Ranjan R., Samant R., Anand S. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach. *In: ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Eng., 2015, pp. 1-10. doi: 10.1115/MSEC2015-9448.
 - 12 Psarra S., Grajewski T. Describing shape and shape complexity using local properties. *Proceedings, 3rd International Space Syntax Symposium 2001*. Atlanta, USA. 2001, pp. 28.1-28.16. Available at: <http://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/1320681> (accessed 20.01.2018).
 - 13 Balhanov V. K. *Osnovy fraktal'noj geometrii i fraktal'nogo ischisleniya* [Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus]/ Otv. red. Ju.B. Bashkuev. Ulan-Udje, 2013. 224 p.
 - 14 Pandey P., Reddy N., Dhande S. G. Slicing procedures in layered manufacturing: a review. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, Issue: 5, 2003. pp. 274–288. doi: 10.1108/13552540310502185.
 - 15 Abdurajimov L. N. Adaptivnoe razdelenie na sloi ishodnoj 3D modeli izdelija v tehnologijah bystrogo prototipirovanija i izgotovlenija [Adaptive layering of the original 3D model of the product in rapid prototyping] // *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. Simferopol, 2009. Vyp. 18. pp. 15-20.
 - 16 Topçu O., Taşcıoğlu Y., Ünver H. Ö. A method for slicing CAD models in binary STL format. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 2011. pp. 141-145.
 - 17 Mandelbrot B. *The fractal geometry of nature*. Macmillan, 1983. 468 p.
 - 18 Albers A., Gerald A. L. Mandelbrot B. *In his own words // Mathematical people: profiles and interviews*. Wellesley, Mass: AK Peters, 2008. 214 p.
 - 19 Bozhokin S. V., Parshin D. A. *Fraktaly i mul'tifraktaly* [Fractals and multifractals]. Izhevsk, 2001. 128 p.
 - 20 Falconer K. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. New York: Wiley, 2003. 366 p.

Поступила (received) 29.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гаращенко Ярослав Николаевич (Гаращенко Ярослав Миколайович, Yaroslav Garashchenko) – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри "Інтегровані технології машиностроєння", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", г. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2568-4763>; e-mail: yaroslav.garashchenko@gmail.com.

Ю. А. СИЗЫЙ, А. Н. УШАКОВ, С. Е. СЛИПЧЕНКО

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИИ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ, ОГРАНИЧЕННЫХ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМОЙ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

В статье, принимая оптимальным по структуре двухступенчатый цикл круглого врезного наружного шлифования (КВНШ), показано влияние параметров этого цикла: скорости вращения заготовки S м/мин и скорости поперечной подачи V_p мм/мин, на глубину дефектного слоя H_d поверхности заготовки претерпевшей нагрев выше предельно допустимой температуры $T_{\text{пред}}^{\circ}\text{C}$. Последняя определена для закаленной стали 40X как верхнее значение температуры среднетемпературного отпуска в 490°C .

Расчет величины дефектного слоя H_d в зависимости от условий шлифования $H_d(V_p)$ выполняется с помощью формулы расчета температуры поверхности заготовки как функции расстояния x мм от поверхности в радиальном направлении и времени τ , сек, т.е. $T(\tau, x)$.

Для проектирования максимально производительного цикла КВНШ при ограничении нагрева поверхности детали не выше $T_{\text{пред}} = 490^{\circ}\text{C}$ применены формулы расчета величины припуска $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ снимаемого при шлифовании в различные фазы цикла как функции подачи на оборот заготовки S_0 и $K_{\text{ш}}$ – обобщенной статической характеристики системы врезного шлифования.

Владея $T(\tau, x)$, $H_d(S_0)$ $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ найдены условия наименьшего числа оборотов заготовки за операцию КВНШ обеспечивающие снятие необходимого припуска и нагрев поверхности детали не выше $T_{\text{пред}} = 490^{\circ}\text{C}$.

Ключевые слова: круглое врезное наружное шлифование, дефектный поверхностный слой, температура нагрева, оптимальные условия шлифования

Ю.А. СИЗИЙ, О.М. УШАКОВ, С.Е. СЛИПЧЕНКО

ПРОЕКТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАЦІЇ ВРІЗНОГО ШЛІФУВАННЯ, ОБМЕЖЕНИХ ГРАНИЧНОЮ ДОПУСТИМОЮ КОНТАКТНОЮ ТЕМПЕРАТУРОЮ

В статті, приймаючи оптимальним за структурою двосхідчатий цикл круглого врізного зовнішнього шліфування (КВЗШ), показано вплив параметрів цього циклу: швидкості обертання заготовки S м/хв і швидкості поперечної подачі V_p мм/хв, на глибину дефектного слою H_d поверхні заготовки що підлягла нагріву вище гранично припустимої температури $T_{\text{гран}}^{\circ}\text{C}$. Остання визначена для загартованої сталі 40X як верхнє значення температури середньотемпературного отпуска в 490°C .

Розрахунок величини дефектного слою H_d в залежності від умов шліфування $H_d(V_p)$ виконується за допомогою формули розрахунку температури поверхні заготовки як функції відстані x мм від поверхні у радіальному напрямку і часу τ , сек, тобто $T(\tau, x)$.

Для проектування максимально продуктивного циклу КВЗШ при обмеженні нагріву поверхні деталі не вище $T_{\text{гран}} = 490^{\circ}\text{C}$ застосовані формули розрахунку величини припуску $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ що знімається при шліфуванні в різні фази циклу як функції подачі на оборот заготовки S_0 і $K_{\text{ш}}$ – узагальненої статичної характеристики системи врізного шліфування.

Володіючи $T(\tau, x)$, $H_d(S_0)$ $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ знайдені умови найменшого числа обертів заготовки за операцію КВЗШ забезпечуючи зняття необхідного припуску і нагрів поверхні деталі не вище $T_{\text{гран}} = 490^{\circ}\text{C}$.

Ключові слова: кругле врізне зовнішнє шліфування, дефектний поверхневий шар, температура нагріву, оптимальні умови шліфування.

Yu. SIZYI, A. USHAKOV, S. SLIPCHENKO

DESIGN OF OPTIMAL PARAMETERS FOR THE GRINDING OPERATION LIMITED BY THE MAXIMUM PERMISSIBLE CONTACT TEMPERATURE

Influence parameters of two step cycle infeed grinding: speed rotation of blank S m/min and speed of V_p mm/min, on thickness defect layer is presented. Defect layer is a layer which are heated temperature over T_{pr} . This T_{pr} for hardening steel 40X is equal 490°C as a top temperature of medium-temperature tempering. Thickness defect layer $H_d(V_p)$ are calculated with helping calculation formula $T(\tau, x)$ temperature as a function of x , mm-distance from blank surface and team τ , s. For design maximum productivity cycle infeed grinding with limit heating layer of part over $T_{pr}=490^{\circ}\text{C}$ the formula $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ which calculate removing layer in process of grinding in any phase of cycle as a function of feed per blank revolution S_0 and $K_{\text{ш}}$ - static characteristic system infeed grinding, are used. With helping $T(\tau, x)$, $H_d(S_0)$ $\Pi(S_0, K_{\text{ш}})$ the conditions of minimum number blank revolutions for removing necessary allowance and heating surface of part not over $T_{pr}=490^{\circ}\text{C}$ are found.

Keywords: Cylindrical infeed grinding, surface defect layer, reheat temperature, optimality conditions grinding.

Обзор литературы. При исследовании теплофизики шлифования в основном применяются два подхода, когда за источник нагрева заготовки принимают: 1) сплошную поверхность контакта круга с заготовкой; 2) суммарное тепловое воздействие при резании единичными абразивными зёрнами.

Наиболее глубоко разработан первый подход и ему посвящены работы [3,4,5,6]. Второй подход использован в работах [7,8,9,10,11,12]. Теплофизика шлифования нашла отражение также в работах [13,14,15].

Кроме перечисленных работ, в которых используются два основных подхода к описанию теплофизики резания и шлифования, встречаются и оригинальные подходы. Так в работах [16,17]

обрабатываемая поверхность представляется как набор адиабатических стержней, что позволяет авторам решать задачу теплового баланса и повышения качества поверхности по температурному критерию.

В настоящей работе применяется первый подход, который достаточно полно разработан в работе [5], но в отличии от неё, где источник тепла это плоскость, движущаяся по поверхности полупространства, заменен на быстро движущийся. Возможность такой замены доказано, анализом критерия Пекле [8]:

$$P_e = \frac{V_z \cdot L}{a} \leq 8 \div 10, \text{ где } L - \text{размер источника тепла в}$$

направлении его движения; a - температуропроводность материала заготовки.

Применение понятия «быстро движущегося»

источника тепла» позволило получить зависимость $T(\tau, x)$ [18] интегрированием по времени, т.е. с учетом пребывания поверхности заготовки в источнике тепла и вне его. Это в свою очередь позволило учесть различную теплоотдачу от поверхности заготовки при пребывании её в зоне контакта и вне её.

В настоящей работе при оптимизации параметров цикла КНВШ производится расчет припуска снимаемого на каждом обороте заготовки на основе формул полученных в [18], в которых используется так называемая «обобщенная статическая характеристика процесса шлифования» - $K_{ш} = \frac{C_e}{j + C_p}$, где C_p -

жесткость процесса шлифования; j - жесткость системы «заготовка-абразивный круг станок». Жесткость j определяется экспериментально, как это показано в [18], а C_p определяется на основе экспериментальной формулы расчёта P_z от условий шлифования с переходом к P_y - радиальной составляющей силы шлифования и линеаризацией её относительно глубины шлифования h т.е. получения зависимости $P_y = C_p \cdot h$.

3. Методы решения задачи определения оптимальных параметров цикла КНВШ.

Методика определения оптимальных параметров цикла КВНШ основана на имитационном моделировании динамики КВНШ представленного трехмассовой моделью круглошлифовального станка 3М151. На её основе получены формулы расчета припуска снятого при шлифовании на каждой фазе цикла с использованием экспериментальной зависимости силы шлифования P_z от условий шлифования (режимов, характеристики круга, условий правки) и обобщенной статической характеристики КВНШ.

Величина припуска необходимого для снятия, т.е. величина дефектного поверхностного слоя заготовки, определяется на основе аналитически полученной зависимости $T(\tau, x)$ для быстро движущегося источника тепла с программированием пределов интегрирования по времени, что позволяет учесть различную интенсивность теплоотдачи от заготовки в зоне контакта её с кругом и вне её.

4. Результаты исследования и их обсуждение

Исследование операции КВНШ выполнено применительно для шлифования цилиндрической поверхности $\varnothing 100f7 \begin{pmatrix} -0,036 \\ -0,071 \end{pmatrix}$ длиной вдоль оси $B=40$ мм.

В работе сравниваются по производительности оптимальные двухступенчатые циклы КВНШ с окружными скоростями вращения заготовки $S=35$ м/мин и $S=100$ м/мин.

Оптимальным циклом КВНШ принимается цикл обеспечивающий нагрев детали не выше $T_{пред}=490^\circ$ и минимальное при этом число оборотов заготовки.

Нагрев шлифуемой заготовки $T(\tau, x)$, как функция x - расстояния от поверхности в радиальном направлении и τ - времени отсчитываемого от момента

входа поверхности заготовки в зону контакта с кругом [18] рассчитывается по формуле:

$$T(\tau, x) = \frac{q \cdot \sqrt{a}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{\tau} \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}\right)}{\sqrt{\tau-t}} \left[1 - \frac{\text{erf}\left[\frac{x}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}} + \frac{\text{if}\left[\tau \leq \tau_1, \alpha_1, \alpha\left(1 - \frac{\tau}{\tau_2}\right)\right]}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau-t)}\right]}{\sqrt{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}} + \frac{\text{if}\left[\tau \leq \tau_1, \alpha_1, \alpha\left(1 - \frac{\tau}{\tau_2}\right)\right]}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot (\tau-t)}\right]^2 dt \quad (1)$$

где $q = \frac{P_z \cdot V_k}{L \cdot B} \cdot \beta$ - плотность теплового потока,

$\frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$; P_z - окружная сила шлифования, Н; V_k -

окружная скорость шлифовального круга, м/с; a - коэффициент температуропроводности, $\frac{\text{мм}^2}{\text{сек}}$; λ - коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Дж}}{\text{мм} \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$; τ -

время наблюдения за температурой; $(\tau-t)$ - время распространения тепла от момента t возникновения теплового импульса до τ - времени наблюдения; τ_1 - время действия источника тепла, сек; τ_2 - время оборота заготовки, сек; α_1 - коэффициент теплоотдачи в источнике тепла, $\frac{\text{Дж}}{\text{мм}^2 \cdot \text{сек} \cdot \text{град}}$; α - коэффициент теплоотдачи вне источника тепла; if - условный оператор «если», при помощи которого программируется решение задачи определения $T(\tau, x)$ в источнике тепла и вне его.

Окружная сила шлифования P_z вычисляется по экспериментальной зависимости [18]:

$$P_z = 2,254 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot V_p^{0,945} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S^{0,073} \cdot S_{pr}^{0,073} \cdot t_{pr}^{0,026}}, \text{ Н} \quad (2)$$

где σ_t - предел прочности материала заготовки при температуре 600°C ; Н - показания прибора «Звук - 202» (частота собственных колебаний кГц, ГОСТ 25961-83); Z - зернистость; V_p - скорость врезной подачи, мм/мин; S - окружная скорость вращения заготовки, м/мин; S_{pr} - продольная скорость правки алмазным карандашом, мм/мин; t_{pr} - глубина правки, мм.

Длина дуги контакта L вычисляется по формуле [13, 10]:

$$L = \sqrt{D_e \cdot h}, \quad (3)$$

где $D_e = \frac{D_k}{1 + \frac{D_k}{d_z}}$ - эффективный диаметр круга; D

- диаметр круга; d_z - диаметр заготовки; h - глубина шлифования (поперечная подача на оборот заготовки), мм.

Доля тепла выделяемого при шлифовании поступающая в заготовку учитывается коэффициентом ввода β [5, 18]:

$$\beta = \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{4 \cdot V_z \cdot 10^3}{60 \cdot L \cdot a \cdot \pi}}}, \quad (4)$$

Время действия источника тепла τ_1 , и время оборота заготовки τ_2 вычисляются по:

$$\tau_1 = \frac{L \cdot 60}{V_z \cdot 100}; \tau_2 = \frac{\pi \cdot d_z \cdot 60}{V_z \cdot 100}.$$

Для вычисления силы P_z по (2) принимаем, что шлифование выполняется кругом 24A16НСМ1К. Поэтому для твердости круга СМ1 показания прибора «Звук-202» $H=1,38$.

Шлифуется закаленная сталь 40Х и поэтому $\sigma_B=22$ кгс/мм² зернистость выбранного круга $z=16$. Режимы правки: $S_{pr}=150$ мм/мин, $t_{pr}=0,01$ мм. Значения коэффициентов $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0,017$; $\frac{Дж}{мм^2 \cdot сек \cdot град}$, что соответствует охлаждению заготовки поливом жидкостью на водной основе [8].

Теплоотдача в зоне контакта, учитываемая коэффициентом α крайне мала в связи с тем, что охлаждающая жидкость практически не поступает в зону контакта и поэтому α_1 , можно принять равным нулю.

Значения a и λ для стали 40Х следующие [8]: $a=6,7$ мм²/с; $\lambda=0,0339$ Дж/мм·сек·град. Таким образом имеются все данные для расчета $T(\tau, x)$, а значит для расчета величины дефектного слоя заготовки, т.е. слоя нагретого выше 490°. Изменяя V_p в (1) и перебирая x можно найти такое его значение x_i , для которого максимальное значение $T(\tau, x_i)$ будет равно 490°.

На рис. 1 приведен пример выбора V_p , обозначенной как $V_{поп}$, обеспечивающей

$\sigma_b := 22$ $H_{1,38} := 1.38$ $V_{non} := 1.1$ $Z := 16$ $V_z := 100$ $S_{pr} := 150$ $t_{pr} := 0.01$
 $D_k := 750$ $d_z := 100$ $V_k := 50$ $a := 6.7$ $\lambda := 0.0339$ $B := 40$
 $P_z := \frac{2.254 \cdot \sigma_b^{0.342} \cdot H^{0.258} \cdot V_{non}^{0.945} \cdot B}{Z^{0.051} \cdot V_z^{0.073} \cdot S_{pr}^{0.073} \cdot t_{pr}^{0.026}}$ $P_z = 149.645$ $De := \frac{D_k}{1 + \frac{D_k}{d_z}}$ $De = 88.235$
 $h := \frac{\pi \cdot d_z \cdot V_{non}}{V_z \cdot 1000}$ $h = 3.456 \times 10^{-3}$ $L_{\text{eff}} := \sqrt{De \cdot h}$ $L = 0.552$
 $c_{\text{eff}} := h \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot V_z \cdot 1000}{60 \cdot L \cdot a \cdot \pi}}$ $\beta := \frac{1}{1 + c}$ $q := \frac{P_z \cdot V_k}{L \cdot B} \cdot \beta$ $q = 312.857$ $N_{\text{eff}} := \frac{P_z \cdot V_z}{60}$ $N_{\text{eff}} = 249.40$
 $\tau_1 := \frac{L \cdot 60}{V_z \cdot 1000}$ $\tau_1 = 3.313 \times 10^{-4}$ $\tau_2 := \frac{\pi \cdot d_z \cdot 60}{V_z \cdot 1000}$ $\tau_2 = 0.188$ $\Delta \tau := 0.000025$
 $N_{\text{eff}} := 500$ $i := 0..N$ $\tau_i := 0 + i \cdot \Delta \tau$ $j := 0..200$ $x_j := 0 + 0.001 \cdot j$ $\alpha_1 := 0$ $\alpha_2 := 0.017$

$$T(\tau, x) = \frac{q \cdot \sqrt{a}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi}} \int_0^{\text{if}(\tau < \tau_1, \tau, \tau_1)} \frac{e^{-\frac{x^2}{4 \cdot a \cdot (\tau-t)}}}{\sqrt{\tau-t}} \left[1 - \frac{\text{if}(\tau \leq \tau_1, \alpha_1, \alpha_2 \left(1 - \frac{\tau}{\tau_2}\right))}{\lambda} \sqrt{a \cdot (\tau-t)} \right] dt$$

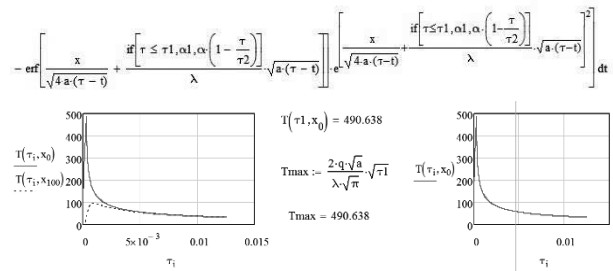


Рис. 1 – Определение скорости чистой поперечной подачи из условия $T_{max}=490^\circ\text{C}$

максимальную температуру на поверхности, т.е. для $x=0$, равную предельно допустимой $T_{np}=490^\circ$.

Так для $S=100$ мм/мин вектору дискретных значений $V_p = (1.1, 1.5, 2.3, 4.4, 5)^T$ получен соответственно вектор глубины дефектного слоя H_d , т.е. слоя нагретого выше 490°, $H_p=(0, 0.001, 0.021, 0.039, 0.053, 0.06)^T$

Зависимость $H_d(V_p)$ аппроксимируем полиномом 2^{ой} степени, как это делается при планировании экспериментов.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 1.1 & 1.1^2 \\ 1 & 1.5 & 1.5^2 \\ 1 & 2 & 2^2 \\ 1 & 3 & 3^2 \\ 1 & 4 & 4^2 \\ 1 & 4.5 & 4.5^2 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.001 \\ 0.021 \\ 0.039 \\ 0.053 \\ 0.06 \end{pmatrix} \quad B = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad B = \begin{pmatrix} -0.034 \\ 0.031 \\ -2.143 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$V_{pop} = X \cdot B = \begin{pmatrix} -3.062 \times 10^{-3} \\ 6.911 \times 10^{-3} \\ 0.018 \\ 0.038 \\ 0.054 \\ 0.06 \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \times 10^{-3} \\ 0.021 \\ 0.039 \\ 0.053 \\ 0.06 \end{pmatrix}$$

$V_{pop} = 0.6, 0.601, 4.5$ $H_d(V_{pop}) := -0.034 + 0.031 \cdot V_{pop} - 2.143 \cdot 10^{-3} \cdot V_{pop}^2$

$$X1 = \begin{pmatrix} 1 & 0.67 & 0.67^2 \\ 1 & 1 & 1^2 \\ 1 & 2 & 2^2 \\ 1 & 3 & 3^2 \\ 1 & 4 & 4^2 \\ 1 & 4.5 & 4.5^2 \end{pmatrix} \quad Y2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.029 \\ 0.081 \\ 0.123 \\ 0.160 \\ 0.175 \end{pmatrix} \quad B1 = (X1^T X1)^{-1} (X1^T Y2) \quad B1 = \begin{pmatrix} -0.041 \\ 0.071 \\ -5.122 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$Y3 := X1 \cdot B1 = \begin{pmatrix} 3.872 \times 10^{-3} \\ 0.024 \\ 0.08 \\ 0.125 \\ 0.16 \\ 0.174 \end{pmatrix} \quad Y2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.029 \\ 0.081 \\ 0.123 \\ 0.16 \\ 0.175 \end{pmatrix}$$

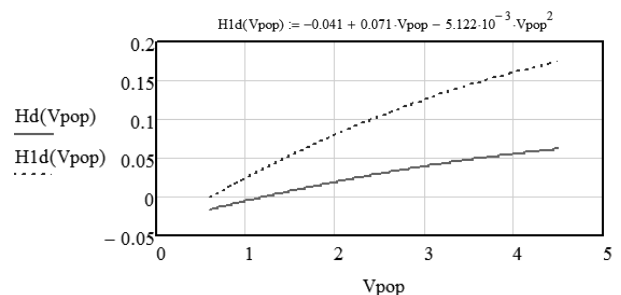


Рис. 2 – Аппроксимация зависимостей $H_d(V_p)$ при $S=35$ м/мин и $S=100$ м/мин и их сравнение

Вектор V_p представляем матрицей X условий эксперимента, а вектор H_p представляем вектором H_d результатов эксперимента, и по формуле

$\mathbf{B}=(\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \cdot (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y})$ вычисляем коэффициенты полинома второй степени. Вектор \mathbf{Y} сравнивается с вектором \mathbf{Y}_1 - расчетный по модели значений H_p . Из этого сравнения видно, что полученное уравнение модели хорошо описывает зависимость $H_d(V_p)$. Процедура получения $H_d(V_p)$ показана на рис. 2. На этом же рис.2 выполнено получением зависимости $H_p(V_p)$ при $S=35$ м/мин. Полученная зависимость это полином $H_{1d}(V_p)$. Здесь же на рис. 2 приведено их графическое сравнение, из которого видно, что глубина дефектного слоя при $S=100$ м/мин. значительно меньше, чем при $S=35$ м/мин при варьировании V_p в диапазоне возможных его значений на станке 3М151.

Для расчета числа оборотов на фазах чернового и чистового шлифования необходимо пользоваться следующими формулами расчета снимаемого припуска на радиус заготовки [18]:

- для шлифования на черновой подаче S_{10}

$$\Pi = \sum_{i=1}^{n_2} [S_{10}(1 - K_{iu}^i)]; \quad (5)$$

- для шлифования на чистовой подаче S_0

$$\Pi_1 = \sum_{i=1}^{n_1} [S_0(1 - K_{iu}^i) + S_{10} \cdot K_{iu}^i]. \quad (6)$$

В этих формулах n_1 и n_2 число оборотов заготовки на фазе чистового и чернового шлифования соответственно.

Поскольку в формулах (5) и (6) припуск является функцией S_0 , S_{10} , то необходимо иметь формулы расчета глубины дефектного слоя H_d в функции поперечной подачи на оборот.

Для этого в векторах V_{pop} сделан переход к $S_0 = V_p \cdot \frac{\pi \cdot d_z}{V \cdot 100}$, а затем аналогично, как и при

получении зависимостей $H_d(V_p)$ получены зависимости $H_{d1}(S_0)$ для $S=100$ м/мин и $H_{d2}(S_0)$ для $S=35$ м/мин. Все необходимые результаты расчетов приведены на рис.3.

Из рис.3 видно, что $H_{d1}(S_0)$ и $H_{d2}(S_0)$ мало отличаются друг от друга однако, учитывая что время оборота заготовки при $S=100$ м/мин почти в три раза меньше времени оборота ее при $S=35$ м/мин, следует ожидать производительность двухступенчатого цикла врезного шлифования при оптимальных сочетаниях S_0 и S_{01} будет при $S=100$ м/мин значительно выше чем при $S=35$ м/мин.

В формулах расчета снимаемого припуска Π (5) и (6) присутствует важнейший параметр системы врезного шлифования

$$K_{iu} = \frac{C_p}{j + C_p}, \quad (7)$$

где C_p - жесткость процесса шлифования Н/м; j - жесткость системы «заготовка-шлифовальный круг-станок», Н/м.

C_p является коэффициентом пропорциональности в зависимости $P_y = C_p \cdot h$, где P_y - радиальная составляющая силы шлифования, H ; h - глубина шлифования или поперечная подача на оборот заготовки S_0 .

$$V_{pop} := (1.1 \ 1.5 \ 2 \ 3 \ 4 \ 4.5)^T \quad Hd := (0 \ 0.001 \ 0.021 \ 0.039 \ 0.053 \ 0.06)^T \quad dz := 100$$

$$Vz := 100 \quad So := 4.5 \cdot \frac{\pi \cdot dz}{Vz \cdot 1000} = 0.014$$

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 0.003456 & 0.003456^2 \\ 1 & 0.004712 & 0.004712^2 \\ 1 & 0.006283 & 0.006283^2 \\ 1 & 0.009425 & 0.009425^2 \\ 1 & 0.013 & 0.013^2 \\ 1 & 0.014 & 0.014^2 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.001 \\ 0.021 \\ 0.039 \\ 0.053 \\ 0.06 \end{pmatrix} \quad B := (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y) \quad B = \begin{pmatrix} -0.033 \\ 9.732 \\ -243.143 \end{pmatrix}$$

$$Y_1 := X \cdot B$$

$$Y_1^T = (-2.511 \times 10^{-3} \ 7.218 \times 10^{-3} \ 0.018 \ 0.037 \ 0.052 \ 0.062)$$

а) Коэффициенты B в зависимости Hd(So) при Vz=100

$$V_{pop} := (0.67 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 4.5)^T \quad Hd := (0 \ 0.029 \ 0.081 \ 0.123 \ 0.16 \ 0.175)^T \quad Vz := 35$$

$$So := 4.5 \cdot \frac{\pi \cdot dz}{Vz \cdot 1000} = 0.04$$

$$X2 := \begin{pmatrix} 1 & 0.006014 & 0.006014^2 \\ 1 & 0.008976 & 0.008976^2 \\ 1 & 0.018 & 0.018^2 \\ 1 & 0.027 & 0.027^2 \\ 1 & 0.036 & 0.036^2 \\ 1 & 0.04 & 0.04^2 \end{pmatrix} \quad Y3 := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.029 \\ 0.081 \\ 0.123 \\ 0.160 \\ 0.175 \end{pmatrix} \quad B2 := (X2^T \cdot X2)^{-1} \cdot (X2^T \cdot Y3)$$

$$B2 = \begin{pmatrix} -0.041 \\ 7.784 \\ -60.725 \end{pmatrix}$$

$$Y4 := X2 \cdot B2 \quad Y4^T = (4.005 \times 10^{-3} \ 0.024 \ 0.08 \ 0.125 \ 0.161 \ 0.174)$$

б) Коэффициенты в зависимости Hd(So) при Vz=35

$$So := 0.003, 0.0031, 0.02 \quad Hd1(So) := -0.033 + 9.732 \cdot So - 243.143 \cdot So^2$$

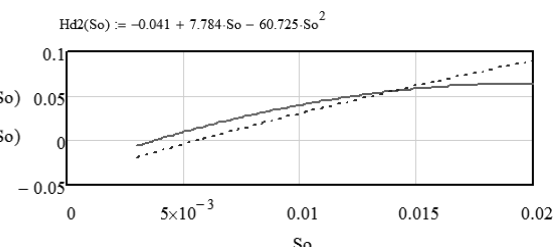


Рис. 3 – Аппроксимация зависимостей глубины дефектного слоя от подачи на оборот заготовки S_0 при $S=35$ м/мин и $S=100$ м/мин

$$j := 3.17 \cdot 10^7 \quad G_c := 10 \cdot 10^7 \quad k := \frac{c}{j + c} \quad k = 0.759 \quad Vz := 100 \quad dz := 100$$

$$\Pi := 0.2 \quad So := 0.0035 \quad S_{10} := 0.012 \quad Hd := -0.033 + 9.732 \cdot S_{10} - 243.143 \cdot S_{10}^2$$

$$V_{pop} := \frac{S_{10} \cdot Vz \cdot 1000}{\pi \cdot dz} \quad V_{pop} = 3.82 \quad Gt := 22 \quad H_{max} := 1.38 \quad Z := 16 \quad Spr := 150$$

$$B := 40 \quad tpr := 0.01$$

$$Pz := 2.254 \cdot \frac{Gt^{0.342} \cdot H^{0.258} \cdot V_{pop}^{0.945}}{Z^{0.051} \cdot Vz^{0.073} \cdot Spr^{0.073} \cdot tpr^{0.026}} \cdot B \quad Pz = 485.251 \quad N_{max} := \frac{Pz \cdot Vz}{60} = 808.751$$

$$Hd = 0.049 \quad n1 := 8 \quad \Pi1 := \sum_{i=1}^{n1} [So \cdot (1 - k^i) + S_{10} \cdot k^i] \quad \Pi1 = 0.052$$

$$\Pi2 := \Pi - \Pi1 = 0.148 \quad n2 := 16 \quad \Pi3 := \sum_{i=1}^{n2} [S_{10} \cdot (1 - k^i)] \quad \Pi3 = 0.155$$

$$n := n1 + n2 = 24$$

$$To := \frac{\pi \cdot dz \cdot 60}{Vz \cdot 1000} \cdot n \quad To = 4.524$$

Рис. 4 – Выбор оптимального значения черновой подачи S_{10} для цикла КВНШ при $S=V_z=100$ м/мин

Принимая, что $P_y \cong 2.5P_z$ и перейдя в (2) от V_p к

$$h \text{ по формуле } V_p = \frac{h \cdot 1000 \cdot S}{\pi \cdot d} \text{ получим}$$

$$P_y = 1,306 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sigma_t^{0.342} \cdot H^{0.258} \cdot S^{0.872} \cdot B}{Z^{0.051} \cdot S_{Pr}^{0.073} \cdot t_{Pr}^{0.026} \cdot d^{0.945}} \cdot h^{0.945} \quad (8)$$

Зависимость (8) следует линеаризовать относительно h , т.е. заменить $h^{0,945}$ на $C \cdot h$, что выполнено методом наименьших квадратов в диапазоне варьирования $h = (0,001 - 0,02)$ мм и получено $C = 1,262$.

Кроме этого надо учесть, что в модели динамической системы КВНШ на станке 3М151 [18] глубина шлифования имеет размерность метры, то выражение (8) преобразуется в:

$$P_y = 1,306 \cdot 10^3 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot S^{0,872} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S_{Pr}^{0,073} \cdot t_{Pr}^{0,026} \cdot d_z^{0,945}} \cdot 1,262 \cdot 1000 \cdot h$$

Следовательно

$$C_p = 1,642 \cdot 10^6 \frac{\sigma_t^{0,342} \cdot H^{0,258} \cdot S^{0,872} \cdot B}{Z^{0,051} \cdot S_{Pr}^{0,073} \cdot t_{Pr}^{0,026} \cdot d_z^{0,945}} \quad (9)$$

и для $S = 100$ м/мин и принятых выше прочих параметрах выражения (9) получим $C_p = 9,999 \cdot 10^7$

Н/м, а при $S = 35$ м/мин $C_p = 4 \cdot 10^7$ Н/м.

Жесткость j необходимая для расчета $K_{ш}$ получена экспериментально [18] и равна $3,17 \cdot 10^7$ Н/м. Следовательно:

$K_{ш} = 0,759$ для $S = 100$ м/мин и $K_{ш} = 0,557$ для $S = 35$ м/мин.

Расчет максимального числа оборотов заготовки необходимого для снятия припуска П на операцию КВНШ с удалением дефектного слоя образуемого на шлифовании с черновой подачей S_{10} , производится следующим образом:

1 – выбирается S_{10} ;

2 – вычисляется глубина дефектного слоя H_d ;

3 – из (6) находят подбором n_1 таким, чтобы припуск П₁ снимаемый на чистовой подаче S_0 был равен H_d ;

4 – припуск на черновой подаче предшествующей чистовой будет равен П–П₁ и пользуясь (5) находим n_2 необходимое для его удаления;

5 – суммарное минимальное число оборотов $n = n_1 + n_2$ и определяет оптимум операции шлифования.

На рис. 4 показан расчет n_1 и n_2 при S обозначенной как $V_z = 100$ м/мин. Припуск П согласно его расчетно-аналитического определения [19] равен 0,2 мм на радиус. Чистовая подача на оборот S_0 определена и равна 0,0035 мм. Формула расчета получена (см. рис.3)

$$H_d = -0,033 + 9,732 \cdot S_{10} - 43,143 \cdot S_{10}^2.$$

На рис. 4 расчет приведен для $S_{10} = 0,012$ мм, что соответствует третьему шагу выбора S_{10} согласно табл. 1.

Таблица 1 – Выбор оптимального значения S_{10} при $V_z = 100$ м/мин.

№ шага выбора	S_{10} , мм	V_p , мм/мин	H_d , мм	n_1	n_2	n	P_z , Н	N , Ватт
1	0,007	2,23	0,023	5	28	33	291	485
2	0,01	3,183	0,041	7	19	26	408	680
3	0,012	3,82	0,05	8	16	24	485	808
4	0,013	4,138	0,055	8	14	22	523	872

Оптимальное значение S_{10} соответствует третьему шагу его назначения. Четвертый шаг при $S_{10} = 0,013$ обеспечивает более высокую производительность, но мощность N затрачиваемая приводом вращения заготовки равная 872 Вт больше номинальной, что недопустимо.

Таким образом, задав $v_p = 3,82$ мм/мин, $S = 100$ м/мин при реализации двухступенчатого цикла врезного шлифования с ограничением на нагрев детали не выше 490° С получим основное время шлифования $T_0 = 4,572$ с.

Аналогичный поиск оптимальных условий врезного шлифования выполнен для $S = V_z = 35$ м/мин и результаты его сведены в табл. 2.

Таблица 2 – Выбор оптимального значения S_{10} при $V_z = 35$ м/мин.

№ шага выбора	S_{10} , мм	V_p , мм/мин	H_d , мм	n_1	n_2	n	P_z , Н	N , Ватт
1	0,01	1,114	0,031	5	18	24	163,5	95
2	0,015	1,671	0,062	9	11	20	239,8	139,9
3	0,02	2,228	0,09	12	7	19	314,8	183,6
4	0,025	2,785	0,116	16	5	21	388,7	226

Из табл.2 видно, что оптимальные условия шлифования с $S = V_z = 35$ м/мин соответствуют $S_{10} = 0,02$ мм/об или $V_p = 2,228$ мм/мин. При этом основное время операции $T_0 = 10,233$ с. Таким образом шлифование с высокой скоростью вращения заготовки $S = 100$ м/мин по сравнению со шлифованием с рекомендуемой $S = 35$ м/мин [20] обеспечивает производительность в 2 раза более высокую при ограничении на нагрев детали не более 490° С.

Высокая скорость вращения заготовки при КВНШ не только обеспечивает повышение производительности обработки при ограничении её предельно допустимой температурной T_{max} нагрева шлифованной поверхности, но и меньшее значение подачи на оборот при этой температуре (см. значения в

первой строке вторых столбцов матриц X и X_2 на рис.3).

Так при $V_z=100$ м/мин $T_{\max} = 490^\circ\text{C}$ обеспечивается при $S_0=0,0035$ мм, а при $V_z=35$ м/мин при $S_0=0,006$ мм.

Известно, что именно уменьшение подачи на оборот (глубины шлифования), которое достигается например на фазе выхаживания при КНВШ, обеспечивает максимально малую шероховатость поверхности.

Поэтому КНВШ с высокой скоростью вращения заготовки предпочтительно при сравнении с шлифованием на меньшей скорости вращения заготовки и с точки зрения достижения малой шероховатости поверхности. КНВШ с меньшей подачей на оборот формирует также меньшую некруглость цилиндрической поверхности детали.

Таким образом все показатели качества обработки при КНВШ как физико-механические так и геометрические достигаются при большей производительности, если шлифование ведется при высокой скорости вращения заготовки.

В вышеприведенных исследованиях анализировалась обработка цилиндрической поверхности длиной вдоль оси равной 40 мм, в то время как на станке 3М151 применяются шлифовальные круги с высотой равной 80 мм. Такое ограничение длины поверхности порока миллиметрами связано с недостаточной мощностью привода вращения заготовки, номинальное значение которой для станка 3М151 равно 850 Вт. Для шлифования с высокой скоростью вращения заготовки, например равной 100 м/мин, поверхности длиной 80 мм требуется увеличение мощности привода примерно в два раза.

Выводы:

1. Показано, что высокая скорость вращения заготовки обеспечивает меньшую глубину дефектного слоя ее в зависимости от величины поперечной подачи V_p .

2. Применение цикла врезного шлифования с высокой S , например равной 100 м/мин, позволяет снизить основное время операции в 2 раза при бездефектной, по температурному критерию, обработке.

3. Все показатели качества обработки при КНВШ как физико-механические так и геометрические (шероховатость, некруглость) достигаются при более высокой производительности, если шлифование ведется при высокой скорости вращения заготовки.

Список литературы

1. Зубенко А. С., Колосков М. М., Каширинский Н. В. и др. *Марочник сталей* / ред. Зубенко А. С. Москва: Машиностроение, 2003. 784 с.
2. Арзамасов В. Н., Сидорин И. И., Косолапов Г. Ф. и др. *Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений* / ред. Арзамасов В. Н. Москва: Машиностроение, 1986. 384 с.
3. Jaeger J. C. *Moving source of heat and temperature at sliding contact* Jaeger J. C. Proceeding the Royal Society of NSW. 1942. № 76. pp. 203-224.
4. Г. Карслоу. *Теплопроводность твердых тел*. Москва: Наука, 1964.

- 488 с.
5. Сипайлов В. А. *Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности*. Москва: Машиностроение, 1978. 167 с.
6. Якимов А. В. Ткаченко В. О. Зимин С. Г. и др. *Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании: учеб. пособие*. Одесса: ОГПУ, 1998. 274 с.
7. Корчак С. Н. *Прогрессивная технология и автоматизация круглого шлифования*. Москва: Машиностроение, 1968. 108 с.
8. Резников А. Н. *Теплофизика резания*. Москва: Машиностроение, 1969. 287 с.
9. Редько С. Г. *Процессы теплообразования при шлифовании металлов*. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1962. 231 с.
10. Островский В. И. *Теоретические основы процесса шлифования*. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1981. 140 с.
11. Бишутин С. Г. *Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев детали при шлифовании*. Москва: Машиностроение, 2004. 144 с.
12. Бишутин С. Г., Тюльпанов Н. В. *Прогнозирование тепловыделения в контактной зоне заготовки и шлифовального круга с учетом его изнашивания*. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2007. №2 (14). С. 4-9.
13. Маслов Е. Н. *Теория шлифования материалов*. Москва: Машиностроение, 1974. 319 с.
14. Лурье Г. Б. *Шлифование металлов*. Москва: Машиностроение, 1969. 172 с.
15. Филимонов Л. Н. *Высокоскоростное шлифование*. Ленинград: Машиностроение, 1979. 246 с.
16. Новиков Ф. В. *Математическая модель определения температуры шлифования на основе учета баланса тепла, уходящего в образующиеся стружки и обрабатываемую деталь*. *Вісник Національного Технічного Університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*. 2007. Вип. 61. С. 22-33.
17. Новиков Ф. В., Рябенков И. А. *Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию*. *Вісник Національного Технічного Університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*. 2007. Вип. 61. С. 164-171.
18. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. *Динамика и теплофизика шлифования*. Харьков: ГП «УкрНТЦ Энергосталь», 2016. 448 с.
19. *Справочник технолога-машиностроителя*. В двух томах / под редакцией Косиловой А. Г., Мещерякова Р. К. Москва: Машиностроение, 1985. Т 1. 655 с.
20. *Справочник технолога-машиностроителя*. В двух томах / под редакцией Косиловой А. Г., Мещерякова Р. К. Москва: Машиностроение, 1985. Т 2. 491 с.

References (transliterated)

1. Zubenko A. S., Koloskov M. M., Kashirinskiy N. V. *Marochnik staley* [Steel quality] Moscow, Machine building Publ., 2003. 784 p.
2. Arzamasov V. N., Sidorin I. I., Kosolapov G. F. *Materialovedenie: Uchebnik dlya vysshyh tehnikeskyh uchebnyh zavedeniy* [Materials authority: Text-book for Higher Technical Education Schools] Moscow, Machine building Publ., 1986. 384 p.
3. Jaeger J. C. *Moving source of heat and temperature at sliding contact* Jaeger J. C. Proceeding the Royal Society of NSW. 1942. no 76. pp. 203-224.
4. Carslow G. S., Jaeger J. C. *Conduction of heat in solids*. Oxford, Uk. University Press, 1959. (Rus. ed.: Carslow G. S., Jaeger J. C., ed. *Teploprovodnost' tverdyh tel*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 488 p.
5. Sipaylov V. A. *Teplovyie protsessy pri shlifovanii i upravleniye kachestvom poverhnosti* [Heat processes in grinding and control surface quality]. Moscow, Machine building, Publ., 1978. 167p.
6. Yakimov A. V. Tkachenko V. O. Zimin S. G. *Teploviye protsessy pri obychnom i preryvistom shlifovanii: ucheb. posob* [Heat processes in usual and interruption grinding. Text-book]. Odessa, OGPU, Publ., 1998. 274p.
7. Korchak S. N. *Progressivnaya tekhnologiya i avtomatizatsiya kruglogo shlifovaniya* [Progressive technology and automation grinding]. Moscow, Machine building, Publ., 1968. 108p.
8. Reznikov A. N. *Teplofizika rezaniya* [Heat physics of cutting]. Moscow, Machine building, Publ., 1969. 287 p.

9. Red'ko S. G. *Protsessy teploobrazovaniya pri shlifovanii metallov* [Heat processes in grinding of metals]. Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, Publ., 1962. 231 p.
10. Ostrovskiy V. I. *Teoreticheskie osnovy protsessa shlifovaniya* [Basis theory of grinding process]. Leningrad, Izdatel'stvo Leningradskogo universiteta, Publ., 1981. 140 p.
11. Bishutin S. G. *Obespecheniye trebuyemoy sovokupnosti parametrov kachestva poverkhnostnykh sloyov detali pri shlifovanii* [Guarantee demand quality parameters surface layers in grinding]. Moscow, Machine building, Publ., 2004. 144p.
12. Bishutin S. G. Tyul'panov N. V. *Prognozirovaniye teplovydeleniya v kontaktной zone zagotovki i shlifoval'nogo kruga s uchuyotom yego iznashivaniya* [Prognosis heat process in contact zone blank with grinding wheel with calculation it wear]. *Vesnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin Bryansk Technical University]. Publ., 2007. no 2 (14). pp. 4-9.
13. Maslov E. N. *Teoriya shlifovaniya materialov* [Theory grinding materials]. Moscow, Machine building, Publ., 1974. 319 p.
14. Lur'ye G. B. *Shlifovaniye metallov* [Grinding metals]. Moscow, Machine building, Publ., 1969. 172 p.
15. Filimonov L. N. *Vysokoskorostnoye shlifovanie* [High speed grinding]. Leningrad, Machine building, 1979. 246 p.
16. Novikov F. V. *Matematicheskaya model' opredeleniya temperatury shlifovaniya na osnovе uchyoта balansa tepla, ukhodyashchego v obrazuyushchiesya struzhki i obrabatyvayemyyu detal'* [Mathematical model define temperature grinding on the base of balance heat which go into chips and machine part]. *Visnyk Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu sil's'kogo gospodarstva im. P. Vasylenka* [Bulletin National Technical University Agriculture name by P. Vasilenko]. 2007, Issue 61, pp 22-33.
17. Novikov F. V. Ryabekov L. A. *Teoreticheskiy analiz usloviy povysheniya kachestva obrabotki po temperaturnomu kriteriyu* [Theoretical analysis conditions of raise quality machining by temperature criterion]. *Visnyk Natsional'nogo Tekhnichnogo Universitetu sil's'kogo gospodarstva im. P. Vasylenka* [Bulletin National Technical University Agriculture name by P. Vasilenko]. 2007, Issue 61, pp 164-171.
18. Sizy Y. A., Stalinskiy D. V. *Dinamika i teplofizika shlifovaniya* [Dynamic and heat physics grinding]. Kharkov, GP UKR NTTS Energostal, 2016. 448 p.
19. Spravochnik tekhnologa-mashinostroityela. V dvuh tomah [Reference book technologist machine building]. Under edited A. G. Kosilova, R.K.Mescheryakova, eds. T.1. Moscow, Machine building, 1985, 655p.
20. Spravochnik tekhnologa-mashinostroityela. V dvuh tomah [Reference book technologist machine building]. Under edited A. G. Kosilova, R.K.Mescheryakova, eds. T.2. Moscow, Machine building, 1985, 491p.

Поступила (received) 26.04.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сизий Юрій Анатолійович (Сизый Юрий Анатольевич, Sizy Yuri Anatoliyovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.. (066) 788-24-41, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3930-3087>, e-mail: sizy.iury@yandex.ua.

Ушаков Олександр Миколайович (Ушаков Александр Николаевич, Ushakov Aleksandr Nikolayevich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057) 720-66-25, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7591-3678>; e-mail: parom38@yandex.ru.

Сліпченко Сергій Євгенович (Слипченко Сергей Евгеньевич, Slipchenko Serhii Yevgenovich) – старший викладач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-720-66-25, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0593-3750>, e-mail: serg.slip@gmail.com.

С. С. ДОБРОТВОРСКИЙ, С. Н. КОНОНЕНКО, Е. В. БАСОВА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ С НЕРАВНОМЕРНОЙ МАЛОЙ ЖЁСТКОСТЬЮ

Обработка деталей с неравномерной малой жёсткостью требует учета множества факторов, являющихся препятствием к достижению технологических требований к изделию. Одним из основных факторов возникновения геометрических отклонений в процессе обработки, является упругая деформация маложестких тонкостенных элементов детали. Произведен обзор методов предотвращения появления нежелательных отклонений в процессе обработки маложестких деталей. Предлагается детальный предварительный анализ при помощи средств инженерной автоматизации как один из методов технологического обеспечения требований к геометрии маложестких тонкостенных элементов. Определены составляющие силы резания. Произведен расчет сил возникающих в процессе снятия величины припуска, определена направленная сила, действующая в поперечном сечении тонкостенного элемента. Смоделирован частный случай динамического процесса снятия припуска. Обработаны величины возникающих сил в зоне снятия припуска и включены в модель расчета отклонений критических точек маложесткого образца. Произведено сравнение расчетных и полученных в результате моделирования величин.

Ключевые слова: малая жесткость, неравномерная жесткость, упругая деформация, тонкостенные элементы, модель процесса, нежелательные отклонения.

С. С. ДОБРОТВОРСЬКИЙ, С. М. КОНОНЕНКО, Є. В. БАСОВА

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З НЕРІВНОМІРНОЮ МАЛОЮ ЖОРСТКІСТЮ

Обработка деталей с нерівномірною малою жорсткістю потребує врахування багатьох чинників, які є перешкодою до досягнення технологічних вимог до виробу. Одним з основних чинників виникнення геометричних відхилень в процесі обробки, є пружна деформація тонкостінних елементів деталі з малою жорсткістю. Зроблено огляд методів запобігання появи небажаних відхилень в процесі обробки деталей з малою жорсткістю. Пропонується детальний попередній аналіз за допомогою засобів інженерної автоматизації як один з методів технологічного забезпечення вимог до геометрії тонкостінних елементів з малою жорсткістю. Визначено складові сили різання. Зроблено розрахунок сил які виникають в процесі зняття величини припуску, визначена спрямована сила, що діє в поперечному перерізі тонкостінного елемента. Змодельовано окремий випадок динамічного процесу зняття припуску. Опрацьовані величини виникаючих сил в зоні зняття припуску і включені в модель розрахунку відхилень критичних точок зразка з малою жорсткістю. Проведено порівняння розрахункових і отриманих в результаті моделювання величин.

Ключові слова: мала жорсткість, нерівномірна жорсткість, пружна деформація, тонкостінні елементи, модель процесу, небажані відхилення.

S. DOBROTVORSKIY, S. KONONENKO, Ye. BASOVA

TECHNOLOGICAL SUPPORT OF HIGH-SPEED MILLING OF PARTS WITH UNEVEN LOW STIFFNESS

The processing of parts with uneven low stiffness requires consideration of a number of factors that are an obstacle to achieving technological requirements for the product. One of the main factors of an appearance of geometric deviations in the process of milling is the elastic deformation of the thin-walled elements of the workpiece. The review of methods of prevention of occurrence of undesirable deviations in the process of machining of the uneven parts is made. A detailed preliminary analysis with the help of engineering automation is proposed as one of the methods of technological providing of the requirements for the geometry of thin-walled elements. The components of the cutting force are determined. The forces that appears during the removal of the size of the allowance are calculated, directed force acting in the cross section of the thin-walled element is defined. A special case of the dynamic process of allowance removing is modeled. The values of the forces in the zone of removal of the stock have been processed and included in the model of calculating the deviations of the critical points of the thin-walled uneven sample. A comparison between the calculated and the resulting values is made.

Key words: low stiffness, uneven rigidity, elastic deformation, thin-walled elements, process model, undesirable deviations.

Введение. Детали, типа лопаток турбин, импеллеры, крыльчатки, и другие, имеющие тонкостенные элементы в своей геометрии, являются необходимыми и незаменимыми в авто-, авиа-, аэрокосмической отрасли. Применяются во множестве узлов приводов, являются ответственными деталями механизмов.

Формирование поверхностей тонкостенных деталей с неравномерной малой жесткостью требует учета множества факторов, препятствующих к достижению технологических требований к изделию. Такими факторами являются: возникающие в процессе обработки отклонения от заданной формы, вибрации, тепловые деформации, погрешности, вносимые инструментом, оборудованием [1-2].

В работе основное внимание уделяется анализу возникающих сил в процессе снятия припуска,

моделированию сложных для расчета процессов, как этапу проектирования с целью уменьшения нежелательных отклонений геометрии.

Анализ последних исследований и литературы. В современной промышленности и научно-исследовательской деятельности активно ведутся разработки методов регистрации и анализа параметров процесса резания тонкостенных деталей.

Применяются методы математического анализа дискретного моделирование динамических фрезерных систем. Концевые фрезы с произвольной геометрией делятся на дифференциальные элементы вдоль оси фрезы. Структурная динамика тонкостенных элементов детали также учитывается на каждом дифференциальном элементе в зоне контакта инструмента-детали. Динамическая фрезерная система моделируется матрицей дифференциальных

уравнений, которые используются не только для выявления вибрационной стабильности системы, но и прогнозирования составляющих процесса резания – возникающие силы, размерные ошибки геометрии и др. [3].

В процесс анализа сложно-профильных тонкостенных деталей внедряется экспериментальная деятельность на основе систематического измерения параметров, в процессе резания в виде отклика системы и получения значений сил резания, а так же шероховатости поверхности. Экспериментальная установка включает в себя начальные параметры – подачу, глубину резания, параметры инструмента; непосредственно процесс обработки; датчики силы, профилометр; усилитель сигнала. Производится варьирование полученных значений и извлечение зависимостей влияющих компонентов [4].

Применяется метод на основе переменной коррекции призванной компенсировать влияние нежёсткой конструкции лопаток, случайных, технологических и других факторов на точностные характеристики обработанных лопаток моноколёс. Величины коррекции зависят от области контакта инструмента с деталью. Преобразованный параметрический вид программы обработки дает возможность включать компенсирующие значения к заданному припуску на станке руками оператора. В процессе производить проверку правильности обработки, при наличии на станке измерительных щупов. В случае неправильных значений величин коррекции, вносить изменения в программу и снова запускать обработку [5].

Проводятся исследования направленные на выявление начальных напряжений в структуре материала образцов. Искажение элементов детали сильно связано с состоянием остаточного напряжения, вызванным производственными процессами, такими как термообработка, формование или механическая обработка. Каждый шаг процесса влияет на начальное состояние напряжения на следующем этапе процесса. При удалении материала во время обработки создается новое равновесие напряжений. Напряжения перераспределяются, что приводит к изменению геометрии детали. В особенности для тонкостенных элементов потенциал искажений особо высок. Получение знаний о влиянии начальных нагрузок и выходе искажений в процессе обработки помогает повысить качество и эффективность продукта. В исследовании используются Т-образные тонкостенные образцы, которые испытывают разные величины нагрузок. В результате получена закономерность – увеличение приложенной силы приводит к увеличению профиля остаточных напряжений и увеличению высвобожденного искажения, т.е. количество начального напряжения оказывает значительное влияние на потенциал искажения [6].

Исходя из анализа исследований можно заключить, что, работы включают в себя, как привлечение дополнительной оснастки с целью регистрации изменений [7], так и применение

программных средств, либо комбинацию и того и другого [8].

Материалы исследований. Технологический процесс механической обработки деталей и их сборки, может быть принят в производстве, когда заданные технические требования на изделие, производительность и экономичность при его изготовлении обеспечиваются в условиях высокой надежности проектных решений.

Проектным решением, для определения значений нежелательных отклонений, в данной работе, является - предварительный расчет возникающих сил в процессе снятия припуска; сравнение полученных значений с динамическим расчетом в средствах инженерной автоматизации; выполнение расчета отклонений методом конечных элементов в САЕ-модуле.

Для определения сил действующих в поперечном сечении образца, как наиболее влияющих на возникновение нежелательных отклонений, необходимо выявить составляющие сил резания (рис. 1).

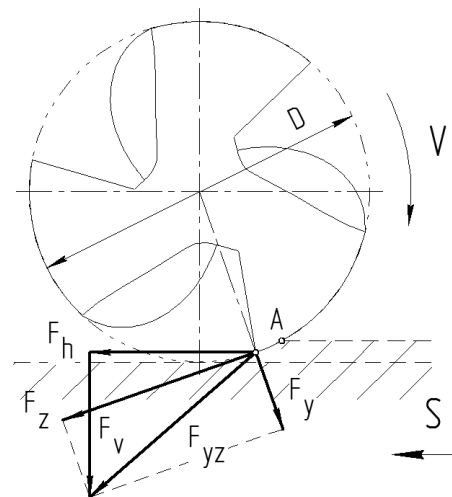


Рис. 1 – Составляющие сил резания при концевом, попутном фрезеровании

Схема действия сил резания при фрезеровании зависит от принятого способа обработки и типа фрезы. Для обработки тонкостенных деталей, типа профили лопаток, используются концевые фрезы. В данной работе рассматривается чистовая обработка попутным фрезерованием образца из алюминиевого сплава. При попутном фрезеровании зуб врежется в материал в точке A (рис. 1), начиная работать при максимальной толщине срезаемого слоя и наибольшей нагрузке, что исключает начальное проскальзывание зуба, так же при попутном фрезеровании получается поверхность с меньшей шероховатостью и более высокой точностью. Однако в случае тонкостенных элементов детали, которые не лишены степени свободы с обратной стороны, эффект отклонения фрезой элемента, ведет к возникновению несоответствия номинальной геометрии изделия.

Суммарная окружная, или касательная, сила F_z и радиальная сила F_y имеют равнодействующую F_{yz} , которую можно разложить на две силы — продольную

F_h и поперечную F_v . В рамках принятой модели исследования процесса обработки, продольная сила F_h направлена вдоль линии снятия припуска. Сила F_v направлена перпендикулярно силе F_h , в направлении предполагаемого отклонения образца пера лопатки.

С точки зрения выбора параметров инструмента, мощности оборудования интерес представляет суммарная окружная, или касательная, сила F_z . Однако, для определения, степени влияния инструмента на тонкостенный маложесткий элемент, наибольшую роль играет поперечная сила F_v .

В результате расчетов, при глубине резания $t=0.25$ mm, ширине резания $B=3$ mm, диаметре участка контакта концевой спиральной трехзаходной фрезы $D=7.5$ mm, и материале детали – алюминиевый сплав, значение окружной силы составило $F_z=263,2$ Н. Исходя из анализа литературы, предлагается использовать относительные значения составляющих сил. Силы F_z и F_v находятся в соотношении, как $F_z:F_v=0.7-0.9$. Исходя из соотношения, расчетное значение поперечной силы составляет $F_v=210,5$ Н.

Полученные величины необходимы для дальнейшего сравнения со значениями, вычисленными в результате моделирования в САЕ среде.

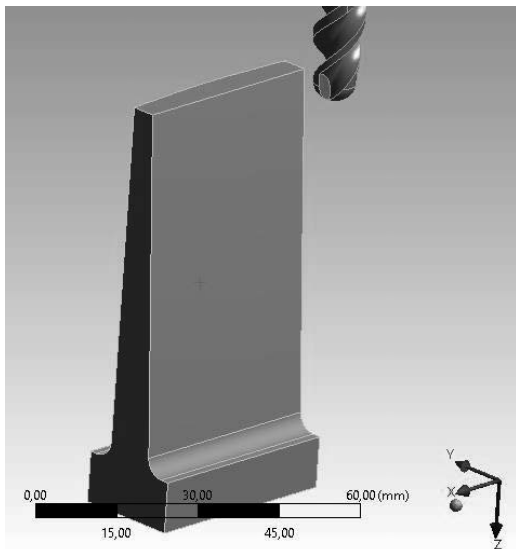


Рис. 2 – Модель тонкостенного образца с неравномерной малой жесткостью и коническая спиральная концевая фреза

Расчет основных характеристик процесса обработки в САЕ среде. Моделирование процесса высокоскоростной обработки фрезерованием произведено с использованием программы инженерного анализа ANSYS.

Спроектированы и импортированы САД модели спиральной конической трехзаходной фрезы со сферическим концом и образец тонкостенного элемента с неравномерным распределением жесткости (рис. 2).

Заданы материал, контактные поверхности образца и фрезы, граничные поверхности, сетка для конечно-элементного расчета.

Предполагаемый припуск на чистовую обработку находится в пределах до 500мкм. Поэтому плотность конечно-элементной сетки образца значительно меньше, чем у детали, и составляет 0,5мм.

Начальное взаимное положение фрезы и образца рассчитывается на этапе САД проектирования. Особое внимание следует уделять положению образца и инструмента, как относительно друг друга, так и относительно системы координат. В САЕ среде оба элемента привязаны к глобальной системе координат. При этом фрезе дополнительно назначена цилиндрическая система координат.

Имея заданные параметры выше, установлены взаимные динамические параметры: осевое вращение фрезы, и осевое перемещение детали на продольную величину обработки.

Одним из основных параметров, интересующих в рамках поставленной задачи, являются силы, воздействующие на тонкостенный элемент в поперечном направлении линии обработки (Normal stress). Значения сняты с обратной стороны образца, вдоль линии контакта фрезы (рис. 3) и занесены в таблицу для сравнения расчетного значения и значений, полученных в результате моделирования (табл. 1).

Анализируя полученные значения, можно установить, что конечно-элементный анализ дает возможность оценить примерные величины сил. Однако стоит учитывать небольшую различность значений, в зависимости от места снятия пробы, несмотря на неизменные параметры резания, вдоль линии контакта с образцом. Это может быть обусловлено, как неточностями в контексте данного вида моделирования, так и необходимостью задания сетки с большей плотностью.

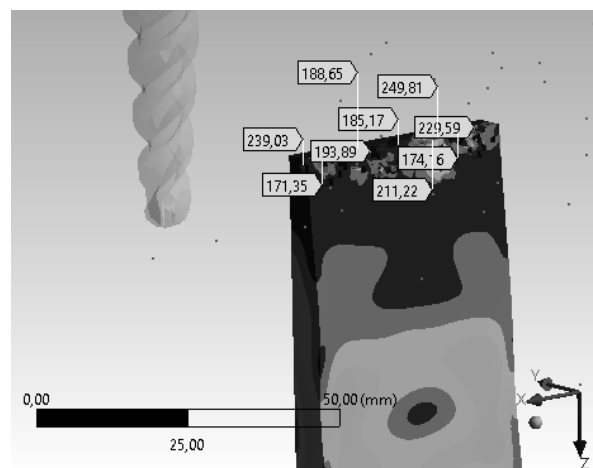


Рис. 3 – Модель динамического процесса и полученные величины возникающих сил

Таблица 1 – Сравнение расчетного значения со значениями в результате моделирования

F_v расч., Н	210,5				
F_v модел., Н	239,03	193,8	185,1	229,5	211,2

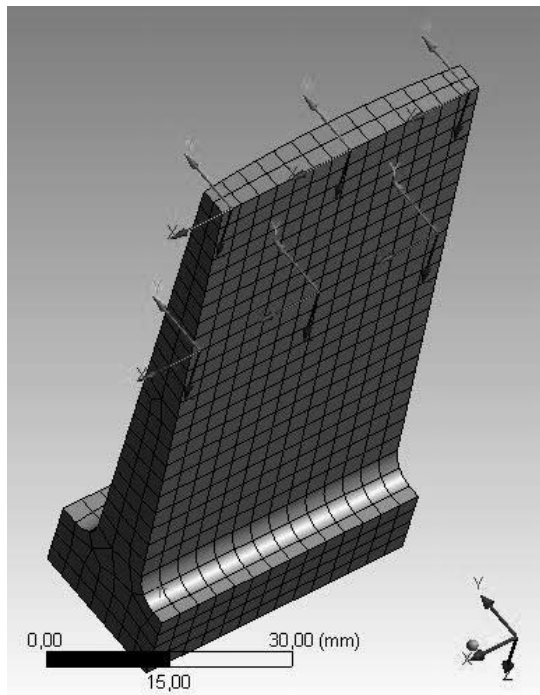


Рис. 4 – Расположение критических точек

Используя полученные значения выше, осуществлено моделирование отжимающего эффекта фрезой тонкостенного образца.

Рассмотрим шесть точек на поверхности (рис. 4), пять из которых, являются критическими – они находятся на краях образца и максимально удалены от места фиксации. Следовательно, в этих точках предположительно будет наблюдаться максимальное отклонение от изначального состояния [9]. Расположение точек обусловлено предполагаемыми линиями снятия припуска.

Нагрузив попеременно критические точки силами, можно оценить величину отклонений в каждой области. Направление действия сил задано вдоль осей Y локальных систем координат. Ось Y перпендикулярна поверхности образца. Значения отклонений, выбранных на разном уровне, отличаются, что обусловлено неравномерным распределением жесткости.

Полученные значения при помощи расчета в САЕ среде, позволяют наглядно оценить степень максимальных значений отклонений образца в разных областях (рис. 5–6). Результаты вычислений занесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнение значений отклонений в зависимости от положения приложенной нагрузки

Критические точки и значения отклонений, мм		
1	2	3
0,095	0,076	0,095
4	5	6
0,035	0,029	0,035

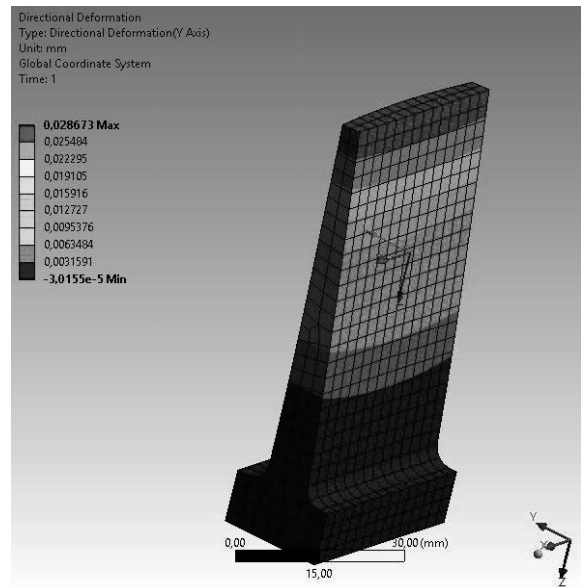


Рис. 5 – Отклонение образца на величину 0,029 мм

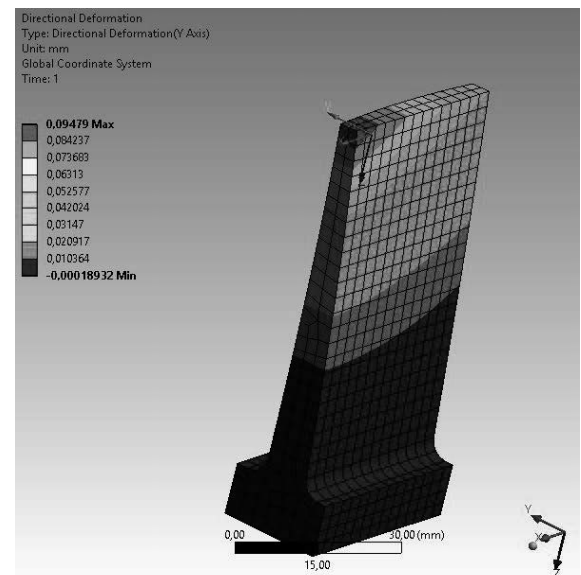


Рис. 6 – Отклонение образца на величину 0,095 мм

Выводы. Произведен инженерный анализ образца с неравномерной малой жесткостью, в результате которого определены составляющие силы резания; выполнен расчет, как основной осевой силы резания, так и относительной поперечной, которая составила 210,5 Н.

Выполнено моделирование динамических сил при концевом попутном фрезеровании, что дало возможность получить значения поперечных сил посредством снятия проб с обратной поверхности образца.

Произведено сравнение расчетной величины силы со значениями полученными в результате моделирования, что позволило установить возможность применения САЕ систем для получения динамических характеристик и величин отклонений в

разных областях образца с неравномерной малой жесткостью.

Список литературы

1. Иванов В. О. Конструкторско-технологичний аналіз сучасних свердильно-фрезерно-розточувальних верстатів / В. О. Иванов, В. С. Карпусь, І. М. Дегтярьов // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Технології в машинобудуванні = Bulletin of National Technical University "KhPI" : coll. of sci. papers. Ser. : Techniques in a machine industry. – Харків : НТУ "ХПІ", 2016. – № 33 (1205). – С. 95–105.
2. Карпусь, В.Е. Конструктивно-технологическое обеспечение эффективной эксплуатации станков с ЧПУ / В.Е. Карпусь, В.А. Иванов, А.В. Котляр // Авиационно-космическая техника и технология. – Харків : НАУ ім. Н.Е. Жуковського "ХАІ", 2008. – № 7 (54). – С. 32–35.
3. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, November 12, 2012.
4. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. Measurement 121, June 2018, pp. 190–204.
5. Мозговой В. Ф., Балушок К. Б., Котов И. И., Панасенко В. А., Бирук М. К. Стратегии обработки лопаток моноколеса на обрабатывающих центрах с ЧПУ с переменной 3D-коррекцией. Авиационно-космическая техника и технология. - 2013. - № 7. С. 22–28
6. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components. Procedia CIRP, 2013, pp. 45–50.
7. Внуков Ю. Н. Стенд для изучения механических колебаний при фрезеровании маложестких деталей при концевом фрезеровании. Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сб. Харьков: НТУ «ХПИ». 2011. Вып. 80. С. 32–37.
8. Zhou-Long Li, Oguzhan Tuysuz, Li-Min Zhu, Yusuf Altintas. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled part. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 128, May 2018, Pages 21–32.
9. Добротворский С.С., Басова Е.В., Кононенко С.Н. Усовершенствование технологии фрезерования деталей с неравномерной жесткостью. Сборник научных трудов «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии» № 72. Харьков: «ХАИ», 2016. С. 105–111.

References (transliterated)

1. Ivanov V. O., Karpus V. E., Dehtiarov I. M. *Konstruktorsko-technologichnyj analiz suchasnykh sverdlylno-frezerno-roztochuvalnykh verstativ* [Design and manufacturing analysis of modern drilling-milling-boring machine tools] // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 33 (1205). – pp. 95–105.
2. Karpus V. E., Ivanov V. A., Kotliar A. V. *Konstruktivno-technologicheskoe obespechenye effektivnoy ekspluatatsiy stankov s ChPU* [Design and technological assurance of effective using of CNC machine tools] Aerospace Technique and Technology. Kharkiv: NAU "KhAI", 2008. No. 7 (54). pp. 32–35.
3. C. Eksioglu, Z. M. Kilic and Y. Altintas. Discrete-Time Prediction of Chatter Stability, Cutting Forces, and Surface Location Errors in Flexible Milling Systems. Journal of Manufacturing Science and Engineering 134(6):061006, Nov 12, 2012.
4. Gururaj Bolar, Argha Das, Shrikrishna N. Joshi. Measurement and analysis of cutting force and product surface quality during end-milling of thin-wall components. Measurement 121, June 2018, pp. 190–204.
5. V. F. Mozgovoy, K. B. Balushok, I. I. Kotov, V. A. Panasenko, M. K. Biruk. Strategii obrabotki lopatok monokoles na obrabatyvayushchikh tsentrakh s ChPU s peremennoy 3D-korrektsey [Strategies for processing blades on CNC machining centers with variable 3D correction]. Aerospace Engineering and Technology. - 2013. - № 7. pp. 22–28
6. V. Schulze, P. Arrazola, F. Zanger, J. Osterried. Simulation of Distortion due to Machining of Thin-walled Components. Procedia CIRP, 2013, pp. 45–50.
7. Vnukov Ju. N. (2011), "Stand for the study of mechanical oscillations in the milling of ladder parts at the end milling", Cutting and tools in technological systems: Int. scientific-techn. Sat [Stend dlja izuchenija mehanicheskikh kolebanij pri frezerovanii malozhestkikh detalej koncevymi frezami], Kharkov: NTU "KhPI". Issue. 80. pp. 32–37.
8. Zhou-Long Li, Oguzhan Tuysuz, Li-Min Zhu, Yusuf Altintas. Surface form error prediction in five-axis flank milling of thin-walled part. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 128, May 2018, Pages 21–32.
9. Dobrotvorskiy S.S., Basova Y.V., Kononenko S.N. *Usovershenstvovanie tehnologii frezerovanija detalej s neravnomernoj zhestkost'ju*. [Improving the technology of milling parts with uneven rigidity]. Sbornik nauchnyh trudov «Otkrytye informacionnye i komp'yuternye integrirovannye tehnologii» [Collection of scientific works "Open information and computer integrated technologies"] № 72. Kharkov: «KhAI», 2016. pp. 105–111.

Поступила (received) 30.01.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Добротворський Сергій Семенович (Добротворський Сергій Семенович, Dobrotvorskiy Sergey S) – доктор технічних наук, професор кафедри технології машиностроєння і металорежущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; тел.: (057) 720-66-25; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1223-1036>, e-mail: sdobro50@gmail.com.

Кононенко Сергій Николаєвич (Кононенко Сергій Миколайович, Serhii Kononenko) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3874-4772>; тел.: (098) 281-31-03; e-mail: sergeykono@gmail.com.

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Євгенія Володимирівна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорежущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com

О.В. ДАНИЛЕЙКО, С.В. ЛАДЕНКО, А.Н. ЖУКОВ

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРЦОВОГО УПЛОТНЕНИЯ ДЛЯ КОМПРЕССОРА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

В работе описаны новые, более надежные и эффективные импульсные газовые торцовые уплотнения (ИГТУ) компрессора углекислого газа по производству карбамида, разработанные фирмой ООО «ТРИЗ», которые значительно превосходят штатные. Основным преимуществом ИГТУ является отсутствие жестких требований к физическим свойствам рабочей среды, а их радиальные габаритные размеры меньше штатных, что позволяет модернизировать компрессорную установку без изменения установочных размеров в корпусе компрессора. Следует отметить, что надежность и долговечность предлагаемых уплотнений обеспечивается новыми технологическими решениями, направленными на повышение износостойкости рабочих поверхностей колец разработанных уплотнений. Авторами предложен новый способ повышения износостойкости рабочих поверхностей стальных колец ИГТУ, заключающийся в формировании на предварительно цементуемых методом электроэрозионного легирования поверхностях, квазимногослойных комбинированных электроэрозионных покрытий.

Ключевые слова: торцовое импульсное уплотнение, надежность, износостойкость, поверхностный слой, испытательный стенд.

О.В. ДАНИЛЕЙКО, С.В. ЛАДЕНКО, О.М. ЖУКОВ

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ТОРЦЕВОГО УЩІЛЬНЕННЯ ДЛЯ КОМПРЕСОРА ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

В роботі описані нові, більш надійні і ефективні імпульсні газові торцеві ущільнення (ІГТУ) компресора вуглекислого газу з виробництва карбаміду, розроблені фірмою ТОВ «ТРИЗ», які значно перевершують штатні. Основною перевагою ІГТУ є відсутність жорстких вимог до фізичних властивостей робочого середовища, а їх радіальні габаритні розміри менше штатних, що дозволяє модернізувати компресорну установку без зміни настановних розмірів в корпусі компресора.

Слід зазначити, що надійність і довговічність пропонувані ущільнень забезпечується новими технологічними рішеннями, спрямованими на підвищення зносостійкості робочих поверхонь кілець розроблених ущільнень. Авторами запропоновано новий спосіб підвищення зносостійкості робочих поверхонь сталевих кілець ІГТУ, що полягає у формуванні на попередньо цементованих методом електроерозійного легування поверхнях, квазібагатошарових комбінованих електроерозійних покриттів.

Ключові слова: торцеве імпульсне ущільнення, надійність, зносостійкість, поверхневий шар, випробувальний стенд.

O. V. DANILEYKO, S. V. LADEKNO, A. N. ZHUKOV

IMPROVING RELIABILITY AND EFFICIENCY OF THE FACE SEAL FOR CARBON DIOXIDE GAS COMPRESSOR

The paper describes new, more reliable and efficient gas impulse face seals (GIFS) of a carbon dioxide gas compressor for the production of urea, developed by the company TRIZ LTD, which far exceed the regular ones. The main advantage of GIFS is the absence of rigid requirements to the physical properties of the working medium, and their radial overall dimensions are smaller than the standard ones, which allows to modernize the compressor unit without changing the installation dimensions in the compressor casing.

It should be noted that the reliability and durability of the proposed seals is provided by new technological solutions aimed at increasing wear resistance of the ring surfaces of the developed seals. The authors proposed a new method of increasing wear resistance of the working surfaces of steel rings of GIFS, consisting in the formation of surfaces that are previously cemented by the electroerosive doping method, quasi-multilayer composite electroerosive coatings.

Keywords: impulse face seal, reliability, wear resistance, surface layer, test bench.

Введение. Решение проблемы, связанной с увеличением сроков службы машин, напрямую зависит от повышения износостойкости и надежности узлов трения. При большом разнообразии условий работы деталей наиболее нагруженным у них является поверхностный слой. Поэтому реальный ресурс работы машины напрямую зависит от несущей способности поверхностей деталей, которая определяется качеством их поверхностного слоя.

В высокооборотных насосах высокого давления широкое применение нашли торцевые импульсные уплотнения (ТИУ), поверхности колец которых контактируют очень непродолжительное время, только в моменты пуска и останова машины.

Наличие в торцевой паре гарантированного зазора величиной 0,003-0,004 мм приводит к тому, что уплотняющие поверхности колец почти не изнашиваются. Несмотря на это их уплотнительные кольца целиком изготавливаются из износостойких материалов, таких, как карбид вольфрама, карбид

кремния, различные виды графитов. Стоимость колец из этих материалов достигает сотен и тысяч долларов США. Поэтому исследования, направленные на обеспечение эффективности работы ТИУ, кольца которых изготовлены из более дешёвых, но не менее качественных материалов своевременны, а формирование их поверхностных слоев с требуемыми свойствами является актуальной задачей.

Анализ основных достижений и публикаций.

Постановка проблемы. Согласно [1, 2] уплотнения роторов должны удовлетворять двум главным условиям: обладать требуемой герметичностью и повышенной надежностью при заданных перепадах давления, частотах вращения, температурах и физических свойствах уплотняемой среды.

Следует отметить то, что для функционирования торцового уплотнения вала необходима минимальная утечка. Вследствие этого зазор между кольцами должен быть очень маленьким, смазывающая пленка очень тонкой, а материалы поверхности уплотнения

должны выдерживать трение друг об друга, причем зачастую при высоких скоростях и нагрузках. Поэтому материалы для контактирующих поверхностей колец должны обладать низким коэффициентом трения, достаточной твердостью, хорошей устойчивостью к коррозии и высокой теплопроводностью. Большинству этих требований отвечают ТИУ.

Изменение защитных и трибологических свойств поверхностей деталей можно достичь за счет образования специального рельефа поверхностей пар трения [3, 4] или формирования покрытий, сформированных, например, методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) [5].

Перспективным путем повышения износостойкости колец ТИУ является формирование на рабочих торцевых поверхностях методом ЭЭЛ квазимногослойных комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП), совмещающих в себе смазывающие и стойкие к износу свойства. Такими покрытиями являются КЭП, включающие в себя твердые износостойкие и мягкие антифрикционные материалы.

Наиболее предпочтительным является КЭП, где первый и последний слой из твердого сплава ВК8 наносятся при энергии разряда $W_u = 0,2$ Дж, а медь – 0,08 Дж, когда микротвердость находится на уровне 8740 МПа, а сплошность составляет 100% [6] (прототип). Однако толщина формируемого при этом покрытия (30-40 мкм) недостаточна для большинства колец ТИУ.

Резервом повышения износостойкости поверхностей трения скольжения могут быть комбинированные технологии электроэрозионного легирования, представляющие собой совмещение метода ЭЭЛ с другими упрочняющими технологиями, например, безабразивной ультразвуковой финишной обработкой (БУФО) [7].

На предприятии ПАО «Азот» (г. Черкассы) в технологическом процессе производства карбамида для сжатия углекислого газа используется мультипликаторный компрессор (поз. К-105), введенный в эксплуатацию с целью увеличения мощности с 1000 до 1600 т в сутки. Компрессор представляет собой многовальную восьмиступенчатую машину, приводимую электродвигателем через мультипликатор. Каждая ступень состоит из входного устройства, улитки с диффузором и рабочего колеса. За рабочим колесом установлено уплотнение для предотвращения протечек углекислого газа в машинный зал. Тип уплотнения – торцовое газодинамическое. Характерной проблемой при эксплуатации компрессора являются случаи отказа штатных уплотнений на 5-ой и 6-ой ступенях сжатия и, как следствие, его внеплановые остановки. Для решения этой проблемы возникла необходимость в разработке более надежного уплотнения.

Таким образом **целью** настоящей работы является разработка новой конструкции ТИУ с рабочими поверхностями контактирующих колец,

обладающими, за счет сформированных на них КЭП, необходимыми трибологическими свойствами.

Методика исследований. С целью улучшения качественных характеристик формируемых поверхностных слоев исследовались квазимногослойные КЭП, сформированные в последовательности ВК8 + Cu + ВК8. Покрытия наносили на образцы из стали 40Х, 12Х18Н10Т и 38Х2МЮА, которые предварительно подвергали цементации методом ЭЭЛ (ЦЭЭЛ)

ЭЭЛ и ЦЭЭЛ производили на установках «ЭИЛ-8А» и «Элитрон -52А» в автоматизированном режиме (рис.1).

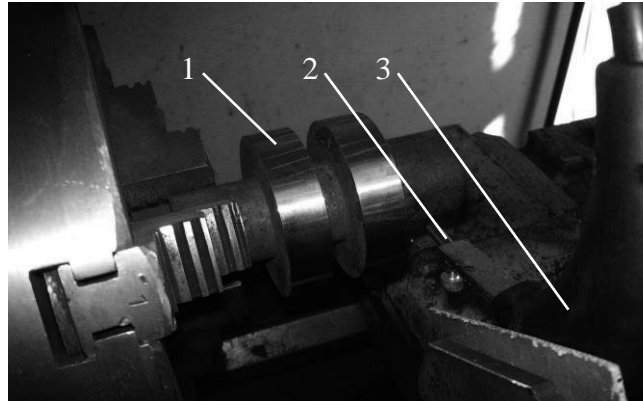


Рис. 1 - Схема ЭЭЛ и ЦЭЭЛ в автоматизированном режиме:
1 – образец; 2 – электрод; 3 – вибратор.

Шероховатость сформированного слоя при ЭЭЛ значительно зависит от величины исходной шероховатости поверхности, причем, чем выше исходная, тем выше конечная. Учитывая то, что после ЦЭЭЛ шероховатость поверхности образцов повышается и составляет $Ra = 0,8 - 0,9$ мкм, а также то, что при воздействии на цементируемый слой в зоне термического влияния последнего может произойти снижение микротвердости и толщины упрочненного слоя, первый слой твердого сплава ВК8 наносится при энергии разряда меньшей чем в прототипе, а второй (медь) и третий (ВК8) на различных режимах (табл. 1).

Для определения фактических характеристик в зоне высоких давлений и частот вращения, подтверждения материального исполнения пар трения, проверки основных теоретических положений расчета специалистами ООО «ТРИЗ» разработаны импульсные газовые торцевые уплотнения (ИГТУ) и стенд для их натурных испытаний (рис. 2). Стенд включает в себя: испытательный блок 1; блок управления 2 (обеспечение регулирования и измерения требуемых параметров, система подготовки буферного газа), система трубной обвязки с запорной арматурой 3. Требуемые условия работы уплотнений обеспечиваются системой подготовки газа. Для ее функционирования используется газ, отобраный из линии нагнетания компрессора (углекислый газ). Вентильми 4 и 5 задаются давления, имитирующие уплотняемое и буферное давление работающего компрессора.

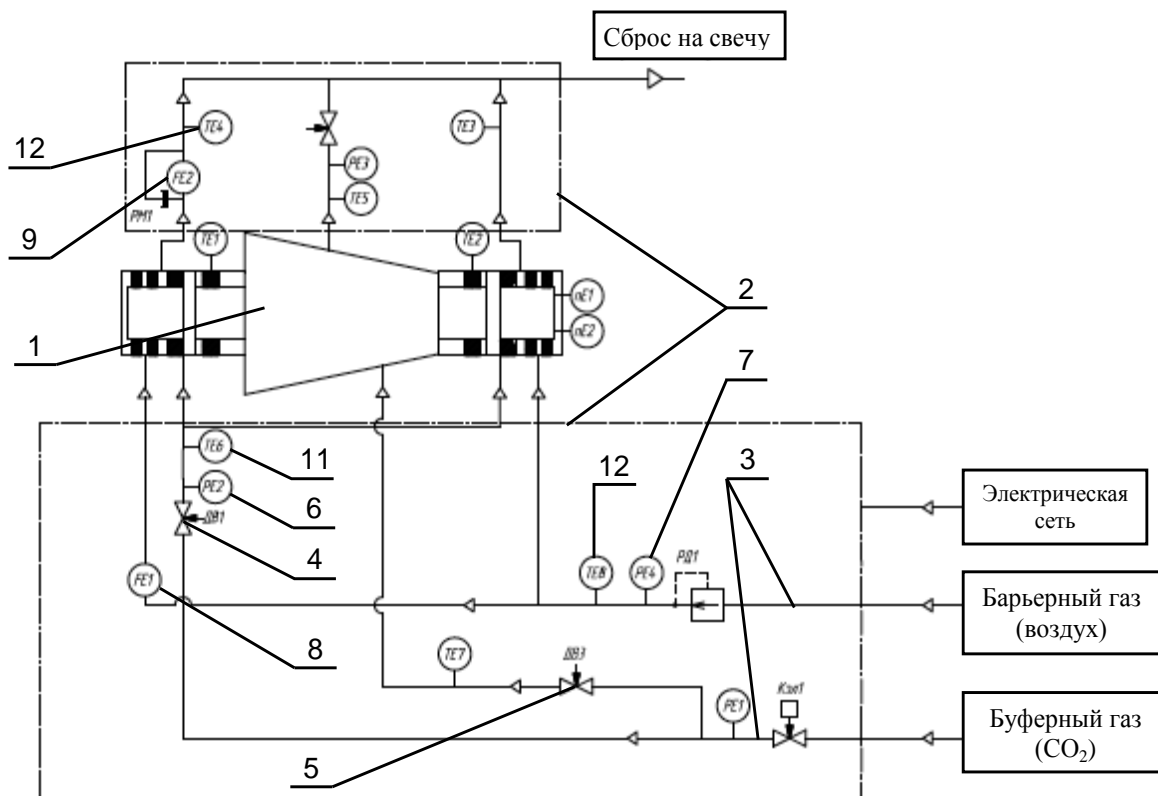


Рис. 2 – Принципиальная схема испытательного стенда ИГТУ

Таблица 1 - Результаты металлографических исследований КЭП

Мат-ал элек-да	Wu, Дж	Толщина, мкм		Микротв-ть, МПа		Ra, мкм
		слоя	перех. зоны	слоя	перех. зоны	
ВК8	0,1	до 15	60-65	6500- 9600	7500... 9800	0,5
Cu	0,04					
ВК8	0,1	до 15	60-65	6420... 7570	7500... 9580	0,5
Cu	0,08					
ВК8	0,1	до 15	до 60	5520... 6970	6480... 9300	0,8
Cu	0,08					
ВК8	0,2	12...20	до 60	6330... 8740	6030... 9500	0,7
Cu	0,08					
ВК8	0,2					

*Для сравнения, одно из КЭП наносили на режимах прототипа.

Очищенный газ после вентиля 4 под давлением, которое контролируется с помощью манометра 6, поступает в торцовые пары испытуемых уплотнений. В концевые уплотнения испытуемых узлов под требуемым давлением, которое контролируется манометром 7, поступает барьерный газ (воздух), расход которого измеряется с помощью ротаметра 8. Суммарный расход утечек барьерного и буферного газа измеряется ротаметром 9 и отводится на свечу. Контроль температуры буферного газа, подаваемого на

турбопривод и в испытуемые уплотнения производится при помощи датчиков температуры 10 и 11 соответственно.

Общий вид испытательного блока представлен на рис. 3 и представляет собой установленный на раме внешний корпус, в котором находятся две испытательные камеры для узлов ИГТУ.

Камеры образованы внутренним корпусом, торцовыми крышками и валом, который установлен в корпусе на радиальном и радиально-упорном подшипниках качения. Привод вала осуществляется от вихревого турбопривода, скорость вращения которого регулируется количеством подаваемого в него буферного газа. При помощи турбопривода осуществляется плавное регулирование частоты вращения вала в необходимом диапазоне (0...35000 об/мин).

Результаты исследований. Разработка новой конструкции ТИУ. Для устранения указанной выше проблемы и обеспечения надежности работы компрессорной установки специалистами ООО «ТРИЗ» были разработаны ИГТУ, на рабочие параметры 5-ой и 6-ой ступеней компрессора поз. К-105, которые по своим эксплуатационным характеристикам превосходят штатные (рис. 4).

Конструкция уплотнения проста, компактна и, благодаря газостатическому принципу создания зазора в торцовой паре, способна сохранять работоспособность в широком диапазоне уплотняемых давлений.

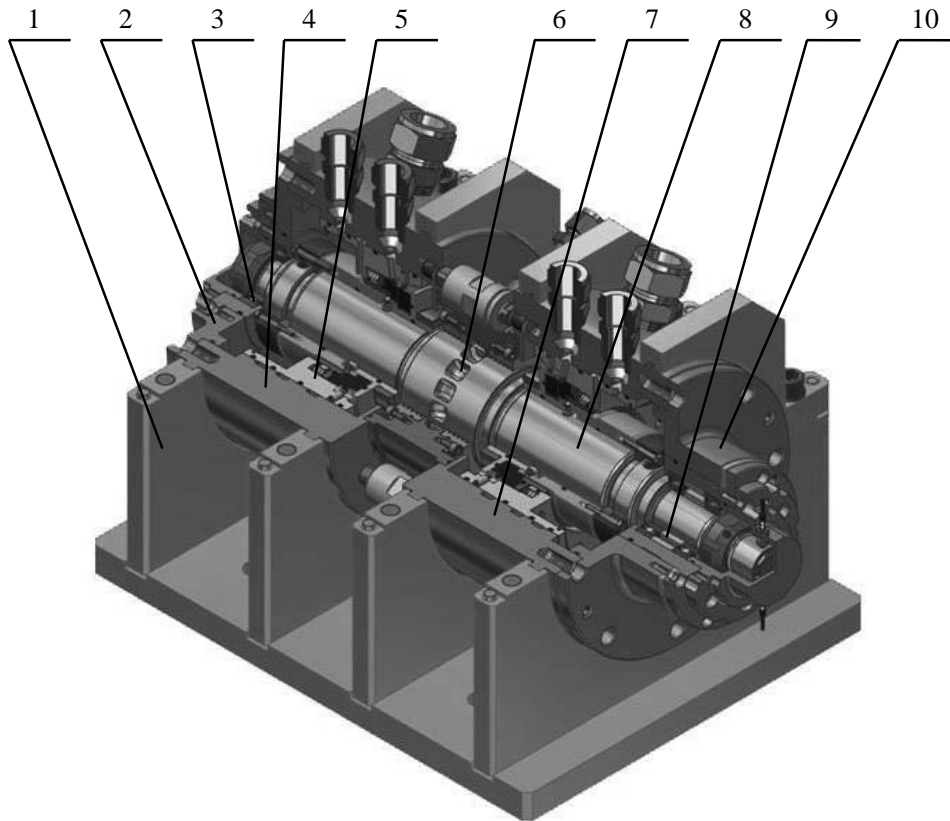


Рис. 3 – Разрез испытательного блока стенда:

1 – корпус внешний, 2, 10 – крышки, 3, 9 – подшипники, 4, 7 – корпус внутренний, 5 – ИГТУ, 6 – турбопривод, 8 – вал

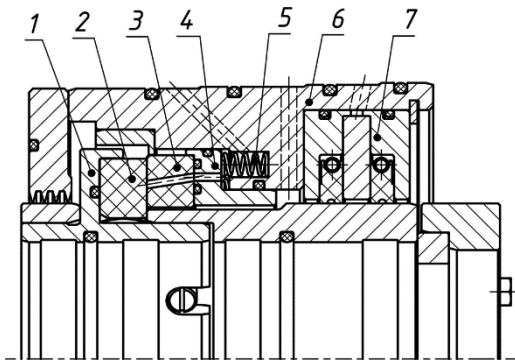


Рис. 4 – Конструкция ИГТУ:

1 – втулка внутренняя, 2 – контркольцо, 3 – торец, 4 – обойма, 5 – пружина, 6 – корпус внутренний, 7 – уплотнение концевое.

Узел ИГТУ состоит из вращающегося кольца 2, закрепленного на валу с помощью втулки 1, подвижного в осевом направлении кольца 3, закрепленного в обойме 4. Кольца 2 и 3 составляют пару трения, первоначальное поджатие которой осуществляется пружинами 5, установленными в отверстиях корпуса внутреннего 6. Концевое уплотнение 7 является дополнительной уплотнительной ступенью и предназначено для герметизации вала в месте выхода его из корпуса. Это самоустанавливающееся уплотнение с сегментными

графитовыми кольцами, стянутыми браслетной пружиной.

Уплотняющее действие происходит между торцовыми поверхностями пары трения (рис. 5).

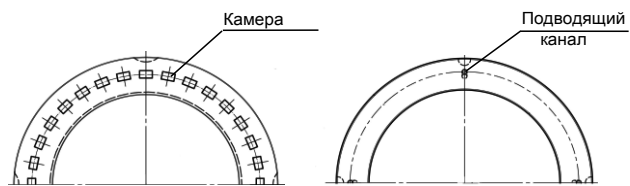


Рис. 5 – Пара трения импульсного уплотнения.

На рабочей торцовой поверхности невращающегося аксиально-подвижного кольца выполнены камеры, а во вращающемся кольце на радиусе расположения камер выполнены подводящие каналы (отверстия).

При вращении ротора подводящие каналы периодически запитывают камеры и подводят в пару трения буферный газ, давление которого превышает давление уплотняемого газа. Вследствие этого изменяется баланс осевых сил, действующих на аксиально-подвижное кольцо, и рабочие поверхности торцовой пары разделяются слоем газа, который

предотвращает износ уплотнительных колец во время работы. Таким образом, между рабочими поверхностями пары трения образуется торцовый зазор, величина которого зависит от давления буферного газа и частоты вращения ротора. При установившемся давлении и частоте вращения величина зазора поддерживается автоматически, так как его увеличение приводит к уменьшению давления в камерах и нарушению баланса сил, действующих на аксиально-подвижное кольцо. В результате этого зазор уменьшается до тех пор, пока давление в камерах не возрастет настолько, чтобы восстановилось равновесие сил, действующих на аксиально-подвижное кольцо.

Когда ротор не вращается, а газ подается, давление сохраняется только в тех камерах, которые совпали с подводными каналами, торцовый зазор закрывается и уплотнение работает как стояночное.

Основным преимуществом ИГТУ является отсутствие жестких требований к физическим свойствам рабочей среды. Исходя из опыта эксплуатации, основной причиной отказа штатных уплотнений является наличие жидкости в рабочей среде, что исключается в предлагаемой конструкции уплотнения. Кроме того, радиальные габаритные размеры ИГТУ меньше штатных, что не только позволяет модернизировать компрессорную установку без изменения установочных размеров в корпусе компрессора, но и обеспечивает меньшие деформации уплотнительных колец и является дополнительным преимуществом при микронных зазорах в уплотнительных парах. ИГТУ более просты в изготовлении, чем газодинамические, у которых профилирование торцовых поверхностей является сложной и трудоемкой операцией. Также немаловажным преимуществом является высокая ремонтпригодность, обусловленная возможностью многократной притирки контактных поверхностей пары трения уплотнения.

Обеспечение надежности и долговечности ИГТУ новыми технологическими решениями

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что наиболее предпочтительным является КЭП, когда первый и последний слои из твердого сплава ВК8 наносили при энергии разряда $W_u = 0,1$, а медь при $W_u = 0,04$ Дж.

Таким образом, с целью повышения износостойкости надежности и долговечности

стальных колец ИГТУ, предложен новый способ [8], включающий, как и прототип, нанесение на них квазимногослойных КЭП состава, формируемого в последовательности ВК8 + Cu + ВК8, в котором слои КЭП наносят при пониженных показателях энергий разрядов, а перед нанесением КЭП рабочие поверхности колец подвергают ЦЭЭЛ. В результате толщина слоя повышенной твердости увеличивается на глубину цементированного слоя.

Применение нового способа позволяет, изменяя величину энергии разряда при осуществлении операции ЦЭЭЛ, формировать слои рабочих поверхностей стальных колец ИГТУ повышенной твердости толщиной от 4-5 до 320-350 мкм.

Учитывая то, что для формирования при ЭЭЛ качественных покрытий исходная шероховатость поверхности не должна превышать $Rz \leq 6,3$ мкм ($Ra \approx 1,2$ мкм), ЦЭЭЛ в качестве предварительной операции, согласно предлагаемому способу, можно производить без дополнительной обработки только лишь при энергии разряда в диапазоне 0,05...1,4 Дж.

Начиная с 1,41 до 2,83 Дж необходимо после ЦЭЭЛ проводить дополнительную безабразивную ультразвуковую финишную обработку (БУФО), а с 2,83 до 4,6 Дж цементированную поверхность обрабатывать методом БУФО и шлифовкой.

При энергии разряда больше 4,6 Дж ЦЭЭЛ проводить нежелательно из-за ухудшения качества поверхности, а именно, высокой шероховатости, недостаточной сплошности обработки и др., а также из-за быстрого разрушения электрода.

Для сравнения в табл. 2 представлены результаты распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя и шероховатости поверхности следующих серий образцов из стали 40X:

- 1 - ЦЭЭЛ;
- 2 - ЭЭЛ ВК8+Cu+ВК8;
- 3 - ЦЭЭЛ+ЭЭЛ ВК8+Cu+ВК8.

Кроме того в табл. 2 представлены результаты распределения микротвердости по глубине поверхностного слоя и шероховатости поверхности при нанесении покрытий по схеме ЦЭЭЛ+ЭЭЛ ВК8+Cu+ВК8 на образцах из сталей 12X18H10T и 38X2MЮА.

Таблица 2 – Распределение микротвердости поверхностного слоя образцов стали 40X, 12X18H10T и 38X2MЮА, упрочненных различными способами

Вид упрочнения	Распределение микротвердости по глубине слоя, МПа при шаге 15 мкм							Ra, мкм
Сталь 40X								
ЦЭЭЛ	7310	5010	4010	3860	3150			0,8-0,9
ЭЭЛ ВК8+Cu+ВК8	8740	6030	3700	3200				0,5
ЦЭЭЛ+ЭЭЛ ВК8+Cu+ВК8	9600	9800	8250	5490	5010	3580	3200	0,5
Сталь 12X18H10T								
ЦЭЭЛ+ЭЭЛ ВК8+Cu+ВК8	8950	7300	4300	3050	1890	1750		0,5
38X2MЮА								
ЦЭЭЛ+ЭЭЛ ВК8+Cu+ВК8	9700	8890	7210	4300	3700	3250		0,5

На рис. 6 представлены микроструктуры и распределение микротвердости по глубине слоя для различных серий образцов стали 40X.

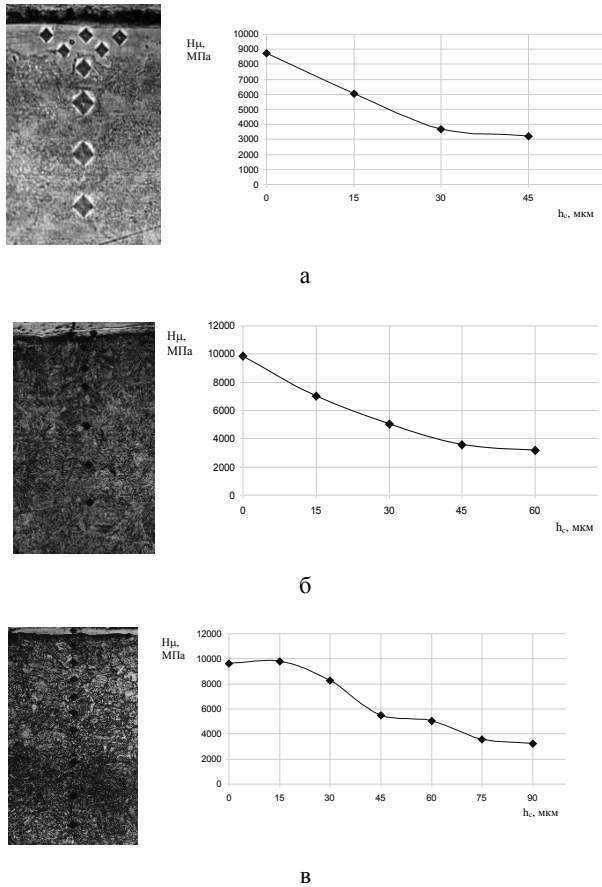


Рис. 6 – Структура и распределение микротвердости по глубине слоя образцов стали 40X после:
а – ЭЭЛ ВК8 + Cu + ВК8; **б** – ЦЭЭЛ;
в – ЦЭЭЛ + ЭЭЛ ВК8 + Cu + ВК8.

Проведенные предварительные испытания ИГТУ на экспериментальном стенде показали, что на протяжении всего периода исследований обеспечивается достаточная герметичность уплотнительного узла (утечка составляет 37 нл/мин), а температура в паре трения (углеграфит АГ 1500 – сталь 30X13) не превышает 45°C [9].

Выводы:

1. Специалистами фирмы ООО «ТРИЗ» разработаны новые, более надежные и эффективные ИГТУ компрессора углекислого газа по производству карбамида, которые значительно превосходят штатные.

2. Основным преимуществом ИГТУ является отсутствие жестких требований к физическим свойствам рабочей среды, а их радиальные габаритные размеры меньше штатных, что позволяет модернизировать компрессорную установку без изменения установочных размеров в корпусе компрессора.

3. Предложен новый способ повышения износостойкости рабочих поверхностей стальных колец ИГТУ, заключающийся в формировании на

предварительно цементируемых методом ЭЭЛ поверхностях КЭП.

4. Согласно предлагаемому способу, к промышленному использованию рекомендуется в качестве предварительной операции ЦЭЭЛ производить:

- при энергии разряда в диапазоне 0,05...1,4 Дж без дополнительной обработки;
- начиная с 1,41 до 2,83 Дж необходимо после ЦЭЭЛ проводить БУФО;
- с 2,83 до 4,6 Дж цементированную поверхность обрабатывать методом БУФО и шлифовкой.
- при энергии разряда больше 4,6 Дж ЦЭЭЛ проводить нежелательно из-за резкого ухудшения качества поверхности, а также быстрого разрушения электрода.

5. Испытания ИГТУ на экспериментальном стенде показали перспективность его применения при модернизации мультипликаторного компрессора для сжатия углекислого газа (поз. К-105), участвующего в технологическом цикле производства карбамида на предприятии ПАО «Азот» (г. Черкассы).

Список литературы

1. Марцинковский В.А. Динамика роторов центробежных машин: монография / ред. В.А. Марцинковский. Сумы: Сум ГУ, 2012. 562 с.
2. Громыко Б.М., Матвеев Е.М., Постников И.Д., Митюков Ю.В., Михалев И.А., Сорокин В.А., Петренко Р.И. Опыт разработки и эксплуатации металлических уплотняющих элементов для работы в широком диапазоне температур и давлений. Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования. Труды 9-й Международной конференции. Т.1. Сумы: СумГУ, 1999. С. 38-51.
3. Antoszewski B. Influence of Laser Surface Texturing on Scuffing Resistance of Sliding Pairs //Advanced Materials Research. 2014. V. 874, pp. 51-55. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.874.51.
4. Martsinkovsky V., Yurko V., Tarel'nik V., Filonko Yu. Designing Radial Sliding Bearing Equipped with Hydrostatically Suspended Pads //Procedia Engineering. 2012. V. 39, pp. 157-167. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.020.
5. Zharkov P.E., Tarel'nik, V.B. Increasing the Service Life of Centrifugal Compressors by Electroerosion Alloying of Impellers // Chemical and Petroleum Engineering. 2003. V. 39, pp. 27-30. doi: 10.1023/A:1023734322794
6. Tarel'nik, V.B., Martsinkovskii, V.S., Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3 // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. V.53, pp. 385-389. doi: 10.1007/s10556-017-0351-5
7. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Косенко П.В., Волошко Т.П., Антошевский Б. Пат. 2631436, Российская Федерация. Способ восстановления частично удаленного упрочненного слоя стальных деталей, 2017.
8. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Белоус А.В., Жуков А.Н. Пат. 2631439, Российская Федерация. Способ повышения износостойкости рабочих поверхностей стальных колец импульсных торцевых уплотнений, 2017.
9. Загорюлько А.В., Лісовенко Д.В., Марцинковский В.С. Розробка та дослідження торцевого запірочного імпульсного ущільнення відцентрового компресора // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. 2016. Т. 1/7(79). С.30-39. doi:10.15587/1729-4061.2016.59884

References (transliterated)

1. Martsinkovsky V.A. *Dinamika rotorov centrobezhnyh mashin: monografiya* [Dynamics of rotors of centrifugal machines: monograph]. Sumy: Sumy State Univ., 2012. 562 p.

2. Gromyko B.M., Matveyev E.M., Postnikov I.D., Mityukov Yu.V., Mikhalev I.A., Sorokin V.A., Petrenko R.I. *Opyt razrabotki i jekspluatacii metallicheskih uplotnjajushhijh jelementov dlja raboty v shirokom diapazone temperatur i davlenij* [Experience in the development and operation of metal sealing elements for operation over a wide range of temperatures and pressures]. *Trudy 9-j mezhdunar. konf. "Germetichnost', vibronadezhnost' i jekologicheskaja bezopasnost' nasosnogo i kompressorного oborudovaniya"* T1. [Proc. of the 9th Int. Conf. "HERVICON". Vol. 1] Sumy: Sum SU Publ., 1999. pp. 38-51.
3. Antoszewski B. Influence of Laser Surface Texturing on Scuffing Resistance of Sliding Pairs // *Advanced Materials Research*. 2014. V. 874, pp. 51-55. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.874.51.
4. Martsinkovsky V., Yurko V., Tarelnik V., Filonenko Yu. Designing Radial Sliding Bearing Equipped with Hydrostatically Suspended Pads *Procedia Engineering*. 2012. V. 39, pp. 157-167. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.020.
5. Zharkov P.E., Tarelnik, V.B. Increasing the Service Life of Centrifugal Compressors by Electroerosion Alloying of Impellers *Chemical and Petroleum Engineering*. 2003. V. 39, pp. 27-30. doi: 10.1023/A:1023734322794
6. Tarelnik, V.B., Martsinkovskii, V.S., Zhukov, A.N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 3 *Chemical and Petroleum Engineering*. 2017. V.53, pp. 385-389. doi: 10.1007/s10556-017-0351-5
7. Tarelnik V.B., Martsinkovsky V.S., Kosenko P.V., Voloshko T.P., Antoshevsky B. *Sposob vosstanovlenija chastichno udalennogo uprochnennogo sloja stal'nyh detalej* [Method for the restoration of a partially removed reinforced layer of steel parts]. Patent RF no 2631436, 2017.
8. Tarelnik V.B., Martsinkovsky V.S., Belous A.V., Zhukov A.N. *Sposob povyshenija iznosostojkosti rabochih poverhnostej stal'nyh kolec impul'snyh torcevyh uplotnenij* [Method for increasing wear resistance of the impulse face seals steel rings working surfaces], Patent RF no 2631439, 2017.
9. Zagorulko A.V. Lysovenko D.V., Martsinkovsky V.S. *Rozrobka ta doslidzhennja torcovogo zapirnogo impul'snogo ushhi'l'nennja vidcentrovogo kompressora* [Development and research of the face shutter impulse seal of a centrifugal compressor]. *Vostochno – Evropejskij zhurnalпередovyh tehnologij*. 2016. vol. 1/7 (79). pp.30-39. doi:10.15587/1729-4061.2016.59884

Поступила (received) 30.04.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Данілейко Ольга Володимірівна (Данилейко Ольга Владимировна, Danileiko Olga Vladimirovna) – ТОВ «ТРИЗ», ведучий інженер-конструктор, м. Суми, Україна; e-mail: danileiko@triz.sumy.ua.

Ладенко Сергій Вікторович (Ладенко Сергей Викторович, Ladenko Sergey Victorovich) – ТОВ «ТРИЗ», керівник проекту нестандартного обладнання та енергозбереження, м. Суми, Україна; e-mail: ladenko@triz-ltd.com.

Жуков Олексій Миколайович (Жуков Алексей Николаевич, Zhukov Aleksey Nikolaevich) – Сумський національний аграрний університет, аспірант; м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7886-6993>; e-mail: technology@i.ua.

С. О. ГУБСЬКИЙ, М. В. ЦЕБРЕНКО, А. О. ОКУНЬ

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ СТЕНДУ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ

У роботі проведено розрахунок напружено-деформованого стану металокопструкції стенду механізму підйому вантажу за граничним станом із застосуванням методу скінченних елементів. Показано, що у всіх розрахункових зонах діють напруження, що не приводять до накопичення ушкоджень і їх металокопструкції мають необмежену довговічність. Наведено результати експериментальних досліджень напружено-деформованого стану металокопструкції клітки за допомогою тензометричного методу неруйнівного контролю. Зроблено порівняльний аналіз аналітичних та експериментальних досліджень.

Ключові слова: механізм підйому, напружено деформований стан, металокопструкція, метод кінцевих елементів.

С. А. ГУБСКИЙ, М. В. ЦЕБРЕНКО, А. А. ОКУНЬ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ СТЕНДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА ГРУЗА

В работе проведен расчет напряженного деформированного состояния металлокопструкции стенда механизма подъема груза по предельному состоянию с применением метода конечных элементов. Показано, что во всех расчётных зонах действуют напряжения, которые не приводят к накоплению повреждений и их металлокопструкции имеют неограниченную долговечность. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металлокопструкции клетки с помощью тензометрического метода неразрушающего контроля. Сделан сравнительный анализ аналитических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: механизм подъема, напряженно-деформированное состояние, металлокопструкция, метод конечных элементов.

S. A. GUBSKIY, M. V. TSEBRENKO, A.O. OKUN

RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE METAL STRUCTURE OF THE LOAD LIFTING MECHANISM TEST BENCH

The paper deals with the stress-strain state of the metal structure of the load lifting mechanism test bench that is calculated on the basis of the limiting state using the finite element method. It is shown that stresses, that do not lead to accumulation of damages, occur in all design zones and the metal structure has unlimited durability. The results of the experimental attachments of the stressed-deformed mill of the metal cladding are added to the result of the use of the tensometric method of non-verbal control. The crippled pornographic analysis of analitic and experimental dosensis.

Keywords: lifting mechanism, stress-strain state, metal structure, finite element method.

Вступ. Динамічні навантаження в механізмах підйому вантажу суттєво впливають на напружено-деформований стан (НДС) металокопструкції.

Для дослідження НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу можливо використовувати аналітичні, числові та інші методи розрахунку. Підтвердити ці розрахунки можливо експериментально, наприклад, магнітно-коерцитивним методом неруйнівного контролю (НК), тензометричним методом НК.

Аналітичний метод розрахунку НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу використовується для попередніх та проектувальних розрахунків, які необхідні для вибору поперечного перерізу елементів металокопструкції та при аналізі впливу окремих елементів на отриманий результат (можливість знаходження оптимального рішення) [1, 2]. Цей метод базується на принципах будівельної механіки та опору матеріалів.

Розрахунок НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу числовим методом можна виконати за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) (рис. 1). Це дозволяє проводити розрахунок металокопструкції стенду механізму підйому вантажу з різними видами навантаження. [3].

Для експериментального визначення НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу можливо використовувати методи неруйнівного контролю (наприклад, тензометричний метод НК,

магнітно-коерцитивний метод НК). Це дозволяє порівнювати отримані результати з числовим методом. Також, експериментальний метод визначення НДС можливо використовувати для визначення реального стану металокопструкції крана з подальшим застосуванням в поєднанні з аналітичними або числовими методами.

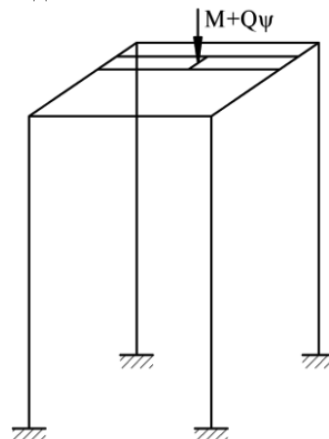


Рис. 1 – Схема для числового розрахунку НДС МСЕ металокопструкції стенду

Як показує практика частину навантажень на металокопструкцію можливо вирахувати за фізичними законами (наприклад, вагові характеристики, інерційні навантаження і т.д.). Ще частину за емпіричними формулам (наприклад, зусилля від взаємодії каната з

канавкою барабана) [4, 5]. Але в цьому випадку неможливо об'єктивно врахувати напруження, незадовільної роботи механізму підйому крана і т.д., що може призвести до значної похибки у визначенні діючих навантажень. Магнітно-коерцитивний НК та МСЕ є інструментом для оцінки дії цих напружень.

Виходячи із розглянутих методів визначення (розрахунку) НДС металокопструкції, ми використаємо числові методи.

Мета дослідження. Проведення дослідження НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу шляхом застосування методу розрахунку граничного стану та кінцевих елементів.

Проводився розрахунок металокопструкції стенду механізму підйому вантажу, який був створений для експериментальних досліджень.

Для визначення впливу механізму підйому вантажу на НДС досліджуваної металокопструкції розрахунок проводився методом граничних станів для характерного технологічного циклу (ХТЦ) роботи механізму: початок підйому вантажу з землі та завершення підйому. Даний ХТЦ розділено на такі розрахункові випадки:

I розрахунковий випадок – від власної ваги металокопструкції;

II розрахунковий випадок – «відрив» вантажу від підлоги;

III розрахунковий випадок – завершення підйому.

Модель стенду механізму підйому вантажу створена в масштабі 1:1. Для моделювання використовувалися елементи оболонкового типу.

Модель спрощена в порівнянні з реальним об'єктом: відсутні механізм підйому, кронштейни для кріплення та інші допоміжні елементи металокопструкції.

Також при розрахунку стенду механізму підйому вантажу було використано наступні характеристики металу, що рекомендуються [1]:

- модуль Юнга $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа;
- коефіцієнт Пуассона $\mu = 0,3$;
- коефіцієнт лінійного розширення $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- густина металу $\rho = 7,85 \cdot 10^3$ кг/м³.

При розрахунках металокопструкції кранів за I граничним станом не фіксуються концентрації напружень, а використовуються для подальших розрахунків (чи аналізу НДС металокопструкції) нормальні напруження [1–3].

Дослідження НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу

В моделі стенду механізму підйому вантажу збережені основні конструктивні особливості: форма та розміри балок металокопструкції (Рис. 2).

Складові (навантаження, швидкості, прискорення, коефіцієнти і т.д.), що діють та враховуються в розрахункових випадках ХТЦ на металокопструкцію

стенду механізму підйому вантажу:

- власна вага копструкції $G_K = 26500$ Н;
- вага вантажу $G_Q = 6600$ Н;
- прискорення вільного падіння $g = 9,81$ м/с²;
- при «відриві» вантажу від основи виникає додаткове динамічне навантаження, яке враховується динамічним коефіцієнтом $\psi_I = 1,1$ [1];
- при завершенні підйому виникає зворотне коливання вантажу на канатах, яке враховується динамічним коефіцієнтом $\psi' = 1/\psi_I = 1/1,1 = 0,9$ [1];

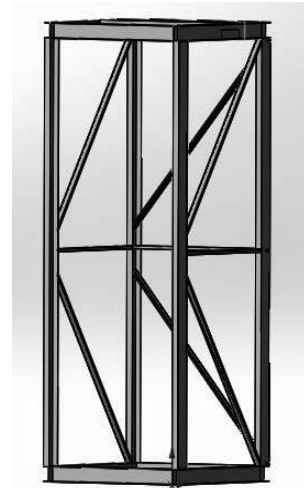


Рис. 2 – Загальний вигляд моделі стенду механізму підйому вантажу

Було проведено розрахунки НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу МСЕ при різних розрахункових випадках (рис. 1). В результаті були встановлені наступні елементи металокопструкції (розрахункові зони (далі РЗ)) з підвищеним рівнем напружень та досить великим розмахом напружень ($\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$) – рис. 3а.

Напруження в найбільш навантажених елементах металокопструкції крана (розрахункових зонах, рис. 3а, б) при різних розрахункових випадках наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Напруження в найбільш навантажених елементах металокопструкції стенду механізму підйому вантажу (розрахункових зонах) при різних розрахункових випадках

Розрахунковий випадок навантаження	Напруження в розрахункових зонах, МПа				
	1	2	3	4	5
I	3,5	1,7	1,4	0,8	0,3
II	47	24	16	9	5
III	39	20	14	7	3

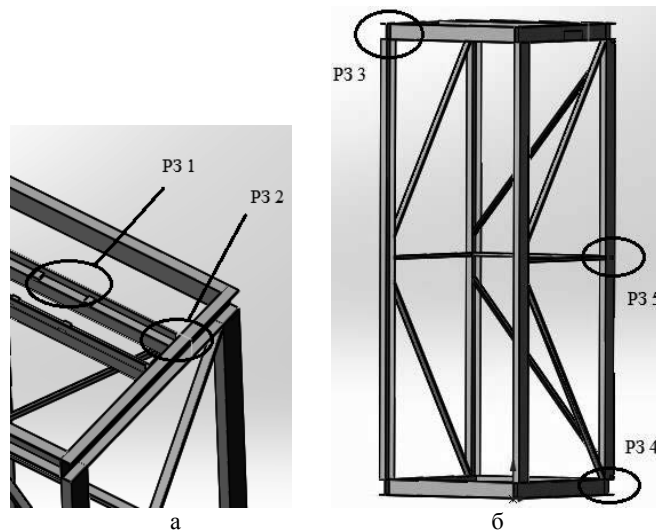


Рис. 3 – Елементи металокопструкції (розрахункові зони):
а - з підвищеним рівнем напружень та б – досить великим розмахом напружень

Межа витривалості, МПа:

$$\sigma_{IK} = k_t \cdot \sigma_{IKB} \quad (1)$$

де σ_{IKB} – базова межа витривалості – для сталі Ст3сп, МПа (ГОСТ 19281-89) табл. 5.3.1 [1];

k_t – коефіцієнт впливу товщини розрахункового елемента металокопструкції

$$k_t = (t_0/t)^{0,2}, \quad (2)$$

де t – товщина того елемента вузла, за яким ведеться розрахунок, мм;
 $t_0=20$ мм.

Межа витривалості (на базі $N_0 = 2 \cdot 10^6$ циклів) для найбільш навантажених елементів металокопструкції крана (розрахункових зон, рис. 3 а, б) наведено в таблиці 2.

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

	Межа витривалості в розрахунковій зоні, МПа				
	1	2	3	4	5
Базова межа витривалості σ_{IKB} , МПа (табл. 5.3.1 [1])	63	63	63	63	63
Товщина елемента розрахункової зони, мм	5	5	5	5	5
Межа витривалості σ_K , МПа	83	83	83	83	83

Схематизація зміни напружень при різних розрахункових випадках навантаження металокопструкції стенду механізму підйому вантажу методом «потоків дощу» [7] зображена на рис. 4.

Приведення асиметричних циклів напруження до еквівалентних симетричних здійснювали відповідно до вимог [7]:

$$\sigma_{\text{пр.}J} = \begin{cases} \sigma_{aj} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m, & \sigma_m > 0 \\ \sigma_{aj} > 0 & \end{cases} \quad (3)$$

де $\sigma_{\text{пр.}J}$ – амплітуда приведеного симетричного циклу напружень, МПа;

σ_{aj} – амплітуда асиметричного циклу напружень, МПа;

σ_m – середнє значення напружень циклу, МПа;

ψ_{σ} – коефіцієнт чутливості сталі до асиметрії циклу. Відповідно для прокатного листа

$$\psi_{\sigma} = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_B = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 372 = 0,0944 \quad (4)$$

де $\sigma_B=372$ МПа – тимчасова межа опору сталі Ст3сп.

Результати схематизації за методом «потоків дощу» [5] стенду механізму підйому вантажу представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати схематизації по методу «потоків дощу» [7] для найбільш небезпечної розрахункової зони 1

№ шляху «потоків»	1-2	2-3
σ_{min} , МПа	3,5	39
σ_{max} , МПа	47	47
σ_a , МПа	43,5	8
σ_m , МПа	25,3	43
$\sigma_{\text{пр.}J}$, МПа	45,9	12

Як видно з табл. 3 отримані амплітуди приведених симетричних циклів напружень для всіх розрахункових зон задовольняють умові

$$\sigma_{\text{пр.}J} < \sigma_{IK}$$

тобто, у всіх розрахункових зонах діють напруження, що не приводять до накопичення ушкоджень і металокопструкція стенду механізму підйому вантажу при експлуатаційному навантаженні має необмежену довговічність [1].

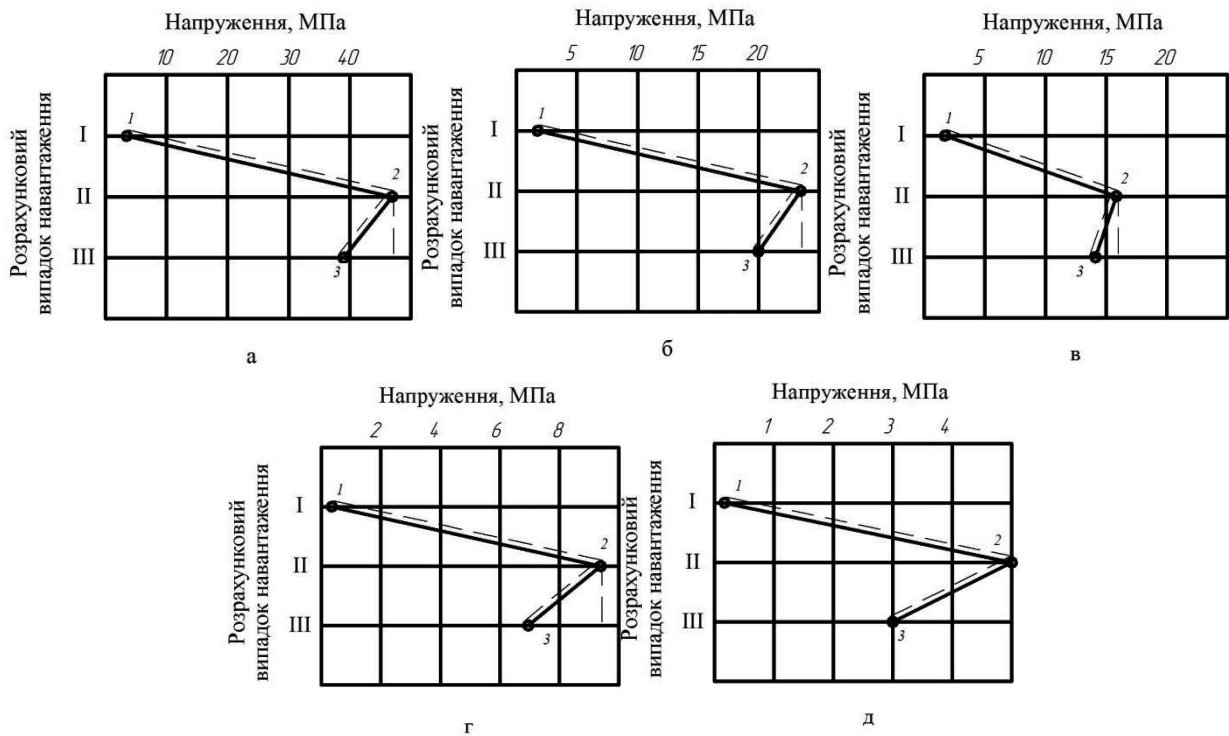


Рис. 4 – Схематизація зміни напружень при різних розрахункових випадках навантаження МК методом «погоків дощу» [7]:
а – Р31, б – Р32, в – Р33, г – Р34, д – Р35.

Стендові дослідження

Проаналізувавши теоретичні та аналітичні розрахунки було прийняте рішення встановити тензо-датчики (рис. 5) для виміру напружень, що виникають у найбільш несприятливій зоні (Р3 1).

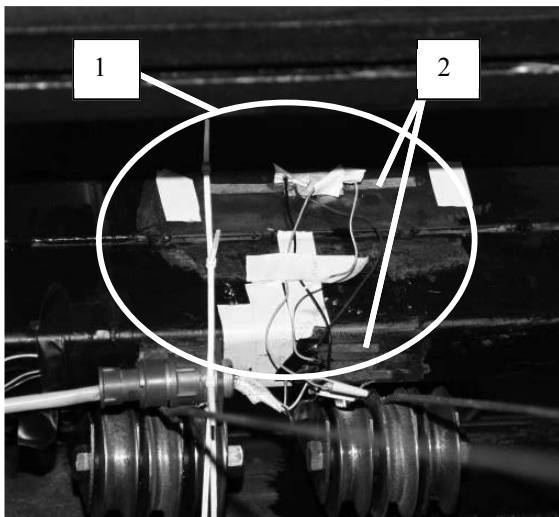


Рис. 5 – Розташування тензо-датчиків на експериментальному стенді:
1 – розрахункова зона 1; 2 – тензо-датчики

В результаті було проведено навантаження стенду при лінійному законі керування гідроприводу та отриманий графік зміни навантаження в

металоконструкції стенду (рис. 6).

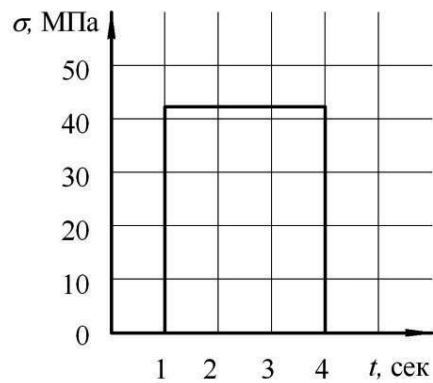


Рис. 6 – Зусилля отримані з тензо-датчиків

Як видно з рис.6 отримані напруження майже співпадають з розрахунковими.

Висновки

При числовому розрахунку металоконструкцій стенду механізму підйому вантажу та під час експлуатаційного навантаження за допомогою МСЕ встановлено: у всіх розрахункових зонах діють напруження, що не приводять до накопичення ушкоджень і їх металоконструкції мають необмежену довговічність.

Список літератури

1. Соколов С. А. *Металлические конструкции подъемно-транспортных машин*. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
2. Губський С. О. Сучасні методи розрахунку кранових металоконструкцій на витривалість. *Подъемные сооружения. Специальная техника*. Одесса, 2016. №8. С. 4–6.
3. Губський С. О. Дослідження напружено-деформованого стану металоконструкцій мостових кранів з різними конструкціями механізму пересування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. №42 (1085). С. 65-74.
4. Брауде В. И., Гохберг М. М., Звягин И. Е. *Справочник по кранам: В 2 т. Т.1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций*. Москва: Машиностроение, 1988. 536 с.
5. Алямовский А. А. *Solid Works/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов*. Москва: ДМК, 2007. 784 с.
6. Трошенко В. Г. *Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом разрушении*. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
7. *ГОСТ 25.101–83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статического представления результатов*. Москва: Изд-во стандартов, 1983. 21 с.
3. Gubskiy S. O. *Doslidzhennya napruzhenno-deformovanogo stanu metalokonstruktsiy mostovih kraniv z riznimi konstruktsiyami mehanizmu peresuvannya* [Research of the stress-strain state of overhead crane metal structures with various structures of the movement mechanism]. *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». Tehnologiyi v mashinobuduvanni*. Harkiv, NTU «HPI», 2014. no. 42 (1085). pp. 65-74.
4. Braude V. I., Gohberg M. M., Zvyagin I. E. *Mashinostroenie Spravochnik po kranam: V 2 t. T.1. Charakteristiki materialov i nagruzok. Osnovy rascheta kranov, ih privodov i metallicheskih konstruktsiy* [Cranes Handbook: Characteristics of materials and loads. Basics of calculation of cranes, their drives and metal structures]. Moscow, 1988. 536 p.
5. Alyamovskiy A. A. *Solid Works/COSMOSWorks 2006–2007. Inzhenerskiy analiz metodom konechnykh elementov* [Solid Works / COSMOSWorks 2006-2007. Engineering analysis by the finite element method]. Moscow, DMK, 2007. 784 p.
6. Troschenko V. G. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogotsiklovom razrushenii* [Deformation and destruction of metals under multi-cyclic destruction]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 344 p.
7. *GOST 25.101–83. Metodyi shematizatsii sluchaynykh protsessov nagruzeniya elementov mashin i konstruktsiy i staticheskogo predstavleniya rezultatov* [State Standart 25.101–83. Schematization methods of loading random processes of machines and constructions elements and static presentation of results]. Moscow, Standartinform Publ., 1983. 21 p.

References (transliterated)

1. Sokolov S. A. *Metallicheskie konstruktсии pod'emno-transportnyih mashin* [Metal structures of lifting and transport machines]. Politehnika, 2005. 423 p.
2. Gubskiy S. O. *Suchasni metodi rozrahunku kranovih metalokonstruktsiy na vitrivalist* [Modern calculation methods of

Надійшла (received) 10.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Губський Сергій Олександрович (Губский Сергей Александрович, Gubskiy Sergey Aleksandrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: Gubskiyso@gmail.com.

Цебренько Максим В'ячеславович (Цебренько Максим Вячеславович, Tsebrenko Maksym Viacheslavovych) – старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-4698> тел.: (098) 850-15-03; e-mail: tsebrenko90@gmail.com.

Окунь Антон Олександрович (Окунь Антон Александрович, Okun Anton Oleksandrovych) – асистент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Підйомно-транспортні машини і обладнання»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6467-4229> тел.: (067) 578-63-17; e-mail: okun@kpi.kharkov.ua.

В. С. МАЙБОРОДА, І. В. СЛОБОДЯНЮК, Д. Ю. ДЖУЛІЙ, Д. В. ТАРГАН

ВПЛИВ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ЯКІСТЬ ШПОНКОВИХ ФРЕЗ ІЗ ШВИДКОРІЗАЛЬНОЇ СТАЛІ

Досліджено вплив швидкості обертання шпонкових фрез виготовлених з швидкорізальної сталі навколо власної осі в процесі магнітно-абразивного оброблення в робочих зонах кільцевого типу та складу магнітно-абразивного інструменту на показники якості. Встановлено, що збільшення швидкості обертання фрез навколо власної осі в досліджуваному діапазоні призводить до підвищення поверхневої твердості, зменшує інтенсивність формування радіусу округлення різальних кромок та суттєво не впливає на зміну шорсткості робочих поверхонь. Проведено дослідження працездатності шпонкових фрез після циклу магнітно-абразивного оброблення, показано, що відбувається підвищення їх стійкості в 2 і більше рази в порівнянні з необробленими. Встановлено, що найбільше на працездатність впливає величина та форма радіусу округлення різальних кромок та поверхнева твердість різального інструменту.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, шпонкова фреза, твердість, шорсткість, різальна кромка, зношення.

В. С. МАЙБОРОДА, І. В. СЛОБОДЯНЮК, Д. Ю. ДЖУЛІЙ, Д. В. ТАРГАН

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ШПОНОЧНЫХ ФРЕЗ С БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Исследовано влияние скорости вращения шпоночных фрез изготовленных из быстрорежущей стали вокруг собственной оси в процессе магнитно-абразивной обработки в рабочих зонах кольцевого типа и состава магнитно-абразивного инструмента на показатели качества. Установлено, что увеличение скорости вращения фрез вокруг собственной оси в исследуемом диапазоне приводит к повышению поверхностной твердости, уменьшает интенсивность формирования радиуса округления режущих кромок и существенно не влияет на изменение шероховатости рабочих поверхностей. Проведено исследование работоспособности шпоночных фрез после цикла магнитно-абразивной обработки, показано, что имеет место повышение их стойкости в 2 и более раз по сравнению с необработанными. Установлено, что больше всего на работоспособность влияет величина и форма радиуса округления режущих кромок и поверхностная твердость инструмента.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, шпоночная фреза, твердость, шероховатость, режущая кромка, износ.

V. S. MAIBORODA, I. V. SLOBODIANIUK, D. YU. DZHULII, D. V. TARHAN

INFLUENCE OF MAGNETO-ABRASIVE MACHINING ON THE QUALITY KEYWAY MILLS MADE OF HIGH SPEED STEEL

Experimental investigations of influences of magneto-abrasive machining conditions on the quality parameters of keyway mills made of high speed steel were carried out. It was determined that an increasing in angular velocity of mills around its own axis during the machining does not lead to the intensification reducing of roughness parameters and formation radiuses of cutting edge rounding. But it increases the hardness of working surfaces due to the frictional hardening. The best results for hardening were obtained at using powdered with round shape, which provides increasing of hardness to value 10–11,5 GPa at the initial 8–9 GPa, reduction of roughness at using splinter powders with high abrasive ability, which provides value of Ra 0,45 μm at the initial 1,4 μm. By using the method of magneto-abrasive machining can be increased the keyway mills tool life by forming the necessary size of radiuses of cutting edge rounding and increasing of the hardness of the surface layers of the working elements. Experimentally was investigated that at the angular velocity of mills around its own axis 500 rpm and using as magneto-abrasive material the diffuse powder made from PR R6M5 with grain size 160/100 μm the tool life increases in 2–2,3 times.

Keywords: Magneto-abrasive machining, keyway mill, hardness, roughness, cutting edge, wear.

Вступ. В зв'язку з прискореним темпом розвитку техніки та сучасного автоматизованого виробництва актуальним є підвищення ефективності та надійності технологічного процесу, який визначається експлуатаційними властивостями різального інструменту (РІ).

В значній мірі показники якості інструменту, такі як фізико-механічні властивості поверхневого шару робочих елементів, їх мікрогеометрія, величина та форма округлення різальних кромок (РК) на всіх елементах, що приймають активну участь у різанні, формуються на фінішних етапах виготовлення. Для забезпечення підвищення зазначених характеристик, які в подальшому визначають надійність та працездатний стан РІ традиційно використовують сучасні методи оброблення, що поєднують в собі комплексний вплив енергій різного походження на поверхневий шар виробів. Однак більшість з таких методів є високоартісними та слабкоконтрольованими і в повній мірі не забезпечують комплексного підвищення параметрів якості. Одним з сучасних

фінішних методів, який інтенсивно розвивається – є магнітно-абразивне оброблення (МАО) в робочих зонах кільцевого типу. Для оброблення деталей складної просторової форми, до яких відноситься РІ, доцільно використовувати робочі зони з кільцевим розташуванням шириною понад 3–5 мм [1]. Характерним для таких схем є те, що сили притискання магнітно-абразивного порошку (МАП) до деталі в основному створюються за рахунок сил динамічного походження при відносних рухах деталі та порошку і, в меншій мірі, за рахунок магнітного поля. В процесі оброблення деталь базується під певним кутом до робочої зони, рухається вздовж неї та обертається навколо власної осі (осі оправки) [2–4]. Тому важливим є визначення впливу швидкості обертання оправки навколо власної осі на підвищення параметрів якості готового інструменту. Попередні дослідження впливу процесу МАО на фінішних етапах виготовлення РІ з різних матеріалів свідчать про перспективність його застосування [1, 3, 5, 6], але в цих роботах не

досліджено вплив кутової швидкості обертання деталей навколо власної осі.

Практично відсутня науково-технічна інформація про вплив даного методу на якість та експлуатаційні властивості шпонкових фрез виготовлених з швидкорізальної сталі з урахуванням кінематичних параметрів процесу.

Метою даної роботи є дослідження впливу магнітно-абразивного оброблення в робочих зонах кільцевого типу на показники якості шпонкових фрез із швидкорізальної сталі.

Матеріал і результати досліджень.

Експериментальні дослідження виконувались на шпонкових фрезах $\varnothing 5,5$ мм з довжиною робочої частини 20 мм виготовлених з інструментальної швидкорізальної сталі – Р9. У вихідному стані шорсткість робочих поверхонь фрез – Ra складала 1,4–1,5 мкм, поверхнева твердість $HV_{200}=8\text{--}8,5$ ГПа. Зовнішній вигляд різальної кромки фрез у вихідному стані наведено на рис. 1. Відзначимо наявність на них задирок і концентраторів напружень у вигляді виривів та сколів.

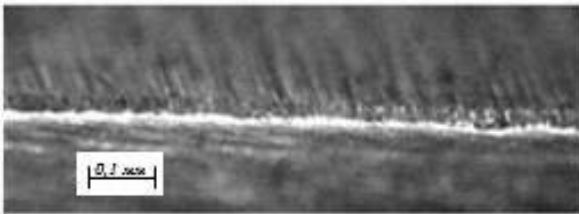


Рис. 1 – Зовнішній вигляд РК шпонкових фрез у вихідному стані

МАО виконували на експериментальному верстаті [3], який забезпечує можливість реверсивного обертання оброблюваного інструменту навколо осі кільцевої ванни з регульованою швидкістю та одночасне обертання навколо власної осі при нахиленому базуванні відносно площини робочої зони. Оброблення фрез виконували при наступних умовах: швидкість руху РІ вздовж кільцевої ванни 2,5 м/с; частота обертання інструменту навколо власної осі – ω_0 варіювалась в діапазоні 100–900 об/хв, величина напруженості магнітного поля в магнітній системі не заповненій МАП складала $H=183$ кА/м; час оброблення – 180 с. Відзначимо, що МАО виконували за умов зміни напрямку руху навколо осі кільцевої ванни [7], а саме в режимі «натікання» магнітно-абразивного інструменту (МАІ) на оброблювану поверхню – час складав 60 с, а в режимі «стікання» – 120 с. Кут базування фрез відносно горизонтальної площини робочої зони – $p=35^\circ$. Для відновлення форми МАІ в режимі «стікання», коли основна маса фероабразивного середовища витісняється в нижню частину робочої зони використовували відновлювальний стрижневий елемент (ВСЕ) $\varnothing 10$ мм, кут базування якого складав 40° відносно горизонтальної площини кільцевої ванни [1, 8, 9].

До та після МАО контролювали: шорсткість поверхні на стрічці фрез на удосконаленому профілограф-профілометрі моделі Калібр 296;

поверхневу твердість на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 2 Н; радіус округлення РК оцінювали на інструментальному мікроскопі УІМ-2М за параметром k (рис. 2), який визначали за спрощеною методикою, аналогічною методу, наведеному в [10] та підходом до вимірювань, які реалізовані на вимірювальному комплексі MicroCAD [11].

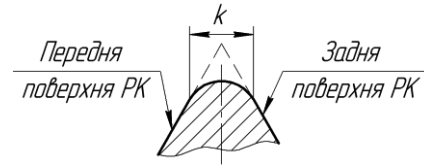


Рис. 2 – Схема визначення параметра k

Зовнішній вигляд РК шпонкових фрез після МАО представлено на рис. 3. В результаті проведення експериментальних досліджень показано, що на робочих поверхнях фрез знижується шорсткість і видаляється регулярний мікрорельєф, а з РК видаляються задирки та заусенці, формується рівномірна та гладка поверхня без істотних концентраторів напружень.

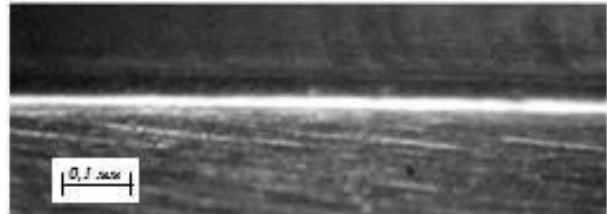


Рис. 3 – Зовнішній вигляд РК шпонкових фрез після МАО

На першому етапі виконували дослідження впливу швидкості обертання фрези навколо власної осі – ω_0 , яка складала 100 об/хв, 500 об/хв, 900 об/хв в процесі МАО на зміну шорсткості робочих поверхонь, поверхневу твердість, величину округлення РК. Для формування МАІ використовували магнітно-абразивний порошок Феромап зернистістю 200/100 мкм з додаванням мастильно-охолоджуючого технологічного середовища (МОТС) марки Асфол [1, 12, 13]. Результати впливу швидкості обертання фрез навколо власної осі на показники якості представлено на рис. 4.

Показано, що при збільшенні частоти обертання інструменту навколо власної – ω_0 до 900 об/хв відбувається більш інтенсивний процес зміцнення поверхневого шару (див. рис. 4, а), що може бути пов'язано з переважною фрикційною взаємодією МАІ з оброблюваними поверхнями.

Зміна величини ω_0 в зазначеному діапазоні не призводить до суттєвої інтенсифікації процесу полірування робочих поверхонь фрез, незважаючи на збільшення шляху оброблення (див. рис. 4, б). Розрахунки виконані за методиками, наведеними в [6, 11] показують що саме співвідношення швидкості обертання РІ навколо власної осі – ω_0 до швидкості обертання навколо осі кільцевої ванни – ω_6 при $\omega_0=500$ об/хв є найбільш оптимальним для даного розміру та типу фрез. Отримані дані свідчать, що при

використанні в процесі оброблення зазначеного вище типу порошку саме тангенціальна складова швидкості MAO – $V\tau$, що визначає умови взаємодії та тертя між MAI та оброблюваними поверхнями і відіграє важливу роль в процесі зміцнення поверхневого шару робочих елементів.

Показано, що при швидкості обертання PI навколо власної осі 100 та 500 об/хв в процесі MAO відбувається збільшення параметру k , який характеризує величину притуплення РК на 16,5–17,5 мкм, в той час як при $\omega_0=900$ об/хв лише на 5 мкм (див. рис. 4, в).

Зменшення величини радіусу округлення РК при підвищених значеннях ω_0 може бути пов'язано або з умовами більш інтенсивного оброблення задньої поверхні фрез і сприятливими умовами формування форми кромки, або з особливостями формування та руйнування окремих структурних елементів MAI безпосередньо в процесі контакту з РК фрез при MAO [1, 14].

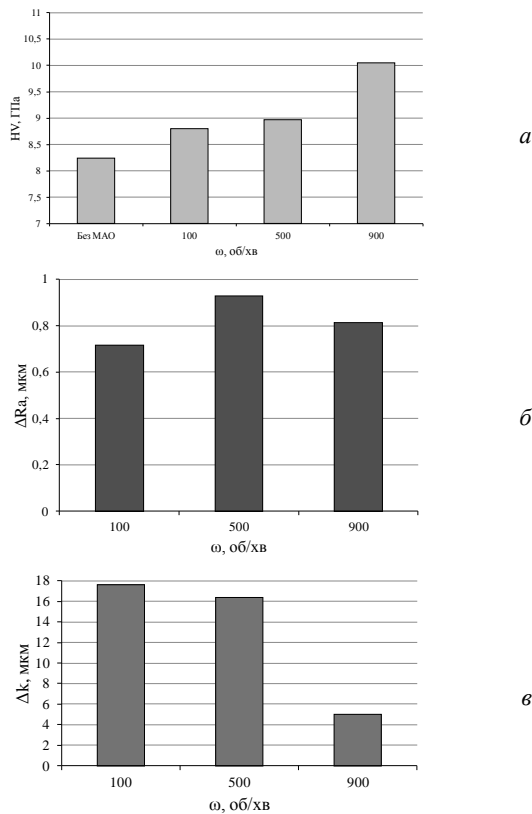


Рис. 4 – Вплив швидкості обертання шпонкових фрез навколо власної осі в процесі MAO на:
а – поверхневу твердість; б – шорсткість поверхні;
в – параметр k

Другий етап досліджень процесу MAO виконували при швидкості обертання шпонкових фрез навколо власної осі 500 об/хв. Досліджували вплив складу MAI на параметри їх якості. Оброблення виконували інструментом сформованим з наступних МАП: Феромап з розміром частинок 200/100 мкм, S330 – 1200/900 мкм, ПР Р6М5 – 160/100 мкм, Царамам – 315/200 мкм та сумішню порошоків Полімам М –

315/200 мкм з додаванням 5% порошку Феромап 160/100 мкм [1, 5].

Після циклу MAO шпонкових фрез різними типами МАП контролювали величину зміни шорсткості робочих поверхонь – ΔRa , параметра k – Δk та величину поверхневої твердості – HV . Отримані результати представлено на рис. 5.

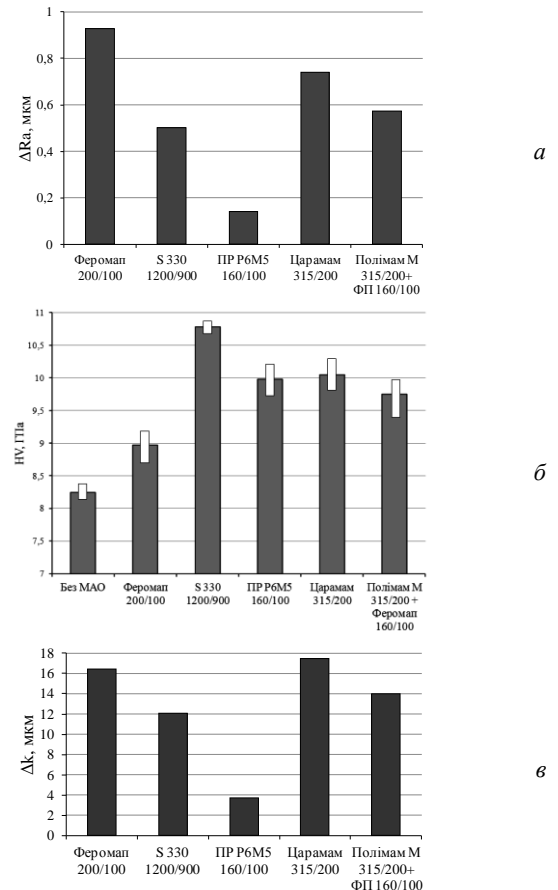


Рис. 5 – Вплив складу MAI в процесі MAO шпонкових фрез на: а – шорсткість поверхні;
б – поверхневу твердість; в – параметр k

Встановлено, що використання осколкових рівновісних типів порошоків – Феромап 200/100 мкм та округлих нерівновісних – Царамам 315/200 мкм для формування MAI забезпечують кращу полірувальну та абразивну здатність (див. рис. 5, а та рис. 5, в) в порівнянні з іншими. Це пояснюється мікрогеометричними характеристиками частинок MAI із зазначених порошкових матеріалів [1], а саме величиною округлення мікрорізальних кромки окремих частинок.

Найбільший вплив на формування радіусу округлення РК має MAI який сформований з нерівновісного порошку Царамам 315/200 мкм (див. рис. 5, в), що пояснюється його підвищеною абразивною здатністю [3].

Найкращі показники по зміцнювальному обробленню притаманні MAI, який сформовано з округлих рівновісних порошоків S330 – 1200/900 мкм та ПР Р6М5 – 160/100 мкм (див. рис. 5, б), так як вони мають практично сферичну форму зерен, а їхня

абразивна здатність незначна і процес оброблення відбувається за рахунок ударно-фрикційної взаємодії з оброблюваними поверхнями, яка сприяє пластичному деформуванню мікронерівностей та тонкого поверхневого шару [1].

Дослідження експлуатаційних властивостей шпонкових фрез до та після MAO виконували при фрезеруванні відкритих пазів у плиті, виготовленій зі Сталі 45 при частоті обертання фрез – 710 об/хв, подачі – 15 мм/хв, подачі на зуб – 0,01 мм/зуб, глибина фрезерування – 2 мм без застосування MOTS. Величину зношення контролювали на інструментальному мікроскопі при вершині зуба на стрічці. Критичне зношення вибрано за [15] та складає 0,3 мм.

При порівнянні працездатності фрез, які оброблялися магнітно-абразивним методом при різних швидкостях обертання навколо власної осі з необробленими встановлено, що до величини критичного зношення такий інструмент працює на 15–20 хв довше (див. рис. 6, а), що складає 100–130 % підвищення стійкості.

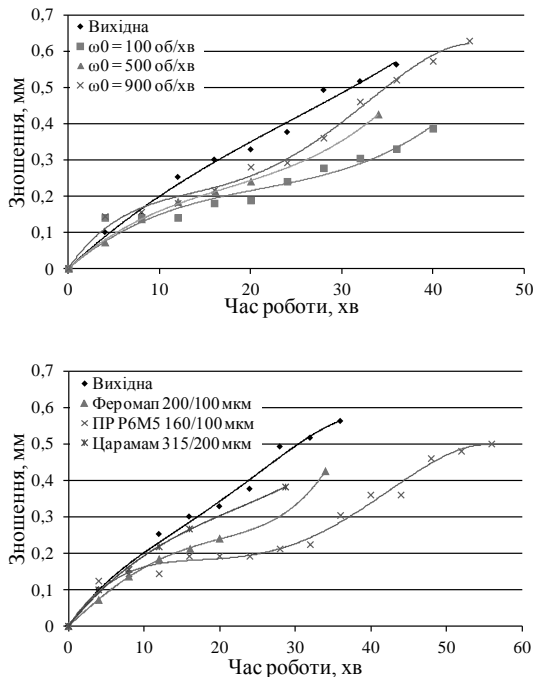


Рис. 6 – Криві зношення шпонкових фрез в залежності від часу роботи

Встановлено, що найкращий працездатний стан у шпонкових фрез після MAO округлим типом порошку PR P6M5 зернистістю 160/100 мкм, так як він забезпечує утворення шорсткості робочих поверхонь на рівні $Ra=0,18$ мкм, сприятливої мікрогеометрії РК притуплюючи їх на 4 мкм та збільшує мікротвердість до 9,9 ГПа. При такому стані фрез їх час роботи збільшується на 20 хв в порівнянні з необробленими.

Отримані результати показують, що при заданих режимах різання на стійкість РІ найбільший вплив має величина та форма радіусу округлення РК, адже при його збільшенні зменшується товщина шару матеріалу, який зрізується, що призводить до його змінання в

результаті чого відбувається більш інтенсивно процес зношення задньої поверхні. Для уникнення цього ефекту необхідно провести ряд досліджень по визначенню оптимальних режимів різання для РІ з заданою величиною округлення РК.

Висновки. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що змінюючи умови MAO шпонкових фрез з швидкорізальної сталі, такі як кінематика процесу, тип, форма і розміри МАП, можна контролювано впливати на формування відповідних параметрів якості. Встановлено, що найбільша полірувальна здатність притаманна МАІ, сформованому з рівновісного осколкового порошку Феромап 200/100 мкм, а зміцнювальне оброблення – МАІ, який сформовано з округлого сферичного порошку S330 1200/900 мкм. При раціональних умовах MAO можна підвищити стійкість шпонкових фрез в 2– 2,3 рази, що матиме значний економічний ефект та зменшення часу оброблення деталей при використанні підготовленого різального інструменту.

Список літератури

1. Майборода В. С., Слободянюк И. В., Джулий Д. Ю. *Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы*. Житомир: ИП «Рута», 2017. 272 с.
2. Гейчук В. М. *Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2012. 472 с.
3. Майборода В. С. *Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2001. 404 с.
4. Ткачук І. В. *Формування магнітно-абразивного інструменту зі стабільними властивостями в робочих зазорах кільцевого типу: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2015. 164 с.
5. Byelayev O. *Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung: Phd-Thesis*, Otto von Guericke. Magdeburg, Germany, 2008. 150 p.
6. Klimov O. *Magnet-Abrasive-Bearbeitung von Werkzeuge aus WC-Hartmetall. Phd-Thesis*, Otto von Guericke. – Magdeburg, Germany, 2014. – 159 p.
7. Maiboroda V., Karpuschewski B., Klymov O. *Analyse von Prozessbedingungen auf der Werkzeugschneidkanten während der magnetabrasiven Bearbeitung von Schaftfräsern aus Hartmetall mit ihren positionierungen in Ringförmigen Arbeitszonen. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство*. Донецьк, ДонНТУ, 2013. Випуск 1(10). С. 28–35.
8. Майборода В. С., Гейчук В. М., Джулий Д. Ю., Ткачук І. В. Пат. 104328 Україна. *Спосіб магнітно-абразивного оброблення*. 2014.
9. Джулий Д. Ю., Майборода В. С., Ткачук І. В., Гейчук В. М. *Формування магнітно-абразивного інструменту при магнітно-абразивному обробленні довгомірних деталей у кільцевій робочій зоні. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наук. праць. ЖДТУ*. Житомир, 2011. Вип. 11. С. 92–107.
10. Криворучко Д. В., Залога В. О. Пат. 45759, Україна. *Спосіб вимірювання малого радіуса сполучення площин*, 2002.
11. Джулий Д. Ю. *Підвищення якості багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при магнітно-абразивному обробленні в кільцевій ванні: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01*. Київ, 2014. 175 с.
12. Олиker В. Е. *Порошки для магнітно-абразивної обробки і износоустойчивых покрытий*. Москва: Металлургия, 1990. 176 с.
13. Барон Ю. М. *Магнітно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов*. Ленинград: Машиностроение, 1986. 176 с.
14. Степанов О. В. *Исследование процесса формирования магнітно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей*

- сложной геометрической формы: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.06. Киев, 1997. 158 с.
15. Внуков Ю. М., Залог В. О. *Зношування і стійкість різальних лезових інструментів: навчальний посібник*. Суми: СумДУ, 2010. 243 с.

References (transliterated)

1. Maiboroda V. S., Slobodianiuk I. V., Dzhulii D. Yu. *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detaley slozhnoy formy* [Magneto-abrasive machining of parts with complex shape]. Zhytomyr: PP "Ruta" Publ., 2017. 272 p.
2. Geichuk V. M. *Syntezy kinematyky protsesu mahnitno-abrazivnoyi obrobky v kil'tsevyi vanni: dis. ... d-ra. tekhn. nauk 05.03.01* [Synthesis of kinematics of the process of magnetic-abrasive machining in the ring bath. Dr. eng. sci. diss]. Kiev, 2012. 472 p.
3. Maiboroda V. S. *Osnovy stvorennia i vykorystannya poroshkovoho mahnitno-abrazivnoho instrumentu dlya finishnoyi obrobky fazonnykh poverkhon': dis. ... d-ra. tekhn. nauk: 05.03.01* [Basics of creating and using powder magnetic abrasive tool for finishing shaped surfaces. Dr. eng. sci. diss]. Kiev, 2001. 404 p.
4. Tkachuk I. V. *Formuvannya mahnitno-abrazivnoho instrumentu zi stabil'nymy vlastyvostyamy v robochykh zazorakh kil'tsevoho typu: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01*. [Formation of magneto-abrasive tool with stable properties in the ring-type working gaps. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kiev, 2015. 164 p.
5. Byelyayev O. *Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung: Phd-Thesis*, Otto von Guericke, Magdeburg, Germany, 2008. 150 p.
6. Klimov O. *Magnet-Abrasive-Bearbeitung von Werkzeuge aus WC-Hartmetall. Phd-Thesis*, Otto von Guericke. – Magdeburg, Germany, 2014. – 159 p.
7. Maiboroda V., Karpuschewski B., Klymov O. *Analyse von Prozessbedingungen auf der Werkzeugschneidkanten während der magnetabrasiven Bearbeitung von Schaftfräsern aus Hartmetall mit ihren positionierungen in Ringförmigen Arbeitszonen. Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Engineering and Mechanical Engineering*. Donetsk, Vol. 1 (10), pp. 28 – 35.
8. Maiboroda V. S., Geichuk V. M., Dzhulii D. Yu., Tkachuk I. V. *Sposib mahnitno-abrazivnoho obroblennia* [Method of magnetic abrasive machining]. Patent UA, no. 104328, 2014/
9. Dzhulii D. Yu., Maiboroda V. S., Tkachuk I. V., Geichuk V. M. *Formuvannya mahnitno-abrazivnoho instrumentu pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni dohomirnykh detaley u kil'tsevyi robochii zoni* [Formation of magnetic-abrasive tool for magnetic-abrasive finishing of long-measuring parts in a ring-type working area]. *The processes of mechanical processing in machine building*. Zhytomyr State Technological University. Zhytomyr, 2011 vol. 11, pp. 92–107.
10. Kryvoruchko D. V., Zaloha V. O. *Sposib vymiryuvannya maloho radiusa spoluchennya ploschyn* [Method of measuring a small radius of conjugation of the planes of the object]. Patent UA, no. 45759, 2002.
11. Dzhulii D. Yu. *Pidvyshchennia yakosti bahatohrannykh neperetochuvanykh tverdospalvnykh plastyn pry mahnitno-abrazivnomu obroblenni v kil'tsevyi vanni: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.03.01*. [Increasing quality of multisided not sharpened hard-alloy plates by using magneto-abrasive machining in ring-type working area. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kiev, 2014. 175 p.
12. Oliker V. E. *Poroshki dlya mahnitno-abrazivnoyi obrabotki i iznosostoykikh pokrytyi* [Powders for magnetic-abrasive machining and wear-resistant coatings]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 176 p.
13. Baron Yu. M. *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdelii i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1986. 176.
14. Stepanov O. V. *Issledovaniye protsesa formirovaniya magnitno-abrazivnogo poroshkovogo instrumenta dlya obrabotki detaley slozhnoy geometricheskoy formy: dis. ... kand. tekhn. nauk 05.16.06*. [Study of the formation process magnetic-abrasive powder tools for processing details of complex geometric form. Candidate eng. sci. diss.]. Kiev, 1997. 158 p.
15. Vnykov Yu. M., Zaloha Viliam O. *Znoshuvannya i stijkist rizalnykh lezovykh instrumentiv* [Wear and durability of cutting tools]. SumDU Publ., 2010. 243 p

Надійшла (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Майборода Віктор Станіславович (Майборода Виктор Станиславович, Maiboroda Viktor Stanislavovich)

– доктор технічних наук, професор, професор кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; GOOGLE SCHOLAR: <https://scholar.google.com.ua/citations?user=ZK14ByQAAAAJ&hl=uk>; e-mail: maiborodavs@gmail.com

Слободянюк Іванна Валентинівна (Слободянюк Иванна Валентиновна, Slobodianiuk Ivanna Valentynivna) – кандидат технічних наук, асистент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-2691>; e-mail: ivannavalentinovna@gmail.com

Джулій Дмитро Юрійович (Джулий Дмитрий Юрьевич, Dzhulii Dmytro Yuriyovich) – кандидат технічних наук, асистент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8863-626X>; e-mail: dmytro.dzhulii@gmail.com

Тарган Дмитро Валентинович (Тарган Дмитрий Валентинович, Tarhan Dmytro Valentynovich) – аспірант кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; e-mail: tarakan.com@ukr.net

О.Ю. ПРИХОДЬКО, С.Е. СЛИПЧЕНКО, Ф.М. ЕВСЮКОВА, Е.В. БАСОВА, М.С. ИВАНОВА

ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ АГРЕГАТИРОВАННЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

Использование структурного синтеза конечных автоматов, а именно автомата Мили, при осуществлении управления сложными технологическими системами. Осуществление перехода от математической модели конечного автомата к его функциональной логической схеме, которая является основой для последующей аппаратной реализации автомата, производится на основе технического задания при определении конкретных автоматов. Рассматриваемая агрегатированная технологическая система включает в себя обрабатывающий центр и обслуживается конвейерной системой и роботами-манипуляторами. Построена функциональная логическая схема синтезируемого автомата.

Ключевые слова: конечные автоматы, моделирование, алгоритм, диаграмма Вейча, структурный синтез, программируемые логические контроллеры, автомат Мили, автомат Мура, триггеры, логические элементы.

О.Ю. ПРИХОДЬКО, С.Е. СЛИПЧЕНКО, Ф.М. ЕВСЮКОВА, Е.В. БАСОВА, М.С. ИВАНОВА ПИТАННЯ УПРАВЛІННЯ АГРЕГАТОВАНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ СИСТЕМАМИ НА ОСНОВІ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ КІНЦЕВИХ АВТОМАТІВ

Використання структурного синтезу кінцевих автоматів, а саме автомата Милі, при здійсненні управління складними технологічними системами. Здійснення переходу від математичної моделі кінцевого автомата до його функціональної логічної схеми, яка є основою для подальшої апаратної реалізації автомата, робиться на основі технічного завдання при визначенні конкретних автоматів. Дана агрегатована технологічна система включає оброблювальний центр і обслуговується конвеєрною системою і роботами-маніпуляторами. Побудована функціональна логічна схема автомата, що синтезується.

Ключові слова: кінцеві автомати, моделювання, алгоритм, діаграма Вейча, структурний синтез, програмовані логічні контроллери, автомат Милі, автомат Мура, триггери, логічні елементи.

O. PRIHODKO, S. SLIPCHENKO, F. YEVSUKOVA, Ye. BASOVA, M. IVANOVA CONTROL QUESTIONS OF THE AGGREGATED TECHNOLOGICAL SYSTEMS ON THE BASIS OF THE STRUCTURAL SYNTHESIS OF FINITE AUTOMATA

Use of structural synthesis of eventual automats, namely automat of Mile, during realization of management by the difficult technological systems. Realization of transition from the mathematical model of eventual automat to his functional logical diagram that is basis for subsequent hardware representation of automat, produced on the basis of requirement specification at determination of certain automats. The examined paclaged technological system plugs in itself a processing center and served by the pipeline system and robots-manipulators. The functional logical diagram of the synthesized automat is built.

Keywords: eventual automats, design, algorithm, diagram of Veitch, structural synthesis, logical pios, automat of Mile, Moore automaton, logical elements.

Введение. Структурный синтез конечных автоматов осуществляется на базе структурной теории автоматов, в которой в отличии от абстрактной теории производится учет большого числа свойств реально существующих цифровых автоматов. Тогда как абстрактный автомат представляет собой математическую модель проектируемого устройства, в структурном автомате учитывается структура входных и выходных сигналов, а также внутренняя структура автомата на уровне структурных схем.

Главной задачей структурной теории автоматов является нахождение общих приемов построения структурных схем автомата на основе композиции элементарных автоматов, принадлежащих к заранее заданному конечному числу типов.

Целью данной статьи является осуществление перехода от математической модели конечного автомата агрегатированной технологической системы к его функциональной логической схеме, которая является основой для последующей аппаратной реализации автомата с помощью структурного синтеза.

Постановка проблемы. Задачей структурного синтеза конечных автоматов является создание такой композиции некоторого множества автоматов, называемых элементарными, чтобы полученный автомат был эквивалентен заданному. Эта задача имеет

решение, если система элементарных автоматов структурно полна. Осуществление перехода от математической модели конечного автомата к его функциональной логической схеме, которая является основой для последующей аппаратной реализации автомата, производится на основе технического задания при определении конкретных автоматов (например, обрабатывающий центр или силовой агрегат), для управления сложными технологическими системами, каковыми и являются производственные автоматические линии.

Алгоритм структурного синтеза

Исходные данные:

- 1) математическая модель конечного автомата Мили или Мура в виде взвешенного орграфа переходов либо таблицы переходов/выходов, полученная в результате абстрактного синтеза КА;
- 2) набор элементарных автоматов;
- 3) набор логических элементов, образующих базис и реализующих функционально полную систему булевых функций. Требуется построить функциональную логическую схему автомата в результате поэтапного выполнения алгоритма структурного синтеза КА.

Алгоритм структурного синтеза рассмотрим на конкретном примере. Пусть автомат Мили задан

графом переходов (рис. 1). Автомат представляет собой элемент модели управления агрегированной технологической системой, содержащей: S_1 – накопитель заготовок, S_2 – робот-манипулятор, S_3 – транспортная система, S_4 – робот-манипулятор на позиции обработки, S_5 – обрабатывающий центр, S_6 – промежуточный накопитель заготовок, S_7 – робот-манипулятор и S_8 – накопитель деталей.

Система счисления: двоичная. Элементарные автоматы: синхронные RS-триггеры, синхронные D-триггеры. Логический базис: конъюнкция, дизъюнкция, отрицание.

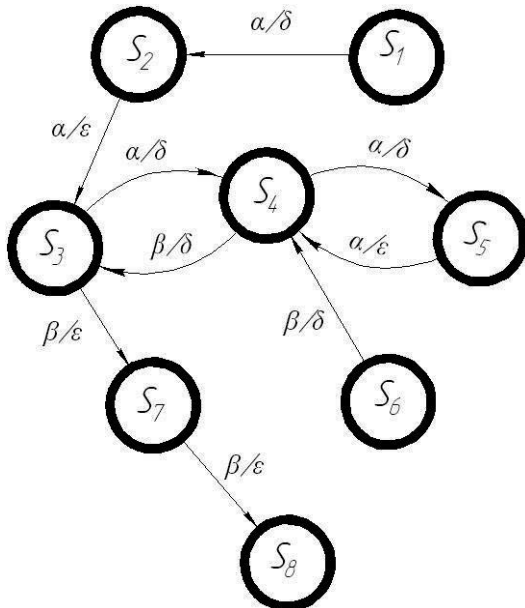


Рис. 1 – Взвешенный орграф переходов заданного конечного автомата

Имеем: $X = \{\alpha, \beta\}$; $Y = \{\delta, \epsilon\}$; $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8\}$

Этап 1. Кодирование входного алфавита. Присваиваем логические значения элементам множества X . Пусть $\alpha = 0$, $\beta = 1$. **Этап 2.** Кодирование выходного алфавита. Аналогично поступаем с элементами множества Y . Пусть $\delta = 0$, $\epsilon = 1$. Так как условием задачи оговорена двоичная система счисления, и множество как входных, так и выходных сигналов равно $\{0, 1\}$, будем считать, что вход и выход автомата одноразрядные и представлены булевыми переменными – x и y соответственно.

Этап 3. Кодирование состояний автомата.

1). Определяем разрядность кода L – минимальное количество элементарных автоматов или, иначе говоря, разрядность памяти автомата. Так как система счисления двоичная, то

$$L = \log_2 |S|,$$

где $|S|$ – мощность множества состояний.

Поскольку в данном примере $|S| = 8$, то $L = 3$. Линейка памяти автомата трехразрядная, то есть память строится на трех триггерах.

2). Определяем двоичный код каждого состояния автомата. Существует множество алгоритмов кодирования состояний, например, противогоночное,

экономичное, соседнее кодирование и ряд других. В случае противогоночного кодирования стремятся к тому, чтобы в каждый дискретный момент времени, по возможности, переключался только один разряд. Это позволяет избежать ложных срабатываний элементов памяти из-за гонок (критических состязаний) в комбинационной схеме. Такой способ актуален для асинхронных схем. Обоснование эффективности противогоночного кодирования относится к давним разработкам – периода элементной базы малой степени интеграции. В современных системах время срабатывания триггера мало отличается от времени задержки распространения сигнала в логическом элементе и большее значение имеют задержки в линиях связи (слоях металлизации на кристалле), значительно выгоднее проектировать синхронный автомат, не заботясь о противогоночном кодировании, требующем дополнительных аппаратных затрат.

Воспользуемся одним из возможных алгоритмов кодирования, сочетающим достоинства экономичного, соседнего и противогоночного методов.

Шаг 1. Нулевой код сопоставляем состоянию, вершина которого имеет наибольшую полустепень захода, то есть среди всех вершин графа ей инцидентно наибольшее количество входящих дуг.

Шаг 2 – итерационный. Находим состояние, наиболее связанное с ранее закодированными. Назовем это состояние текущим. Из всех свободных кодовых комбинаций выбираем ту, для которой минимальна сумма кодовых расстояний между ней и существующими кодами состояний, смежных текущему. Кодовым расстоянием d между кодовыми комбинациями i и j одинаковой разрядности называется число различных разрядов в i и j . Кратность связей учитываем введением поправочного коэффициента $k_{св}$. Например, если две вершины графа связаны парой дуг, то $k_{св} = 2$. Очевидно, число итераций шага 2 равно $|S| - 1$. Рассмотрим применение сформулированного алгоритма к кодированию состояний данного конкретного автомата.

Шаг 1. Наибольшее количество входящих дуг на графе переходов инцидентно вершине s_4 . (полустепени захода: $p^+(s_1)=p^+(s_6)=0$, $p^+(s_2)=p^+(s_5)=p^+(s_7)=p^+(s_8)=1$, $p^+(s_3)=2$, $p^+(s_4)=3$.) Состоянию s_4 присваиваем нулевой код: $s_4 = 000$.

Шаг 2. Итерация 2.1. Вершины s_3, s_5, s_6 связаны с вершиной s_4 каждая одной дугой. Не имеет значения, какое из состояний предпочесть. Выбираем s_3 . Очевидно, код s_3 должен содержать единицу в любом разряде, обеспечивая кодовое расстояние

$$d_{34} = 1. \text{ Пусть } s_3 = 001.$$

Итерация 2.2. Наибольшее количество дуг на графе переходов инцидентно вершине s_5 .

Рассчитываем кодовые расстояния **S5** (табл. 1).

Поскольку вершины s_4 и s_5 связывают две дуги, d_{54} берется с поправочным коэффициентом $k_{св} = 2$. Наименьшим значением суммы кодовых расстояний обладают комбинации 010 и 100. Предпочтение можно отдать любой из них. Пусть $s_5 = 010$.

Таблица 1 – Расчетные значения кодовых состояний S_5

Свободные комбинации	$2d_{54}$
010	$2*1=2$
011	$2*2=4$
100	$2*1=2$
101	$2*2=4$
110	$2*2=4$
111	$2*3=6$

Итерация 2.3. Подмножество закодированных вершин: $\{s_3, s_4, s_5\}$. Число связей для s_1 – одна, для s_2 – две, для s_6 – одна, для s_7 – две, для s_8 – одна; выбор s_2 или s_7 равновероятный. Кодуем состояние s_2 :

Рассчитываем кодовые расстояния S_2 (табл.2)

Таблица 2 – Расчетные значения кодовых состояний S_2

Свободные комбинации	d_{23}
011	1
100	2
101	1
110	3
111	2

Наименьшим значением суммы кодовых расстояний обладают комбинации 011 и 101. Предпочтение можно отдать любой из них.

Пусть $s_2 = 011$.

Итерация 2.4.

Теперь кодируем состояние s_7 :

Рассчитываем кодовые расстояния S_7 (табл.3).

Таблица 3 – Расчетные значения кодовых состояний S_7

Свободные комбинации	d_{73}
100	2
101	1
110	3
111	2

Как видно $s_7 = 101$.

Итерация 2.5.

Теперь кодируем состояние s_1 :

Рассчитываем кодовые расстояния S_1 (табл.4).

Таблица 4 – Расчетные значения кодовых состояний S_1

Свободные комбинации	d_{12}
100	3
110	2
111	1

Исходя из наименьшего кодового расстояния $s_1 = 111$.

Итерация 2.6.

Аналогично определяем значение s_6

Рассчитываем кодовые расстояния S_6 (табл. 5)

Таблица 5 – Расчетные значения кодовых состояний S_6

Свободные комбинации	d_{64}
100	1
110	2

Принимаем расстояния $s_6 = 100$.

Некодированным осталось состояние s_8 . Ему присваиваем оставшуюся свободную комбинацию $s_8 = 110$.

Сведем полученные коды состояний автомата в общую таблицу (рис. 2). Обозначим разряды кода: Q_2, Q_1, Q_0 , где Q_0 – младший разряд.

Состояние	Код		
	Q_2	Q_1	Q_0
S_1	1	1	1
S_2	0	1	1
S_3	0	0	1
S_4	0	0	0
S_5	0	1	0
S_6	1	0	0
S_7	1	0	1
S_8	1	1	0

Рис. 2 – Результат кодирования состояний КА

Этап 4. Составление кодированной таблицы переходов/выходов автомата.

В таблицу переходов/выходов включаем:

а) для момента времени t – значения входного сигнала, обозначения и коды состояний, значения выходного сигнала;

б) для момента времени $t+1$ – обозначение и код состояния, в которое переходит автомат из данного состояния под воздействием соответствующего входного сигнала.

В правой части таблицы для каждого перехода $s_i \rightarrow s_j$ указываем, какие сигналы должны быть сформированы комбинационной схемой автомата и поданы на входы триггеров, чтобы в момент времени $t+1$ произошло требуемое переключение автомата.

Например, пусть в момент времени t автомат находится в состоянии S_4 . Под воздействием входного сигнала $x = 0$ в следующий момент времени автомат должен перейти в состояние S_3 , на переходе вырабатывается выходной сигнал $y = 1$:

$$S_4(Q_2 Q_1 Q_0 = 000) \xrightarrow{y=1(x=0)} S_3(Q_2 Q_1 Q_0 = 001)$$

Условием задачи оговорено применение синхронных RS- и D-триггеров. Реализуем разряды Q_2 и Q_1 , например, на RS-триггерах, а разряд Q_0 – на D-триггере. Для обеспечения указанного перехода значения сигналов на входах триггеров должны быть такими:

$$Q_2: 0 \rightarrow 0, S_2R_2 = 0\sim; Q_1: 0 \rightarrow 0, S_1R_1 = 01; Q_0: 0 \rightarrow 0, D_0 = 0. \text{ Фрагмент таблицы, отвечающий}$$

рассмотренному случаю, показан на рис. 3.

Время:		t					t+1				t(входы триггеров)					
x		S ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₀	y	S ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₀	S ₂	R ₂	S ₁	R ₁	D ₀	
0	·															
	·															
	·	4	0	1	0	1	1	0	0	0	0	~	0	1	0	
	·															

Рис.3 – Фрагмент кодированной таблицы переходов/выходов автомата для перехода S₄ → S₁ при x=0

Таким образом, строка таблицы соответствует конкретному переходу в автомате при выработке значения выходного сигнала, заданного алгоритмом функционирования КА. Количество строк полной таблицы такого формата, очевидно, равно числу всех переходов в автомате, то есть мощности множества дуг графа переходов. Однако в таблицу целесообразно включить и неиспользуемые кодовые комбинации, что может оказаться полезным при получении минимальных форм функций fu и fs на следующем этапе синтеза.

Полная двоичная кодированная таблица переходов/выходов автомата приведена на рис.4.

Строки таблицы упорядочены по возрастанию кодов состояний для каждого значения входного сигнала. Для удобства чтения столбцы таблицы, относящиеся к одному и тому же разряду памяти, выделены одинаковым цветом. Для справки в таблицу добавлены столбцы, соответствующие триггерам других типов: JK-триггеру для разряда Q1 и T-триггеру для разряда Q0. Знаком «~» обозначены как произвольные значения логических переменных, так и

позиции, несуществующие в данном КА.

Этап 5. Построение и минимизация функции выхода.

Областью определения функции выхода автомата Мили являются множество входных сигналов и множество состояний автомата. Поэтому для данного автомата выходной сигнал y выражается булевой функцией четырех аргументов:

$$y = f_y(x, Q_2, Q_1, Q_0).$$

Пользуясь аппаратом алгебры логики, можно представить функцию выхода в одной из совершенных нормальных форм – конъюнктивной или дизъюнктивной (СКНФ или СДНФ).

Таблицей истинности фактически является построенная таблица переходов/выходов (рис. 4.). Количество нулевых и единичных значений функции y в данном случае одинаково, поэтому предпочтение можно отдать СДНФ, учитывая доступность традиционных методов минимизации булевой функции, заданной в СДНФ. Получим:

$$y = \bar{x}\bar{Q}_2\bar{Q}_1Q_0 \vee \bar{x}\bar{Q}_2Q_1Q_0 \vee \bar{x}\bar{Q}_2\bar{Q}_1\bar{Q}_0xQ_2\bar{Q}_1\bar{Q}_0;$$

Таким образом, fu представлена в виде дизъюнкции пяти импликант, каждая ранга 4. Минимизацию функции целесообразно выполнить методом диаграмм Вейча (карт Карно): см. рис. 5

Значения y, отмеченные знаком «~» в таблице переходов/выходов, при необходимости могут быть доопределены до логической единицы и задействованы в процессе минимизации. Такое доопределение никак не влияет на картину истинностных значений функции.

Время:		t					t+1				t(входы триггеров)					Входы триггеров други типов			
x		S ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₀	y	S ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₀	S ₂	R ₂	S ₁	R ₁	D ₀	I ₁	K ₁	T ₀	
0	·	3	0	0	0	0	4	0	1	0	0	~	1	0	0	1	~	0	
	·	2	0	0	1	1	3	0	0	0	0	~	0	~	0	0	~	1	
	·	4	0	1	0	0	5	0	1	1	0	~	~	0	1	~	0	1	
	·	5	0	1	1	1	4	0	1	0	0	~	~	0	0	~	0	1	
	·	~	1	0	0	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	·	1	1	0	1	0	2	0	0	1	0	1	0	~	1	0	~	~	0
	·	~	1	1	0	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	·	~	1	1	1	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
1	·	3	0	0	0	1	7	1	0	0	1	0	0	~	0	0	~	~	0
	·	~	0	0	1	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	·	4	0	1	0	0	3	0	0	0	0	~	0	1	0	~	1	0	
	·	~	0	1	1	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	·	7	1	0	0	1	8	1	1	1	~	0	1	0	1	1	1	~	1
	·	~	1	0	1	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~
	·	6	1	1	0	0	4	0	1	0	0	1	~	0	0	~	0	0	
	·	~	1	1	1	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~

Рис. 4 – Полная кодированная таблица переходов/выходов автомат

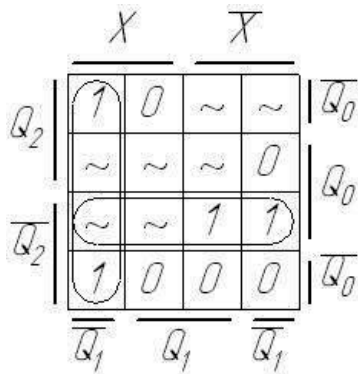


Рис. 5 – Диаграмма Вейча для функции выхода

Причина в том, что двоичные наборы аргументов, соответствующие $y = \langle \sim \rangle$, в процессе функционирования автомата не формируются. Иными словами, в данном автомате таких двоичных комбинаций не существует. Участие же соответствующих им импликант в минимизации дает более сокращенный вид ДНФ, что, в свою очередь, приводит к экономии аппаратных средств при покрытии функции логическими элементами. На диаграмме Вейча ячейки для этих импликант содержат тот же знак «~».

В итоге минимальная ДНФ функции выхода имеет вид:

$$y_{\min} = x\bar{Q}_1 \vee \bar{Q}_2 Q_0;$$

Этап 6. Получение и минимизация функций возбуждения ЭА.

Совокупность функций возбуждения триггеров реализует функцию переходов автомата fs. Поскольку $s(t+1) = fs(x, s(t))$, то в общем случае каждая функция возбуждения есть функция двух множественных аргументов:

$$f_{ir}^i = f^i(\{x_1, x_2, \dots, x_p\}, \{Q_{L-1}, Q_{L-2}, \dots, Q_0\});$$

$$i = \bar{1}, k,$$

где k – суммарное число информационных входов триггеров, составляющих линейку памяти автомата, L – ее разрядность, p – число входных переменных.

В данном случае k = 5, L = 3, p = 1. Для удобства обозначим каждую из функций возбуждения так же, как обозначен соответствующий вход триггера: S2, R2, S1, R1, D0. Запишем СДНФ для каждой функции согласно таблице переходов/выходов (см. рис. 4):

$$S_2 = x\bar{Q}_2\bar{Q}_1\bar{Q}_0;$$

$$R_2 = \bar{x}Q_2\bar{Q}_1Q_0 + xQ_2Q_1\bar{Q}_0;$$

$$S_1 = \bar{x}\bar{Q}_2\bar{Q}_1\bar{Q}_0 + xQ_2\bar{Q}_1\bar{Q}_0;$$

$$R_1 = x\bar{Q}_2Q_1\bar{Q}_0;$$

$$D_0 = \bar{x}\bar{Q}_2Q_1\bar{Q}_0 + \bar{x}Q_2\bar{Q}_1Q_0 + xQ_2\bar{Q}_1\bar{Q}_0;$$

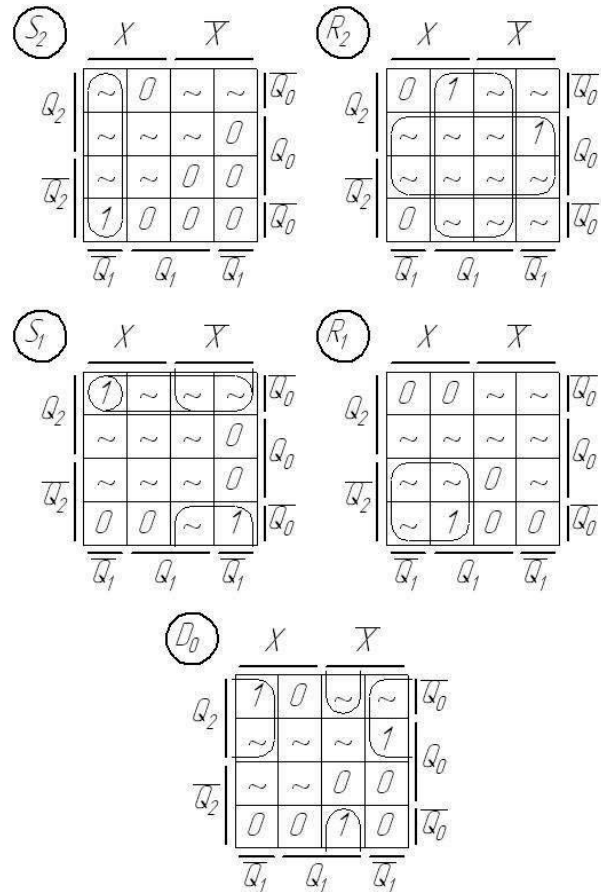


Рис. 6 – Минимизация функции возбуждения триггеров автомата

В итоге минимизации имеем:

$$S_{2\min} = x\bar{Q}_1;$$

$$R_{2\min} = Q_0 + Q_1;$$

$$S_{1\min} = \bar{x}\bar{Q}_0 + Q_2\bar{Q}_0;$$

$$R_{1\min} = x\bar{Q}_2;$$

$$D_{0\min} = \bar{x}Q_1\bar{Q}_0 + Q_2\bar{Q}_1;$$

Этап 7. Построение функциональной логической схемы автомата. Функциональная логическая схема синтезированного автомата приведена на рис. 7. Слева от линейки триггеров размещена комбинационная схема, реализующая функцию переходов автомата, справа от шины – комбинационная схема, обеспечивающая функцию выходов.

Выводы

В результате структурного синтеза осуществлен переход от математической модели конечного автомата к его функциональной логической схеме, которая является основой для последующей аппаратной реализации автомата. Следует заметить, что в случае исходной модели автомата Мура этапы синтеза остаются такими же, но при представлении функции выхода необходимо учесть, что ее единственным аргументом является вектор состояний автомата

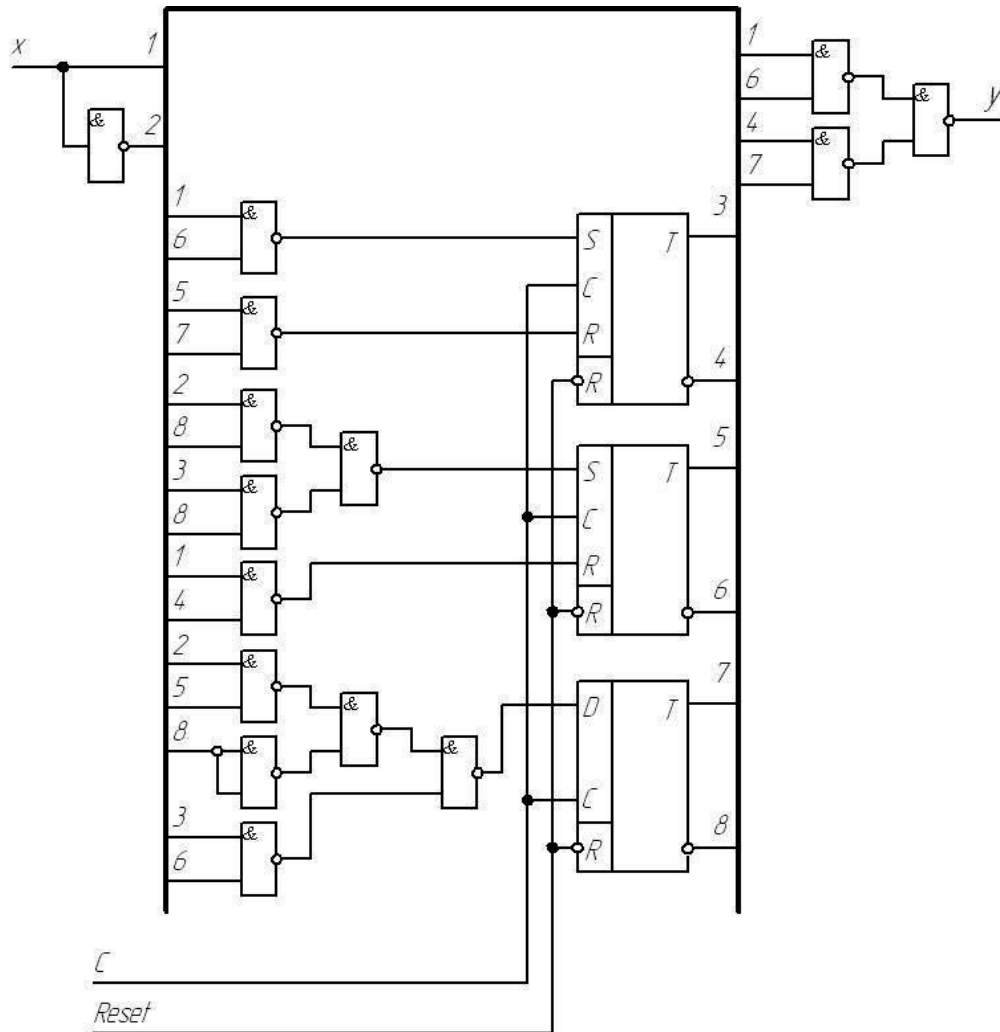


Рис. 7 – Функциональная логическая схема автомата

Использование конечных автоматов для управления сложными технологическими автоматизированными системами является целесообразным и обоснованным и позволяет повысить качество проектирования.

Список литературы

1. Брауэр В. Введение в теорию конечных автоматов; пер. с нем. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.
2. Белоусов А. И. Дискретная математика / А.И. Белоусов, С.Б. Ткачев. – М. МГТУ, 2006. – 744 с.
3. Джон Хопкрофт, Раджив Мотвани, Джеффри Ульман. Глава 8. Введение в теорию машин Тьюринга // Введение в теорию автоматов, языков и вычислений - Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. – М.: «Вильямс», 2002. – 528 с.
4. Букатова И.Л. Эволюционное моделирование и его приложения. – М.: Наука, 1979. – 134 с.
5. Mealy George H. A Method to Synthesizing Sequential Circuits. — Bell Systems Technical Journal. — P. 1045–1079.
6. Приходько О.Ю. Вопросы алгоритмизации работы технологических систем с использованием SWITCH-технологий / О.Ю. Приходько, А.Н. Ушаков, С.Е. Слипченко С.Е. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Технології в машинобудуванні» – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 66-70.
7. Пермяков А.А. Моделирование структур и систем управления циклом агрегатированных технологических систем на основе конечных автоматов. / А.А.Пермяков, О.Ю. Приходько, С.Е.

Слипченко С.Е. // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Технології в машинобудуванні» – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). С.74-80

Bibliography (transliterated)

1. Brauer V. *Vvedenie v teoriyu konechnih avtomatov*. [Introduction to the theory of eventual automata.] Moscow, Radio I svjaz. Publ. 1987. 392 p.
2. Belousov A.I., Tkachev S.B. *Diskretnaja matematika* [Discrete mathematics]. Moscow, MGTU, 2006. 744 p.
3. Hopcroft Djon, Motvani Radgiv, Ulman Djefrfy. Glava 8. *Vvedenie v teoriyu mashin Tjuringa/VVvedenie v teoriyu avtomatov, jazikov I vichislenij* [Introduction to the theory of machines of Turing // Introduction to the theory of automata, languages and calculations] Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. – Moscow, : «Wiljams», 2002. – 528 p.
4. Bukatova I.L. *Evolucionnoe modelirovanie I ego prilogenija* [Evolutional design and his applications.] Moscow, Nauka Publ., 1996. 352 p.
5. Mealy George H. A Method to Synthesizing Sequential Circuits. — Bell Systems Technical Journal. — P. 1045–1079.
6. Prihodko O.Y., Ushakov O.M., Slipchenko S.E. *Voprosi algoritimizacii raboti tehnologicheskijh sistem s ispolzovaniem SWITCH-tehnologii* [Questions of algorithmization of work of the technological systems with the use of SWITCH are technologies.]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 5, pp. 66–70.
7. Permyakov O.A., Prihodko O.Y., Slipchenko S.E. *Modelirovanije struktur I sistem upravlenija ciklom agregatirovanych tehnologicheskijh sistem na osnove konechnih avtomatov* [Design of

structures and control system by the cycle of the plagued technological systems on the basis of eventual automats.]. *Вісник НТУ "ХПІ"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 33, pp. 74–80.

Надійшла (received) 05.04.2018

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic description

Приходько Ольга Юріївна (Приходько Ольга Юрьевна, Olga Prihodko) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6452-0465>, e-mail: olmurakami@mail.ru.

Сліпченко Сергій Євгенович (Слипченко Сергей Евгеньевич, Slipchenko Serhii Yevgenovych) – старший викладач Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (057)-720-66-25, м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0593-3750>, e-mail: serg.slip@gmail.com.

Євсюкова Фатима Магометбіївна (Евсюкова Фатима Магометбиевна, Fatyma Yevsiukova) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; тел.: (057)-720-66-25, моб. +380979412299; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9764-4106>, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорежущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Іванова Марина Сергіївна (Иванова Марина Сергеевна, Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, доц. кафедри Технології машиностроєння і металорежущих станків, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», г. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; тел.: (057) 720-66-25; e-mail: ivanomaryna1@gmail.com.

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Е.И. СОКОЛ, С.С.ГНУЧИХ, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ENTERPRISE RESOURCE PLANNING (ERP) СИСТЕМ НА OPEN SOURCE ТЕХНОЛОГИЯХ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Анализируются возможности автоматизации процессов на машиностроительных предприятиях системами Enterprise Resource Planning (ERP) с использованием Open Source технологий. Раскрыты проблемы, которые могут решаться ERP системами. Проанализирована структура ERP систем. Рассмотрены её недостатки и достоинства. Предложена концепция использования микросервисов в проектировании ERP систем. Микросервисы - это сервисно - ориентированная архитектура, используемая для создания распределенных программных систем. Сделаны выводы об необходимости разработки отечественных ERP систем на Open Source технологиях. Одним из путей решения которых есть создание JavaMach cluster.

Ключевые слова автоматизация, enterprise resource planning, микросервисы, машиностроение, open source, данные, модули, JavaMach cluster.

С.С. ДОБРОТВОРСКИЙ, Е.И. СОКОЛ, С.С.ГНУЧИХ, Л.Г. ДОБРОВОЛЬСКАЯ

РОЗРОБКА І ВПРОВАДЖЕННЯ ENTERPRISE RESOURCE PLANNING (ERP) СИСТЕМ НА OPEN SOURCE ТЕХНОЛОГІЯХ В МАШИНОБУДІВНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Аналізуються можливості автоматизації процесів на машинобудівних підприємствах системами Enterprise Resource Planning (ERP) з використанням Open Source технологій. Розкрито проблеми, які можуть вирішуватися ERP системами. Проаналізовано структуру ERP систем. Розглянуто її недоліки і переваги. Запропоновано концепцію використання микросервісів в проектуванні ERP систем. Микросервіси - це сервісно - орієнтована архітектура, яка використовується для створення розподілених програмних систем. Зроблено висновки про необхідність розробки вітчизняних ERP систем на Open Source технологіях. Одним із шляхів вирішення яких є створення JavaMach cluster.

Ключові слова Ключові слова: автоматизація, enterprise resource planning, микросервіси, машинобудування, open source, дані, модулі, JavaMach cluster.

S. DOBROTVORSKIY, Ye. SOKOL, S. GNYSHYKH, L. DOBROVOLSKA

DEVELOPMENT AND INTRODUCTION OF ENTERPRISE RESOURCE PLANNING (ERP) SYSTEMS ON OPEN SOURCE TECHNOLOGIES IN MACHINE-BUILDING ENTERPRISES

The possibilities of process automation in the machine-building enterprises Enterprise Resource Planning (ERP) systems using Open Source technologies. Problems that can be solved by ERP systems are disclosed. The structure of ERP systems is analyzed. Its shortcomings and advantages are considered. The concept of using microservices in the design of ERP systems is proposed. Microservices are a service-oriented architecture used to create distributed software systems. Conclusions are drawn about the need to develop domestic ERP systems on Open Source technologies. One way to solve these problems is to create a JavaMach cluster.

Keywords: automation, enterprise resource planning, microservices, engineering, open source, data, modules, JavaMach cluster.

Введение. Каждое предприятие ставит перед собой определённые цели. Эти цели и определяют успешность предприятия в современных реалиях. Это может быть оптимизация и снижение затрат, увеличение своей доли на рынке, обеспечение необходимо уровня рентабельности, повышение качества продукции и т.д. На пути к этому компании сталкиваются с различными проблемами:

- сложность согласования действия различных структурных подразделений;
- отсутствие единого информационного пространства для работы каждого сотрудника;
- неполный анализ эффективности систем;
- производственные проблемы;
- финансово-экономические проблемы;
- проблемы маркетинга, рекламы и сбыта;
- недостаток знаний, опыта у персонала;
- отраслевые специфики деятельности различных предприятий.

Решение данных проблем для современных машиностроительных предприятий мы видим в:

- автоматизации всех процессов, протекающих на предприятии;
- использование многомодульных ERP систем, построенных на базе Open Source (открытое программное обеспечение) технологий;

- применение микросервисов в таких системах.

В данной статье мы проанализируем, возможности автоматизации процессов, на машиностроительном предприятии, ERP системами с использованием Open Source технологий. Раскроем структуру ERP систем. Оценим их преимущества и недостатки. Проанализируем архитектурный подход построения микросервисов и возможность их внедрения в системы автоматизации.

Основная часть. Под автоматизацией мы понимаем не цель, а средство для достижения сформулированных результатов.

Система автоматизации не должна навязывать свои правила - она призвана поддерживать принятую на предприятии и отвечающую его потребностям технологию, развиваясь вместе с компанией и оставаясь актуальной независимо от увеличения масштабов работ [1].

ERP (Enterprise Resource Planning) - организационная стратегия интеграции производства и операций, управления трудовыми ресурсами, финансового менеджмента и управления активами, ориентированная на непрерывную балансировку и оптимизацию ресурсов предприятия посредством специализированного интегрированного пакета прикладного программного обеспечения, обеспечивающего общую модель данных и процессов для всех сфер деятельности [2-3].

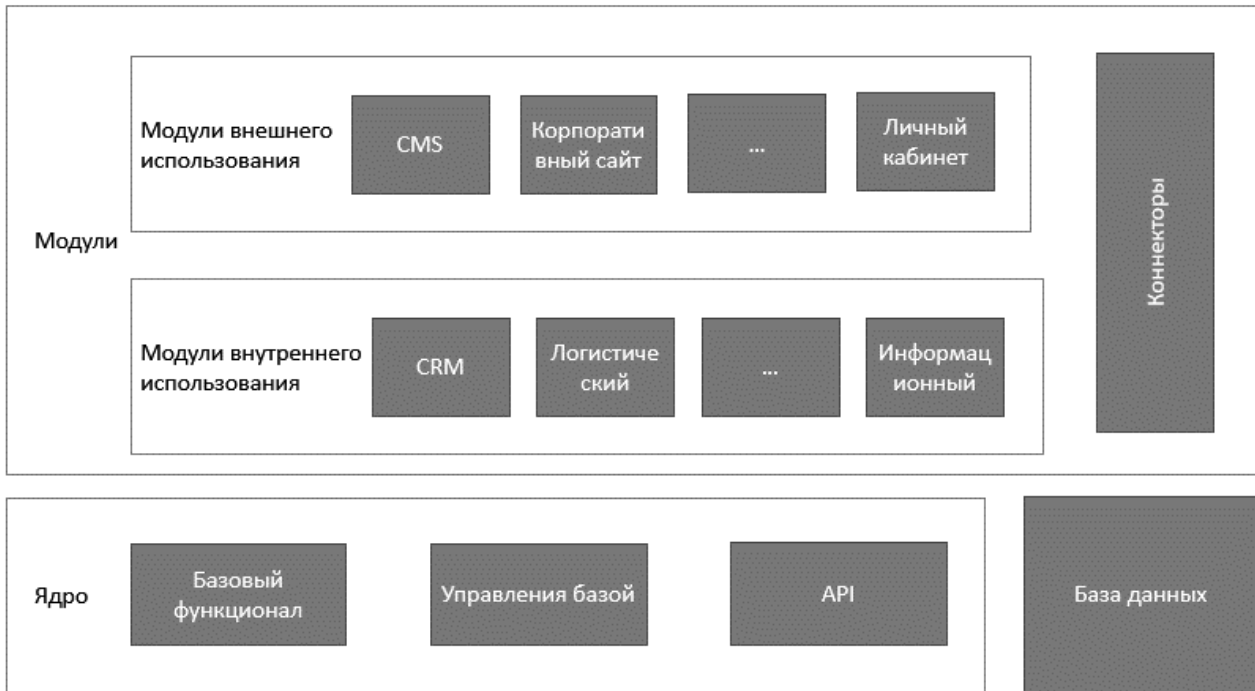


Рис. 1 – Структура ERP системы.

Понятие ERP ввёл аналитик Gartner Ли Уайли в 1990 году в исследовании о развитии MRP [4] Уайли спрогнозировал появление тиражируемых многопользовательских систем, обеспечивающих сбалансированное управление всеми ресурсами организации, не только относящихся к основной деятельности производственного предприятия, но и объединяющих посредством общей модели данных данные о производстве, закупках, сбыте, финансах, кадрах.

На наш взгляд ERP система это прежде всего информационная система, позволяющая обрабатывать и хранить критически важные объёмы данных для предприятия.

Это могут быть, как и данные отдела продаж, личные дела сотрудников, наработанный опыт предприятия. Это список можно продолжать бесконечно, но перечень важных данных вычисляются эмпирически для каждого конкретного предприятия.

Из чего же должна состоять современная ERP система? Схема интересов ERP систем изображена на рисунке 1.

Платформа. Программная среда, в которой будет производиться работа (рис. 1 Ядро). В ней задаются правила поведения и взаимодействия модулей, компонентов этой системы. Базовый функционал, перечень функций без которых не может работать система. В код платформы изменения может вносить только разработчик.

Данные. В эту категорию входят хранилище данных на сервере, программное обеспечение для работы с базами данных (SQL или любая альтернатива), инструменты для интерпретации и обработки данных и отправки их в программные

модули (рис. 1 База данных).

Модули. Компоненты, которые подключаются к платформе по мере необходимости (рис. 1 Модули). Все они работают с базой данных и применяют базовый функционал. В целом модули должны работать независимо друг от друга, и должны «бесшовно» подключаться и отключаться, если потребность в них исчезла. Данная парадигма отлично вписывается в концепцию микросервисов. И является - важной отличительной чертой ERP-системы. Модули могут подразделяться в свою очередь, на несколько типов:

- Модули внутреннего использования (рис. 1). Они предназначены для внутреннего использования в предприятиях. Это управление персоналом, управление складами, технический модуль (CAD/CAM/CAE), информационный модуль, логистический, управление снабжением и закупками. Модули можно подключать, отключать, настраивать.

- Модули внешнего использования (рис. 1). Они предназначены для взаимодействия с внешними пользователями, потенциальными и реальными клиентами компании, партнерами, пользователями продукции, поставщиками и покупателями. Это может быть интернет-магазин, личные кабинеты для поставщиков и покупателей на корпоративном сайте и тому подобные решения.

- Коннекторы (рис. 1). Готовые решения для связи со сторонними приложениями. Они позволяют интегрировать обмен данным, телефонию, почту, бухгалтерию. То есть с теми системами, которые обычно не входят в ERP, но уже используются в компании.

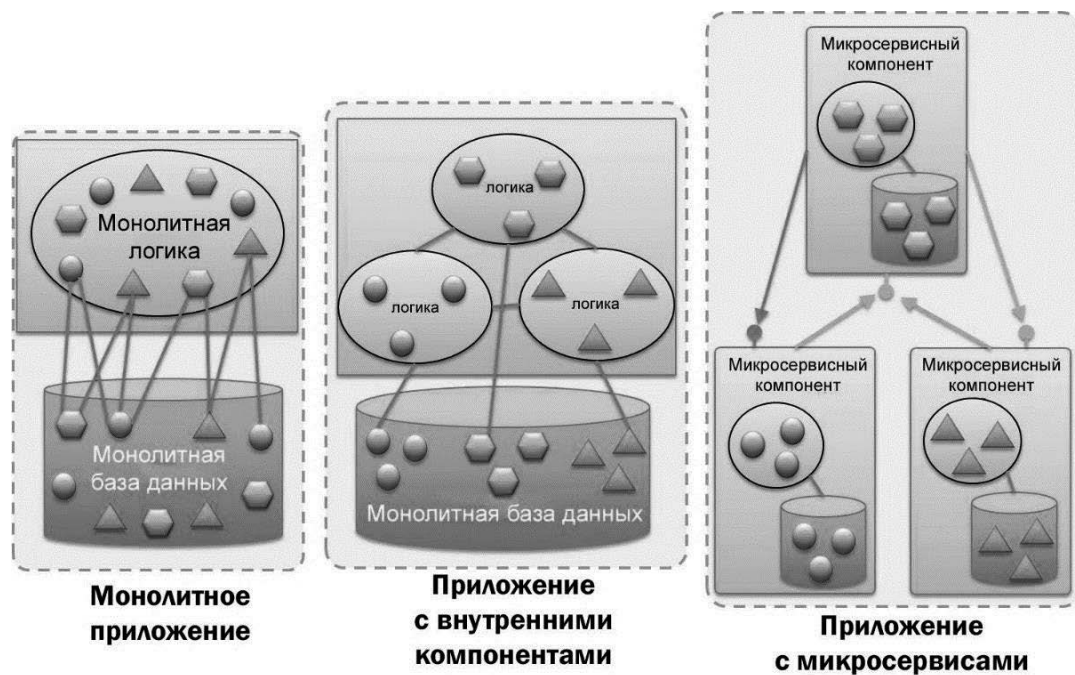


Рис. 2. – Сравнение монолитной структуры с микросервисами

Описанная выше структура характерна для ERP систем с логической точки зрения. Но на практике трудно реализовать многомодульность. И часто ERP-системы выделяют все модули действительно в отдельные продукты. Что противоречит концепции.

Поэтому мы предлагаем ставить эти модули на базе микросервисной архитектуры. Что же такое микросервисы?

Это современное представление сервис-ориентированной архитектуры (SOA), используемое для создания распределенных программных систем. Модули в архитектуре микросервисов взаимодействуют друг с другом для выполнения цели (рис. 2). Микросервисы - это архитектурный стиль, в котором крупные сложные программные приложения состоят из одного или нескольких меньших сервисов. Каждый из этих микросервисов сосредоточен на выполнении одной задачи, которая представляет собой маленькую функциональность бизнеса.

Любая архитектура, демонстрирующая следующие шесть принципов или характеристик, может быть помещена в зону архитектуры микросервиса:

- Система должна состоять из двух или более выполняющихся блоков или компонентов. Эти компоненты должны раскрывать свою функциональность как услуги. Каждый компонент должен служить бизнес-цели, а компоненты должны быть слабо связаны. Компоненты должны взаимодействовать друг с другом через предопределенные протоколы, такие как очереди сообщений.

- Системы должны быть языково агностическими. Один компонент может быть разработан на Java, а другой может быть разработан в

.NET. Решение о выборе технологической платформы для конкретной услуги не должно влиять на архитектуру приложения.

- Системы должны иметь децентрализованную базу данных. В идеале каждый компонент или микросервис должен иметь свою собственную базу данных, с которой взаимодействует только эта служба. Ни один другой компонент или служба не могут извлекать или изменять данные в этой базе данных.

- Каждый компонент системы должен быть внутренне связанным, независимым и саморазвертываемым. Он не должен зависеть от каких-либо других компонентов или ресурсов для работы или развертывания. Он должен иметь непрерывную интеграцию / непрерывное развертывание (CI / CD) для более быстрой доставки.

- Система должна иметь автоматическое тестирование на месте. Скорость - одна из наиболее желательных особенностей архитектуры микросервиса. В цикле сборки, тестирования и развертывания, если автоматическое тестирование не выполняется, оно не может соответствовать цели.

- Любой отказ компонента/службы должен быть изолирован. Отказ одной службы не должен сводить все приложение вниз. Если это не удается, оно не должно влиять на другие компоненты/службы. Должен быть установлен какой-то механизм отката отказа. Это означает, что если одна услуга выходит из строя, ее легко вернуть.

В целом архитектурный подход к проектированию микросервисов отлично вписывается в идею модульности ERP систем и может принести следующие преимущества в ней.

Гибкость и эффективность работы. Они могут создавать, разворачивать и тестировать его независимо

от других компонентов, используя намного более короткие итерационные циклы. Микросервис — всего лишь один из множества компонентов, поэтому для его разработки можно использовать наиболее подходящий для требуемой функциональности язык программирования или среду, а также оптимальный механизм устойчивости [6].

Масштабируемость: команда разработчиков микросервиса может масштабировать компоненты во время выполнения независимо от других микросервисов, тем самым обеспечивая эффективное использование ресурсов и оперативное реагирование на изменения нагрузки.

Устойчивость: Различные технологии, позволяют быстро отключать микросервисы в случае сбоев, без ущерба для других несвязанных функций. В то же время в реализациях микросервисов не применяется модель сохранения текущего состояния, что позволяет мгновенно перераспределить нагрузку и практически незамедлительно инициализировать новые среды выполнения.

В ERP системе очень четко разделены границы модулей. И отключение любого из них (кроме некоторых базовых возможностей) никак не повлияет на работу оставшихся. Если компания нацелена на максимальное соответствие постоянно меняющимся условиям рынка и потребностям клиентов, ей просто необходимо оперативный обмен данными между подразделениями и оперативность принятия управленческих решений.

Преимущества ERP систем.

Такие системы призваны помогать персоналу предприятия, взяв на себя решение определенных задач, среди которых:

- Повышение эффективности управления предприятием;
- Доступность данных. Один раз внесенные данные становятся доступны в рамках целой системы, при этом не требуются сверки, дополнительные согласования и проверки;
- Обеспечение надежного учета, контроля поступления и прозрачность расходования денежных средств и материальных ресурсов;
- Организация эффективного планирования и прогнозирования;
- Контроль работы сотрудников;
- Оперативный свод анализа деятельности всех подразделений предприятия;
- Повышение эффективности обмена данных между всеми подразделениями компании.

Недостатки ERP-систем.

Недостатки этих систем являются следствием их преимуществ.

Единая база данных и единая система порождают проблемы обеспечения безопасности данных. Так как в системе работают все подразделения и сотрудники компании, то и права доступа необходимо настроить для каждого свои. И если при использовании отдельных специализированных программ обычно требуется создать несколько уровней доступа (рядовой сотрудник, начальник подразделения), то система прав

доступа в ERP получается сложной. Здесь нужно настроить и доступ к модулям для разных подразделений, и внутри каждого отдела настроить иерархию [8].

Если по той или иной причине перестает работать ERP-система (отключается электричество или возникают другие проблемы на сервере), останавливается работа всей компании. А потому необходимо особо внимательно относиться к обеспечению надежности работы серверной части и своевременному техническому обслуживанию.

Стоимость внедрения ERP системы? Каждый проект внедрения автоматизированной системы управления предприятием уникален, а потому общих расценок на данное решение не существует. Однако мы можем проанализировать стоимость, исходя следующих фактов.

Общий бюджет на внедрение ERP складывается из следующих показателей:

- Цена самого программного продукта, типовое или отраслевое решение обойдется в разы дешевле уникального. Заграничные аналоги начинают свой ценник с 200 тысяч.

- Стоимость лицензий, крупные производители ERP систем продают лицензии для пользователей. Так предприятия стремясь оптимизировать затраты, закупают лицензии постепенно: сначала для ключевых пользователей, затем для всех остальных. Цена одной лицензии от 1.5 до 8 тыс. долларов.

- Цена аппаратного обеспечения, для поддержания работоспособности ERP как минимум требуется мощный сервер. Платформа, на которой будет работать ERP-система, может потребовать обновления серверов, покупки новых компьютеров и т. д. Цена сервера начинаться от 3 тыс. долларов.

- Стоимость поддержки ERP, в течение работы с ERP-системой, как правило, возникают различные проблемы, поэтому наличие службы поддержки для пользователей помогает оперативно решать данные вопросы. Сюда можно включать затраты на обучения персонала. Как мы видим заграничные системы очень дорогие и требуют постоянных инвестиций.

Выводы. В этой статье мы рассмотрели преимущества, которые может дать внедрение многомодульных ERP систем, построенных на Open Source технологиях. Рассмотрели максимально просто и без лишних технических подробностей структуру ERP систем. Анализ рынка показал, что такие системы очень дорогие и требуют ежемесячных выплат таким компаниям как SAP, Oracle.

Поэтому мы видим необходимость проводить разработки отечественных аналогов на Open Source технологиях. Одним из путей решения этой проблемы есть создание JavaMach cluster [1] и разработка этих систем на базе него. Применение микросервисов позволят ускорить и облегчить разработку. Позволяя разработчикам уделить больше внимания бизнес-логике, не отвлекаясь на инфраструктурные особенности среды, в которой эти приложения будут работать. Комбинация этих подходов позволит гибко решать проблемы, возникающие на

Список литературы

1. Сокол Е. И. JavaMach Cluster – единая платформа образования, науки и производства. *Сучасні технології в машинобудуванні Modern technologies in mechanical engineering: зб. наук. пр.* – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – вып. 12. – С. 3-4.
2. Hamilton S. *Maximizing your ERP system: a practical guide for managers*. McGraw-Hill, 2003. 350 p.
3. O'Leary, Daniel L. *Enterprise resource planning systems*. Cambridge University Press, 2000. 232 p.
4. Leon A. *Enterprise Resource Planning — 2nd*. New Dehli: McGraw-Hill, 2008. 500 p.
5. Wylie L. *A Vision of Next Generation MRP II*. Gartner Scenario, 1990. 300 p.
6. Andriole A., Stephen J. *Technology Due Dilligence*. L.: IGI Global, 2009. 402 p.
7. Turban E. Epharaim M. *Information Technology for Management, Transforming Organizations in the Digital Economy*. Massachusetts: John Wiley & Sons, 2009. 320 p.
8. Дніел О'Ліри *ERP - системи: вибор, впровадження, експлуатація. Сучасне планування і управління ресурсами підприємств* М.: Вершина, 2004. 356 с.
9. Jürgen B. *Produktionscontrolling und -management mit SAP® ERP: Effizientes Controlling, Logistik - und Kostenmanagement moderner Produktionssysteme, Ausgabe 4*. Springer-Verlag, 2016. 364 p.
10. Ganesh K. *Enterprise Resource Planning: Fundamentals of Design and Implementation*. Springer, 2014. 170 p.

1. Sokol E. I. JavaMach Cluster – edinaja platforma obrazovanija, nauki i proizvodstva. *Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni Modern technologies in mechanical engineering: zb. nauk. pr.* – Harkiv: NTU "HPI", 2017. – vyp. 12. – S. 3-4.
2. Hamilton S. *Maximizing your ERP system: a practical guide for managers*. McGraw-Hill, 2003. 392 p.
3. O'Leary, Daniel L. *Enterprise resource planning systems*. Cambridge University Press, 2000. 232 p.
4. Leon A. *Enterprise Resource Planning. — 2nd*. New Dehli: McGraw-Hill, 2008. 500 p.
5. Wylie L. *A Vision of Next Generation MRP II*. Gartner Scenario, 1990. 300 p.
6. Andriole, Stephen J. *Technology Due Dilligence*. L.: IGI Global, 2009. 402 p.
7. Turban E. Epharaim M. *Information Technology for Management, Transforming Organizations in the Digital Economy*. Massachusetts: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 320 p.
8. Djeniel O'Liri *ERP-sistemy: vybor, vnedrenie, jekspluatacija. Sovremennoe planirovanie i upravlenie resursami predpriyatija*. M.: Vershina, 2004. 356 c.
9. Jürgen B. *Produktionscontrolling undmanagement mit SAP® ERP: Effizientes Controlling, Logistik- und Kostenmanagement moderner Produktionssysteme, Ausgabe 4*. Springer-Verlag, 2016. 364 p.
10. Ganesh K. *Enterprise Resource Planning: Fundamentals of Design and Implementation*. Springer, 2014. 170 p.

Поступила (received) 05.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Доброворський Сергій Семенович (Доброворський Сергій Семенович, Sergey Dobrovorskiy) – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1223-1036>; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: sdobro50@gmail.com

Сокол Євгеній Іванович (Сокол Євген Іванович, Yevgen Sokol) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1960-3445>; тел +380-706-3213, E-mail sokol@kpi.kharkov.ua

Гнучих Сергій Сергєєвич (Гнучий Сергій Сергійович, Sergey Gnuchykh) – аспірант Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8549-5687>; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: gnuch4ix@mail.ru.

Добровольська Людмила Георгієвна (Добровольська Людмила Георгієвна, Ludmila Dobrovolska) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8318-8552>; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: Lyudmyla@ukr.net

О.А. ПЕРМЯКОВ, О.О. КЛОЧКО, Н.Р. ВЕСЕЛОВСЬКА, Ю.О. СИНИЦЯ

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ЗУБЧАСТИХ РЕЙОК ВАЖКИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

Розроблено математичну модель прогнозування показників якості поверхневого шару зубчастих рейок, що дозволяє управляти структурою і технологічними параметрами для забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих рейок, яка характеризується комплексним станом оброблених поверхонь з урахуванням геометричних параметрів, фізико-механічних властивостей і технологічних регламентів обробки. Розроблено методику визначення мінімальних значень кутів ковзання $\psi_{ск}$ при фрезеруванні зубів рейок дисковими фрезами для досягнення необхідної якості поверхневого шару зубчастих рейок, вираженого через коефіцієнт ефективності формоутворення $K_{фр}$.

Ключові слова: зуби, зубчасті рейки, технологічне забезпечення, математична модель, продуктивність обробки, поверхневий шар, показники якості, коефіцієнт ефективності формоутворення.

А.А. ПЕРМЯКОВ, А.А. КЛОЧКО, Н.Р. ВЕСЕЛОВСКАЯ, Ю.А. СИНИЦА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА ЗУБЧАСТЫХ РЕЕК ТЯЖЕЛЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Разработана математическая модель прогнозирования показателей качества поверхностного слоя зубчатых реек, позволяет управлять структурой и технологическими параметрами для обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых реек, которая характеризуется комплексным состоянием обрабатываемых поверхностей с учетом геометрических параметров, физико-механических свойств и технологических регламентов обработки. Разработана методика определения минимальных значений углов скольжения $\psi_{ск}$ при фрезеровании зубьев реек дисковыми фрезами для достижения требуемого качества поверхностного слоя зубчатых реек, выраженного через коэффициент эффективности формообразования $K_{фр}$.

Ключевые слова: зубья, зубчатые рейки, технологическое обеспечение, математическая модель, производительность обработки, поверхностный слой, показатели качества, коэффициент эффективности формообразования.

O. PERMYAKOV, O. KLOCHKO, N. VESELOVSKAYA, Yu. SYNITSYA

TECHNOLOGICAL MAINTENANCE OF INCREASE OF PARAMETERS OF ACCURACY AND QUALITY OF TOOTHED RAILS OF HEAVY DUTY CNC MACHINES

The mathematical model of prediction of quality indicators of the surface layer of gear rails is developed, which allows to control the structure and technological parameters for maintenance of operational properties of toothed rails, which is characterized by a complex state of treated surfaces taking into account geometrical parameters, physical-mechanical properties and technological regulations of processing. The method of determining the minimum values of slip angle $\psi_{ск}$ during milling of rails with disk drives is developed to achieve the required quality of the surface layer of gear rails, expressed in terms of the coefficient of efficiency of forming $K_{фр}$.

Keywords: gear, gear racks, technological maintenance, mathematical model, efficiency of processing, surface, parameters of quality, effectiveness ratio.

Постановка проблеми. Надійність і довговічність механізмів і машин у т.ч. із зубчастими рейковими передачами визначаються точністю виготовлення та експлуатаційними властивостями деталей [1]. Останні характеризуються станом поверхневого шару робочих поверхонь зубчастих рейкових передач і визначаються технологією їхнього виготовлення. Відсутність наукового підходу до забезпечення точності і призначенню параметрів стану робочих поверхонь зубчастих рейок приводить до необґрунтованого завищення вимог і подорожчання машин, що випускаються, без належного підвищення їхньої надійності. Несуча здатність і контактна взаємодія робочих поверхонь зубчастих рейок залежать не тільки від параметрів шорсткості, але і від стану поверхневого шару в цілому. З метою вивчення точності виготовлення і стану параметрів поверхневого шару необхідний комплексний науковий підхід із устанавленням системи параметрів поверхневого шару і можливістю їх технологічного і метрологічного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Важливим параметром забезпечення стабілізації процесу формоутворення є кількість зубів фрез, які одночасно знаходяться у зоні обробки. З урахуванням

вільного розміщення стружки в западині стружкової канавки при фрезеруванні сталі з глибиною різання t і подачею на зуб S_z найбільше число зубів фрези Z діаметром D визначається за формулою [1] $Z=0,2D/t^{0,5} \cdot S^{0,5}$ і для загальномашинобудівних нормативів регламентується в межах 6-14, що зумовлює одночасне перебування в зоні обробки 0-2 зуба фрези, що і є однією з причин дестабілізації процесу обробки, що в свою чергу негативно відбивається на якості поверхневого шару зубів, його експлуатційних властивостях, що підтверджується теоретичними і практичними дослідженнями [1,2,3].

Мета роботи – забезпечення вимог точності і якості поверхневого шару зубчастих рейок технологічними методами при максимальній продуктивності обробки і виключення негативного впливу технологічної спадковості в умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу

Моделюванню методу профільного формоутворення зубів рейок полягає у визначенні кута неузгодженості між зубами спарених дискових зуборізних фрез за умови, що функція приймає мінімальне значення [4].

Фрезерування зубів зубчастих рейок здійснюється

з використанням спарених дискових зуборізних фрез 1 і 2, які мають певний крок, кратний кроку, який нарізається на зубчастому виробі, при цьому кратність виражається цілим числом (рис. 1). У зоні обробки при зніманні металу постійно знаходиться три і більше зубів 3-5, при цьому передня поверхня зуба 5 фрези 2 розташовується між двома передніми поверхнями зубів 3 і 4 фрези 1. При виході із зони різання зуба 3 фрези 1 наступний зуб 4 фрези 1 входить в зону різання, але при цьому в зоні різання знаходиться зуб 5 фрези 2, розташований під певним кутом неузгодженості по відношенню до зуба фрези, який обумовлює стаціонарністю технологічних параметрів профільного формоутворення. Під час обробки зуби 3 і 4 фрези 1 і зуби 5 і 6 фрези 2 контактують з виробом 7. Кутівий крок між зубами фрез Δ , а найбільший кут контакту зуб фрези з оброблюваним виробом ψ_{max} . Крок між зубами спарених фрез модулем m виразимо $t = \pi \cdot m$, причому зуб фрез 1 і 2 мають у своєму розпорядженні при вигляді з торця під кутом неузгодженості $\beta_{опт}$ [2].

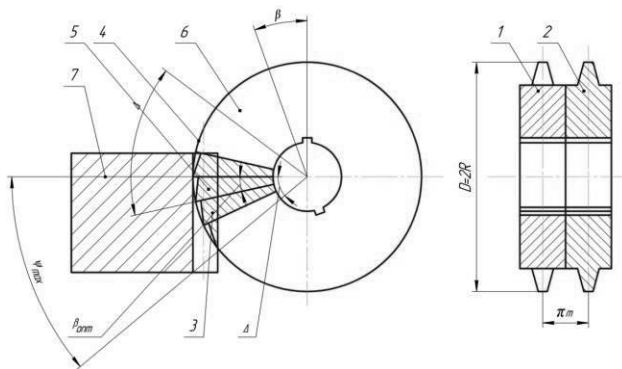


Рис. 1 - Синтез параметрів операції зубонарізування рейок спареними дисковими фрезами

На рис.1 представлена схема розташування зубів у зоні обробки і розташування спарених фрез дискових зуборізних фрез.

Сила різання при обробці впадини одним зубом у загальному виді може бути представлена вираженням

$$P_1 = C_1 \cdot S_z^{k+1} \cdot \sin^{k+1} \varphi \cdot \left[B + A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \cdot \left(R - \frac{R-2,25 \cdot m}{\cos \varphi} \right) \right], \quad (1)$$

$$\text{де } A_1 = C_1 \cdot S_z^{k+1}; \quad A_2 = \left[A_3 \cdot \sin^{k+1} \alpha \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\lambda^2}} \right];$$

$A_3 = 1$ при обробці лівого або правого профілю; $A_3 = 2$ при обробці лівого і правого профілів одночасно.

Вираз (1) запишемо у вигляді

$$P_1 = P_1(\psi) = A_1 \cdot \sin^{k+1} \varphi \cdot \left[B + A_2 \cdot A_3 \cdot \left(\frac{R \cdot \cos \varphi - (R - 2,25 \cdot m)}{\cos \varphi} \right) \right], \quad (2)$$

де B - ширина впадини зуба оброблюваної рейки 7.

Вираження (1) при відповідному значенні ширини западини B и коефіцієнта A_3 описує спосіб профільного формоутворення зубів коліс і рейок.

Сумарна сила різання при знаходженні в зоні різання двох або одного зубів однієї фрези при зміні кута контакту з нижче наведеною формулою

$$P(\psi) = \begin{cases} P_1(\psi) + P_1(\psi + \Delta), & \text{если } 0 \leq \psi \leq (\psi_{max} - \Delta) \\ P_1(\psi), & \text{если } (\psi_{max} - \Delta) \leq \psi \leq \Delta \end{cases}, \quad (3)$$

де $\Delta = \frac{360^\circ}{z}$ - кут між зубами 3 і 4 фрези 1 і відповідно між зубами 5 і 6 фрези 2;

$\psi_{max} = \arccos \left(1 - \frac{2,25 \cdot m}{R} \right)$ - найбільший кут контакту.

Результуюча сила різання $P_{заг}$ при використанні спарених фрез 1 і 2 з кутом неузгодженості β зубів фрези 2 щодо фрези 1 визначається функцією:

$$P_{заг} = P(\psi) + P(\psi + \beta), \quad (4)$$

де $P(\psi)$ - сила різання при обробці однією фрезою; $P(\psi + \beta)$ - сила різання при обробці 2-й фрезою, зуби якої розташовані по відношенню до зубів 1-ї фрези під кутом β при вигляді з торця, $P_{заг}$ - результуюча сила різання при використанні спарених фрез з кутом неузгодженості β зубів 2-ї фрези щодо зубів 1-ї фрези при вигляді з торця.

Зміна параметра $\beta_{опт}$ зубонарізування рейок при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення спареними фрезами показано на рис.2.

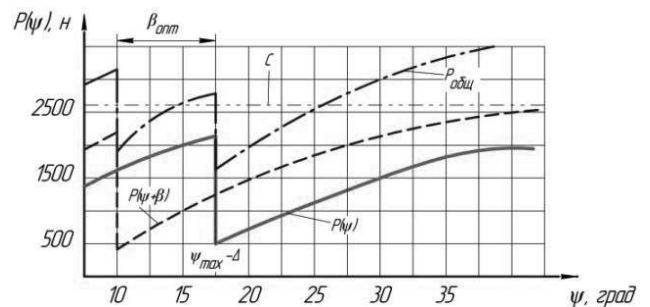


Рис. 2 - Зміна параметра $\beta_{опт}$ зубонарізування рейок при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення спареними фрезами

Середнє значення сили різання при обробці спареними фрезами з формули (3.3) і (3.4) визначається інтегральною функцією:

$$C = 2 \cdot \frac{1}{\Delta} \cdot \int_0^{\Delta} P(\varphi) d\varphi, \quad (5)$$

Знаходиться найменша відстань ρ_{min} між інтегральними функціями середньоквадратичного відхилення $P_{заг}$ від постійної C (5)

$$\rho_i = \sqrt{\int [P(\psi) + P(\psi + \beta) - C]^2 \cdot d\psi}, \quad (6)$$

в інтервалі зміни β от $0 \leq \beta \leq \Delta$, де інтервал $i=1, 2, \dots, N$ з кроком $h = \frac{\Delta}{N}$.

Серед отриманих значень ρ_i вибирається найменше ρ_{min} , яке відповідає оптимальному куту неузгодженості $\beta_{опт}$.

Інструмент може бути оснащений ріжучою частиною зі швидкорізальної сталі P6M5K5 (СНД), S6-5-2-5 (Німеччина), SKH55 (Японія) або марками твердого сплаву підгрупи застосування по ISO K10-K20 - MK8 (MC318), M10 - MF1 (MC3215), P15-P20 - MF2 (MC1466).

Оптимізація технологічного забезпечення геометричних параметрів стану поверхневого шару при профільному формоутворення зубів коліс і рейок здійснюється по куту неузгодженості $\beta_{опт}$, що відповідає найменшому значенню середньоквадратичного відхилення сили різання від її середнього значення [3].

При використанні трьох- і чотирирядних дискових зуборізних фрез кут між зубами сусідніх фрез також розраховується за розробленою методикою.

Відповідно до проведених дослідженнями з вивчення параметрів зубонарізування рейок і їх впливу на стабілізацію процесу формоутворення розглянуті залежності зміни оптимального кута неузгодженості $\beta_{опт}$ від оброблюваного модуля зубчастої рейки при різних технологічних режимах обробки.

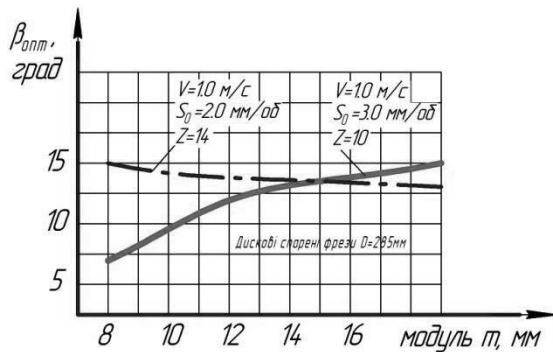


Рис. 3 - Залежність зміни оптимального кута неузгодженості $\beta_{опт}$ від оброблюваного модуля зубчастої рейки при різних технологічних режимах обробки

У процесі формоутворення при розгляді фрезерування як дискретного переміщення зуба фрези, кожна точка активної частини різального леза має свою траєкторію і цим самим визначає здатність поверхневих шарів інструменту чинити опір руйнуванню при сходженні стружки по передній поверхні і тертю ковзання по задніх поверхнях, а також при мікропереміщеннях, обумовлених впливом вібрацій в процесі обробки [4].

Геометрія зуборізних інструментів має форму, яка розраховується тільки в залежності від схеми зубонарізування без урахування зношування інструменту при експлуатації. Тому технологічна підготовка інструменту при забезпеченні стабілізації процесу формоутворення грає істотну роль для досягнення параметрів зубонарізування рейок.

Наявність зносу ріжучого інструменту призводить до зниження точності обробки зубчастих рейок, збільшення динамічних навантажень системи ВПД і зростання сил різання, що веде до зниження стійкості зубообробного інструменту, появи передчасних відмов.

В умовах сучасного рівня технології машинобудування необхідно управляти з великою ймовірністю процесами формоутворення, а значить, і забезпечити заданий знос інструменту, виходячи з умов точності обробки рейок.

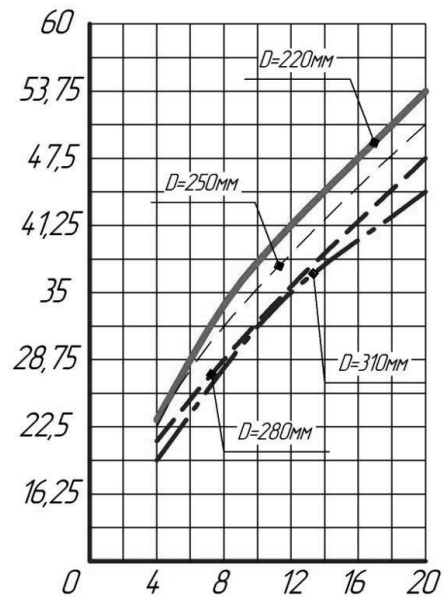


Рис. 4 - Зміна кута контакту зуба фрези з оброблюваною рейкою

При механічній обробці зубів рейок різанням зуборізними фрезами поверхневий шар піддається пластичній деформації і місцевим короточасним нагріванням. У цьому шарі виникають залишкові напруги, які мають значну величину.

Технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих рейок визначається рішенням двох завдань: вибір матеріалів рейок і призначення точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару, які забезпечували необхідні експлуатаційні властивості; вибір методу і встановлення режимів обробки, що забезпечують найбільш економічне отримання заданої точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару оброблених зубчастих рейок. Таким чином зносостійкість рейкових передач характеризується комплексним станом поверхонь тертя.

У відповідності зі сформованим поданням про процес приробки поверхонь зубчастих рейкових передач, одним з його результатів є утворення рівноважної шорсткості. Несуча здатність поверхні зубчастих рейок, їх коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу при терті ковзання поряд з шорсткістю, визначаються макровідхиленням, хвилястістю і фізико-механічними властивостями. Тому що утворюється шорсткість поверхонь тертя в процесі підробітки буде залежати від інших параметрів стану поверхневого шару контактуючих деталей.

Рівноважний стан поверхонь тертя зубчастих рейок характеризується параметром [3]:

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot (0,75 \cdot R_z)}{S_m^6 \cdot k^{-12}}, \quad (7)$$

Значення комплексного параметра, що забезпечує необхідну зносостійкість розраховується за формулою:

$$C_x = 3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (l - \mu^2)} \right]^{-3} \cdot \left(\frac{10 \cdot l \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6 \quad (8)$$

Відомо, що при терті різального інструменту з оброблюваною поверхнею зубів рейок змінюються багато властивостей як оброблюваного матеріалу, так і ріжучого інструменту.

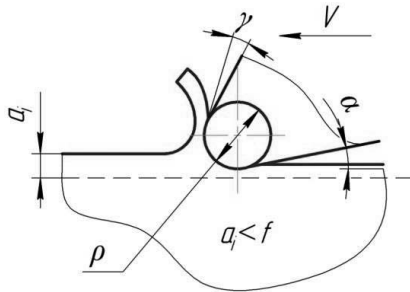


Рис. 5 - Співвідношення між товщиною шару, що зрізається a_i і радіусом округлення різальної кромки ρ

При формоутворенні процес візання теоретично здійснюється з нульової товщини шару, що зрізується, при $a=0$ відбувається тертя ковзання зуба по обробленій поверхні і кожним наступному зубі працює по поверхні. Тому з метою технологічного забезпечення якості обробки і показників якості поверхневого шару зубів рейок визначається мінімальний кут ковзання $\psi_{ск}$ інструмента.

Ковзання буде відбуватися на певному куті ковзання $\psi_{ск}$ до тих пір, поки пластичні деформації не перейдуть до мікрорізання і безпосередньо різання, тобто коли товщина зрізу (a_i) не досягне певного значення глибини відносного впровадження ріжучим інструментом, що має радіус округлення ріжучого леза ρ [4].

Якщо розглядати впроваджений елемент - індентор, який переміщаючись в тангенціальному напрямку, деформує нижчележачий матеріал як ріжуче лезо з радіусом ρ , а глибину впроваджені нерівності h_i , як a_i , то глибина відносного впровадження h_i / ρ запишеться у вигляді: a_i / ρ .

Умови переходу пластичного відтискування в різання:

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2 \cdot \pi}{\sigma_s} \right), \quad (9)$$

де $h_i=a_i$ - товщина шару, що зрізається; $R=\rho$ - радіус ріжучого леза; τ - міцність на зріз адгезійного зв'язку; σ_s - межа плинності матеріалу.

Значить, що при

$$\sigma_s \leq 2 \cdot \tau$$

зовнішнє тертя неможливо при будь-якому відносному впровадженні, воно також неможливо при

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq 0,5$$

навіть за умови нульової міцності адгезійного зв'язку на зріз.

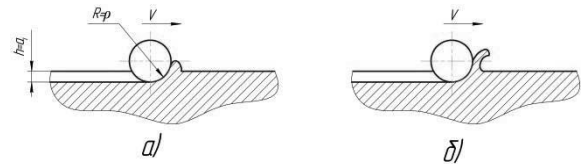


Рис. 6 - Переміщення індентора (ріжучого леза) в разі передоформування (а) і різання (б)

При мастилі граничним буде відносне впровадження

$$\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho} \geq 0,31.$$

При порушенні зовнішнього тертя в разі $\tau = 0$ і при наявності гарної мастильної плівки на поверхні розділу коефіцієнт тертя в залежності від ставлення $\frac{h_i}{R} = \frac{a_i}{\rho}$ визначається з молекулярно-механічної теорії тертя

$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{r}}, \quad (10)$$

де τ_0 - питома зсувна міцність молекулярних зв'язків;

β - коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг;

a_r - коефіцієнт гістерезисних втрат при ковзанні;

p_r - тиск на фактичних майданчиках контакту.

Підставляючи в формулу (10) значення $\frac{a_i}{\rho}=0,31$, при якому неможливо зовнішнє тертя, отримаємо $f=0,22$. Ця величина є граничним значенням деформаційної складової коефіцієнта тертя. При переході критичного значення, тобто при $f \geq 0,22$ спостерігаються скачки дотичної поверхні і індентора

Таким чином, глибина відносного впровадження, яка веде до різання без застосування мастила відповідає $\frac{a_i}{\rho} \geq 0,5$, а з мастилом - $\frac{a_i}{\rho} \geq 0,31$. Товщина шару, що зрізається описується формулою

$$a_i = S \cdot \sin \varphi_{ск} \cdot \sin \varphi, \quad (11)$$

де S_z - подача на зуб; φ - кут профілю зуба фрези.

Задаючись певним значенням радіусу ріжучого леза ρ зуба фрези і подачі на зуб S_z , визначаємо мінімальні значення кутів ковзання в суху і з МОР за формулою:

$$\text{без МОР} \quad \psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi}, \quad (12)$$

$$\text{з МОР} \quad \psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi}, \quad (13)$$

Співвідношення між кутом ковзання $\psi_{ск}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези ψ_{max} з оброблюваним зубчастим виробом дозволяє встановити ефективність процесу формоутворення через коефіцієнт $K_{фр}$ без застосування МОР і з МОР:

$$K_{фр} = \frac{\sin \psi_{max} - \sin \psi_{ск}}{\sin \psi_{max}} \cdot 100\%, \quad (14)$$

Аналіз графіків зміни коефіцієнта ефективності

формоутворення фрезерування $K_{\text{эф}}$ (рис.7) зубчастих рейок в залежності від режимів різання без застосування MOP і з MOP показав області, що забезпечують нормальний процес формоутворення робочих поверхонь. Сприятливим областю технологічного забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих рейок є значення коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{\text{эф}}$ від 30 до 80% і регламентується радіусом округлення ріжучого леза інструменту ρ або величиною зносу по задній поверхні, режимами різання: подачі, швидкості, параметрами шорсткості, сил різання в залежності від прийнятої схеми різання.

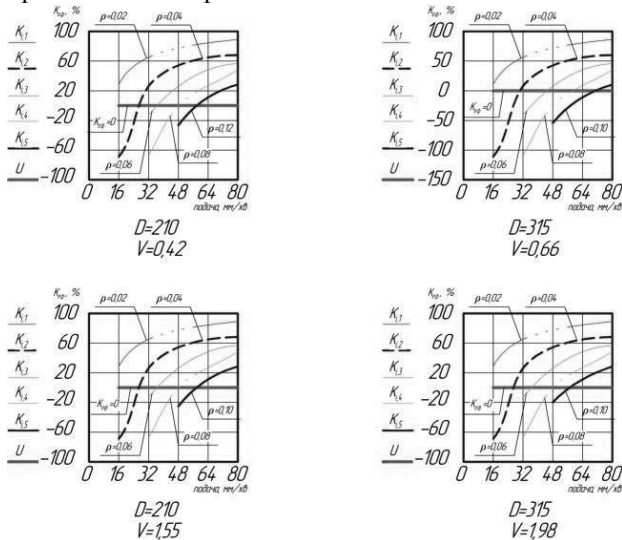


Рис. 7 - Графік зміни коефіцієнта ефективності фрезерування $K_{\text{эф}}$ в залежності від режимів різання із застосуванням MOP:

- 1 - $D = 210$, $Z = 10$, $V = 0,42$;
- 2 - $D = 315$; $Z = 10$; $V = 0,66$;
- 3 - $D = 210$, $Z = 10$, $V = 1,55$;
- 4 - $D = 315$; $Z = 10$; $V = 1,98$.

Дослідження показали, що в зоні різання коефіцієнт тертя ріжучого леза залежить від шорсткості поверхні по якій переміщається інструмент і відповідно до математичної обробки експериментальних досліджень коефіцієнт тертя дорівнює [5]:

$$f = 0,148 \cdot R_a^{0,08} \cdot V^{-0,09} \cdot (0,1 \cdot P_z)^{-0,06}, \quad (15)$$

де R_a - шорсткість поверхні, мкм; V - швидкість різання, м/с; P_z - сила різання, Н.

Експериментальні дослідження показали кореляційний зв'язок між собою висотних параметрів шорсткості R_a , R_z , R_{max} .

Для фрезерування зубів рейок $R_{\text{max}}=6,0 R_a$; $R_z=5,0 R_a$.

Параметри стану шорсткості поверхні зубчастих рейок при рейкофрезеруванні для сталі мають такий вигляд:

$$R_z = 5 \cdot R_a = P_z \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,41}} \cdot K_{\text{фр}}, \quad (16)$$

$$W_z = P_z \cdot \frac{S_z^{1,01} \cdot a_i^{0,46} \cdot \rho^{0,16} \cdot \lambda^{0,54}}{V^{1,55}}, \quad (17)$$

Для прогнозування показників якості поверхневого шару розроблена математична модель з урахуванням технологічних, геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей за умови переходу пластичного відтискування матеріалу оброблюваної поверхні рейок у взаємозв'язку з відомим комплексним параметром стану поверхневого шару, вираженому через параметр шорсткості R_z .

$$R_z = 5 \cdot R_a = P_z \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \lambda^{0,41}} \cdot K_{\text{фр}} =$$

$$= \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot S_m^{\frac{3}{2}} \cdot k^{-3}}{H_p^{\frac{1}{4}} \cdot W_p^{\frac{1}{4}}}, \quad (18)$$

Результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні передумови про широкі можливості механічних методів обробки в технологічному забезпеченні системи параметрів поверхневого шару деталей зубчастих рейок. Значний вплив на параметри оброблюваних поверхонь зубчастих рейок надає технологічна спадковість, що вказує на широкі можливості управління системою параметрів оброблюваних поверхонь протягом технологічного процесу. Отримані дані використовуються в якості технічних обмежень по системі параметрів поверхневого шару зубчастих рейок, що визначають їх експлуатаційні властивості, при виборі технологічних методів і режимів обробки [5].

Інтенсивність зносу зубчастих рейок досліджувалася в залежності від зміни технологічних параметрів нарізання зубів. На рис. 8 показана інтенсивність зносу зубчастих рейок від зміни кута неузгодженості при фрезеруванні зубчастих рейок спареними дисковими фрезами.

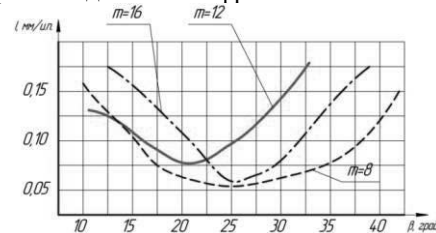


Рис. 8 - Вплив кута неузгодженості при фрезеруванні на зносостійкість зубчастих рейок

Досліджуючи комплексний параметр ефективності процесу формоутворення $K_{\text{фр}}$, встановлені теоретичні залежності технологічних параметрів обробки на зносостійкість рейок в процесі експлуатації. На рис.9 показані залежності зміни зносостійкості зубчастих рейок модулем 8-16 мм від ефективності процесу формоутворення. Коефіцієнт ефективності процесу формоутворення $K_{\text{фр}}$ з фізичної точки зору показує безпосередню участь в обробці ріжучого інструменту і дозволяє судити про якість обробленої поверхні [1,5].

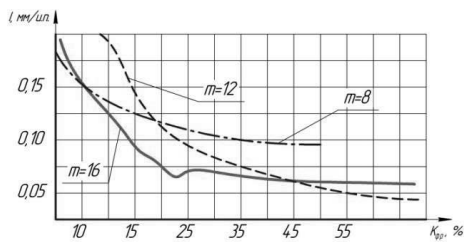


Рис. 9 - Зміна зносостійкості зубчастих рейок в процесі експлуатації від коефіцієнта ефективності процесу формоутворення

Висновки. Для прогнозування показників якості поверхневого шару розроблена математична модель з урахуванням технологічних, геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей за умови переходу пластичного відтискування матеріалу оброблюваної поверхні рейок у взаємозв'язку з комплексним параметром стану поверхневого шару, вираженому через параметр шорсткості R_z . Розглянуті технологічні умови забезпечення показників якості поверхневого шару від кута ковзання при фрезеруванні зубчастих рейок. Аналіз структури технологічного процесу показав широкі можливості зміни технологічних параметрів обробки шляхом глибокого вивчення процесу формоутворення поверхневого шару зубчастих рейок і застосування нових високопродуктивних технологічних способів обробки. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження з визначення оптимальних кутів ковзання $\psi_{ск}$ при яких встановлюється стабільність процесу зубофрезерування і необхідні умови по стійкості інструмента і якості оброблюваної поверхні.

Список літератури

1. Пермяков О.А., Клочко О.О., Синица Ю.О. Синтез технологічних параметрів високопродуктивної обробки зубчастих рейок спареними фрезами. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2018, № 17 (1239), С.71–77.
2. Клочко А.А., Зиновьев Н.И., Клочко Ю.А., Мироненко Е.В. Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек. *Высокие технологии в машиностроении* :зб. науч. пр. ХДПУ. 2000, №1(3), С. 138–145.
3. Тимофеев Ю.В., Волошин А.И., Мироненко Е.В., Клочко А.А., Кравцов А.Н. Научное обоснование технологических методов обеспечения эксплуатационных свойств закаленных

крупномодульных зубчатых колес. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. 2012, №30, С. 194–204.

4. Шелковой А.Н., Мироненко Е.В., Клочко А.А., Ефремов Д.В., Клиновский А.А. Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. 2012, №31, С. 157–173.
5. Мироненко Е.В., Клочко А.А., Шелковой А.Н., Ярошенко А.А., Палашек С.Ю. Исследование влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес. *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем* : сб. науч. тр. 2014, №34, С. 19–25.

References (transliterated)

1. Permyakov O. A., Klochko A. A., Sinitza Y.O. *SynteZ tekhnolohichnykh parametriv vysokoproduktyvnoi obrobky zubchastykh reioK sparenymy frezamy* [Synthesis of technological parameters of high-performance processing of toothed racks by twin milling cutters]. *Bulletin of NTU "KhPI"*. 2017, No.17 (1239), pp. 71–77.
2. Klochko A.A., Zinoviev N.I., Klochko Y.A., Mironenko E.V. *Novie tekhnolohicheskye napravleniya chystovoi obrabotky zubchatykh reek* [New technological directions of finishing processing of cogged racks]. *Visoki tehnologii v mashinobuduvanni: zb. Sciences. Pr. KhPPU*. 2000, No.1 (3), pp. 138-145.
3. Timofeev Y.V., Voloshin A.I., Mironenko E.V., Klochko A.A., Kravtsov A.N. *Nauchnoe obosnovanye tekhnolohicheskikh metodov obespecheniya ekspluatatsyonnykh svoystv zakalennykh krupnomodulnykh zubchatykh koles* [Scientific substantiation of technological methods for ensuring the operational properties of hardened coarse-grained cogwheels]. *Instrument reliability and optimization of technological Systems: Sat. Sci. Tr.* 2012, No. 30, pp.194-204.
4. Shelkova A.N., Mironenko E.V., Klochko A.A., Efremov D.V., Klinovskii A.A. *Metodyka rascheta parametrov sostoianiya poverkhnostnogo sloia zakalennykh krupnomodulnykh zubchatykh koles v zavyssymosti ot uslovyi ykh obrabotky* [Methods for calculating the parameters of the state of the surface layer of quenched coarse-grained gears, depending on the processing conditions]. *Tool reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr.* 2012, No.31, pp.157-173.
5. Mironenko E.V., Klochko A.A., Shelkova A.N., Yaroshenko A.A., Palashok S.Y. *Yssledovanye vliyaniya parametrov volnistosti na ekspluatatsyonnye svoystva tsylindricheskyykh krupno-modulnykh zubchatykh koles* [Investigation of the influence of ripple parameters on the operational properties of cylindrical coarse-grained cogwheels]. *Instrument reliability and optimization of technological systems: Sat. Sci. Tr.* 2014, No.34, pp.19-25.

Поступила (received) 14.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пермяков Олександр Анатолійович (Пермяков Александр Анатольевич, Permyakov Olexsandr Anatoliyovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9589-0194>; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: perm_a@i.ua.

Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Klochko Alexander Alexandrovich) – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2841-9455>; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net.

Веселовська Наталія Ростиславівна (Веселовская Наталья Ростиславовна, Veselovskaya Natalia Rostislavovna) - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машин та обладнання сільського господарювання виробництва Вінницький національний аграрний університет, м. Вінниця, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9399-6721>; тел. +380975370748; e-mail: wnatalia@ukr.net.

Синица Юрій Олександрович (Синица Юрий Александрович, Sinitza Yuriy Olexsandroovich) – магістр кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7081-2536>; тел.: (063) 656-75-16; e-mail: yura.sinitza.at@gmail.com.

УДК 621.9.044

*Г. И. КОСТЮК, Ю. В. ЕКАСЁВА***О ВЛИЯНИИ ДОЛИ НИТРИДА ТАНТАЛА В ТВЕРДЫХ СПЛАВАХ T12A И T23A НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

На основе теоретического исследования влияния технологических параметров фемтосекундного лазера (плотность теплового потока, время облучения, радиус пятна контакта) на полученный объем нанокластера (НК) для твердых сплавов T12A и T23A сделаны следующие выводы: 1) с ростом плотности теплового потока, снижением времени его действия и размера радиуса пятна, объем НК, а следовательно и его размеры снижаются; 2) следует ожидать повышение физико-механических характеристик РИ.

Размер зерна в сплаве T23A несколько выше, что говорит о большой перспективе применения T12A с наноструктурами, что подтверждается большей его твердостью чем у T23A, т.е. увеличение доли нитрида тантала снижает твердость наноструктуры.

Ключевые слова нитрид тантала, твердый сплав, наноструктуры, фемтосекундный лазер.

*Г. І. КОСТЮК, Ю. В. ЕКАСЬОВА***ПРО ВПЛИВ ЧАСТКИ НІТРИДУ ТАНТАЛУ В ТВЕРДИХ СПЛАВАХ T12A І T23A НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУР ПРИ ДІЇ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРА**

На основі теоретичного дослідження впливу технологічних параметрів фемтосекундного лазера (щільність теплового потоку, час опромінення, радіус плями контакту) на отриманий обсяг нанокластера (НК) для твердих сплавів T12A і T23A зроблені наступні висновки: 1) з ростом щільності теплового потоку, зниженням часу його дії і розміру радіуса плями, обсяг НК, а отже і його розміри знижуються; 2) слід очікувати підвищення фізико-механічних характеристик РІ.

Розмір зерна в сплаві T23A трохи вище, що говорить про велику перспективу застосування T12A з наноструктурами, що підтверджується більшою його твердістю ніж у T23A, тобто збільшення частки нітриду танталу знижує твердість наноструктур

Ключові слова: нітрид танталу, твердий сплав, наноструктури, фемтосекундний лазер.

*G. KOSTYUK, Yu. YEKASYEV***ON THE INFLUENCE OF THE FRACTION OF TANTALUM NITRIDE IN HARD ALLOYS T12A AND T23A ON THE EFFICIENCY OF OBTAINING NANOSTRUCTURES UNDER THE ACTION OF A FEMTOSECOND LASER**

Based on the theoretical study of the influence of the technological parameters of a femtosecond laser (heat flux density, irradiation time, contact spot radius) on the obtained volume of a nanoclusters (NC) for hard alloys T12A and T23A, the following conclusions are drawn: 1) with an increase in the density of heat flow, a decrease in the time of its action and the size of the spot radius, the volume of the ND, and consequently its dimensions, decrease; 2) we should expect an increase in physico-mechanical characteristics of the RI.

The grain size in the T23A alloy is somewhat higher, which indicates the long-term use of T12A with nanostructures, which is confirmed by its greater hardness than in T23A, i.e. an increase in the proportion of tantalum nitride reduces the hardness of the nanostructure

Keywords: tantalum nitride, hard alloy, nanostructures, femtosecond laser.

Введение. В настоящее время проектирование материала твёрдого сплава проводится без учёта возможности повышения его свойств за счёт образования наноструктур. Свойства упрочнённых различными методами, включая и образования наноструктур твёрдых сплавов, будут отличаться от твёрдых сплавов в основном состоянии и, очевидно, необходимо при проектировании состава твёрдого сплава учитывать конечный результат – возможности режущего инструмента с упрочнённым слоем, тогда эффективность режущего инструмента будет выше.

Состояние вопроса. В настоящее время есть достаточное количество теоретических работ по расчёту размера зерна [1 - 7], с учётом различных факторов и процессов при действии потоков ионов или ионизированного излучения. Но сравнения результатов расчётов размеров зерна в твёрдых сплавах после воздействия фемтолазера нет. Проведём такое сравнение для двух твёрдых сплавов T12A и T23A (производство Японии), причём у первого имеем $0,83\text{TiN}+0,12\text{TaN}$ сравнение результатов по объёмам зерна наноразмеров даст нам перспективность использования того или иного твёрдого сплава, а значит и определяют доли нитрида тантала на физико-

технические характеристики и работоспособность твёрдого сплава.

Модель расчёта параметров наноструктур. На основе решения совместной задачи теплопроводности и термоупругости, учитывающей не только основные источники и стоки тепла, но и энергию кристаллизации, и использование теплофизических и термомеханических характеристик материала РИ, рассчитанных квантово-механическим методом полученные основные характеристики наноструктур, это прежде всего объём зерна, а также технологические параметры обработки.

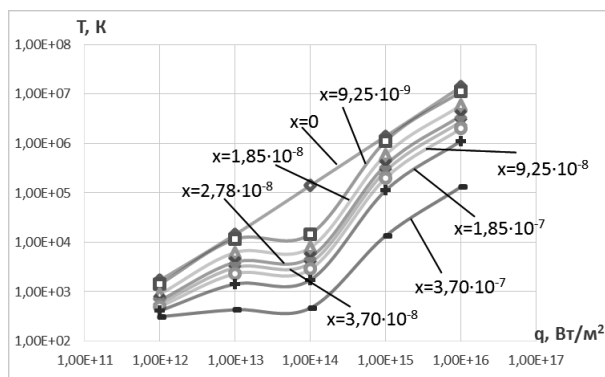
Результаты и их обсуждение. Для случая действия фемтосекундного лазера зависимости максимальной температуры на разной глубине ($x=0$, $x=x_1$ и $x=x_2$, $x=x_3$) представлены на рис. 1 при его действии на T12A и на рис. 2 при его действии на T23A. Для случая описания теплофизических и термомеханических характеристик стохастическим методом и аналогично для случая квантово-механического метода их расчета на рис. 3 и 4 соответственно. Сравнение этих рисунков показывает, что значение максимальных температур при квантово-механическом описании теплофизических и

© . И. Костюк, Ю. В. Екасёва, 2018

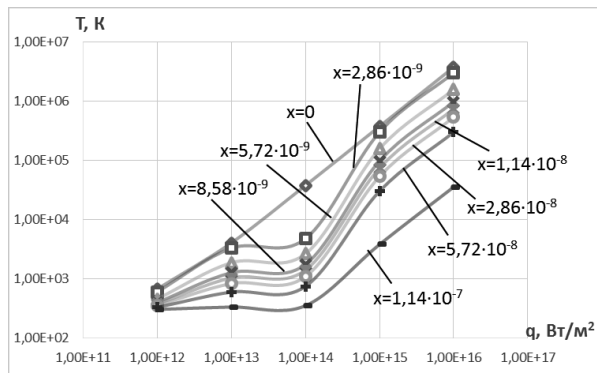
термомеханических характеристик приводит к увеличению расчетной температуры при всех рассмотренных вариантах.

Всё это говорит о том, что следует ожидать в последнем случае больших по величине зон, где могут быть получены наноструктуры. Поэтому были проведены расчеты объемов зон, где реализуются наноструктуры на РИ из T12A и T23A.

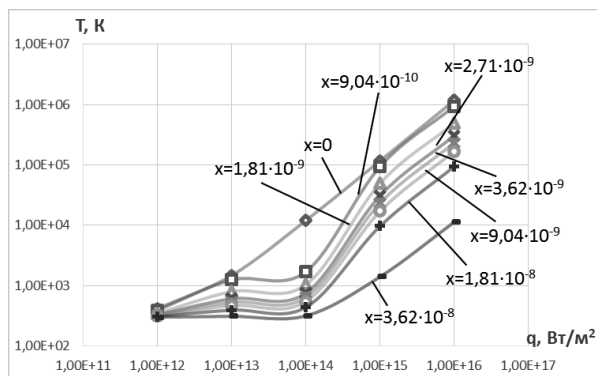
В результате расчёта получены зависимости объема наноструктуры от плотности теплового потока для фемтосекундного лазера. Исследовался диапазон плотностей теплового потока $10^{11} - 10^{16}$ для случая радиуса 10^{-6} м (рис. 3), 10^{-7} м (рис. 4).



а

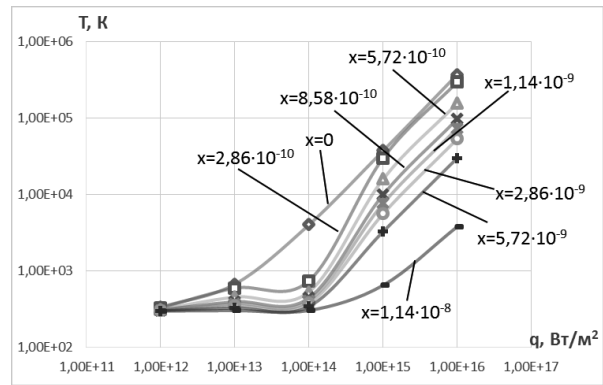


б

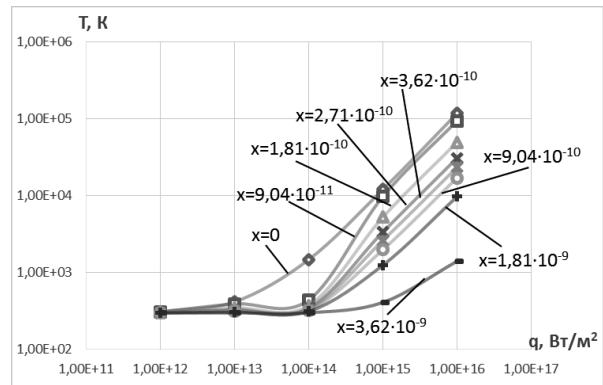


в

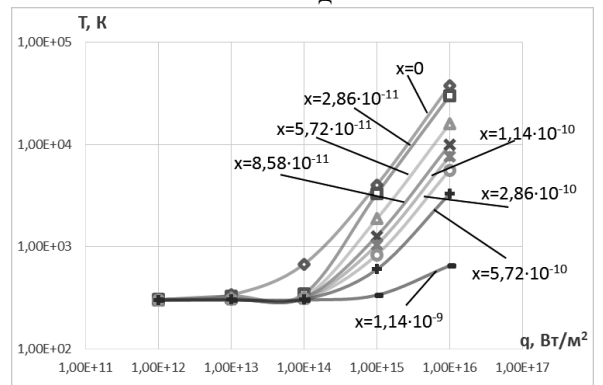
Рис. 1 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на T12A от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10-10$ с; б - $t=10-11$ с; в - $t=10-12$ с; г - $t=10-13$ с; д - $t=10-14$ с; е - $t=10-15$ с; ж - $t=10-16$ с



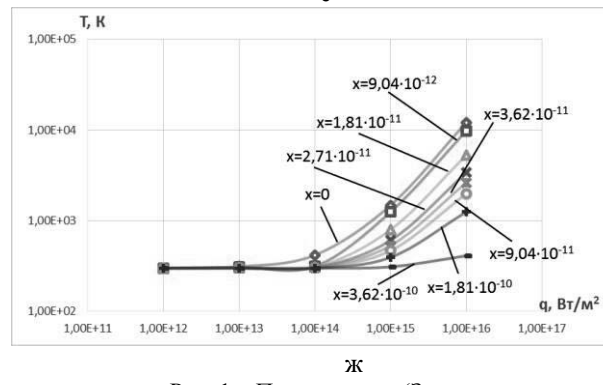
г



д



е



ж

Рис. 1 – Продолжение (Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на T12A от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10-10$ с; б - $t=10-11$ с; в - $t=10-12$ с; г - $t=10-13$ с; д - $t=10-14$ с; е - $t=10-15$ с; ж - $t=10-16$ с)

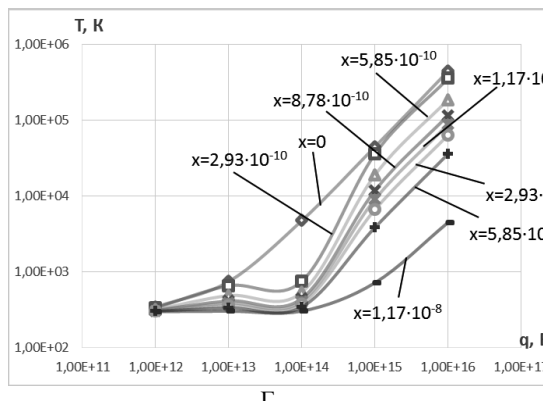
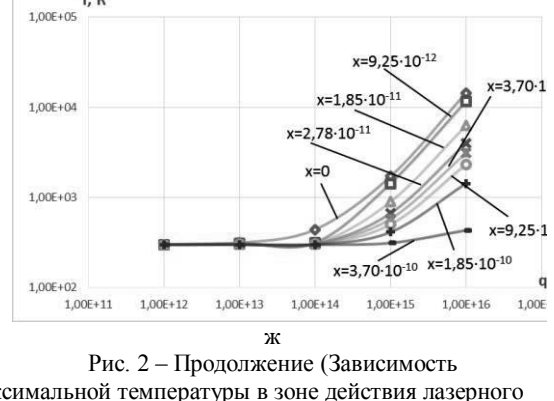
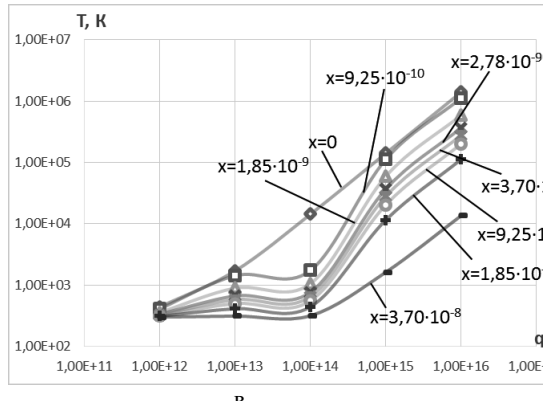
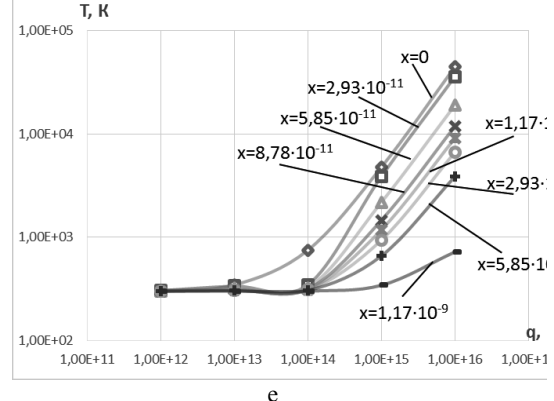
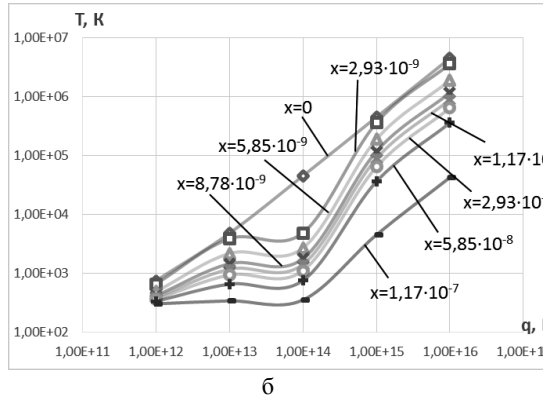
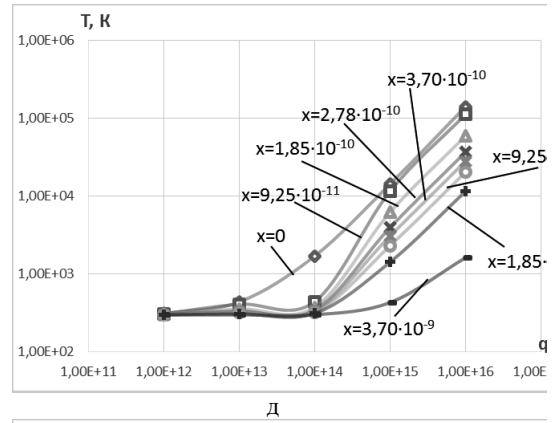
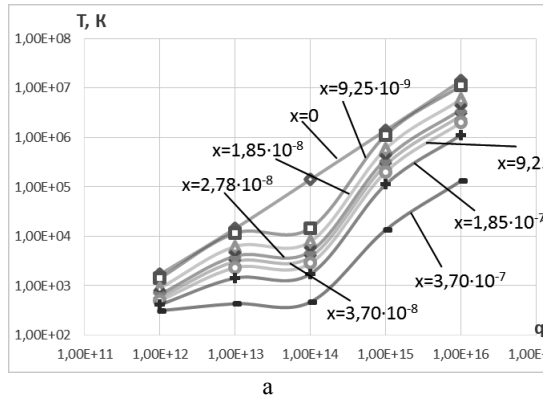


Рис. 2 – Продолжение (Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на T23A от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - t=10-10 с; б - t=10-11 с; в - t=10-12 с; г - t=10-13 с; д - t=10-14 с; е - t=10-15 с; ж - t=10-16 с)

Рис. 2 – Зависимость максимальной температуры в зоне действия лазерного излучения на T23A от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - t=10-10 с; б - t=10-11 с; в - t=10-12 с; г - t=10-13 с; д - t=10-14 с; е - t=10-15 с; ж - t=10-16 с

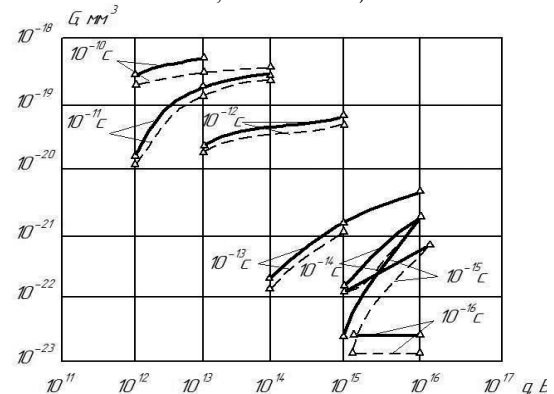


Рис. 3 – Зависимости объема, занятого наноструктурами, от плотности теплового потока q и времени для фемтосекундного лазера, действующего на T12A (----) и T23A (-----) при Rp = 10^-6 м

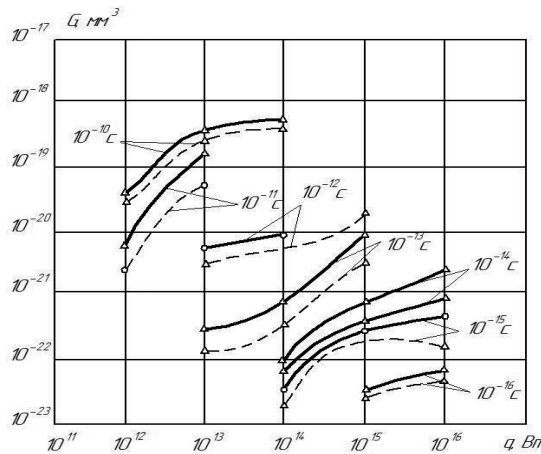


Рис. 2 – Зависимости объема, занятого наноструктурами, от плотности теплового потока q и времени для фемтосекундного лазера, действующего на T12A (-----) и T23A (-----) при $R_p = 10^{-7}$ м

С учетом возможности непосредственного образования наноструктур при действии температурных напряжений больше, чем 10^{10} Н/м², т.е. есть возможность получения наноструктур по критерию достижения критических давлений (напряжений).

Видно, что для случая радиуса 10^{-6} м для твёрдого сплава T12A размеры зерна несколько меньше, чем для твёрдого сплава T23A при одних и тех же плотностях теплового потока, и временах его действия. При чём существует область технологических параметров, где наноструктуры для T12A образуются с меньшими затратами энергии и самое главное обеспечивается минимальный размер зерна. Как, например, при высоких временах (порядка 10^{-10} с), объём наноструктур составляет от 4 до 7 на 10^{-19} м³. Дальнейшее снижение времени действия до 10^{-12} с приводит к снижению объёмов практически на порядок, при чём минимальные размеры реализуются для T12A. Снижение времён до 10^{-12} и 10^{-16} с, приводит к снижению объёмов наноструктур от 1,5 на 10^{-3} до 6 на 10^{-21} м³, при чём и в этом случае минимальные объёмы зерна реализуются для T12A.

Переход к ещё меньшему размеру пятна луча до 10^{-7} м приводит к увеличению зоны технологических параметров, где реализуются наноструктуры. Так при $t = 10^{-10}$ с и $q = 10^{12} - 10^{14}$ Вт/м² получение наноструктур в зоне плотностей светового потока $10^{14} - 10^{16}$ реализуются при временах 10^{-16} и 10^{-14} с. При чём и в этом случае большие объёмы соответствуют твёрдому сплаву T23A (рис.4).

Анализ графиков показывает, что твёрдый сплав T12A с 12% тантала обеспечивает более низкие объёмы зерна, а, следовательно, и будет обеспечивать более высокие физико-механические характеристики по износостойкости РИ, его эффективности и производительности обработки, что было показано в монографии [7]. Всё это говорит, что даже при минимальных количествах нитрида тантала – 12% есть возможность получить довольно значительные повышения физико-механических характеристик, а

значит этот твёрдый сплав с наноструктурным слоем будет более износостойким, будет обеспечивать больший снимаемый объём материала за период стойкости

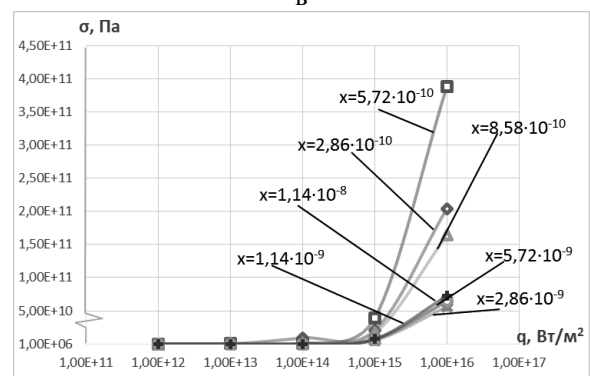
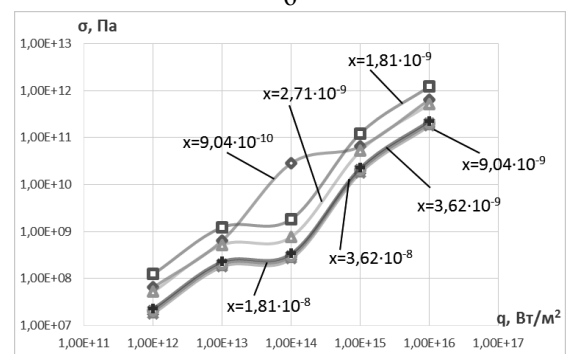
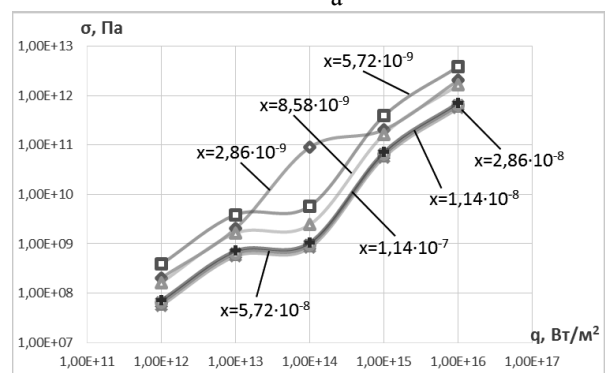
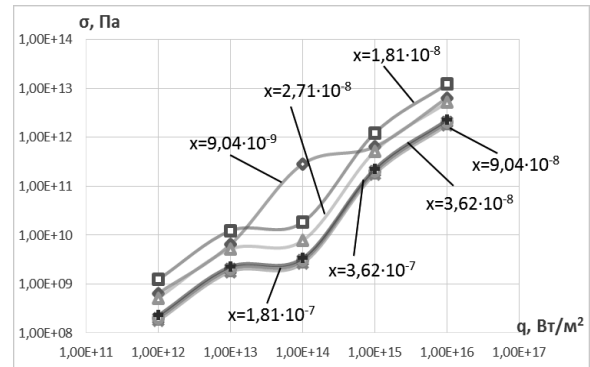
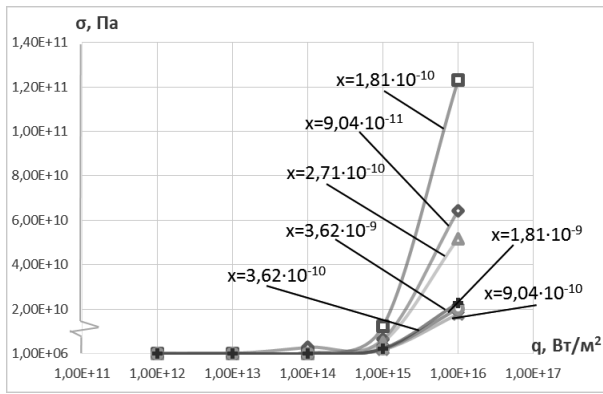
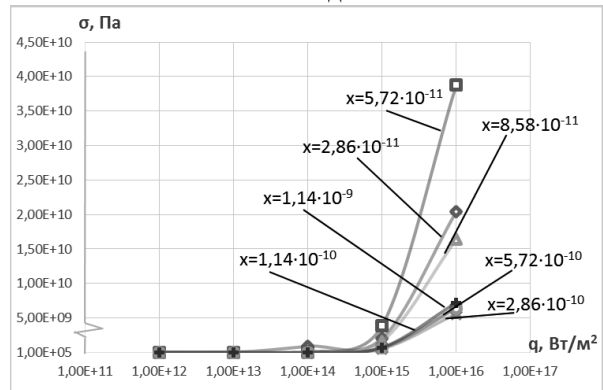


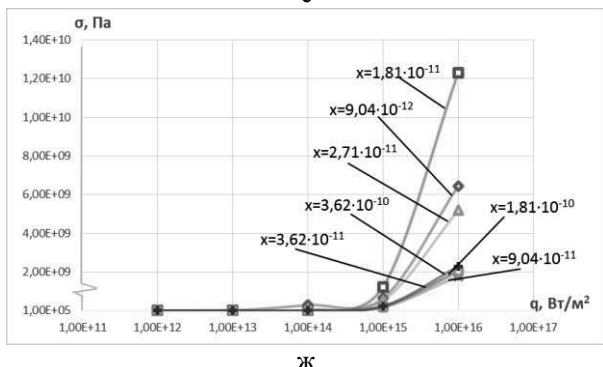
Рис. 5 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на T12A от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10^{-16}$ с



Д

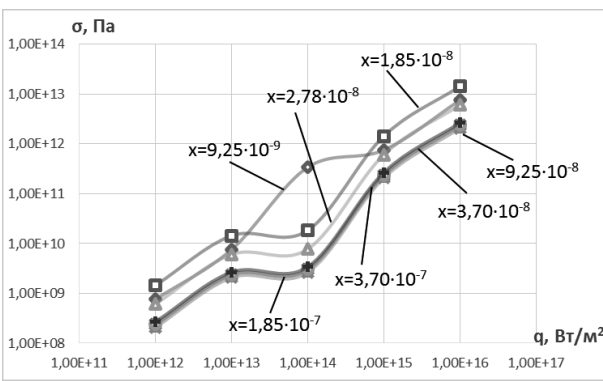


е



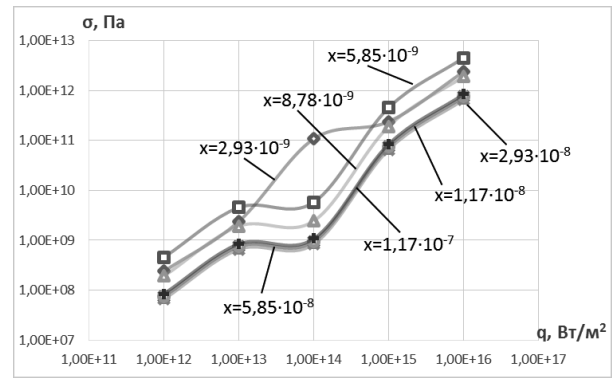
ж

Рис. 5 – Продолжение

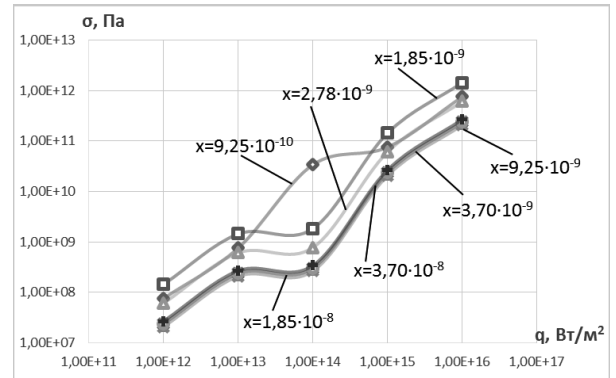


а

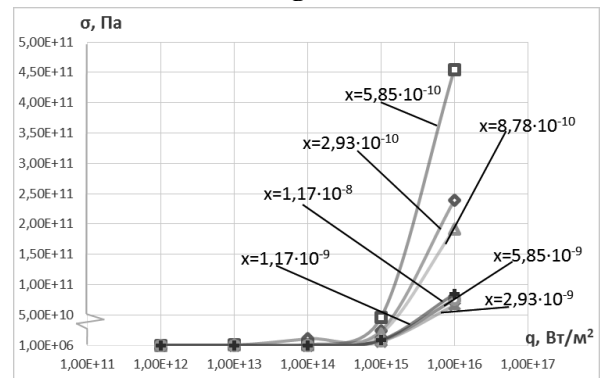
Рис. 6 – Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на Т23А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10$



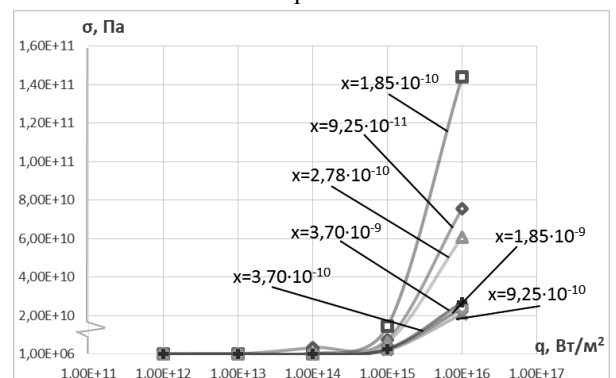
б



в



г



д

Рис. 6 – Продолжение (Зависимость температурных напряжений в зоне действия лазерного излучения на Т23А от плотности теплового потока на разных глубинах при времени действия: а - $t=10^{-10}$ с; б - $t=10^{-11}$ с; в - $t=10^{-12}$ с; г - $t=10^{-13}$ с; д - $t=10^{-14}$ с; е - $t=10^{-15}$ с; ж - $t=10$)

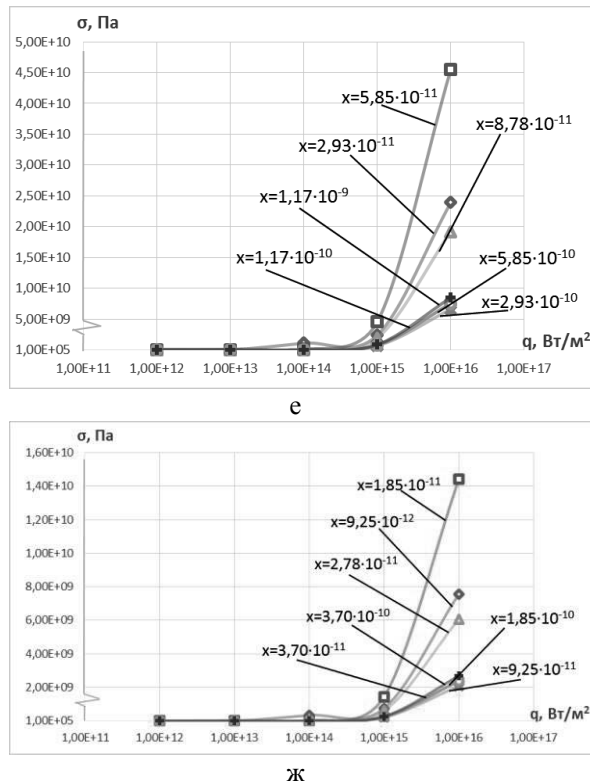


Рис. 6 – Продолжение

Выводы. Проведенные исследования показывают, что есть возможность определять состав твёрдого сплава, который будет обеспечивать наилучшие условия для образования наноструктур. Видно, что использование лазерного луча с меньшим диаметром (10^{-7} м), будет обеспечивать получение большего размера наноструктур в материале режущего инструмента или его покрытия.

Построенные графики позволяют выбирать технологические режимы и размер пятна луча, позволяющие получать наилучшие режимы для упрочнения твёрдого сплава, а значит и обеспечивать конструирование твёрдого сплава с учётом его упрочнения за счёт образования наноструктур.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокровками и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии / Г.И. Костюк – Харьков: «Планета-Принт», 2016. — 735 с.
2. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических

параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.

3. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокровы: перспективы и реальность: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк, Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник / Г. И. Костюк. – Киев.: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – Москва: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва: Физматлит, 2005. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference. in 2 books. Book 1. Plasma-ion and ion-beam technologies. Kharkov. "Planet-Print", 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G.I. Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph. Kiev. Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G.I. Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph. Kiev. Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G.I. Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help. Kharkov: The national. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2009. 406 p.
5. Kostyuk, G.I. Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.
6. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a monograph-reference book. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a reference book. Kiev. View of АІНУ, 2003. 412 p.
8. Grechikhin, L.I. Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies / L.I. Grechikhin. - Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. Aksenov, I.I. Vacuum arc in erosive plasma sources. Kharkov: Publishing house of scientific research institute "Kharkov Institute of Physics and Technology ", 2005. 211 p.
10. Gusev, A.I. Nanomaterials, nanostructures. Moscow: Fizmatlit, 2005. - 416

Поступила (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

Єкасьова Юлія Володимирівна (Екасева Юлия Владимировна, Ekas'ova Yuliya Volodimirivna) – студентка, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

УДК 621.9.044

Г. И. КОСТЮК**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СИЛИЦИДНЫХ, НИТРИДНЫХ, КАРБИДНЫХ, БОРИДНЫХ И ОКСИДНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА ТВЁРДОМ СПЛАВЕ T12A**

В работе была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных в нанопокрyтии на твёрдом сплаве T12A на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения покрытий из силицидов, нитридов, карбидов, боридов и оксидов непосредственно в теле материала при энергиях ионов в диапазоне от 200 до $2 \cdot 10^4$ эВ с зарядовыми числами от 1 до 3. Получены важные характеристики: объём зерна для всех перечисленных ионов кремния, ионов азота, углерода и кислорода и глубины их залегания, что позволяет оценить слои наноструктур из соединений и элементов или субмикроструктур, которые могут быть образованы этими высокоэнтропийными покрытиями. Показано, что есть возможность избежать получения интерметаллидов благодаря высокой подвижности ионов азота, углерода, бора и кислорода.

Ключевые слова: высокоэнтропийные покрытия, субмикроструктуры, наноструктуры, твёрдый раствор, интерметаллиды, силициды, нитриды, карбиды, бориды, оксиды.

Г. І. КОСТЮК**ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СИЛІЦИДНИХ, НІТРИДНАЯ, КАРБІДНИХ, БОРИДНИХ І ОКСИДНИХ НАНОПОКРИТТІВ НА ТВЕРДОМУ СПЛАВІ T12A**

В роботі була досліджена можливість створення високоентропійних нитридних, карбідних, боридних і оксидних в нанопокриттях на твердому сплаві T12A на основі гафнію, цирконію, молибдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання покриттів з сіцилідів, нітридів, карбідів, боридів і оксидів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів в діапазоні від 200 до $2 \cdot 10^4$ еВ з зарядовими числами від 1 до 3. Отримані важливі характеристики: обсяг зерна для всіх перерахованих іонів кремнію, іонів азоту, вуглецю і кисню і глибини їх залягання, що дозволяє оцінити шари наноструктур із з'єднань і елементів або субмікроструктур, які можуть бути освічені цими високоентропійними покриттями. Показано, що є можливість уникнути отримання интерме-таллидов завдяки високій рухливості іонів азоту, вуглецю, бору і кисню.

Ключові слова: високоентропійні покриття, субмікроструктури, наноструктури, твердий розчин, інте-рметаліди, силіциди, нітриди, карбіди, бориди, оксиди.

G. I. KOSTYUK**PROSPECTS OF CREATION OF HIGH-ENTROPIC SILICIDES, NITRIDE, CARBIDE, BORIDE AND OXIDE NANO-COATINGS ON THE SOLID T12A ALLOY**

The possibility of creating high-entropic nitride, carbide, boride and oxide in a nanocoating on a solid T12A alloy based on hafnium, zirconium, molybdenum, tungsten, yttrium and nickel was investigated. The study of obtaining coatings from silicides, nitrides, carbides, borides and oxides directly in the body of the material at ion energies in the range from 200 to $2 \cdot 10^4$ eV with charge numbers from 1 to 3. Important characteristics are obtained: the grain volume for all the silicon ions listed, ions of nitrogen, carbon and oxygen and the depth of their bedding, which allows us to evaluate the layers of nanostructures from the compounds and elements or submicrostructures that can be formed by these high-entropy alloy coatings. It is shown that it is possible to avoid the production of intermetallics due to the high mobility of nitrogen, carbon, boron and oxygen ions.

Keywords: high-entropy coatings, submicrostructures, nanostructures, solid solution, intermetallics, silicides, nitrides, carbides, borides, oxides.

Введение. Исследования высокоэнтропийных сплавов, что они благодаря образованию твёрдых растворов имеют высокую твёрдость и обладают другими высокими физико-механическими характеристиками [1-3]. Есть попытки создавать покрытия из высокоэнтропийных сплавов [4] и даже экспериментально получать нитриды на основе высокоэнтропийных сплавов, но, теоретических работ, в области создания слоёв из нитридных, карбидных, боридных, силицидных и оксидных высокоэнтропийных покрытий нет.

Всё вышеизложенное говорит об актуальности и своевременности создания теории получения наноструктурных высокоэнтропийных покрытий на материале режущих инструментов.

Появление нового класса материалов высокоэнтропийных сплавов, их применение может существенно улучшить физико-механические характеристики (ФМХ) деталей и режущего инструмента, но в них входят дорогостоящие

составляющие: гафний, цирконий, вольфрам, молибден и другие редкоземельные металлы. Используя эти металлы можно создавать силицидные, нитридные, карбидные, боридные и оксидные покрытия на поверхности РИ и их характеристики могут быть такими же или даже выше, чем у высокоэнтропийных сплавов.

Высокоэнтропийные сплавы требуют, чтобы в их составе было минимум 5 различных элементов, с увеличением числа элементов энтропия растёт, очевидно, то же самое будет и с увеличением числа силицидов, карбидов, нитридов, оксидов и боридов. Причём одного элемента должно быть не более 30%. Очевидно у таких покрытий появятся новые возможности, о которых мы ещё и не подозреваем, так как они могут создавать твёрдые растворы, которые могут обладать сверх высокими ФМХ так и образовывать интерметаллиды, которые обладают высокой пластичностью, что при их малом количестве реализуются свойства покрытия, которые будут

© Г.И. Костюк, 2018

эффективно противостоять ударным нагрузкам. Всё это говорит о своевременности и важности проводимых исследований. Учитывая адгезионные взаимодействия соответствующих силицидов, нитридов, карбидов, боридов и оксидов с обрабатываемым материалом можно выбирать поверхностные слои с минимальным адгезионным взаимодействием, что существенно уменьшит адгезионный износ покрытия на РИ и снизит силы резания, что повысит с учётом образования наноструктур работоспособность и эффективность режущих инструментов. Можно также эффективно использовать силициды, которые выдерживают высокие температуры, а значит для конструкций, работающих при высоких температурах.

Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учетом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. В настоящее время широко обсуждается вопрос о создании высокоэнтропийных сплавов, которые могут найти широкое применение в технике за счёт высокой твёрдости, высокой прочности при значительных температурах, существенно снижается ползучесть по сравнению с традиционными конструкционными материалами, что тоже является важной характеристикой [1-5]. В тоже время вопрос получения НС как на высокоэнтропийных сплавах так и в покрытиях из составляющих этих сплавов, даже экспериментально практически не изучен (существуют отрывочные данные о возможности получения НС), а работ в теоретическом плане по получению НС за исключением наших [6-11] нет.

Всё это говорит о том, что есть существенная необходимость в развитии работ по получению покрытий из нитридов, карбидов, боридов, оксидов, силицидов и других твердых соединений в случае образования высокоэнтропийного покрытия. Выше изложенное говорит о важности и актуальности проводимых теоретических исследований в направлении получения высокоэнтропийных нитридных карбидных, боридных, силицидных и оксидных наноструктурных покрытий.

Результаты и их обсуждение. Была исследована возможность создания высокоэнтропийных нитридных

покрытий на твёрдом сплаве Т12А (Япония), рассматривалась возможность нанесения нитридов, силицидов, карбидов, боридов и оксидов гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Для этого на основе совместной задачи теплопроводности и термоупругости определялся объём зерна и глубины его залегания для рассмотренных элементов, а также азота, углерода, бора и кислорода. Для азота зависимости объёма зерна максимальной и минимальной глубины залегания представлены на рис.1. Видно, что объём для малых энергий порядка 200 эВ, соответствует нанозерну, тогда как при больших энергиях он их превышает (рис.1а), глубины залегания объёма в первом случае лежат в диапазоне $8,6 \cdot 10^{-10}$ – $3,9 \cdot 10^{-9}$ м — минимальные (рис.1в) и $2,7 \cdot 10^{-9}$ – $6,8 \cdot 10^{-9}$ м — максимальные (рис.1в).

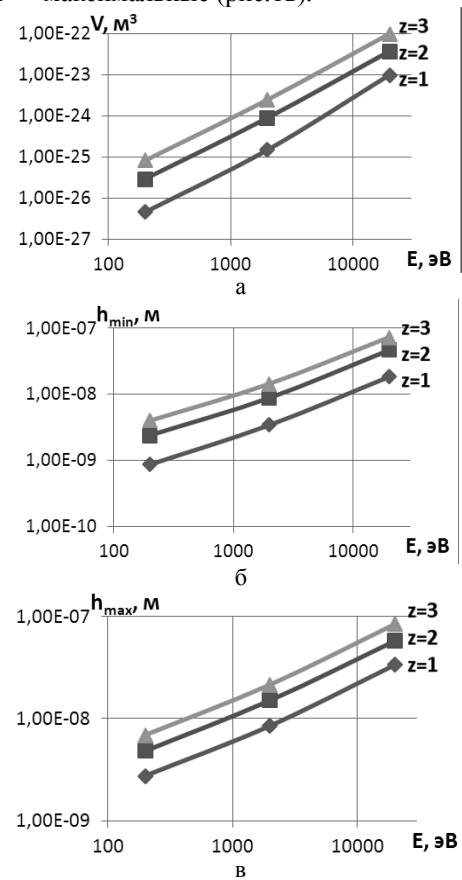


Рис.1 – Зависимости объёма нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов азота (N^+) с различным зарядом ($z=1$, $z=2$, $z=3$) для Т12А

Получение карбидов требует подачи ионов углерода, которые можно получать непосредственно из углеродного электрода при использовании магнетрона или из газов, содержащих углерод.

Для углерода зависимости объёма зерна (рис. 2, а), минимальной (рис. 2, б) и максимальной (рис.2в) глубины залегания позволяют получить пространственную картину образования зерна в зоне действия иона углерода. Видно, что нанозерно может быть получено при энергиях ионов от 200 до 2000 эВ, когда как вблизи 20 КэВ вероятность его образования не высока, а при зарядовых числах 2 и 3 вообще не возможна. Диапазон

минимальных глубин залегания составляет величины $1,2 \cdot 10^{-9}$ – $9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальные $2,94 \cdot 10^{-9}$ – $1,07 \cdot 10^{-7}$ м (рис. 2). Видно, что в этом случае достигается максимальная глубина зоны, где образуется зерно увеличивается практически до десятка микрометров, что в последнем случае образует субмикрзерно.

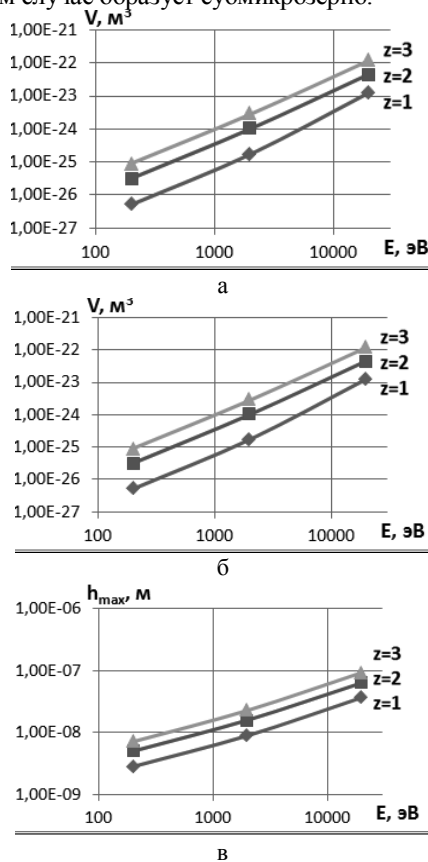


Рис.2 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов углерода (C^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Для случая действия ионов бора (рис.3) размер зерна увеличивается: лежат в пределах $4,4 \cdot 10^{-9}$ – $1,364 \cdot 10^{-7}$ м. Так в последнем случае мы имеем дело с субмикрзерном, глубины его залегания: минимальная лежит в диапазоне $1,2 \cdot 10^{-9}$ – $9,29 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальная $2,9 \cdot 10^{-9}$ – $1,07 \cdot 10^{-7}$ м. В этом случае глубины залегания превышают все предыдущие, как и размер зерна (рис.3).

Переход к ионам кислорода (для образования оксидов) приводит к существенному снижению размера зерна до $3,94 \cdot 10^{-9}$ – $1,04 \cdot 10^{-7}$ м, последнее значение уже соответствует субмикро зерну (рис. 4, а). Диапазон глубин залегания зерна: $7,49 \cdot 10^{-9}$ – $6,4 \cdot 10^{-8}$ м – минимальные (рис.4б) и $2,65 \cdot 10^{-9}$ – $7,7 \cdot 10^{-8}$ м – максимальные (рис. 4, в) значения.

Аналогично для ионов кремния зависимости объема зерна (рис. 5а) минимальной (рис. 5б) и максимальной (рис. 5в) глубин залегания, видно, что нанозерно получаем при энергиях 200 и 2000 КэВ, тогда как вблизи энергии 20 КэВ вероятность его образования не высока, а при зарядовых числах 2 и 3 вообще невозможна.

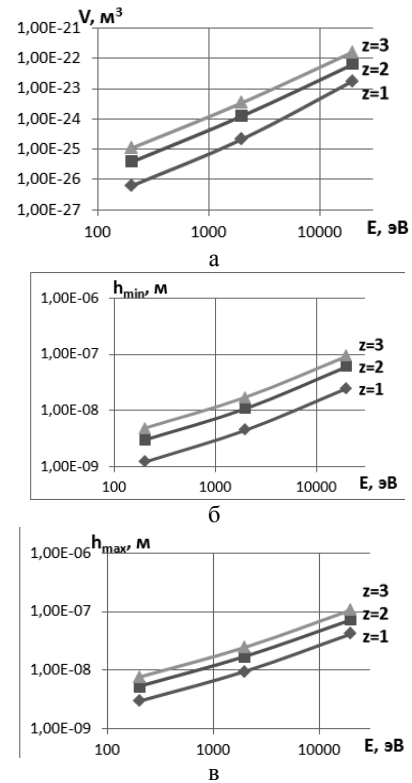


Рис.3 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов бора (B^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

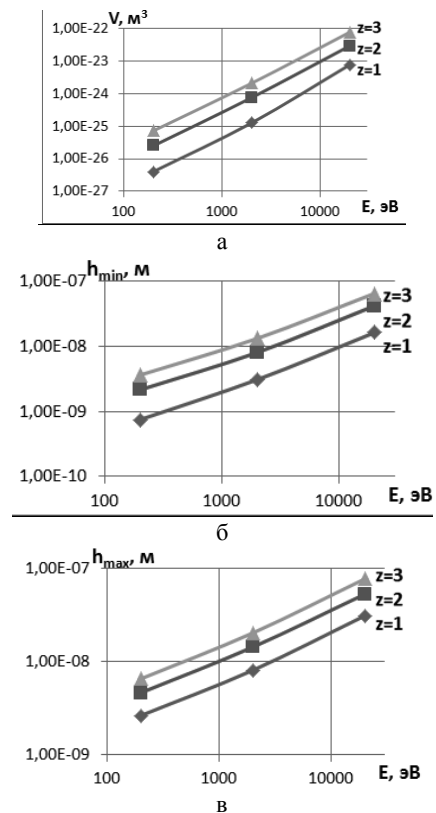


Рис.4 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов кислорода (O^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Минимальные глубины залегания НК 0,6 на 10^{-9} –4,2 на 10^{-8} , а максимальное 1,5 на 10^{-9} –5,2 на 10^{-8} м, зона с нанозерном увеличивается до долей микрометра, а в остальных случаях образуется субмикрозерно.

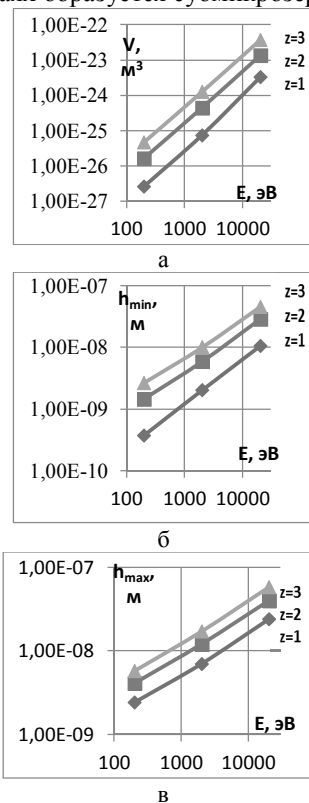


Рис. 5 – Зависимости максимальной температуры (а), объема нанокластера (НК) (б), максимальной (в) глубины залегания НК, при действии ионов алюминия (Al^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

В дальнейшем в зависимости от того какую последовательность слоёв мы хотим получить исходя из адгезионных [2] и прочностных [3] характеристик покрытия мы выбираем поверхностный слой покрытия и их чередование. Для выполнения условия высокоэнтропийности определяем долю гафния участвующего в процессе с учётом требования, чтобы циркония было не более 30%, а потом оцениваем скажность импульсов напряжения на испарители с катодом СЦГ 20 и долю остальных компонентов для которых необходимо иметь один катод двухкомпонентный, с соотношением компонентов 50%/50% и два испарителя с однокомпонентными катодами (причём объединяя в двухкомпонентном катоде элементы с близкими парциальными давлениями при одинаковых температурах). Далее рассматриваем (в зависимости от выбранной последовательности слоёв, первый слой наружный для него выбираем диапазон глубин: минимальный и максимальный, а также размер зерна. Вторым по глубине бут слой из соединения или элементов 9 интерметаллидов) в зависимости от характера работы РИ: если РИ работает с ударной нагрузкой, то второй слой должен быть из чистого металла (интерметаллидный) или соединения демпфирующего информацию первого слоя. Последующие слои могут быть из химических соединений.

На рис.5 для ионов гафния представлены все 3 зависимости. Видно, что объём соответствующий наноструктурам (НС) реализуется до энергии ионов порядка 700–800 эВ и глубины: для минимальной 0 – $2,2 \cdot 10^{-8}$ м; для максимальной — $1,8 \cdot 10^{-9}$ – $3,2 \cdot 10^{-8}$ м. Видно, что с ростом массы иона объёмы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов. Для образования нитридов, необходимо, чтобы заряд и энергия ионов азота были такие, чтобы глубина его залегания была близка полученным для гафния (сравни рисунки 1 и 5).

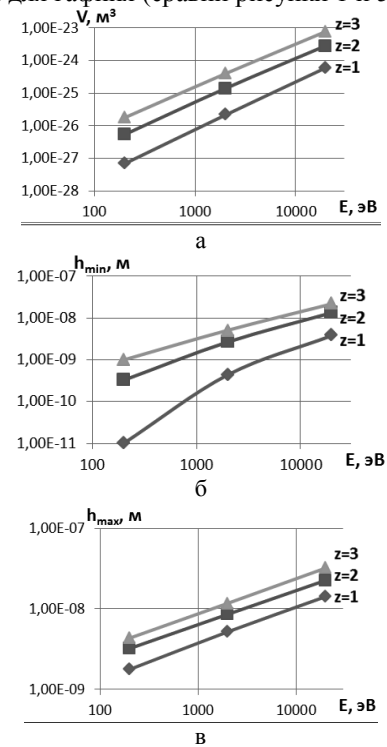


Рис. 6 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Перейдя к зависимостям для циркония Zr^+ (рис. 6) получим, что практически для всех исследуемых энергий реализуются НС. Причём при 200 эВ глубины залегания составляют: минимальная – $0 - 6,3 \cdot 10^{-10}$ м; максимальная – $3,34 \cdot 10^{-9} - 5,43 \cdot 10^{-9}$ м. При 2000 эВ минимальные – $6,37 \cdot 10^{-10} - 5,37 \cdot 10^{-9}$ м; максимальные – $5,4 \cdot 10^{-9} - 1,25 \cdot 10^{-8}$ м. Для 20 КэВ для минимальной глубины залегания – $4,6 \cdot 10^{-9} - 2,48 \cdot 10^{-8}$ м; для максимальной – $1,54 \cdot 10^{-8} - 3,52 \cdot 10^{-8}$ м.

Сравнения глубин залегания НС для ионов гафния и циркония с проникновением ионов азота видим, что многие энергии азота не могут быть использованы так как их глубина проникновения больше и во многих из режимов не будут образовываться нитриды, а будет довольно большое количество интерметаллидов, которые обладают малыми физико-механическими характеристиками, а следовательно будут зоны в материале с пониженными свойствами, что не обеспечит появление высоко энтропийных нитридных покрытий с хорошими характеристиками.

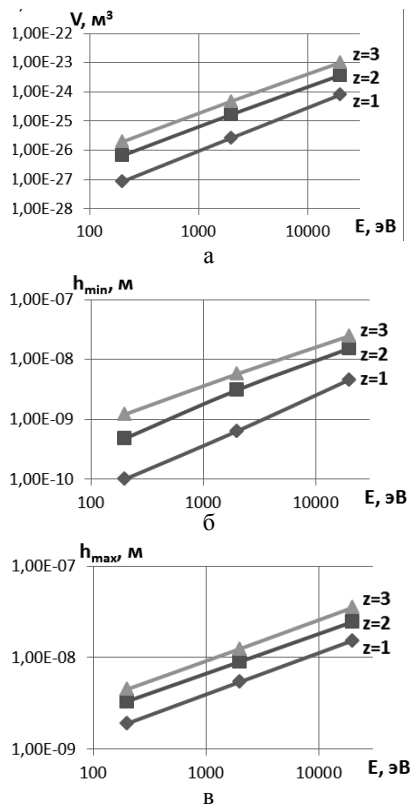


Рис. 7 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов циркония Zr^+ с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

Для молибдена (Mo^+) глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 - 1,18 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $1,89 \cdot 10^{-9} - 4,49 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $6,12 \cdot 10^{-10} - 5,65 \cdot 10^{-9}$ м; максимальная – $5,59 \cdot 10^{-9} - 1,23 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $4,47 \cdot 10^{-9} - 2,44 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,52 \cdot 10^{-8} - 3,48 \cdot 10^{-8}$ м (рис.7).

Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $0 - 1,52 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $2,1 \cdot 10^{-9} - 4,79 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $9,24 \cdot 10^{-10} - 6,63 \cdot 10^{-9}$ м; максимальная – $5,77 \cdot 10^{-9} - 1,35 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $5,7 \cdot 10^{-9} - 2,87 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,7 \cdot 10^{-8} - 3,95 \cdot 10^{-8}$ м (рис.9).

Для никеля глубины залегания ближе к глубинам залегания азота, что способствует эффективному образованию НС из нитридов.

Уменьшаются минимальная и максимальная глубины залегания зерна с увеличением массы иона, а также не значительно уменьшаются объёмы зерна.

Зона энергии, где возможно получение наноструктур, увеличивается, что положительно сказывается на физико-механических характеристиках покрытия, которое при наноструктурном зерне имеет большую микротвёрдость, предел текучести, предел прочности, повышается также коррозионная стойкость при этом увеличивается способность воспринимать ударные нагрузки за счёт снижения модуля упругости. Это позволяет выдерживать высокие нагрузки в зоне упругости, то есть при больших деформациях мы имеем не высокие напряжения.

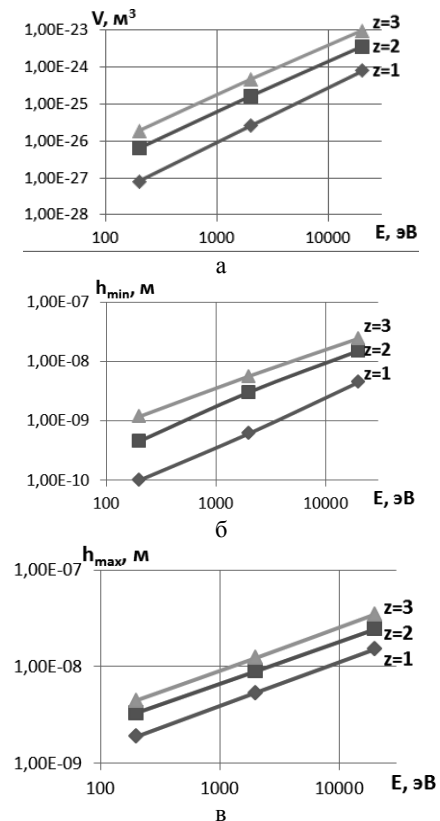


Рис. 8 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

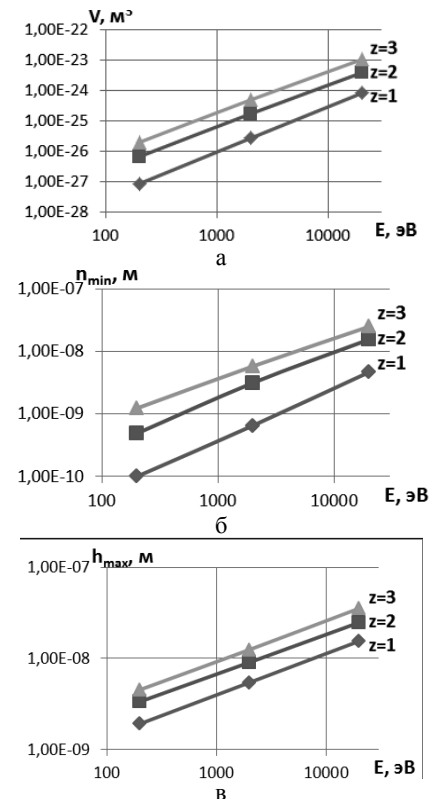


Рис. 9 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для T12A

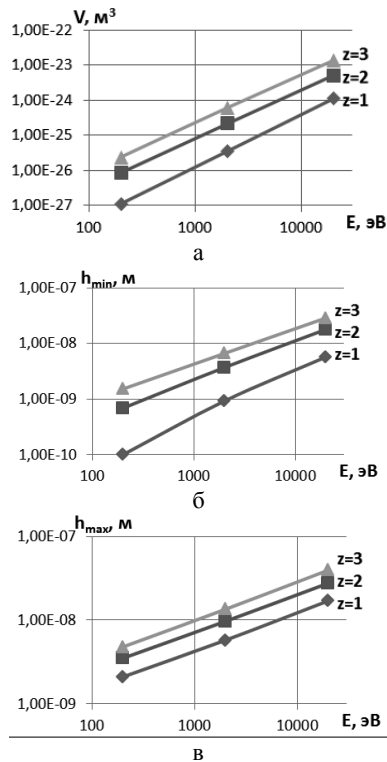


Рис. 10 – Зависимости объема нанокластера (НК) (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni^+) с различным зарядом ($z=1, z=2, z=3$) для Т12А

Необходимо также обеспечить пространственно-временной закон распределения ионов в материале детали с целью получения эффективных высокоэнтропийных нитридных, силицидных, карбидных, боридных и оксидных покрытий.

Выводы. В результате совместного действия всех рассмотренных сортов ионов мы можем получить высокоэнтропийное покрытие, а с учётом действия ионов азота (выбрав соответствующую энергию ионов) получаем высокоэнтропийное нитридное, силицидное и карбидное наноструктурное покрытие.

В заключение можно отметить, что благодаря созданию слоёв из высокоэнтропийных нитридных, карбидных, боридных и оксидных наноструктурных покрытий и выбрав последовательность слоёв (первый на поверхности с учётом адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом) мы можем конструировать эффективный режущий инструмент высокой работоспособности.

Показано, что для получения эффективных высокоэнтропийных покрытий необходимо за счёт управления установкой обеспечить соответствующий пространственно-временной закон распределения подачи ионов в материале РИ.

Предложен алгоритм выбора технологических режимов получения высокоэнтропийного нитридного,

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

карбидного, боридного и оксидного нанопокрyтия с чередующимися слоями и с учётом адгезионного взаимодействия поверхностного слоя с обрабатываемым материалом.

Список литературы

1. *Костюк, Г. И.* Эффективный режущий инструмент с нанопокрyтиями и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии / Г.И. Костюк – Харьков: «Планета-Принт», 2016. — 735 с.
2. *Костюк, Г. И.* Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. *Костюк, Г. И.* Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. *Костюк, Г. И.* Наноструктуры и нанопокрyтия: перспективы и реальность: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. *Костюк, Г. И.* Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. *Костюк, Г. И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. *Костюк, Г. И.* Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник / Г. И. Костюк. – Киев: Вид-во АІНУ, 2003. – 412 с.
8. *Гречихин, Л. И.* Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – Москва: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. *Аксенов, И. И.* Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. *Гусев, А. И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва: Физматлит, 2005. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Kostyuk, G.I.* Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference. in 2 books. Book 1. Plasma-ion and ion-beam technologies. Kharkov: "Planet-Print", 2016. 735 p.
2. *Kostyuk, G.I.* Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph. Kiev. Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472.
3. *Kostyuk, G.I.* Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph. Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. *Kostyuk, G.I.* Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help. Kharkov: The national aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2009. 406 p.
5. *Kostyuk, G.I.* Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.
6. *Kostyuk, G.I.* Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a monograph-reference book. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. *Kostyuk, G.I.* Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a reference book. Kiev: View of АІНУ, 2003. 412 p.
8. *Grechikhin, L.I.* Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies. Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. *Aksenov, I.I.* Vacuum arc in erosive plasma sources. Publishing house of scientific research institute "Kharkov Institute of Physics and Technology", 2005. 211 p.
10. *Gusev, A.I.* Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.

Поступила (received) 05.02.2018

Г. И. КОСТЮК, О. Д. ГРИГОР

СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В ЗОНЕ ЛАЗЕРНОЙ ФЕМТОСЕКУНДНОЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВОЛКАР ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК, СТОХАСТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ, ПРОСЧИТАННЫХ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Проведены сравнение температур и скорости нарастания температур, полученных при использовании теплофизических и термомеханических характеристик, как стохастических значений, так и полученных квантово-механическим методом.

Результаты сравнения показали, что при использовании квантово-механического метода полученные значения температур и скоростей нарастания температур несколько более высокие, чем при использовании стохастических значений. Это требует исследования не только влияния этих способов задания на температуру, но и самое важное на объем кластера, который мы должны провести в дальнейшем, для оценки адекватности того или иного метода задания теплофизических и термомеханических характеристик.

Ключевые слова: технологичні параметри лазера, фемтосекундний лазер, твердий сплав «ВолКар», ріжучий інструмент, наноструктурні шари.

Г. І. КОСТЮК, О. Д. ГРИГОР

ПОРІВНЯННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ У ЗОНІ ЛАЗЕРНОЇ ФЕМТОСЕКУНДНОЇ ОБРОБКИ ТВЕРДОГО СПЛАВА ВОЛКАР ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ І ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК, СТОХАСТИЧНИХ ЗНАЧЕНЬ, ПРОРАХУВАНІХ КВАНТОВО-МЕХАНІЧНИМ МЕТОДОМ

На основі теоретичного дослідження впливу технологічних параметрів фемтосекундного лазера (щільність теплового потоку, час Проведено порівняння температур і швидкості наростання температур, отриманих при використанні теплофізичних і термомеханічних характеристик, як стохастичних значень, так і отриманих квантово механічним методом.

Результати порівняння показали, що при використанні квантово механічного методу отримані значення температур і швидкостей наростання температур дещо вищі, ніж при використанні стохастичних значень. Це вимагає дослідження не тільки впливу цих способів завдання на температуру, але і найважливіше, на обсяг кластера який ми повинні провести в подальшому, для оцінки його того чи іншого методу завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик.

Ключові слова: технологічні параметри лазера, фемтосекундний лазер, твердий сплав «ВолКар», ріжучий інструмент, наноструктурні шари.

G. KOSTYUK, O. GRIGOR

COMPARISON OF TEMPERATURE REGIMES IN THE ZONE OF LASER FEMTOSECOND PROCESSING OF A VOLCAR SOLID ALLOY WHEN USING THERMOPHYSICAL AND THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS, STOCHASTIC MEANS OF READ QUANTUM MECHANICAL METHODS

Comparison of the temperatures and the rate of temperature increase obtained using thermophysical and thermomechanical characteristics, both stochastic values and quantum mechanical methods, are compared.

The results of the comparison showed that using the quantum mechanical method, the obtained values of temperatures and rates of temperature increase are somewhat higher than when using stochastic values. This requires research not only on the effect of these methods of setting on temperature, but, most importantly, on the volume of the cluster that we must carry out in the future, to assess the adequacy of this or that method of specifying thermophysical and thermomechanical characteristics.

Key words: technologic parameters of the laser, femtosecond laser, hard alloy "VolKar", radio tool, nanostructured balls.

Введение. В настоящее время, к сожалению, нет адекватной модели получения наноструктур при действия фемтосекундных лазеров, хотя и экспериментально были получены наноразмерные зерна на разных материалах.

Применение интегральных значений теплофизических и термомеханических характеристик обычно дает хорошее согласие результатов эксперимента при достаточно большом времени действия теплового источника. Поэтому нашей задачей было оценить возможность использования таких моделей (1-15) для оценки размера нанозерна с тем, чтобы выявить режимы обработки, при которых можно гарантированно говорить о получении наноструктур.

Квантово-механический способ задания теплофизических и термомеханических характеристик

ближе к процессам, которые реализуются в зоне действия фемтосекундного лазера. Поэтому необходимо было оценить насколько отличаются результаты по определению с температурой при стохастическом задании и квантово-механическом способе задания теплофизических и термомеханических характеристик.

Оценка адекватности модели при тех или иных способах задания теплофизических и термомеханических характеристик позволит оценить возможную ошибку то ли в определении этих характеристик то ли в модели. Так как квантово-механический подход обычно дает порядок величины, а само значение оно обычно не соответствует истинному значению.

Все это говорит о важности определения таких

© Г. И. Костюк, О. Д. Григор, 2018

характеристик как теплопроводность, теплоемкость, плотность, модуль упругости, коэффициент линейного расширения, которые могут существенно повлиять на точность определения объема наноструктур, а, следовательно, и точность предлагаемой модели.

Состояние вопроса. Несмотря на то, что в настоящее время имеется огромное количество работ по наноструктурам и их свойствам, монографии в которых они обобщены [4-10]. Два вопроса, которые не рассматривались в этих работах это: технологические параметры фемтосекундных лазеров для получения наноструктур, а также влияния характера задания теплофизических и термомеханических характеристик на точность прогноза этих технологических параметров.

Все выше изложенное говорит о том, что предлагаемая работа по исследованию влияния способа задания теплофизических и термомеханических характеристик материала на точность расчета и технологические параметры получения наноструктур есть важной и актуальной задачей.

Постановка задачи исследования. Проводилось решение совместной задачи теплопроводности и термоупругости [4] в которой использовались стохастические значения и полученные квантово-механическим методом теплофизические и термомеханические характеристики, проводилось исследования, как характер изменения температур, так и скорости ее изменения так и плотности теплового потока на разных глубинах.

Результаты и их обсуждение. На рисунках (а–ж) даны зависимости температур от плотности теплового потока на разных глубинах и разных временах действия (а- 10^{-10} , б- 10^{-11} , в- 10^{-12} , г- 10^{-13} , д- 10^{-14} , е- 10^{-15} , ж- 10^{-16} с)

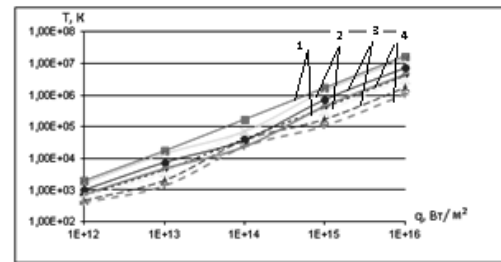
При следующих временах действия фемтолазера (а-с, б- 10^{-11} , в- 10^{-12} , г- 10^{-13} , д- 10^{-14} , е- 10^{-15} , ж- 10^{-16} с) рисунок 1.

При чем на этих рисунках сплошными линиями обозначены кривые при использовании квантово-механического метода, а пунктиром при использовании стохастических значений теплофизических и термомеханических характеристик.

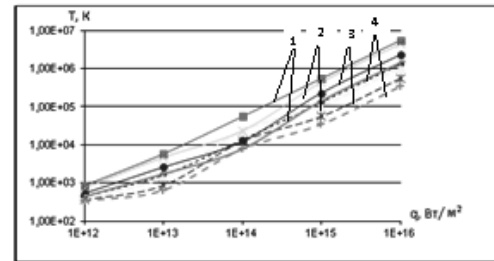
Анализ зависимости кривых показал, что при относительно невысоких плотностях теплового потока отличие относительно невелико, тогда как с ростом теплового потока этих значений увеличивается правда незначительно. А с уменьшением времени действия теплового потока это отличие возрастает. Видно, что фемтосекундный лазер очень чувствителен к способу задания теплофизических и термомеханических характеристик.

Исследования же скорости изменения температур от плотности теплового потока на разных глубинах представлены на рисунках 2 (а- 10^{-10} , б- 10^{-11} , в- 10^{-12} , г- 10^{-13} , д- 10^{-14} , е- 10^{-15} , ж- 10^{-16} с). Показано, что характер изменения скоростей роста температур соответствует характеру изменения температур от плотности теплового потока. В этом случае также для меньших времен отличие результатов увеличивается и несмотря на то, что эти скорости высоки и превышают

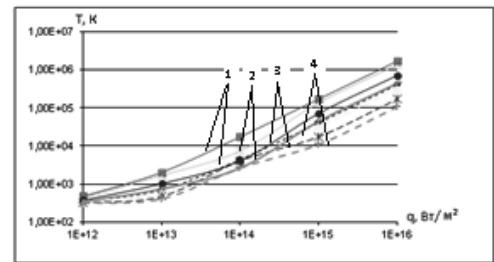
необходимые значения для получения наноструктур (10^{-7} Кс) поэтому необходимо также учитывать теплофизические и термомеханические способы задания.



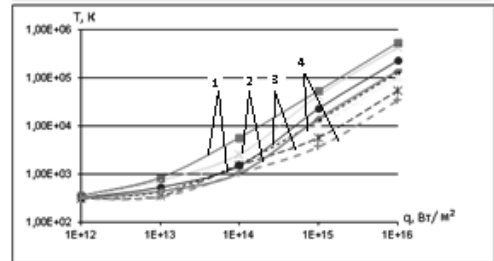
а



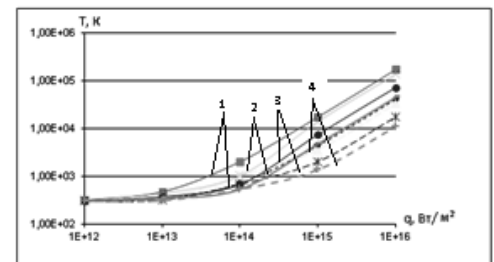
б



в

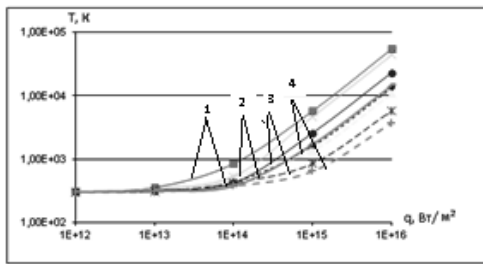


г

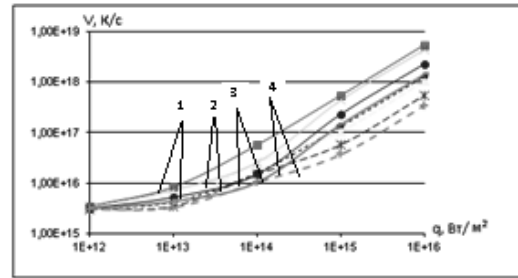


д

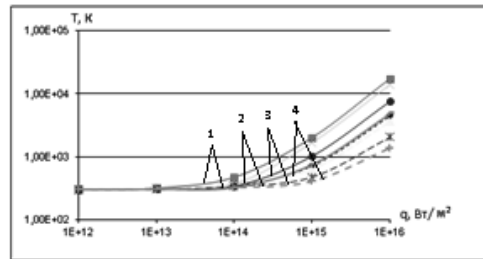
Рис. 1 – Зависимости максимальной температуры – T от плотности теплового потока q создаваемого лазерным излучением при разных временах его действия (а- 10^{-10} , б- 10^{-11} , в- 10^{-12} , г- 10^{-13} , д- 10^{-14} , е- 10^{-15} , ж- 10^{-16} с) и на разной глубине (1- $x=0$, 2- $x=1$, 3- $x=2$, 4- $x=3$) при разных способах задания теплофизических и термомеханических характеристик: _____ квантово-механическим методом, ----- стохастическим методом



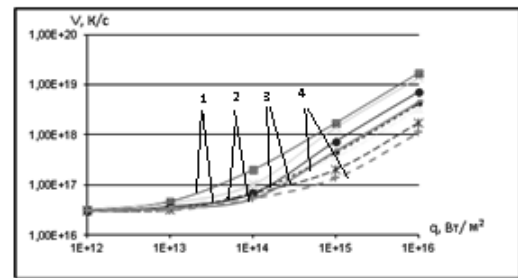
е



г



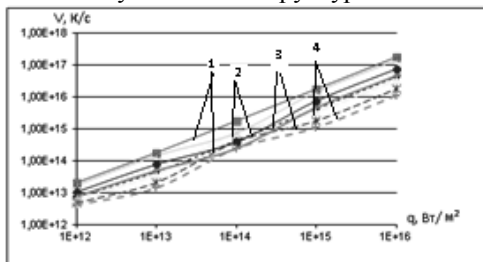
ж



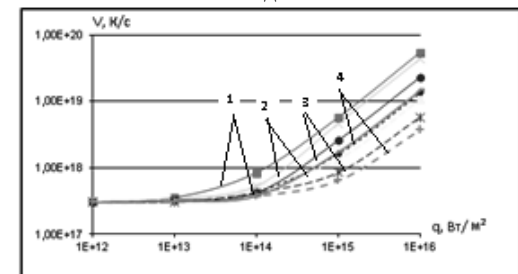
д

Рис. 1 – Продолжение

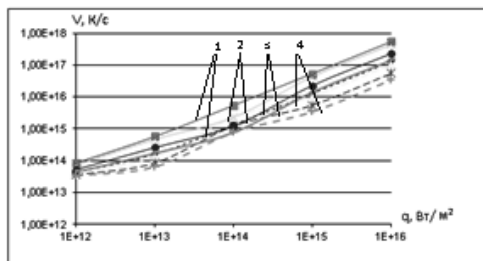
Но в рассмотренных вариантах эти значения существенно превышают необходимые для форсирования получения наноструктур.



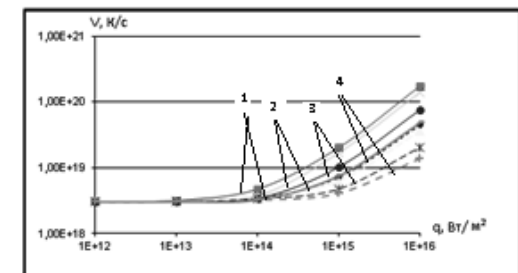
а



е

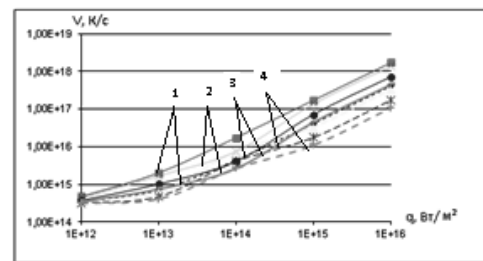


б



ж

Рис. 2 – Продолжение



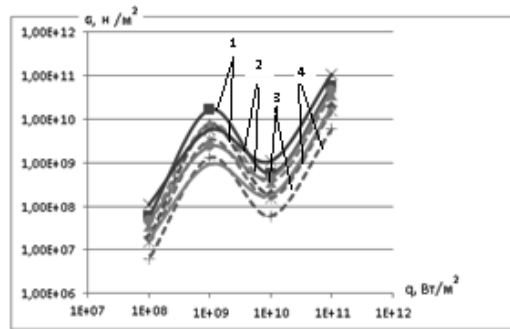
в

Рис. 2– Зависимости скорости изменения максимальной температуры – V от плотности теплового потока q создаваемого лазерным излучением при разных временах его действия (а- 10^{-10} , б- 10^{-11} , в- 10^{-12} , г- 10^{-13} , д- 10^{-14} , е- 10^{-15} , ж- 10^{-16} с) и на разной глубине (1- $x=0$, 2- $x=x1$, 3- $x=x2$, 4- $x=x3$) при разных способах задания теплофизических и термомеханических характеристик: _____ квантово-механическим методом, ----- стохастическим методом

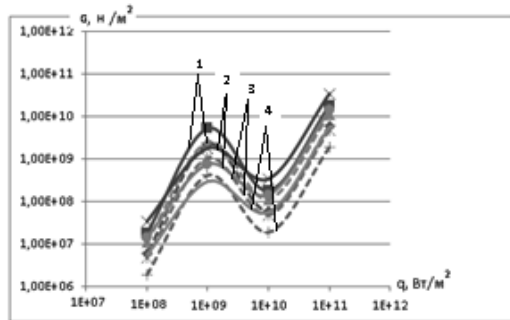
Все это говорит о том, что мы имеем дело с довольно тонким механизмом и большое значение будет иметь сопоставление теоретических значений и полученных экспериментально. Так как измерить, эти температура практически невозможно то мы будет проверять результаты по размеру наноструктур, которые можно будет оценить с помощью предложенной модели.

Так на рисунке 3 представлены зависимости температурных напряжений от плотности теплового потока на разных глубинах и для разных времен действия фемтолазера. Видно, что на всех есть зоны с максимумом, которые находятся вблизи 10^9 Вт/м² и минимум которые находятся вблизи 10^{10} Вт/м², в дальнейшем происходит рост температурных напряжений, что объясняется концентрацией тепловых полей в зоне плотности теплового потока 10^9 Вт/м² (смотри рисунок 1). В дальнейшем область

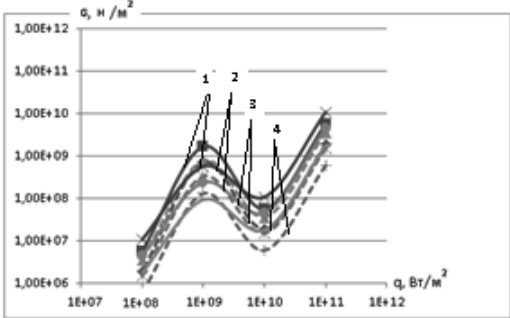
расширяется и достигает минимума при 10^{10} Вт/м². При дальнейшем росте теплового потока зона температур сжимается (градиент увеличивается, а значит, и растут напряжения).



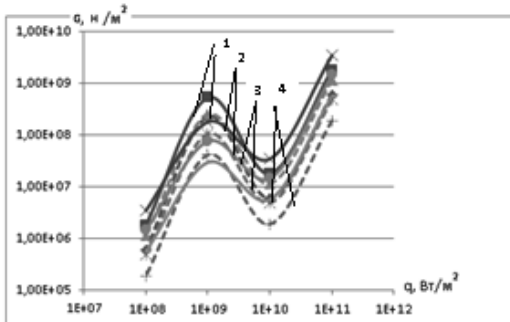
а



б

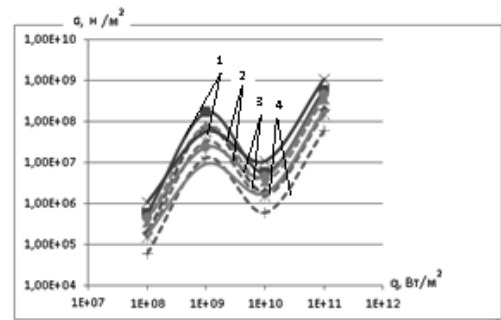


в

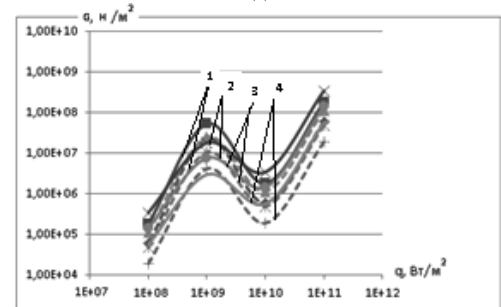


г

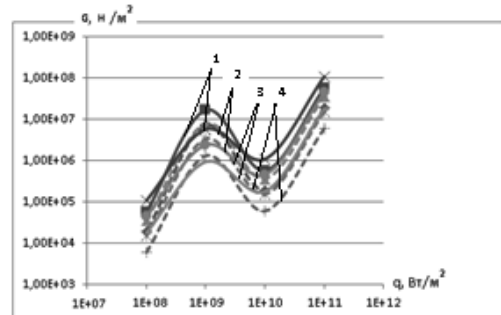
Рис. 3 – Зависимости температурных напряжений от плотности теплового потока q создаваемого лазерным излучением при разных временах его действия (а- 10^{-10} , б- 10^{-11} , в- 10^{-12} , г- 10^{-13} , д- 10^{-14} , е- 10^{-15} , ж- 10^{-16} с) и на разной глубине (1- $x=0$, 2- $x=x1$, 3- $x=x2$, 4- $x=x3$) при разных способах задания теплофизических и термомеханических характеристик: _____ квантово-механическим методом, ----- стохастическим методом.



д



е



ж

Рис. 3 – Продолжение

Величины температурных напряжений превышают 10^{10} Вт/м² только при трех временах (рис 3-а, 3-б, 3-в). В этом случае температурные напряжения могут, приводит к образованию наноструктур тогда как в остальных случаях они только ускоряют процесс образования наноструктур.

Выводы. Проведенные исследования получения наноструктур при разных способах задания теплофизических и термомеханических характеристик показал, что значение температур в случае квантово механического способа задания значительно выше чем при использовании стохастических значений. Причем для высоких значений плотности теплового потока эти отличия более существенны, особенно это заметно для времен 10^{-16} 10^{-14} .

Данные исследования, к сожалению, еще не позволяет говорить об адекватности модели с тем или иным способом задания теплофизических и термомеханических характеристик, поэтому для более точного определения адекватности модели необходимо будет сравнить объемы наноструктур получаемые в том или ином случае.

В то же время характер распределения температурных напряжениях показывает об их

высокой неоднородности: наличия максимума при плотности теплового потока $q=10^9$ Вт/м² и минимума при $q=10^{10}$ Вт/м², что объясняется максимальным градиентом температур при $q=10^9$ Вт/м² и его минимуме при $q=10^{10}$ Вт/м².

Показано, что при временах действия теплового потока при 10^{-10} , 10^{-11} , 10^{-12} , с. есть вероятность получения наноструктур только за счет температурных напряжений.

Обнаружено, что максимальные температурные напряжения реализуется при квантово-механическом способе задания теплофизических и термомеханических характеристик.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокртиями и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии / Г.И. Костюк – Харьков: «Планета-Принт», 2016. — 735 с.
2. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк, Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и

упрочненным слоем: справочник / Г. И. Костюк. – Киев.: Вид-во АИУ, 2003. – 412 с.

8. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – Москва: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозионных источниках плазмы / И. И. Аксенов. – Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
10. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва: Физматлит, 2005. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference. in 2 books. Book 1. Plasma-ion and ion-beam technologies. Kharkov: "Planet-Print", 2016. 735 p.
2. Kostyuk, G.I. Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph. Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472 p.
3. Kostyuk, G.I. Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph. Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. Kostyuk, G.I. Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help. Kharkov: The national. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2009. 406 p.
5. Kostyuk, G.I. Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.
6. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a monograph-reference book. Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. Kostyuk, G.I. Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a reference book. Kiev: View of AINU, 2003. 412 p.
8. Grechikhin, L.I. Physics of Nanoparticles and Nanotechnology. Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. Aksenov, I.I. Vacuum arc in erosive plasma sources. Kharkov: Publishing house of scientific research institute "Kharkov Institute of Physics and Technology", 2005. 211 p.
10. Gusev, A.I. Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.

Поступила (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

Григор Ольга Діонісовна (Григор Ольга Діонісівна, Grigor Olga Dionisovna) – студентка, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

A. В. ФЕСЕНКО, Е. В. БАСОВА, М. С. ИВАНОВА, Ф. М. ЕВСЮКОВА, А. С. ЗАБАРА

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ И ИСПЫТАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ РОТОРНО-КАВИТАЦИОННОГО АКТИВАТОРА

В статье приведены результаты анализа эффективности используемых элементов конструкции первой камеры роторно-кавитационного активатора РКА-02-11 и режимов ее работы по интенсивности тепловыделения. На основе методики анализа энергетических характеристик роторных гидродинамических активаторов, проведена оценка эффективности установки по энергоёмкости гидродинамического воздействия на рабочую технологическую среду. Анализ аппаратных средств и активации рабочих технологических жидкостей выполнен с учетом распределения энергии в рабочей зоне гидродинамических кавитационных установок.

Ключевые слова: активация, гидродинамическая кавитация, технологические жидкости, диссипативная энергия, тепловыделение, диспергатор.

A. В. ФЕСЕНКО, Е. В. БАСОВА, М. С. ИВАНОВА, Ф. М. ЕВСЮКОВА, О. С. ЗАБАРА

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ВИПРОБУВАННЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ РОТОРНО-КАВІТАЦІЙНОГО АКТИВАТОРА

У статті наведені результати аналізу ефективності елементів, що використовуються в конструкції першої камери роторно-кавітаційного активатора РКА-02-11 і режимів її роботи за інтенсивністю тепловиділення. На основі методики аналізу енергетичних характеристик роторних гідродинамічних активаторів, проведена оцінка ефективності установки по енергоємності гідродинамічного впливу на робочу технологічну середу. Аналіз апаратних засобів і активації робочих технологічних рідин виконаний з урахуванням розподілу енергії в робочій зоні гідродинамічних кавітаційних установок.

Ключові слова: активація, гідродинамічна кавітація, технологічні рідини, дисипативна енергія, тепловиділення, диспергатор

A. FESENKO, Ye. BASOVA, M. IVANOVA, F. YEVSUKOVA, A. ZABARA

ANALYSIS METHODS IN THE PROCESSING OF SURVEY DATA OF POPULATION

The article presents the results of the analysis of the efficiency of the elements used in the construction of the first chamber of the rotor-cavitation activator PKA-02-11 and its modes of operation according to the intensity of heat dissipation. On the basis of the method of analysis of the energy characteristics of rotor hydrodynamic activators, an estimation of the efficiency of the installation on the energy intensity of the hydrodynamic impact on the working technological environment. Analysis of hardware and activation of working process fluids is based on the distribution of energy in the working zone of hydrodynamic cavitation plants

Keywords: activation, hydrodynamic cavitation, technological fluids, dissipative energy heat generation, dispersant.

Введение. В последнее время для повышения эффективности технологических процессов все чаще используются различные системы и устройства, оказывающие влияние на физико-химические свойства используемых жидкотекучих компонентов. При этом используются различные виды воздействия на рабочую среду [1]. Так, в роторных гидродинамических активаторах энергия, получаемая потоком жидкости при вращении элементов рабочей зоны, кроме создания определенного напора на выходе, расходуется на изменение физико-химического состояния жидкости и переходит в диссипативную. При определении эффективности устройств и технологий такого вида активации важным моментом является анализ затрат энергии, на основании которого можно оценить интенсивность воздействия на продукт в рабочей зоне [2, 3].

Предложенная методика оценки гидродинамической кавитации [4], основанная на сравнении затрат энергии в рабочей зоне, позволяет выполнить анализ эффективности используемых элементов конструкции установки и режимов ее работы по интенсивности тепловыделения. Приведенные расчетные зависимости могут использоваться как для оценки отдельных блоков, так и всей системы.

Материалы исследований. Используя методику энергетического анализа [4], рассмотрим конструкцию

и выполним исследование работоспособности первой камеры гидродинамического активатора.

Роторно-кавитационный активатор (РКА), предназначен для активации жидких сред, для ускорения массообменных и других технологических процессов. В частности установка РКА-02-11 используется для приготовления и восстановления СОЖ (рис.1).

Установка имеет две рабочие камеры. В первой камере выполняется предварительная обработка рабочего продукта, которая должна обеспечить его однородность и мелкодисперсность. Рабочие элементы, установленные в этой камере, определяются технологическими задачами и могут иметь конструкцию роторно-пульсационного типа для обработки вязких сред, или диск с лопастями (крыльчатка) для обработки жидкостей. При обработке СОЖ используется крыльчатка в виде диска с радиальными лопастями, расположенными под углом к плоскости вращения.

Конструкция первой камеры представляет собой нагнетатель центробежного типа с рабочим колесом, имеющим два участка: диск с лопастями полуоткрытого типа и радиальные лопасти открытого типа (рис.2).

Ширина рабочей камеры H определяется шириной лепестков B и боковыми зазорами $G1$ и $G2$.

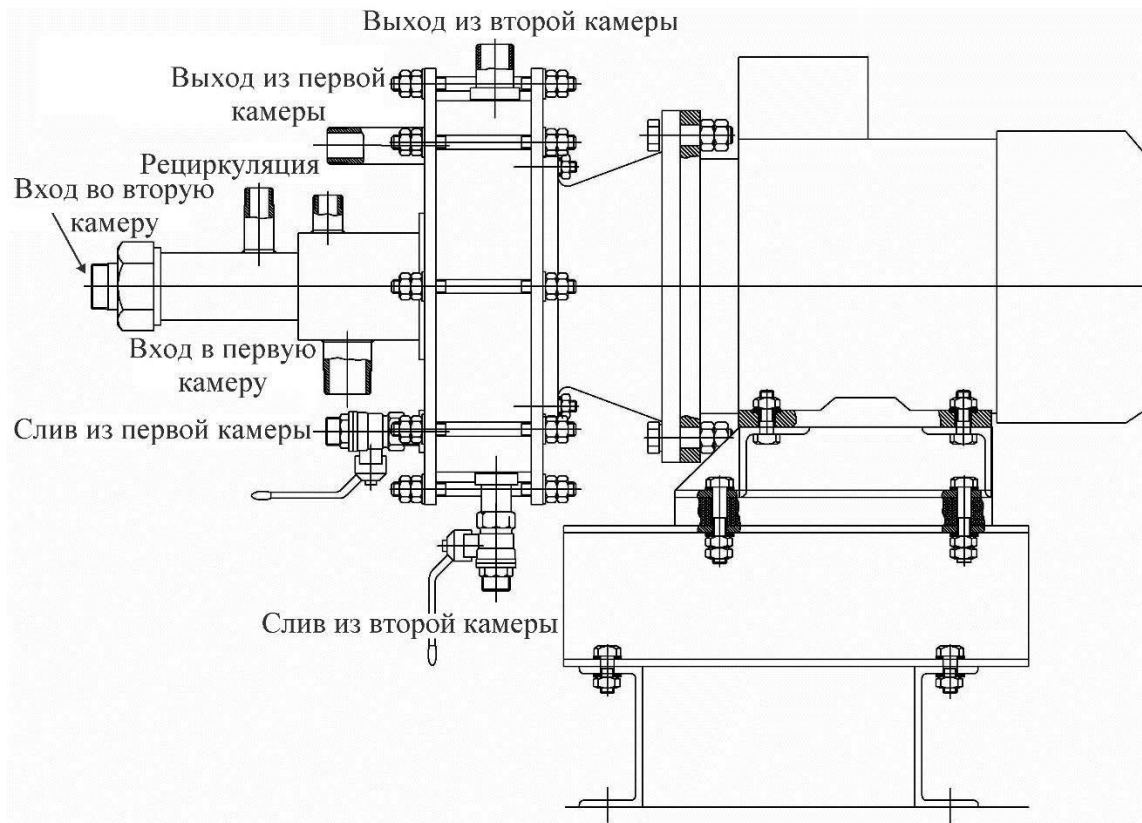


Рис. 1- Роторно-кавитационный активатор РКА-02-11

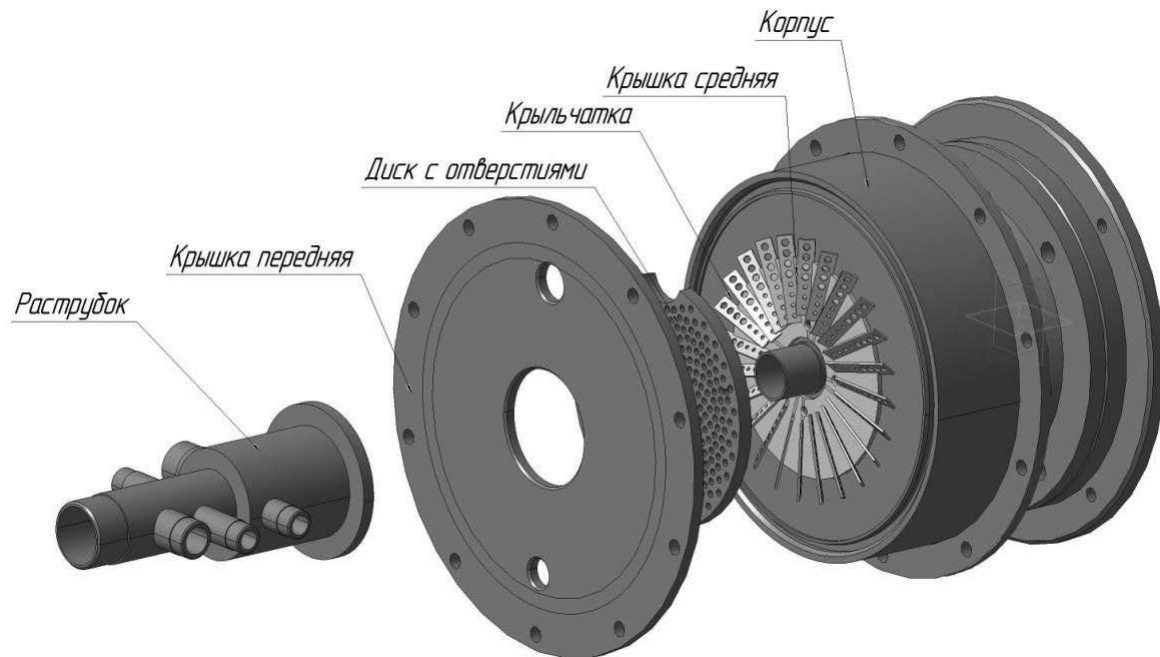


Рис. 2 – Первая камера активатора РКА-02-11

При вращении крыльчатки жидкость перемещается от входа до конца лопасти. При определенном соотношении упругих характеристик лопастей и гидродинамической обстановки в рабочей камере на крыльчатке могут возникать колебания лопастей, которые будут генерировать акустические колебания в среде, вызывающие кавитацию.

При вращении крыльчатки с обратной стороны по направлению вращения создается зона разрежения с интенсивным перемешиванием и кавитацией. Такая конструкция не позволяет выполнять эффективное перекачивание жидкости, но способствует интенсивной диссипации энергии, проявляющейся в нагреве рабочей среды.

При закрытом выходе из камеры при вращении жидкости с объемным весом γ центробежные силы должны создать давление, определяемое частотой вращения ω и расположением участка разгона потока от входа $R_{ВХ}$ до конца лопатки R_L [5]

$$P_K = \frac{\gamma \omega^2 (R_L^2 - R_{ВХ}^2)}{2g}. \quad (1)$$

В общем случае суммарное давление в рабочей зоне определяется с учетом давления на входе P_O .

$$p = P_K + P_O. \quad (2)$$

Кроме того, при открытом выходе в рабочей зоне будет создаваться разрежение, обусловленное сужением струи при увеличении радиальной скорости жидкости

Расположение лопастей на вертушке $R_{ВХ} = 80$ мм и $R_L = 180$ мм. Рабочая среда – вода $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$. При закрытом канале выхода (и $P_O = 0$) максимальное

расчетное давление будет равно $P_{\text{рас}} = 0.316$ МПа.

Экспериментальное значение максимального давления на выходе $P_{\text{max}} = 0.25$ МПа. Различие расчетного и измеренного давления можно объяснить перетоком жидкости из полости нагнетания через боковые зазоры, отверстия и наклонным расположением лопастей. Поэтому при расчете давления в рабочей полости данной конструкции необходимо вводить коэффициент потерь напора

$$K_T = P_{\text{max}} / P_{\text{рас}} = 0,79. \quad (4)$$

Оценка и анализ полученных результатов.

Оценка эффективности работы первой камеры выполнялась на стенде, оснащенный измерительными приборами. При проведении экспериментов на воде измеряли давление на входе ($P1$) и выходе ($P2$) аппарата; температура в потоке на входе ($T1$) и выходе ($T2$); производительность установки (Q) по расходомеру и нагрузка на электродвигатель (N).

Переменным параметром было давление на выходе из аппарата ($P2$), величина которого устанавливалась с помощью крана на выходе.

Результаты измерений параметров и расчетные данные показаны на графиках (Рис.5 и 6).

При открытом кране на выходе первая камера работает с наибольшей производительностью $Q = 2.4 \text{ м}^3/\text{час}$. При этом давление на выходе $P2 = 0.08 \text{ МПа}$ характеризует сопротивление в трубопроводе. Разрежение на входе составляло при этом $P1 = -0.06 \text{ МПа}$. Общий напор $P_{\Sigma} = 0.14 \text{ МПа}$.

Анализ энергетических показателей свидетельствует о том, при что увеличении давления на выходе до $P2 = 0.1 \text{ МПа}$ диссипативная мощность вначале увеличивается до $N_t = 6.69 \text{ кВт}$, затем снижается, и при $P2 = 0.2 \text{ МПа}$ составляет 3.14 кВт . Коэффициент эффективности наибольший при $P2 = 0.1 \text{ МПа}$. В этом случае он равен $K_T = 0.88$.

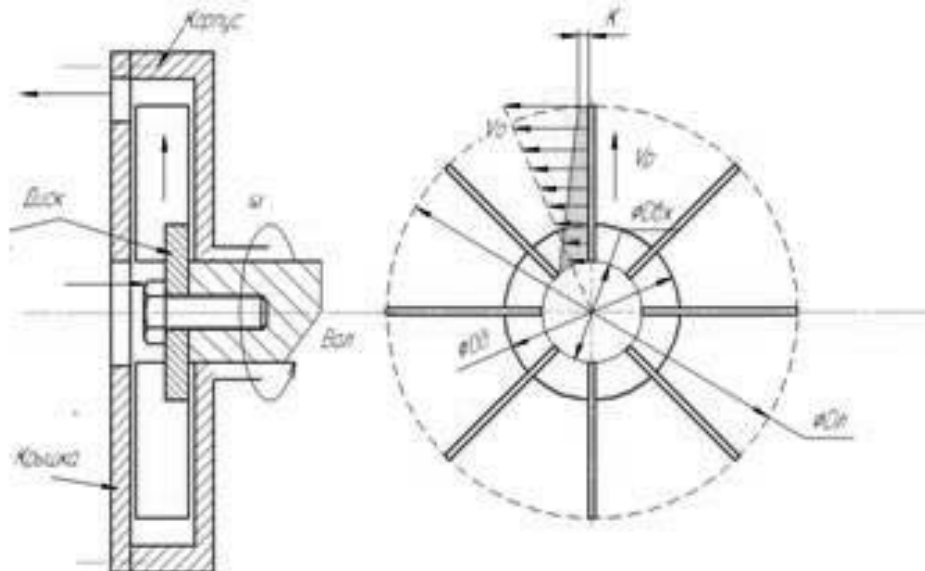


Рис. 4 – Расчетная схема работы диска

Удельная энергия диссипации Wt увеличивается с увеличением давления на выходе от 2.33 до 5.24 $кВт/м^3$, что свидетельствует об интенсификации кавитационных процессов при создании сопротивления на выходе из камеры. При этом абсолютные значения и эффективной мощности электродвигателя N_e , и тепловой N_t при $P=0.2 МПа$ уменьшаются.

Оценку эффективности установки в производственных условиях можно выполнить при определении интенсивности нагрева рабочей среды массой M с теплоемкостью T_e , залитой в систему активатора.

Во время испытаний на выбранном режиме работы выполняется измерение температуры жидкости T в баке и металлоконструкций T_m в

начальный момент и через определенное время τ . Количество затраченной электроэнергии определяется по счетчику W .

Интенсивность нагрева воды в системе при работе на бак определялась при испытаниях крыльчатки, установленной в первой камере активатора РКА-02-11. Вторая камера была пустой. В систему было залито 15 литров воды. Схема измерений Работа выполнялась при колебаниях давления на выходе, среднее значение которого было равно $P=0.12 МПа$ и среднее значение расхода за этот период было $Q=2.0 м^3/час$. Замеры выполнялись в течении времени $\tau=5$ минут.

Количество затраченной энергии (по счетчику) было $W_c=0.766 кВт \cdot час$. За это время среднее значение мощности электродвигателя $N_c \approx 9.2 кВт$, а холостого хода $N_{xx}=1.6 кВт$.

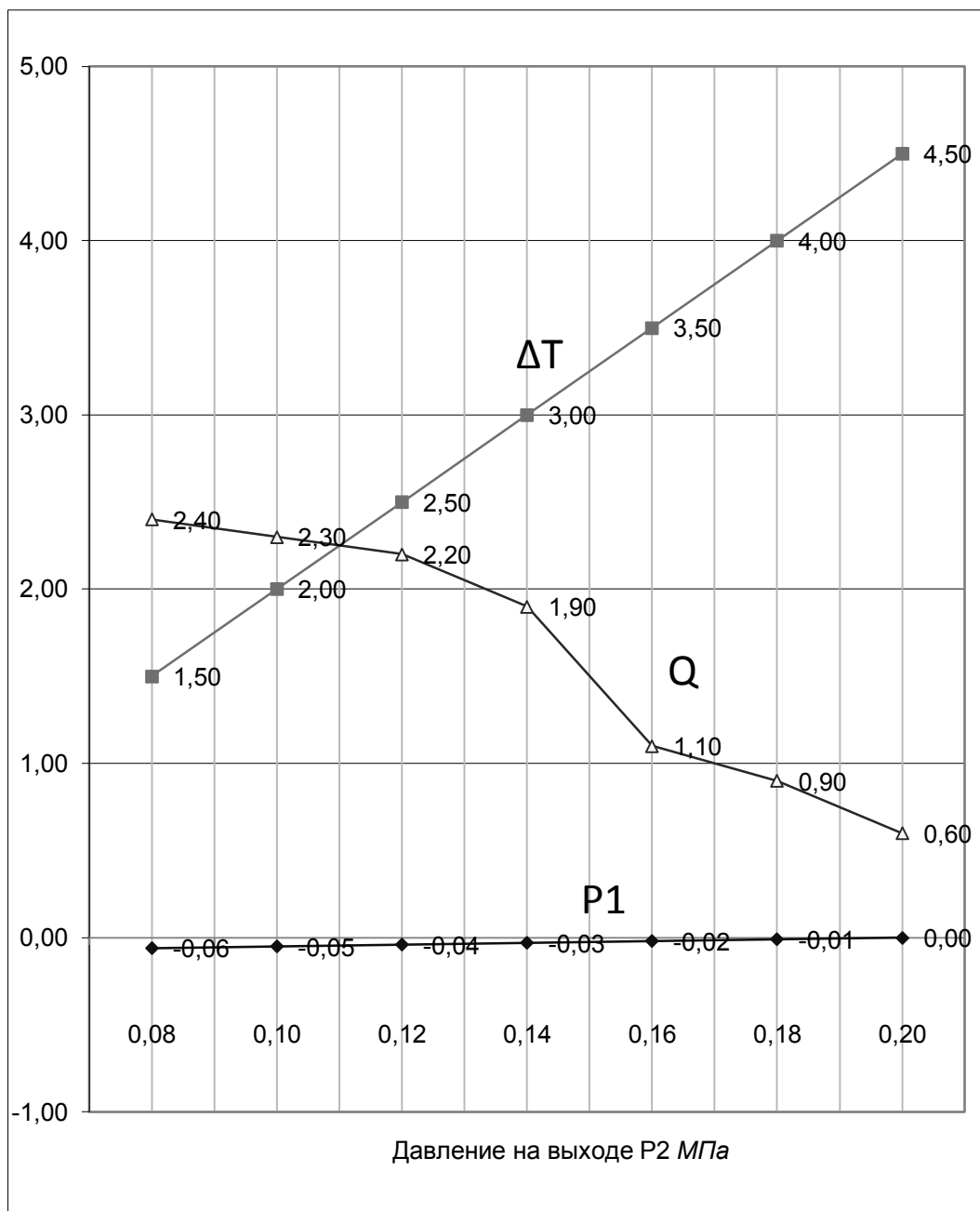


Рис. 5 – Гидродинамические характеристики первой камеры

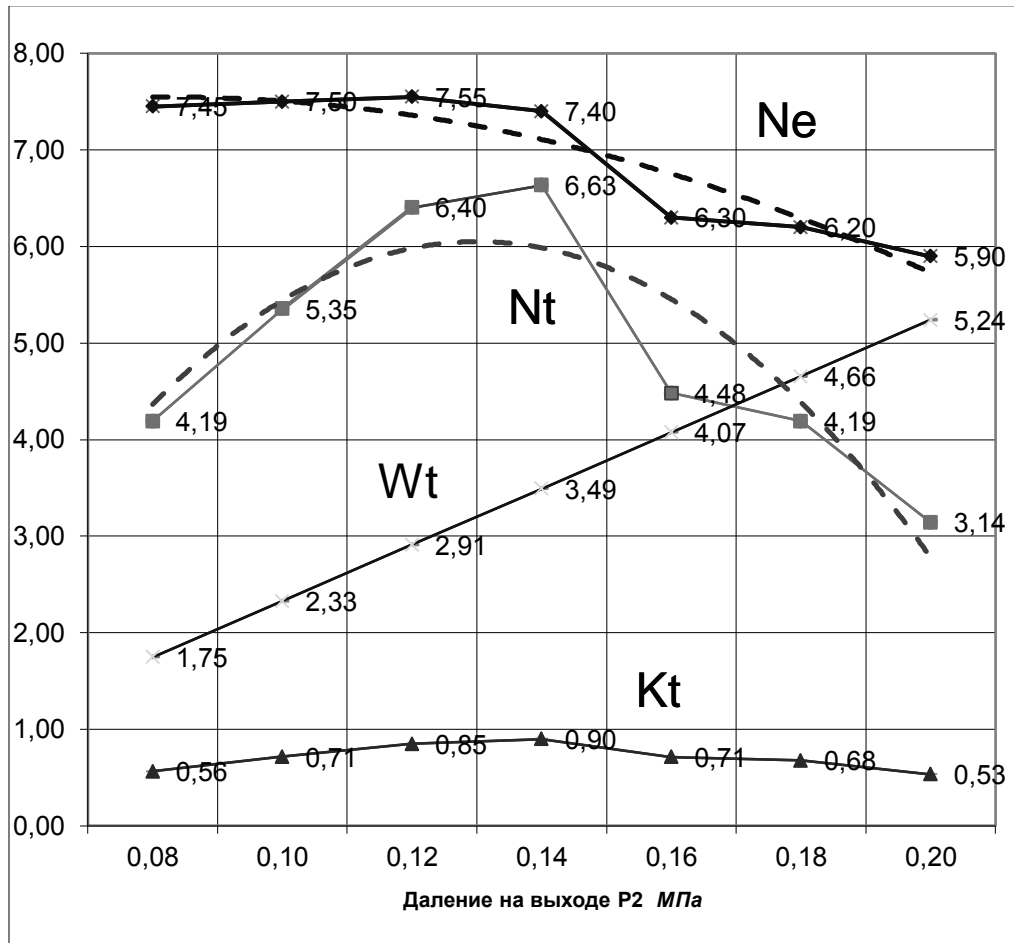


Рис. 6 – Энергетические показатели первой камеры

В результате проведенного эксперимента установлено, что данная конструкция рабочей зоны первой камеры активатора РКА-02-11 при выбранном режиме работы обеспечивает скорость нагрева в системе $Vt = 5.8$ град/мин, при этом интенсивность нагрева составляет $Wt = 87$ град·кг/мин. Гидравлическая мощность $Ng = 0.667$ кВт, а энергия, затрачиваемая на перекачку жидкости $Wg = 0.056$ кВт·час.

Энергия, соответствующая нагреву воды составила $Wt = 0.504$ кВт·час, расчетное значение затрат эффективной энергии составляет $We = 0.630$ кВт·час. При этом коэффициент эффективности $Kt = 0.84$. (Рис.8)

Выводы. Как видно, при использовании данной конструкции рабочей камеры затраты гидравлической мощности незначительны.

Проведенные исследования показали, что конструкция передней камеры в виде крыльчатки с наклонными лопастями и диска с ячейками позволяет обеспечить средний уровень кавитационной обработки, что в некоторых случаях может быть достаточным для получения требуемого технологического эффекта.

Из приведенного выше анализа можно сделать вывод, что оптимальным режимом работы первой камеры данной конструкции является диапазон давлений на

выходе от $P_2 = 0.11$ до 0.15 МПа при расходе $Q = 2.0$ м³/час.

Такая конструкция может использоваться в активаторах для интенсификации перемешивания с целью получения гомогенной эмульсии.

Список литературы

1. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. *Использование кавитации в технологических процессах*. Киев: Вища школа, 1984. 68 с.
2. Промптов М. А. *Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика: Монография*. Москва: Машиностроение – Т. 1, 2001. 260 с.
3. *Интенсифікація процесів механічної обробки: монографія*/ В.С. Карпусь, В.О. Іванов, О.В. Котляр та ін.; за ред. В.С. Карпуся. - Суми: Сумський державний університет, 2012. - 436 с.
4. Фесенко А. В., Любимый Ю. Н. Сравнительный анализ гидродинамических установок для диспергирования, гомогенизации и нагрева жидкости. *Вісн. Сумського державного університету. Сер.: Техн. науки*. Суми: СДУ, 2009. № 4. С. 103-109. URI: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/10273> (дата обращения 01.05.2018).
5. Кононов А. А., Кобзов Д. Ю., Кулаков Ю. Н., Ермашонок С. М. *Основы гидравлики. Курс лекций*. Братск: ГОУВПО «БрГТУ», 2004. 92 с.

References (transliterated)

1. Fedotkin I. M., Nemchin A. F. *Ispol'zovanie kavitacii v tehnologicheskikh processah* [The use of cavitation in technological processes]. Kiev, Vishha shkola Publ., 1984. 68 p.

2. Promptov M. A. *Pul'sacionnye apparaty rotornogo tipa: teoriya i praktika: monografija* [Pulsating apparatuses of rotary type: theory and practice: monograph.]. Moskva, Mashinostroenie – Vol. 1, 2001. 260 p.
3. Karpus V. E., Ivanov V. O., Kotliar O. V. et al. *Intensyfikacija procesiv mehaničnoj obrobky* [Intensification of Manufacturing Processes]; edited by V. E. Karpus. Sumy, Sumy State University, 2012, 436 p., doi: 10.13140/2.1.3953.7604.
4. Fesenko A. V., Ljubimyj Ju. N. Sravnitel'nyj analiz gidrodinamicheskikh ustanovok dlja dispergirovaniya, gomogenizacii i nagreva zhidkosti [Comparative analysis of hydrodynamic devices for dispersion, homogenization and heating of liquid]. *Vistn. Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Ser.: Tehn. nauki*. Sumi: SDU, 2009, no. 4. pp. 103-109. Available at: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/10273> (accessed 01.05.2018).
5. Kononov A. A., Kobzov D. Ju., Kulakov Ju. N., Ermashonok S. M. *Osnovy gidravliki. Kurs lekcij* [Fundamentals of hydraulics. Lecture course]. Bratsk, GOUVPO «BrGTU», 2004. 92 p.

Поступила (received) 05.02.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фесенко Анатолій Володимирович (Фесенко Анатолий Владимирович, Fesenko Anatolij Vladimirovich) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0626-0180>; e-mail: anfesenko73@gmail.com.

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8549-4788>; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Іванова Марина Сергіївна (Иванова Марина Сергеевна, Maryna Ivanova) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0848-6805>; e-mail: ivanovamaryna1@gmail.com.

Євсюкова Фатима Магометбієвна (Евсюкова Фатима Магомедбиевна, Fatima Yevsiukova) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9764-4106>, e-mail: fatimaevsukova@gmail.com.

Забара Олександр Сергійович (Забара Александр Сергеевич, Zabara Aleksandr) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5893-3861>; e-mail: zabara_a@ukr.net.

В. В. ГЕРАСИМ, В. Г. ОХРЕМ

НОВІ АСПЕКТИ ФІЗИКИ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ

Запропоновано моделі термоелектричних холодильників Пельтьє, в яких гілки p - і n - провідностей розташовані в лінію і з'єднані між собою встик або за посередництвом мідної перемички. Розраховані температури стиків гілок між собою і між гілками і мідною перемичкою. Розрахунки виконані за допомогою пакета математичних програм MAPLE. Одержані залежності температур T_1 і T_2 від густини електричного струму для двох випадків. Проведено оцінку глибини охолодження цих пристроїв. Досліджено також вплив ефекту Томсона на ці температури. Викладені результати розрахунків потребують експериментального підтвердження і поглиблення теоретичних досліджень: необхідно провести більш глибокі дослідження з порушених у статті питань з метою з'ясування механізмів охолодження, підбору термоелектриків, геометричних розмірів структурних елементів холодильників. У статті зроблено аналіз отриманих результатів, надано практичні рекомендації.

Ключові слова: ефект Пельтьє, ефект Томсона, термоелектричний холодильник Пельтьє, глибина охолодження, теплопровідність, електропровідність.

В. В. ГЕРАСИМ, В. Г. ОХРЕМ

НОВЫЕ АСПЕКТЫ ФИЗИКИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Предложены модели термоэлектрических холодильников Пельтье, в которых ветви p - и n - проводимостей расположены в линию и соединены между собой встык или посредством медной перемычки. Рассчитаны температуры стыков ветвей между собой и между ветвями и медной перемычкой. Расчеты выполнены с помощью пакета математических программ MAPLE. Полученные зависимости температур T_1 и T_2 от плотности электрического тока для двух случаев. Проведена оценка глубины охлаждения этих устройств. Исследовано также влияние эффекта Томсона на эти температуры. Изложенные результаты расчетов требуют экспериментального подтверждения и углубления теоретических исследований: необходимо провести более глубокие исследования по затронутым в статье вопросам с целью выяснения механизмов охлаждения, подбора термоэлектриков, геометрических размеров структурных элементов холодильников. В статье сделан анализ полученных результатов, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: эффект Пельтье, эффект Томсона, термоэлектрический холодильник Пельтье, глубина охлаждения, теплопроводность, электропроводность.

V. V. GERASIM, V. G. OKRIM

NEW ASPECTS OF THERMOELECTRIC COOLING PHYSICS

Models of thermoelectric refrigerators of the Peltier model in which the branches of p - and n - conductivity are located in a line and are connected to each other by means of a copper jumper. The temperature of the joints of the branches between each other and between the branches and the copper jumper are calculated. Calculations are made using the package of mathematical programs MAPLE. Temperature dependences of T_1 and T_2 on the density of electric current are obtained for two cases. An estimation of cooling depth of these devices is carried out. The effect of Thomson's effect on these temperatures has also been studied. The presented results of calculations require experimental confirmation and deepening of theoretical studies: it is necessary to carry out more in-depth studies of the issues raised in the article in order to find out the mechanisms of cooling, selection of thermoelectrics, and the geometric dimensions of the structural elements of refrigerators. The article analyzes the obtained results, provides practical recommendations.

Keywords: Peltier effect, Thomson effect, Peltier thermoelectric fridge, cooling depth, thermal conductivity, electrical conductivity.

Вступ. Напівпровідниковий термоелектричний холодильник (ТХ) Пельтьє складається з двох напівпровідникових гілок n - і p - провідностей, які можуть бути розташовані послідовно (в лінію) і з'єднані між собою встик (рис. 1, а), або паралельно і з'єднані комутаційною (мідною) перемичкою (рис. 1, б). На практиці частіше застосовується ТХ, в якому гілки розташовані паралельно. Цей ТХ зручний для використання, тому що має досить велику холодильну площадку і тому охолоджуваний об'єкт може мати досить великі розміри.

Цей варіант ТХ був запропонований і детально вивчений А. Ф. Іоффе з співробітниками в середині минулого століття [1-4]. Він широко застосовується і в наш час в різних областях науки і техніки. Дослідженню і застосуванню цих холодильників присвячена велика кількість робіт (див., наприклад, [5-9]). Серед цих робіт є і роботи одного із авторів даної публікації [11-15].

Вважається, що спосіб з'єднання гілок не впливає (або слабо впливає) на глибину охолодження. Більш того, вплив перемички на ефект охолодження взагалі

не досліджувався. Основні вимоги, що пред'являються до перемички полягають у тому, що вона повинна мати високі теплопровідність і електропровідність. Зазвичай матеріалом служить мідь, яка задовольняє цим вимогам. Температура перемички вважається постійною і рівною T_0 . Таким чином, перемичка є елементом конструкції ТХ, який в охолодженні участі не бере.

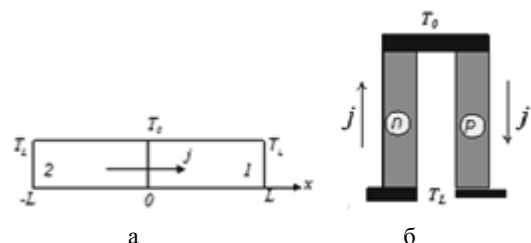


Рис. 1 – Схема напівпровідникового термоелектричного холодильника: а - з'єднання гілок ТХ встик, б - з'єднання гілок за допомогою металевий перемички

Між тим на з'єднаннях торців гілок з металом утворюються контакти, на яких виділяється або поглинається (в залежності від напрямку струму) в найбільшій кількості тепло Пельтьє [10]. Тому цікавим є врахування впливу перемички на ефект охолодження. Звичайно, дослідити цей вплив, використовуючи схему ТХ, зображену на рис. 1, б важко, оскільки потрібно вважати, що і струм, і температура двовимірні. При цьому задача сильно ускладнюється і в аналітичному вигляді не може бути розвязана. Тому в роботі розглянута інша схема (див. рис. 2), яка з одного боку якось доповнить відомі результати, а з іншого - призведе до результатів, які раніше не були відомі.

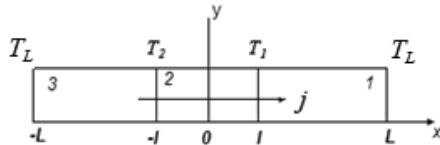


Рис.2 - Схема ТХ, що складається з двох напівпровідникових гілок 3 (n-тип), 1 (p-тип) і мідної перемички 2. T_L - температура гарячої сторони (термостата) ТХ, T_1 і T_2 - температури стиків, L і l - лінійні розміри, j - густина електричного струму

Крім того в статті зроблено розрахунок розподілу температури з урахуванням впливу ефекту Томсона на величину зниження температури. Нижче проведені ці дослідження і отримані нові результати.

1. Дослідження роботи лінійного ТХ Е.Х. Ленца

Пристрій, схема якого зображена на рис.1, а, вперше застосував Е. Х. Ленц в 1838 р. для демонстрації ефекту Пельтьє. На стику гілок, виготовлених з вісмуту і сурми, в невеликому заглибленні він розміщував краплю води, яка при одному напрямку струму випаровувалася, а при протилежному - замерзала. Ця стаття присвячена дослідженню різних варіантів цього пристрою. У зв'язку з цим цей пристрій назовемо термоелектричним холодильником Ленца.

Розглянемо модель холодильника, зображеного на рис.1, а. У припущенні, що температури в гілках 1 і 2 одновимірні, знаходимо їх розподіли:

$$T_1(x) = -\frac{1}{2}b_1x^2 + \frac{1}{2}\frac{L^2b_1 - 2T_0 + 2T_L}{L}x + T_0,$$

$$T_2(x) = -\frac{1}{2}b_2x^2 - \frac{1}{2}\frac{L^2b_2 - 2T_0 + 2T_L}{L}x + T_0.$$

В цих формулах T_0 - температура стику, T_L - температура термостата, L - довжини гілок, $b_1 = \rho_1 j^2 / \kappa_1$, $b_2 = \rho_2 j^2 / \kappa_2$; $\kappa_1, \kappa_2, \rho_1, \rho_2$ - питомі теплопровідності і опори матеріалів гілок.

З рівняння $-\kappa_1 \frac{L^2b_1 - 2T_0 + 2T_L}{2L} + \alpha_1 T_0 j = \kappa_2 \frac{L^2b_2 - 2T_0 + 2T_L}{2L} + \alpha_2 T_0 j$, яке виражає собою умову рівності теплових потоків на стику гілок 1 і 2, знайдемо температуру T_0 :

$$T_0 = \frac{1}{2} \frac{L^2 (b_1 \kappa_1 + b_2 \kappa_2) + 2T_L (\kappa_1 + \kappa_2)}{Lj (\alpha_1 - \alpha_2) + \kappa_1 + \kappa_2}.$$

Графічна залежність T_0 від густини електричного струму, що отримана за допомогою пакету математичних програм MAPLE, наведена на рис.3. Для розрахунків обрані такі матеріальні і розмірні константи:

$$\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}, \alpha_2 = -2 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}, \kappa_1 = \kappa_2 = 0.02 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}, \rho_2 = 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}, L = 0.5 \text{ см}, T_L = 300 \text{ К}.$$

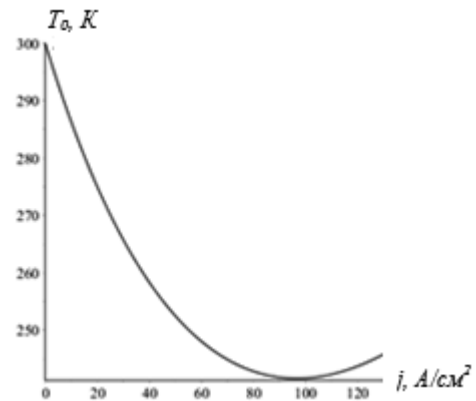


Рис.3 - Крива залежності температури стику від густини електричного струму

Як видно з рис. 3 глибина охолодження в цій простій моделі становить близько 60 К. Цей же результат виходить і в випадку, зображеному на рис. 1, б.

2. Термоелектричне охолодження з урахуванням ефекту Томсона

З фізичної точки зору цікавим є врахування впливу тепла Томсона на глибину охолодження. Вже згадана модель дає можливість це зробити. Нагадаємо, що ефект Томсона - це виділення або поглинання додаткового до тепла Джоуля тепла, яке з'являється при одночасній наявності градієнта температури і вектора густини електричного струму. Виділення або поглинання залежить від того колінеарні чи антиколінеарні ці вектори. З урахуванням явища Томсона диференціальні рівняння теплопровідності матимуть вигляд:

$$\kappa_i \cdot \frac{d^2 T_i}{dx^2} + \tau_i \cdot j \cdot \frac{dT_i}{dx} + \rho_i \cdot j^2 = 0,$$

де i - номер гілки ТХ, τ_i - коефіцієнт ефекта Томсона. За визначенням $\tau_i = T_i \cdot d\alpha_i / dT$, α_i - термоЕДС. В рівнянні теплопровідності другий член являє собою ефект Томсона. Видно, що, якщо термоЕДС постійна, то ефект Томсона відсутній. В попередньому випадку ми вважали, що термоЕДС постійна. Тому там ефект Томсона був відсутній. Насправді термоЕДС від температури залежить. Але, якщо вважати τ_i постійним, то тоді з виразу $\tau_i = T_i \cdot d\alpha_i / dT$ випливає, що $\alpha_i = \alpha_k + \tau_i \cdot \ln T_i / T_k$, де T_k - температура на одному з кінців i - гілки, α_k - термоЕДС на цьому кінці.

Розподіл температур в гілках ТХ за умов постійності τ_i мають вигляд:

$$T_1(x) = \frac{e^{-a_1 x} (Lb_1 - T_0 a_1 + T_L a_1)}{a_1 (e^{-a_1 L} - 1)} - \frac{b_1}{a_1} x - \frac{e^{-a_1 L} T_0 a_1 + Lb_1 + T_L a_1}{a_1 (e^{-a_1 L} - 1)},$$

$$T_2(x) = \frac{e^{-a_2 x} (Lb_2 + T_0 a_2 - T_L a_2)}{a_2 (e^{-a_2 L} - 1)} - \frac{b_2}{a_2} x - \frac{e^{-a_2 L} T_0 a_2 + Lb_2 - T_L a_2}{a_2 (e^{-a_2 L} - 1)}.$$

Температуру стику, як і вище, знайдемо за умови рівності теплових потоків на границі областей 1 і 2. Ця умова має вигляд:

$$-\kappa_1 \left(\frac{Lb_1 - T_0 a_1 + T_L a_1}{e^{-a_1 L} - 1} - \frac{b_1}{a_1} \right) + \alpha_1 T_0 j =$$

$$= -\kappa_2 \left(-\frac{Lb_2 + T_0 a_2 - T_L a_2}{e^{-a_2 L} - 1} - \frac{b_2}{a_2} \right) + \alpha_2 T_0 j.$$

Для знаходження T_0 потрібно задати залежність термоерс від температури. Але, оскільки, τ_i - постійне, то має бути $\alpha_i = \alpha_k + \tau_i \cdot \ln T_i / T_k$. При такій залежності термоерс від температури знайти T_0 в аналітичному вигляді неможливо. Однак, якщо врахувати, що τ_i (10^5 - 10^6) В/К, то другим членом в виразі $\alpha_i = \alpha_k + \tau_i \cdot \ln T_i / T_k$ можна знехтувати. И тоді $\alpha_i \approx \alpha_k$, тобто термоерс буде також постійною. Тоді для шуканої температури одержимо: $T_0 = A/B$,

де

$$A = -(e^{-a_1 L} T_L a_1 a_2^2 \kappa_2 - e^{-a_1 L} e^{-a_2 L} a_1 b_2 \kappa_2 + e^{-a_1 L} e^{-a_2 L} a_2 b_1 \kappa_1 -$$

$$- L a_1 a_2 b_1 \kappa_1 + L a_1 a_2 b_2 \kappa_2 + e^{-a_1 L} T_L a_1 a_2^2 \kappa_1 - T_L a_2 a_1^2 \kappa_1 -$$

$$- T_L a_1 a_2^2 \kappa_2 + e^{-a_1 L} a_1 b_2 \kappa_2 - e^{-a_2 L} a_2 b_1 \kappa_1 + e^{-a_1 L} a_1 b_2 \kappa_2 -$$

$$- e^{-a_2 L} a_2 b_1 \kappa_1 + L e^{-a_1 L} a_1 a_2 b_1 \kappa_1 - L e^{-a_2 L} a_1 a_2 b_2 \kappa_2 - a_1 b_2 \kappa_2 +$$

$$+ a_2 b_1 \kappa_1),$$

$$B = a_1 a_2 (j \alpha_1 e^{-a_1 L} e^{-a_2 L} - j \alpha_2 e^{-a_1 L} e^{-a_2 L} -$$

$$- j \alpha_1 e^{-a_1 L} - j \alpha_2 e^{-a_2 L} - j \alpha_2 e^{-a_1 L} -$$

$$- a_1 \kappa_1 e^{-a_2 L} - a_2 \kappa_2 e^{-a_1 L} + \alpha_1 j - \alpha_2 j + a_1 \kappa_1 + a_2 \kappa_2).$$

В цих виразах прийнято:

$$\tau_1 = 10^{-5} \text{ В/К},$$

$$b_1 = \rho_1 j^2 / \kappa_1, \quad b_2 = \rho_2 j^2 / \kappa_2, \quad a_1 = \tau_1 j / \kappa_1, \quad a_2 = \tau_2 j / \kappa_2,$$

$$\tau_2 = -10^{-5} \text{ В/К}, \quad L = 0.5 \text{ см}, \quad T_L = 300 \text{ К};$$

$$\rho_1 = \rho_2 = 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}, \quad \kappa_1 = \kappa_2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/К} \cdot \text{см},$$

$$\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}, \quad \alpha_2 = -2 \cdot 10^{-4} \text{ В/К}.$$

3 порівняння двох залежностей температури стику від густини струму (рис. 3 і 4) видно, що наявність ефекту Томсона призводить до значного підсилення ефекту зниження температури: глибина охолодження збільшується більш ніж в півтора рази. Тут потрібно, звичайно, мати на увазі поправку на те, що кінетичні характеристики термоелектриків не можуть бути постійними в такому широкому інтервалі температур. Потрібно пам'ятати також про те, що розрахунки наближені. Однак в цілому отримані результати вказують на те, що наявність ефекту Томсона призводить до посилення ефекту

охолодження. Тому необхідний пошук термоелектриків, які цим ефектом володіють.

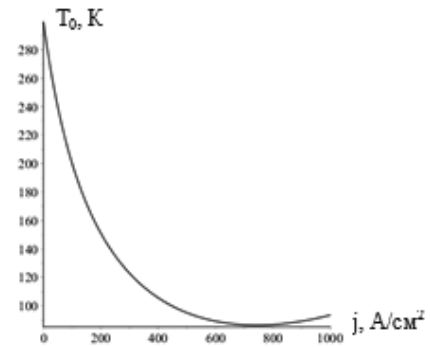


Рис.4 - Крива залежності температури стику від густини електричного струму при наявності ефекту Томсона

3. Лінійний ТХ Ленца з перемичкою

Розглянемо пристрій, схема якого представлена на рис. 2. У цьому пристрої гілки р - і n - провідності 1 і 3 розташовані в лінію і з'єднані між собою мідною перемичкою 2. Поперечні розміри всіх частин ТХ однакові. Розподіл температур в гілках і перемичці легко знаходяться. Вони мають вигляд:

$$T_1(x) = -\frac{1}{2} b_1 x^2 + \frac{1}{2} \frac{b_1 (L^2 - l^2) + 2(T_L - T_1)}{L-l} x -$$

$$-\frac{1}{2} \frac{b_1 L l (L-l) + 2(T_L l - T_1 L)}{L-l},$$

$$T_2(x) = -\frac{1}{2} b_2 x^2 + \frac{1}{2} \frac{(T_L - T_1)}{l} x +$$

$$+ \frac{1}{2} b_2 l^2 + \frac{1}{2} (T_1 + T_2),$$

$$T_3(x) = -\frac{1}{2} b_3 x^2 + \frac{1}{2} \frac{b_3 (L^2 - l^2) + 2(T_L - T_2)}{L-l} x -$$

$$-\frac{1}{2} \frac{b_3 L l (L-l) + 2(T_L l - T_2 L)}{L-l}.$$

Температури стиків між гілками і мідною перемичкою також знаходяться з умов зшивання по тепловому потоку. Ці температури мають такий вигляд:

$$T_1 = A/C, \quad T_2 = B/C,$$

$$A = \frac{1}{2} (2L^3 j l a_2 b_1 \kappa_1 - 2L^3 j l a_3 b_1 \kappa_1 - 6L^2 j l^2 a_2 b_1 \kappa_1$$

$$+ 4L^2 j l^2 a_2 b_2 \kappa_2 + 6L^2 j l^2 a_3 b_1 \kappa_1 - 4L^2 j l^2 a_3 b_2 \kappa_2$$

$$+ 6L j l^3 a_2 b_1 \kappa_1 - 8L j l^3 a_2 b_2 \kappa_2 - 6L j l^3 a_3 b_1 \kappa_1$$

$$+ 8L j l^3 a_3 b_2 \kappa_2 - 2j l^4 a_2 b_1 \kappa_1 + 4j l^4 a_2 b_2 \kappa_2$$

$$+ 2j l^4 a_3 b_1 \kappa_1 - 4j l^4 a_3 b_2 \kappa_2 + L^3 b_1 \kappa_1 \kappa_2 + L^3 b_2 \kappa_2 \kappa_3$$

$$- 3L^2 l b_1 \kappa_1 \kappa_2 + 2L^2 l b_1 \kappa_1 \kappa_3 + 4L^2 l b_2 \kappa_2^2 - 3L^2 l b_2 \kappa_2 \kappa_3$$

$$+ 4L j l T_L a_2 \kappa_1 - 4L j l T_L a_3 \kappa_1 + 3L l^2 b_1 \kappa_1 \kappa_2 - 4L l^2 b_1 \kappa_1 \kappa_3$$

$$- 8L l^2 b_2 \kappa_2^2 + 4L l^2 b_2 \kappa_2 \kappa_3 + 3L l^2 b_3 \kappa_2 \kappa_3 - 4j l^2 T_L a_1 \kappa_3$$

$$+ 4j l^2 T_0 a_2 \kappa_1 + 4j l^2 T_0 a_3 \kappa_1 - l^3 b_1 \kappa_1 \kappa_2 + 2l^3 b_1 \kappa_1 \kappa_3$$

$$+ 4l^3 b_2 \kappa_2^2 - 4l^3 b_2 \kappa_2 \kappa_3 - l^3 b_3 \kappa_2 \kappa_3 + 2L T_L \kappa_1 \kappa_2$$

$$+ 2L T_L \kappa_1 \kappa_3 - 2l T_L \kappa_1 \kappa_2 + 4l T_L \kappa_1 \kappa_3 - 2l T_L \kappa_2 \kappa_3),$$

$$\begin{aligned}
C = & 2L^2 j^2 l \alpha_1 \alpha_2 - 2L^2 j^2 l \alpha_1 \alpha_3 - 2L^2 j^2 l \alpha_2^2 + 2L^2 j^2 l \alpha_2 \alpha_3 \\
& - 4Lj^2 l^2 \alpha_1 \alpha_2 + 4Lj^2 l^2 \alpha_1 \alpha_3 + 4Lj^2 l^2 \alpha_2^2 - 4Lj^2 l^2 \alpha_2 \alpha_3 \\
& + 2j^2 l^3 \alpha_1 \alpha_2 - 2j^2 l^3 \alpha_1 \alpha_3 - 2j^2 l^3 \alpha_2^2 + 2j^2 l^3 \alpha_2 \alpha_3 \\
& + L^2 j \alpha_1 \kappa_2 - L^2 j \alpha_3 \kappa_2 - 2Lj l \alpha_1 \kappa_2 + 2Lj l \alpha_1 \kappa_3 + 2Lj l \alpha_2 \kappa_1 \\
& - 2Lj l \alpha_2 \kappa_3 - 2Lj l \alpha_3 \kappa_1 + 2Lj l \alpha_3 \kappa_2 + j l^2 \alpha_1 \kappa_2 - 2j l^2 \alpha_1 \kappa_3 \\
& - 2j l^2 \alpha_2 \kappa_1 + 2j l^2 \alpha_2 \kappa_3 + 2j l^2 \alpha_3 \kappa_1 - j l^2 \alpha_2 \kappa_3 + L \kappa_1 \kappa_2 \\
& + L \kappa_2 \kappa_3 - l \kappa_1 \kappa_2 + 2l \kappa_1 \kappa_3 - l \kappa_2 \kappa_3,
\end{aligned}$$

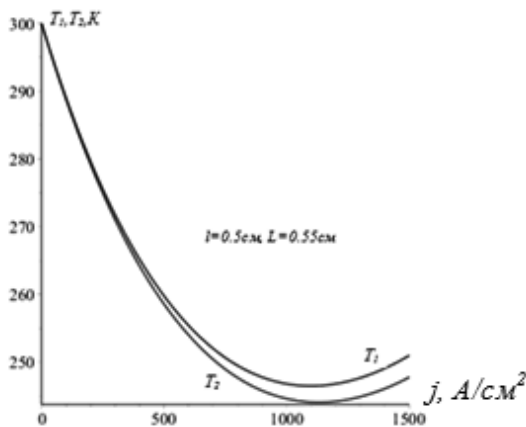
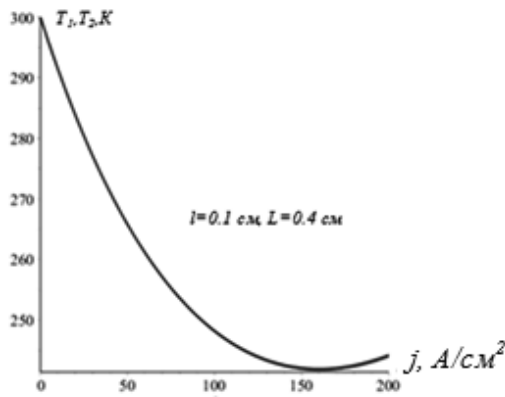


Рис.5 - Залежність температур стиків T_1 і T_2 від густини струму при різних довжинах гілок і перемички

$$\begin{aligned}
B1 = & \frac{1}{2} (2L^3 j l \alpha_1 b_3 \kappa_2 - 2L^3 j l \alpha_2 b_3 \kappa_3 + 4L^2 j l^2 \alpha_1 b_2 \kappa_2 \\
& - 6L^2 j l^2 \alpha_1 b_3 \kappa_3 - 2L^2 j l^2 \alpha_2 b_2 \kappa_2 + 6L^2 j l^2 \alpha_2 b_3 \kappa_3 - 8Lj l^3 \alpha_1 b_1 \kappa_2 \\
& + 6Lj l^3 \alpha_1 b_3 \kappa_3 + 8L^3 j l \alpha_2 b_2 \kappa_2 - 6Lj l^3 \alpha_2 b_3 \kappa_3 + 4j l^4 \alpha_1 b_2 \kappa_2 \\
& - 2j l^4 \alpha_1 b_3 \kappa_3 - 4j l^4 \alpha_2 b_2 \kappa_2 + 2j l^4 \alpha_2 b_3 \kappa_3 + L^3 b_1 \kappa_1 \kappa_2 \\
& + L^3 b_2 \kappa_2 \kappa_3 - 3L^2 l b_1 \kappa_1 \kappa_2 + 4L^2 l b_2 \kappa_2^2 + 2L^2 l b_3 \kappa_1 \kappa_3 \\
& - 3L^2 l b_3 \kappa_2 \kappa_3 + 4Lj l T_1 \alpha_1 \kappa_3 - 4Lj l T_2 \alpha_2 \kappa_2 + 3Ll^2 b_1 \kappa_1 \kappa_2 \\
& + 4Ll^2 b_2 \kappa_1 \kappa_2 - 8Ll^2 b_2 \kappa_1 \kappa_2 - 4Ll^2 b_3 \kappa_1 \kappa_3 + 3Ll^2 b_3 \kappa_2 \kappa_3 \\
& - 4j l^2 T_1 \alpha_1 \kappa_3 + 4j l^2 T_2 \alpha_2 \kappa_3 - l^3 b_1 \kappa_1 \kappa_2 - 4l^3 b_2 \kappa_1 \kappa_2 \\
& + 4l^3 b_2 \kappa_2^2 + 2l^3 b_3 \kappa_1 \kappa_3 - l^3 b_3 \kappa_2 \kappa_3 + 3L T_1 \kappa_1 \kappa_2 \\
& + 2L T_2 \kappa_2 \kappa_3 - 2l T_1 \kappa_1 \kappa_3 - 4l T_2 \kappa_1 \kappa_3 - 2l T_2 \kappa_2 \kappa_3).
\end{aligned}$$

Для числових розрахунків використані наступні значення матеріальних констант:

$$\begin{aligned}
\alpha_1 = & 2 \cdot 10^{-4} \text{ В / см}, \alpha_2 = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ В / см}, \\
\alpha_3 = & -2 \cdot 10^{-4} \text{ В / см}, \kappa_1 = 0.02 \text{ Вт / см} \cdot \text{К},
\end{aligned}$$

$$\kappa_2 = 0.4 \text{ Вт / см} \cdot \text{К}, \kappa_3 = 0.02 \text{ Вт / см} \cdot \text{К},$$

$$\rho_1 = 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}, \rho_2 = 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}, \rho_3 = 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}, \\
T_0 = 300 \text{ К}.$$

Розрахунки виконані за допомогою пакета математичних програм MAPLE. Одержані залежності температур T_1 і T_2 від густини електричного струму для двох випадків подано на графіках. З порівняння видно, що розміри впливають на указані температури і можуть відрізнятися між собою і тим сильніше, чим більша густина струму. Це говорить про те, що температура перемички не постійна.

4. Вплив ефекту Томсона на глибину охолодження ТХ з перемичкою

Нехай далі матеріали гілок (і перемички) володіють ефектом Томсона. Тоді, як і в попередньому випадку, де враховано цей ефект, запишемо рівняння теплопровідності для кожної з областей:

$$\begin{aligned}
\frac{d^2}{dx^2} T_1(x) + a_1 \frac{d}{dx} T_1(x) + b_1 &= 0, \\
\frac{d^2}{dx^2} T_2(x) + a_2 \frac{d}{dx} T_2(x) + b_2 &= 0, \\
\frac{d^2}{dx^2} T_3(x) + a_3 \frac{d}{dx} T_3(x) + b_3 &= 0.
\end{aligned}$$

Розв'язки цих рівнянь з урахуванням граничних умов, які зрозумілі з рис. 2, мають вигляд:

$$\begin{aligned}
T_1(x) = & - \frac{e^{-a_1 x} (L b_1 - l b_1 + T_2 a_1 - T_1 a_1)}{a_1 (e^{-a_1 l} - e^{-a_1 L})} - \frac{b_1}{a_1} x + \\
& + \frac{L e^{-a_1 l} b_1 + e^{-a_1 l} T_2 a_1 - e^{-a_1 L} l b_1 - e^{-a_1 L} T_1 a_1}{a_1 (e^{-a_1 l} - e^{-a_1 L})}, \\
T_2(x) = & - \frac{e^{-a_2 x} (2l b_2 + T_1 a_2 - T_2 a_2)}{a_2 (e^{-a_2 l} - e^{-a_2 L})} - \frac{b_2}{a_2} x - \\
& - \frac{e^{-a_2 l} l b_2 - e^{-a_2 l} T_2 a_2 + e^{-a_2 L} l b_2 + e^{-a_2 L} T_1 a_2}{a_2 (e^{-a_2 l} - e^{-a_2 L})}, \\
T_3(x) = & - \frac{e^{-a_3 x} (L b_3 - l b_3 - T_2 a_3 + T_1 a_3)}{a_3 (e^{-a_3 l} - e^{-a_3 L})} - \frac{b_3}{a_3} x + \\
& + \frac{L e^{-a_3 l} b_3 - e^{-a_3 l} l b_3 + e^{-a_3 l} T_2 a_3 - e^{-a_3 L} T_1 a_3}{a_3 (e^{-a_3 l} - e^{-a_3 L})},
\end{aligned}$$

Для знаходження температур стиків T_1 і T_2 , як і раніше, використовуємо умови зшивання. Тут вони мають вигляд:

$$q_{12} = q_{21}, q_{23} = q_{32},$$

де:

$$\begin{aligned}
q_{12} = & -\kappa_1 \left(\frac{e^{-a_1 l} (L b_1 - l b_1 + T_2 a_1 - T_1 a_1)}{e^{-a_1 l} - e^{-a_1 L}} - \frac{b_1}{a_1} \right) + a_1 T_1 j, \\
q_{21} = & -\kappa_2 \left(\frac{e^{-a_2 l} (2l b_2 + T_1 a_2 - T_2 a_2)}{-e^{-a_2 l} + e^{-a_2 L}} - \frac{b_2}{a_2} \right) + a_2 T_1 j,
\end{aligned}$$

$$q_{23} = -\kappa_2 \left(\frac{e^{a_2 l} (2lb_2 + T_1 a_2 - T_2 a_2) - b_2}{-e^{-a_2 l} + e^{a_2 l}} - \frac{b_2}{a_2} \right) + a_2 T_2 j,$$

$$q_{32} = -\kappa_3 \left(\frac{e^{a_3 l} (Lb_3 - lb_3 - T_L a_3 + T_2 a_3) - b_3}{-e^{-a_3 l} + e^{a_3 l}} - \frac{b_3}{a_3} \right) + a_3 T_2 j.$$

З умов зшивання за тепловими потоками на стиках областей 1-2 і 2-3 знаходимо за допомогою MAPLE вирази для температур T_1 і T_2 . Ці вирази через їх надзвичайну громіздкість в цій статті не наводяться. Для числових розрахунків обрані такі значення матеріальних і розмірних констант:

$$\alpha_1 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ В/см}, \alpha_2 = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ В/см},$$

$$\alpha_3 = -2 \cdot 10^{-4} \text{ В/см}, \kappa_1 = 0.02 \text{ Вт/см} \cdot \text{К},$$

$$\kappa_2 = 0.4 \text{ Вт/см} \cdot \text{К},$$

$$\tau_1 = 10^{-6} \text{ В/К}, \tau_2 = 10^{-5} \text{ В/К},$$

$$\tau_3 = 10^{-6} \text{ В/К}, l = 0.5 \text{ см}, L = 0.55 \text{ см},$$

$$\kappa_3 = 0.02 \text{ Вт/см} \cdot \text{К},$$

$$\rho_1 = 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}, \rho_2 = 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}, \rho_3 = 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см},$$

$$T_L = 300 \text{ К}.$$

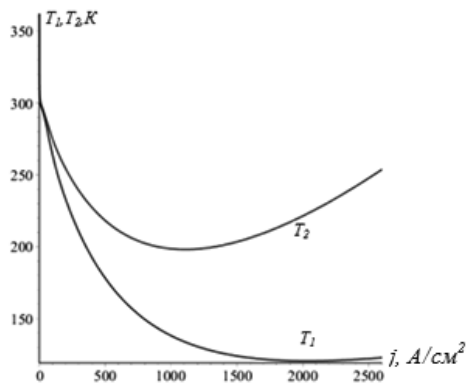


Рис. 6 - Залежність температур стиків T_1 і T_2 з урахування впливу ефекту Томсона

Як видно з рис. 6 температури стиків за величиною сильно розрізняються між собою. Тому тут говорити про те, що перемичка вирівнює температури кінців гілок, не доводиться. Викладені результати розрахунків потребують експериментального підтвердження і поглиблення теоретичних досліджень: необхідно провести більш глибокі дослідження з порушених у статті питань з метою з'ясування механізмів охолодження, підбору термоелектриків, геометричних розмірів структурних елементів холодильників. Особливо слід звернути увагу на контакти. Ймовірно вони в цих процесах мають відігравати важливу роль.

Висновки. ТХ можуть бути більш ефективними з точки зору глибини охолодження в порівнянні з звичайно використовуваними холодильниками, якщо гілки p - і n - провідності з'єднані в лінію і їх матеріали володіють ефектом Томсона.

Використання в якості гілок ТХ пермоселектриків, що володіють ефектом Томсона і з'єднаних мідною премічною, призводить до суттєвого посилення ефекту охолодження.

Отримані аномально низькі розрахункові температури обумовлені тим, що використані для розрахунків матеріальні константи обрані незалежними від температури. Тому отримані результати справедливі для тієї частини температурного інтервалу, для якої ці параметри постійні.

Отримані результати вказують на одне з можливих напрямків пошуку більш ефективних термоелектричних холодильників.

Важливими для експериментальних досліджень повинні бути питання пов'язані з контактами між гілками розглянутих ТХ.

Список літератури

1. А.Ф.Иоффе, Полупроводниковые термоэлементы. М.-Л.: Из-во АН СССР, 1960.
2. А.Ф. Иоффе, Полупроводники в современной физике Изд. АН СССР, М., 1955.
3. А.Ф. Иоффе, Физика полупроводников Изд. АН СССР, М.-Л., 1957.
4. А.Ф. Иоффе, Л.С. Стильбанс, Е.К. Йорданишвили, Т.С. Ставицкая, Термоэлектрическое охлаждение. Издательство Академии наук СССР, М.-Л 1956.
5. Е.Л.Коленко, Термоэлектрические охлаждающие приборы. Наука, Ленинград, 1967.
6. Э.В.Осипов, Твердотельная криогеника. К. Наукова думка, 1977.
7. Т.С.Harman, J.M. Honig. Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications. New-York: Mc Graw-Hill book Company, 1967.
8. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник / Л.И. Анатичук. К., Наук.думка, 1979.
9. В.П. Жузе, Е.И. Гусельникова, Библиография по термоэлектричеству термоэлектродгенераторы и охлаждающие устройства. Изд. АН СССР, М.-Л., 1963.
10. В.И.Кайданов, А.Б. Нуромский, Электропроводность, термоэлектрические явления и теплопроводность полупроводников. Ленинградский политехнический институт, 1981.
11. Термоелектричний охолоджувач. Деклараційний патент № 9240, Україна, 7 Н01L35/00 / Л.И. Анатичук, В.Г. Охрем. Заявлено 01.03.2005. Опубліковано 15.09.2005. Бюл. № 9.
12. Термоелектричний охолоджувач. Деклараційний патент № 9884, Україна, 7 Н01L35/00 /Л.И.Анатичук, В.Г.Охрем. Заявлено 15.04.2005. Опубліковано 17.10.2005. Бюл. № 10.
13. В.Г. Охрем, Новые термоэлектрические охладители Пельтье для глубокого охлаждения, Прикладная физика, 2006, № 4, С. 121 – 127.
14. Н.В. Горобец, В.Г. Охрем, Термоэлектрический охладитель Пельтье с дополнительным проводящим элементом, Прикладная физика, 2007, № 4. с. 124-127.
15. Охрем В.Г. Модель трёхъярусного термоэлектрического холодильника для глубокого охлаждения// Оборонный комплекс-научно-техническому прогрессу России, 2012, № 3.

References (transliterated)

1. A. F. Ioffe, *Poluprovodnikovye termojelementy* [Semiconductor thermoelements], (M.-L. : From the USSR Academy of Sciences, 1960)
2. A. F. Ioffe, *Poluprovodniki v sovremennoj fizike* [Semiconductors in Modern Physics], (Izd. AN SSSR, Moscow, 1955)
3. A. F. Ioffe, *Fizika poluprovodnikov* [Physics of Semiconductors], (USSR Academy of Sciences, M.-L., 1957)
4. A. F. Ioffe, L. S. Stilbans, E. K. Yordanishvili, T.S. Stavitskaya, *Termojelektricheskoe ohlazhdenie* [Thermoelectric cooling]. (Publishing House of the USSR Academy of Sciences, M.-L 1956)

5. E. L. Kolenko, *Termojelektricheskie ohlazhdajushhie pribory* [Thermoelectric Cooling Devices]. (Science, Leningrad, 1967)
6. E. V. Osipov, *Tverdotel'naja kriogenika* [Solid-state cryogenics], (K., Naukova Dumka, 1977)
7. T.C.Harman, J.M. Honig. Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications, (New-York: Mc Graw-Hill book Company, 1967)
8. *Termojelementy i termojelektricheskie ustrojstva: Spravochnik* [Thermoelements and thermoelectric devices: Reference book] / L. I. Anaticuk, (K., Nauk.dumka, 1979)
9. V. P. Zhuze, E.I. Gusel'nikova, *Bibliografija po termojelektrichestvu (termoelektrogeneratori i ohlazhdajushhie ustrojstva)* [Bibliography on Thermoelectricity (Thermoelectric Generators and Cooling Devices)], (USSR Academy of Sciences, M.-L., 1963)
10. V. I. Kaidanov, A. B. Nuromsky, *Jelektroprovodnost', termojelektricheskie javlenija i teploprovodnost' poluprovodnikov* [Electrical conductivity, thermoelectric phenomena and thermal conductivity of semiconductors], (Leningrad Polytechnic Institute, 1981)
11. *Termoelektrichnij oholodzhuvach* [Thermo-electric boilers]. Declaration patent No. 9240, Ukraine, 7 H01L35 / 00 / L. I. Anaticuk, V. G. Ohrem. Declared on 01/03/2005. It is published on September 15, 2005. Bul. № 9.
12. *Termoelektrichnij oholodzhuvach* [Thermo-electric boilers]. Declaration patent No. 9884, Ukraine, 7 H01L35 / 00 / L. I. Anaticuk, V. G. Ohrem. Declared on April 15, 2005. It was published on October 17, 2005. Bul. № 10.
13. V. G. Ohrem, *Novye termojelektricheskie ohladiteli Pel'te dlja glubokogo ohlazhdenija* [New Peltier thermoelectric coolers for deep cooling], Applied Physics, 2006, N 4, pp. 121 - 127.
14. H. V. Gorobets, V. G. Ohrem, *Termojelektricheskij ohladitel' Pel'te s dopolnitel'nym provodjashhim jelementom* [Peltier thermoelectric cooler with additional conductive element], Applied Physics, 2007, N 4, p. 124-127.
15. Ohrem V. G. *Model' trjoh#jarusnogo termojelektricheskogo holodil'nika dlja glubokogo ohlazhdenija* [Model of a three-level thermoelectric refrigerator for deep cooling] Defense Complex-Scientific and Technical Progress of Russia, 2012, No. 3.

Поступила (received) 10.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Герасим Василь Васильович (Герасим Василий Васильевич, Herasym Vasyl' Vasylyovych) – кандидат технічних наук, Чернівецький факультет Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Чернівці, Україна; e-mail: hpi.kafedra.tomm@gmail.com.

Охрем Василь Георгійович (Охрем Василий Георгиевич, Okhrem Vasyl Georijovych) – кандидат фізико-математичних наук, Чернівецький факультет Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Чернівці, Україна; e-mail: hpi.kafedra.tomm@gmail.com.

М.І. ГАСАНОВ, О.О. КЛОЧКО, О.Ю. ЗАКОВОРОТНИЙ, Є.В. ПЕРМІНОВ

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РЕГЛАМЕНТ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ВІДКРИТИХ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ

На підставі узагальнених теоретичних залежностей, які визначають взаємозв'язок критеріїв якості поверхневого шару з технологічними параметрами процесу різання розроблена методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі оброблених зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс черв'ячними модульними і спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні. Методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі дозволяє призначити режими різання виходячи з необхідної величини шорсткості, глибини наклепу, рівня залишкових напружень. Результати досліджень дозволяють вирішувати завдання по визначенню параметрів поверхневого шару обробленої деталі, а також призначити технологічні умови обробки, що забезпечують задані технічними умовами параметри поверхневого шару. Розроблено процес моделювання роботи циліндричних крупномодульних загартованих коліс в порівнянні з результатами теоретичних досліджень і даними, отриманими на експериментальних установках і при дослідженні на «робочих осях» та визначено оптимальні значення параметрів стану робочих поверхонь циліндричних крупномодульних коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Ключові слова: технологічний регламент, оптимізація, відновлення, функціональні властивості, крупногабаритні відкриті зубчаті передачі, критерії якості поверхневого шару, технологічні параметри.

М.И. ГАСАНОВ, А.А. КЛОЧКО, А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ, Е.В. ПЕРМИНОВ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТКРЫТЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

На основании обобщенных теоретических зависимостей, устанавливающих взаимосвязь критериев качества поверхностного слоя с технологическими параметрами процесса резания разработана методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемых изношенных и восстановленных крупногабаритных зубчатых колес червячными модульными и специальными немодульными фрезами при скоростном зубофрезеровании. Методика расчетного определения остаточных напряжений в поверхностном слое позволяет назначить режимы резания исходя из требуемой величины шероховатости, глубины наклепа, уровня остаточных напряжений. Результаты исследований позволяют решать задачи по определению параметров поверхностного слоя обрабатываемой детали, а также назначать технологические условия обработки, обеспечивающие заданные техническими условиями параметры поверхностного слоя. Разработан процесс моделирования работы цилиндрических крупномодульных закаленных колес в сравнении с результатами теоретических исследований и данными, полученными на экспериментальных установках и при исследовании на «рабочих осях» и определены оптимальные значения параметров состояния рабочих поверхностей цилиндрических крупномодульных колес, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства.

Ключевые слова: технологический регламент, оптимизация, восстановление, функциональные свойства, крупногабаритные открытые зубчатые передачи, критерии качества поверхностного слоя, технологические параметры.

M. HASANOV, O. KLOCHKO, O. ZAKOVOROTNYI, Ye. PERMINOV

TECHNOLOGICAL REGULATION OF OPTIMIZATION OF SYSTEMS OF RESTORATION OF FUNCTIONAL PROPERTIES OF LARGE-SIZED OPEN GEAR TRANSMISSIONS

On the basis of the generalized theoretical dependences establishing the relationship between the criteria for the quality of the surface layer and the technological parameters of the cutting process, a technique has been developed for the calculation of the residual stresses in the surface layer of treated worn and repaired large-sized gears with worm modular and special non-modular cutters for high-speed gear milling. The method of calculating the residual stresses in the surface layer allows us to assign cutting regimes based on the required roughness value, the depth of hardening, the level of residual stresses. The results of the research allow solving problems in determining the parameters of the surface layer of the workpiece, and also assign technological processing conditions that ensure the parameters of the surface layer specified by the technical conditions. The process of simulating the operation of cylindrical coarse-grained hardened wheels is compared with the results of theoretical studies and data obtained in experimental installations and in research on "working axes" and the optimum values of the state parameters of the working surfaces of cylindrical coarse-grained wheels providing the required operational properties are determined.

Keywords: technological regulations, optimization, restoration, functional properties, large open gears, surface layer quality criteria, technological parameters.

Постановка проблеми. Завдання моделювання технологічних процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлювальних крупногабаритних зубчастих коліс пропонується вирішувати методами технологічного впливу з урахуванням специфічних умов формоутворення зубчастих коліс [1, 2, 10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз причин виходу з ладу великогабаритних зубчастих коліс показав, що в 90% руйнування великогабаритних зубчастих коліс починається з поверхневого шару через появу мікротріщин,

абразивного зносу, викрашування активних поверхонь зубів, відшарування поверхневого шару зубів, прогресуючого заїдання, пластичних деформацій зубів [3, 4, 5, 8].

При зубофрезеруванні евольвентної поверхні зубчатого колеса переміщення ріжучого леза інструмента з початкового положення в кінцеве положення під дією керуючих впливів може бути здійснено за різними траєкторіями в рамках технологічних і техніко-економічних обмежень. Кожній траєкторії відповідає певне значення критерію оптимальності. Геометрія проектованої передачі визначається параметрами вихідного контуру

інструмента і його зсувами при нарізанні коліс передачі.

Тому при проектуванні насамперед слід задати початковий контур інструменту і вибрати розрахункові зміщення. Якщо циліндричне зубчате колесо нарізається рейковим інструментом, то верстатне зачеплення розглядають в торцевій площині, перпендикулярній осі зубчатого колеса.

Мета роботи – розробка взаємозв'язків технологічного впливу параметрів зачеплення зубів важконавантажених крупногабаритних зубчатих передач і їх відновлення.

Виклад основного матеріалу

При виготовленні циліндричних зубчатих коліс, які працюють при високих знакозмінних навантаженнях в умовах високих контактних напруг, потрібно витримувати задані параметри якості поверхневого шару, зокрема шорсткість поверхні, глибину і ступінь наклепу, залишкові напруги. На підставі узагальнених теоретичних залежностей, які визначають взаємозв'язок критеріїв якості поверхневого шару з технологічними параметрами процесу різання розроблена методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі оброблюваних зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс черв'ячними модульними і спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні. Методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі дозволяє призначити режими різання з необхідної величини шорсткості, глибини наклепу, рівня залишкових напружень.

Розрахунок залишкових напружень, обумовлених структурними і фазовими перетвореннями ґрунтується на розрахунку температурних залишкових напруг і залишкових напружень, обумовлених силовим впливом на поверхневий шар. Оскільки залишкові напруги є пружними, для складання пружних залишкових напруг використовується метод накладення, сумарні залишкові напруги визначаються алгебраїчним підсумовуванням температурних і силових залишкових напружень. Для того щоб визначити залишкові напруги від кожного фактора окремо, необхідно встановити закономірність розподілу температури в поверхневому шарі оброблюваних циліндричних загартованих крупномодульних зубчатих коліс, а також визначити зусилля різання, що діють на оброблювану поверхню.

$$\sigma_{\text{ост.т}} = -\sigma_T + \frac{\beta_D A_1 E_D}{1-\mu} \left\{ \left(\frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_2} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\}, \quad (1)$$

$$\text{при } y = y_{\text{он}}; \sigma_{0\text{max}} < 2\sigma_T \quad \sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_D A_1 E_D}{1-\mu} x$$

$$\left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H+a_1-y)^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}] + (1-\mu)\sigma_T(H-y_{\text{он}})}{E_D y_{\text{он}}} + \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\} \quad (2)$$

$$y = y_0; \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T$$

$$y < y_{\text{он}}; \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = \sigma_T + \frac{\beta_D A_1 E_D}{1-\mu} \left\{ \left(\frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_2} + \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H+a_1-y_{\text{оо}})^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}] + 2(1-\mu)\sigma_T(H-y_{\text{оо}})}{E_D y_{\text{оо}}} \right\} \quad (4)$$

$$\text{при } \begin{cases} y_{\text{оо}} > y \geq y_{\text{он}} \\ \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T \end{cases}$$

$$\sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_D A_1 E_D}{1-\mu} \left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H+a_1-y_{\text{оо}})^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}] + 2(1-\mu)\sigma_T(H-y_{\text{оо}})}{E_D y_{\text{оо}}} - \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1+x_2)} [(H-a_1-y_{\text{он}})^{1+x_2} - (H-a_1)^{1+x_2}] + (1-\mu)\sigma_T(H-y_{\text{он}})}{E_D y_{\text{он}}} \right\} \quad (5)$$

$$\text{де } \begin{cases} y < y_{\text{он}} \\ \sigma_{0\text{max}} = 2\sigma_T \end{cases}$$

де H - твердість оброблюваного зубчатого колеса; H_B , $\sigma_{\text{ост.т}}$ - напруги на поверхні при охолодженні; y - глибина залягання розглянутого шару від поверхні; $y_{\text{он}}$, $y_{\text{то}}$ - кордону розділу пружних і пластичних деформацій при нагріванні і пластичних деформацій при нагріванні і охолодженні; σ_s , E_D - межа плинності і модуль пружності оброблюваного матеріалу; β_L і μ - коефіцієнт температурного лінійного розширення і коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу; A_1 і x_2 - величини, що визначають значення температури в поверхневому шарі оброблюваної деталі; a_1 - змінна товщина зрізу при зустрічному зубофрезеруванні; $a_i = S_z \sin \Psi \sin \varphi$; S_z - подача на зуб; φ - кут профілю зуба фрези.

Залишкові напруги, обумовлені силовим впливом на поверхневий шар, визначаються відповідно до теореми Генки про розвантаження як різниця напруги, що виникають при навантаженні $\sigma_{\text{фнкТ}}$ і розвантаження $\sigma_{\text{нрТ}}$. Залишкові напруги визначалися за формулами (6):

$$\sigma_x = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_1 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2};$$

$$\sigma_y = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_2 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2}; \quad (6)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_3 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_3 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2};$$

де τ_p - опір оброблюваного матеріалу пластичного зсуву; b - ширина зрізу; b - периметр робочих частин різальних крайок; Δ - довжина площадки контакту задньої поверхні фрези з оброблюваною поверхнею; Δ_1 - проекція

поверхні зсуву на горизонтальну площину; h - глибина залягання випереджальних пластичних деформацій в поверхневому шарі; B - критерій, що характеризує кут сходу стружки; α і γ - задній і передній кути фрези.

Справжні напруги визначаються також за формулами (7) за умови, що у відповідає глибини залягання пластичних деформацій. Умова пластичності визначається по теорії М. Хубера - Р. Мізеса.

При аналізі шорсткості обробленої поверхні на формування нерівностей обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні впливають радіус округлення різальної крайки зубів фрези ρ , параметри інструменту, змінна в часі геометрія перетину зрізу $a_i = S_z \cdot \sin \Psi \cdot \sin \varphi$, обсяг і швидкість деформування металу, обумовлені комплексом температурно-силових явищ, що виникають в зоні різання (рис. 1).

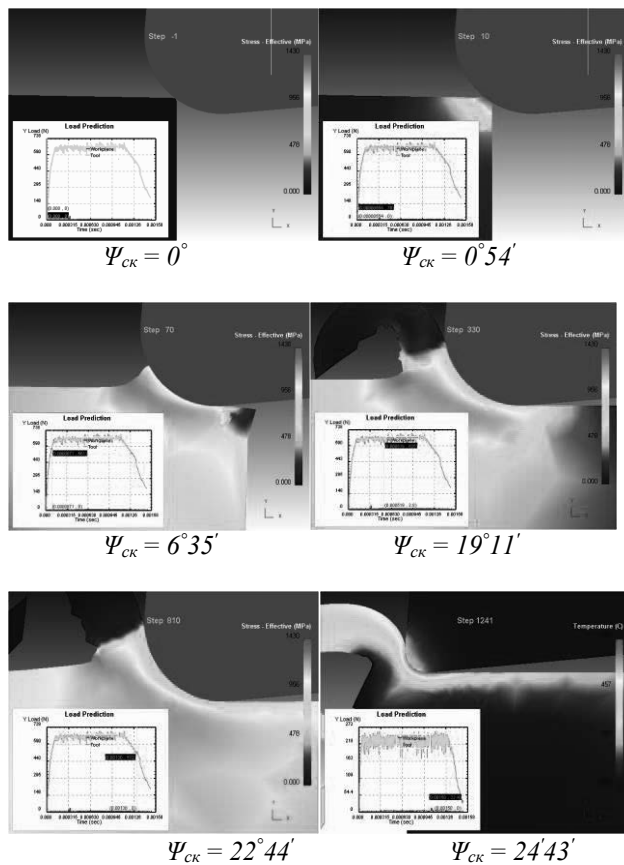


Рис. 1 - Послідовність моделювання

формування глибини залягання залишкових напруг поверхнього шару h_c і сходу стружки при швидкісному зубофрезерування при значеннях радіуса округлення різальної крайки зубів фрези $\rho = 0 \div 300$ мм в залежності від кута ковзання $\Psi_{ск}$

З урахуванням цього:

$$R_z = \frac{a_i^{0,125} b_1^{0,7} c \theta \rho^{0,1} a^{0,43} \left[2,85 \sin^{0,115} \alpha V^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda \rho^{0,57} \rho^{0,075} \right]}{V \lambda \sin^{0,165} \alpha} \cdot \frac{1}{K \rho} \left[-0,5 \tau \rho \cdot b \left[\arccos \left(1 - a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}} \right) + \frac{a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho} \right] \cos \alpha \right] \cdot \frac{1}{t \tau \left[1 + \frac{1}{B} + \lg(\arctg B - \gamma) \right]}$$

де $K\rho$ - коефіцієнт ефективності формообразовання поверхнього шару; c_p - питома об'ємна теплоємність оброблюваного матеріалу; θ - температура в зоні різання; ρ_i - радіус округлення різальної крайки фрези; t - глибина різання; δ - довжина площадки зносу по задній поверхні фрези; α - коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу; V - швидкість різання; λ і $\lambda\rho$ - коефіцієнти теплопровідності оброблюваного та інструментального матеріалів; φ - кут вихідного профілю 20° ; a_1 і a_2 - величини, що залежать від умов обробки (кут сходу стружки).

Глибина наклепу обробленої поверхні h_c приймається рівною глибині залягання пластичних деформацій. Виникнення пластичних деформацій в поверхневому шарі обумовлено одночасним впливом силового і температурного факторів. У цьому випадку глибина залягання пластичних деформацій визначається з умови рівності межі текучості алгебраїчної суми напруг в поверхневому шарі, обумовленому силовим і температурним впливом, а саме

$$\sigma_y + \sigma_H = \sigma_T, \quad (8)$$

$$\text{де } \sigma_{\text{ост.т}} = \frac{\beta_D A_1 E_D}{1 - \mu} \left\{ \left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_2} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1 + x_2) H} \right\} \quad (9)$$

$$\sigma_T = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \frac{1 + B + B \lg(\arctg B - \gamma)}{B \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B\right)} \cos\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B\right) \times \left[2 \arccos \frac{B + B \frac{y}{a_1}}{\sqrt{1 + (B + B \frac{y}{a_1})^2}} - \sin\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B\right) + \frac{2(B + B \frac{y}{a_1}) \left[2 \sin^2\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B\right) - 1 \right] + \sin 2\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B\right) \left[(B + B \frac{y}{a_1})^2 \right]}{1 + (B + B \frac{y}{a_1})^2} \right] \right\} - \frac{\tau_p b}{2\pi b_1 \cos \alpha} \left[\frac{2}{\sin 2\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B + \gamma\right)} \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{y a_1}\right)^2}} + 1 - \frac{\pi}{2} \frac{2 - \frac{\pi}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{y a_1}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{y a_1}\right)^2}} \right] + \frac{2}{\lg 2 \left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctg B + \gamma\right)} \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{y a_1}\right)^2} \right]$$

Таким чином, глибина наклепаного шару h_c функціонально визначається

$$h_c = f\left(\sigma_T, E_D, \tau_p, \mu, \beta_D, \lambda, \lambda\rho, c_p, V, S_{\text{мин}}, \rho, \alpha_i, \alpha\right)$$

Встановлено, що при обробці конструкційних і легованих сталей ступінь наклепу з достатньою для практичних цілей точністю може визначатися за формулою

$$N = \frac{h_c}{1,25 \cdot \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{вл}}\right)^{0,8}} \cdot 100\%$$

де σ_e - межа міцності оброблюваного матеріалу; $\sigma_{вл}$ - межа міцності легованих сталей циліндричних зубчастих коліс.

Результати досліджень дозволяють вирішувати завдання по визначенню параметрів поверхневого шару оброблюваної деталі, а також призначати технологічні умови обробки, що забезпечують задані технічними умовами параметри поверхневого шару.

Методика вибору, призначення, технологічного і метрологічного забезпечення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчатих коліс показує, що експлуатаційні властивості циліндричних крупномодульних зубчатих коліс в значній мірі визначаються системою параметрів їх поверхневого шару.

Проведені дослідження дозволили встановити між ними як якісні, так і кількісні залежності, ступінь достовірності яких цілком задовольняє вимогам практики.

Також існує реальна можливість технологічного управління формуванням обраної системою параметрів поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс при їх виготовленні. Ця можливість може бути реалізована за допомогою раціонального вибору для кожного конкретного випадку методів і режимів попередньої і остаточної обробки з урахуванням технологічної спадковості.

В умовах середньосерійного виробництва призначення методів і режимів обробки циліндричних крупномодульних зубчатих коліс виробляється на стадії технологічної підготовки при розробці операційного технологічного процесу. При дрібносерійному і одиничному виробництві на стадії технологічної підготовки виробництва здійснюється розробка маршрутного технологічного процесу з призначенням тільки методів обробки. Розрахунок режимів обробки виконується за укрупненими нормативами або встановлюються безпосередньо самим зубообробляльником вже в процесі виконання зубообробки.

Звідси випливає, що встановлення оптимальних методів і режимів зубообробки, що забезпечують необхідні точність, стан поверхневого шару і стійку роботу технологічної системи при найменшій собівартості, є одним з найважливіших етапів технологічної підготовки в умовах дрібносерійного і одиничного виробництва. Встановлення оптимальних режимів різання при розробці операційного технологічного процесу засновані на спільному вирішенні системи нерівностей, що характеризують вплив основних обмежень на режими різання і представляють математичні моделі даного процесу [2, 4; 6; 7; 8; 9].

Однак, основним недоліком існуючої методики автоматичного розрахунку оптимальних режимів обробки є недостатнє відображення в системі технічних вимог, що пред'являються до стану поверхневого шару оброблюваних деталей, а отже, і до їх експлуатаційними властивостями. Звідси випливає, що існуюча методика автоматичного проектування технологічних процесів і розрахунку зубообробки не дозволяє вирішити задачу технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс

стадії технологічної підготовки виробництва і вимагає певного доопрацювання або корінного її зміни.

Що ж стосується завдання встановлення режимів різання в умовах одиничного виробництва, то її рішення в даний час, як правило, засноване на використанні укрупнених нормативів і досвіді верстатника, який головним чином має на меті підвищення продуктивності праці, часто ігноруючи питання зменшення собівартості і точного дотримання шорсткості, необхідної за кресленням. Якщо раніше, коли на кресленнях проставляється клас чистоти, досвідчені верстатники ще могли забезпечити необхідну «чистоту», то в даний час при вказанні на кресленнях вимог до ряду параметрів це завдання не під силу навіть досвідченим робочим. Вирішення цього завдання може бути значно полегшено з використанням систем адаптивного управління якістю оброблюваної поверхні [2; 3; 5].

Для забезпечення якості виготовлення циліндричних зубчатих коліс на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва розроблені два шляхи: призначати методи і режими обробки циліндричних зубчастих коліс, виходячи з вимог до їх експлуатаційними властивостями, що визначає точність і надійність важких токарних верстатів; детально розробляти технологічний процес обробки циліндричних зубчатих коліс, що дозволяє отримати необхідні точність розмірів і систему параметрів їх робочих поверхонь, задані кресленням, які забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Перший шлях коротше, однак він не дозволяє використовувати наявні результати теоретичних і експериментальних досліджень з оцінки експлуатаційних властивостей циліндричних зубчатих коліс вже виготовлених вузлів, редукторів, систем приводів важких токарних верстатів, а також використовувати накопичений досвід по технологічному забезпеченню якості оброблених поверхонь. При цьому немає чіткого розмежування між функціями конструктора і технолога, так як конструктор, виходячи з необхідних експлуатаційних властивостей, сам повинен призначати методи і режими обробки. Це, природно, абсолютно неприйнятно для умов одиничного і дрібносерійного виробництва. Крім того, в даний час функції відділів конструктора і технолога розмежовані, тому доцільність вирішення даного завдання по першому шляху в даний час утруднена, хоча таке рішення принципово можливо і в майбутньому має знайти своє місце.

Другий шлях - двоступеневий, він більш універсальний, дозволяє одночасно забезпечувати кілька експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс, що визначають точність і надійність важких металорізальних верстатів, а також використовувати розробляються алгоритми і програми по розрахунку оптимальних параметрів стану поверхонь, що сполучаються в умовах серійного, дрібносерійного і одиничного виробництва. З'являється можливість застосовувати вже наявні

результати теоретичних і експериментальних досліджень надійності випускаються важких токарних верстатів, а також досвід підприємств по технологічному забезпеченню якості оброблених поверхонь циліндричних зубчастих коліс, розрахунку оптимальних режимів різання і використання моделювання технологічних процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс інтегруванням за допомогою фазового простору.

Таким чином, технологічне забезпечення експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс в даний час визначається рішенням двох завдань: вибору матеріалу циліндричних зубчастих коліс і обґрунтування призначення точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару, які забезпечували б необхідні експлуатаційні властивості, вибір методу і встановлення раціональних режимів обробки, забезпечують найбільш економічне отримання заданої точності розмірів і системи параметрів стану поверхневого шару оброблених циліндричних зубчастих коліс.

Неважно бачити, що перша з них є завданням конструктора і, незалежно від умов виробництва, повинна вирішуватися на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.

Друга ж - завдання технолога, її перша частина (вибір методу обробки для всіх виробництв) також вирішується на стадії конструкторсько-технологічної підготовки виробництва; друга частина (встановлення оптимальних режимів обробки) для масового, великосерійного і серійного виробництв вирішується при конструкторсько-технологічній підготовці виробництва, для одиничного і дрібносерійного виробництва - безпосередньо на робочому місці при обробці.

Однак з цього не випливає, що отримання необхідних параметрів поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс в умовах масового, великосерійного і серійного виробництва не залежить від робітника. Ця залежність чисто організаційна і полягає у виконанні робочим заданих технологом умов обробки; т. е. в дотриманні технологічної дисципліни.

Висновки. Узагальнена модель технологічного процесу виготовлення циліндричних зубчастих коліс забезпечує побудова оптимальної математичної моделі управління процесом формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс. В основі аналізу оптимізації технологічного процесу як об'єкта управління і вибору класу математичної моделі лежать закономірності протікають в них явищ, а також завжди апріорна інформація про процеси в подібних об'єктах.

Розроблено процес моделювання роботи циліндричних крупномодульних загартованих коліс в порівнянні з результатами теоретичних досліджень і даними, отриманими на експериментальних установках і при дослідженні на «робочих осях» та визначено оптимальні значення параметрів стану робочих

поверхонь циліндричних крупномодульних коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Список литературы

1. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2005. – 736 с.
2. Анализ параметров поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Д. Кошелева, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 118–131.
3. Шелковой А. Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. пр. Тематичний випуск : Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків : НТУ ХПІ, 2013. – № 83. – С. 286–295.
4. Методология разработки модели управления точностью, качеством и производительностью формообразования при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Сборник научных трудов «Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении: сборник научных трудов [Текст] / Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное общество «ОНИКС». – Краматорск : ДГМА, Ирбит: ЗАО «ОНИКС», Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). 2014. – С. 96–117. ISBN 978-5-906703-03-3.
5. Клочко А.А. Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №40 (1149). С. 102-107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X.
6. John Cooper, Bruce DeRuntz. The Relationship Between the Workpiece Extension Length/Diameter Ratio and Surface Roughness in Turning Applications, Journal of Industrial Technology, Volume 23, Number 2, April 2007 through June 2007, p.p. 2 – 7.
7. Пермяков А.А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями корпусных деталях тяжелых токарных станков / А.А. Пермяков, А.А.Клочко, М.И.Гасанов // Обладнання і технології сучасного машинобудування: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, Україна, м.Тернопіль, 11–12 травня 2017. м.Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. – С. 188.
8. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вып. 8. – С. 61-70.
9. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства /А. Шелковой, А. Клочко, Е. Набока // – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.: ил. На русском языке. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN:9783659691720.
10. Клочко А.А. Новые способы высокоскоростной обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, О.А. Анцыферова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали четвертої міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХПІ». 2017. – С. 54-55.

References (transliterated)

1. Bazrov B.M. The fundamentals of engineering technology. M.: Mechanical Engineering, 2005. - 736 p.
2. Mironenko E.V., Klochko A.A., Kosheleva A.D., Godzula I.G. Analysis of the parameters of the surface layer of quenched coarse-grained cogwheels, characterizing their operational properties.

- Instrument reliability and optimization of technological systems: coll. sci. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 31. - P. 118-131*
- 3 Mironenko E.V., Klochko A.A., Kosheleva A.D., Goduzula I.G. Informational modeling of technological processes of gear processing of hardened coarse-grained cogwheels. *Instrument reliability and optimization of technological systems: coll. sci. tr. - Kramatorsk: DGMA, 2012. - Issue. 32. - P. 351-358.*
 - 4 Shelkvoi A.N., Timofeev Y.V., Klochko A.A. Technological support for a given system of parameters of the surface layer of cylindrical hardened large-modular gears. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute": SB . sciences etc. Thematic issue: Cutting and the tool in technological systems. - Kharkiv: NTU KhPI, 2013. - No. 83. - p. 286-295.*
 - 5 Timofeev Y.V., Shelkvoi A.N., Mironenko E.V., Klochko A.A. Methodology for the development of a model for controlling the accuracy, quality, and productivity of shaping during the processing of hardened coarse-grained cogwheels. Collected scientific works "Design problems and automation in mechanical engineering: a collection of scientific papers [Text] *Donbass State Machine-Building Academy; Closed Joint Stock Company "ONYX". - Kramatorsk: DGMA, Irbit: ZAO ONYX, Series: "Design and application of cutting tools in engineering" Ed. Yu.M. Solomentsev. 2014. - P. 96-117. ISBN 978-5-906703-03-3*
 - 6 Klochko A.A., Hasanov M.I., Basova E.V. Technological support of friction of friction and friction of sliding in gear gears. *Bulletin of the NTU "KhPI". Series: Technology in Mechanical Engineering. - Kh. NTU "KhPI", 2015. - №40 (1149). Pp. 102-107. - Bibliographer: 8 titles. - ISSN 2079-004X.*
 - 7 John Cooper, Bruce DeRuntz. The Relationship Between the Workpiece Extension Length/Diameter Ratio and Surface Roughness in Turning Applications, *Journal of Industrial Technology, Volume 23, Number 2, April 2007 through June 2007, p.p. 2 – 7.*
 8. Permyakov A.A., Klochko A.A., Hasanov M.I. Analysis of errors of technological processes of processing of openings with cross-crossing and crossing in axes of body parts of heavy lathes. *Equipment and Technologies of Contemporary Engineering: Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference, Ukraine, Ternopil, May 11-12, 2017. Ternopil: Ternopil National Technical University named after Ivan Puluj, 2017. - P. 188.*
 9. Shelkvoi A.N., Klochko A.A., Hasanov M.I. Maintenance of operational properties of hardened cogwheels Bulletin of modern technologies: Sat. sci. tr. - Sevastopol: FGAOU VO "Sevastopol State University", 2017. - Issue. 8. - P. 61-70.
 10. Shelkvoy A., Klochko A., Naboka E. Simulation modeling in the tasks of mechanical assembly production. *Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. - 528 p. : ill. In Russian. ISBN-13: 978-3-659-69172-0, ISBN-10: 3659691720, EAN: 9783659691720*

Поступила (received) 14.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гасанов Магомедмін Ісамагомедович (Гасанов Магомедмін Исамагомедович, Magomedemin Hasanov) – проректор по науково-педагогічній роботі, кандидат технічних наук, професор, кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати, проректор Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067)-689-0342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Alexander Klochko) – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Заковоротний Олександр Юрійович (Заковоротный Александр Юрьевич, Aleksandr Zakovorotnyi) – доктор технічних наук, доцент кафедри обчислювальна техніка та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097) 967-32-71.

Пермінов Євген Віталійович (Перминов Евгений Витальевич, Yevhen Perminov) – аспірант кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (099)-238-5845; e-mail: gekauta@gmail.com.

Г. И. КОСТЮК, А. Г. ТИМОФЕЕВ

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ КАРБИДНЫХ И СИЛИЦИДНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА СТМ КОРТИНИТ

В работе была исследована возможность создания высокоэнтропийных карбидных и силицидных нанопокровтий на СТМ кортинит на основе гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Проведено исследование получения покровтий карбидов и оксидов непосредственно в теле материала при энергиях ионов в диапазоне от 200 до $2 \cdot 10^4$ эВ с зарядовыми числами от 1 до 3. Получены важные характеристики: объём зерна для всех перечисленных ионов и глубины их залегания, что позволяет оценить слои наноструктур из соединений и элементов или субмикроструктур, которые могут быть образованы этими высокоэнтропийными покровтиями. Показано, что есть возможность избежать получения ин-терметаллидов благодаря высокой подвижности ионов углерода и кремния.

Ключевые слова: высокоэнтропийные покровтия, субмикроструктуры, наноструктуры, твёрдый раствор, интерметаллиды, карбиды, оксиды.

Г. І. КОСТЮК, О. Г. ТИМОФЕЄВ

РОЗРОБКА ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ КАРБІДНИХ І СИЛІЦИДНИХ НАНОПОКРИТТІВ НА СТМ КОРТИНА

В роботі була досліджена можливість створення високоентропійних карбідних і силіцидних нанопокриттів на СТМ Кортина на основі гафнію, цирконію, молибдену, вольфраму, ітрію і нікелю. Проведено дослідження отримання покриттів карбідів і оксидів безпосередньо в тілі матеріалу при енергіях іонів в діапазоні від 200 до $2 \cdot 10^4$ еВ з зарядовими числами від 1 до 3. Отримані важливі характеристики: обсяг зерна для всіх перерахованих іонів і глибини їх залягання, що дозволяє оцінити шари наноструктур із з'єднань і елементів або субмікроструктур, які можуть бути утворені цими високоентропійними покриттями. Показано, що є можливість уникнути отримання інтерметаллідів завдяки високій рухливості іонів вуглецю і кремнію.

Ключові слова: високоентропійні покриття, субмікроструктури, наноструктури, твердий розчин, інтерметалліди, карбіди, оксиди.

G. KOSTYUK, O. TIMOFEEV

DEVELOPMENT OF HIGHLY ENTROPIC CARBIDE AND SILICIDE NANOCOATINGS ON STM CORTINITE

The possibility of creating highly entropic carbide and silicide nanocoatings on STM cortinite based on hafnium, zirconium, molybdenum, tungsten, yttrium and nickel was investigated. The study of obtaining carbide and oxide coatings directly in the body of the material at ion energies in the range from 200 to $2 \cdot 10^4$ eV with charge numbers from 1 to 3. Important characteristics are obtained: the grain volume for all the ions listed and the depth of their occurrence, nanostructures from compounds and elements or submicrostructures that can be formed by these highly entropic coatings. It is shown that it is possible to avoid the production of intermetallics due to the high mobility of carbon and silicon ions.

Key words: high-entropy coatings, submicrostructures, nanostructures, solid solution, intermetallics, carbides, oxides.

Введение. Образованию твёрдых растворов имеют высокую твёрдость и обладают другими высокими физико-механическими характеристиками [1–3]. Есть попытки создавать покровтия из высокоэнтропийных сплавов [4] и даже экспериментально получать нитриды на основе высокоэнтропийных сплавов, но теоретических работ в области создания слоёв из карбидных и оксидных высокоэнтропийных покровтий нет.

Всё вышеизложенное говорит об актуальности и своевременности создания теории получения наноструктурных высокоэнтропийных покровтий на материале режущих инструментов.

Появление нового класса материалов – высокоэнтропийных сплавов, их применение может существенно улучшить физико-механические характеристики деталей и режущего инструмента (РИ), но в них входят дорогостоящие составляющие: гафний, цирконий, вольфрам, молибден и другие редкоземельные металлы. Используя эти металлы, можно создавать карбидные и оксидные покровтия на поверхности РИ, и их характеристики могут быть такими же или даже выше, чем у высокоэнтропийных сплавов.

Высокоэнтропийные сплавы требуют, чтобы в их

составе было минимум 5 различных элементов, с увеличением числа элементов энтропия растёт, очевидно, то же самое будет и с увеличением числа карбидов, силицидов нитридов, оксидов и боридов. Причём одного элемента должно быть не более 30 %. Очевидно, у таких покровтий появляются новые возможности, о которых мы ещё и не подозреваем, так как они могут создавать твёрдые растворы, которые могут обладать сверхвысокими физико-механическими характеристиками, так и образовывать интерметаллиды, которые обладают высокой пластичностью, что при их малом количестве реализуются свойства покровтий, которые будут эффективно противостоять ударным нагрузкам. Всё это говорит о своевременности и важности проводимых исследований. Учитывая адгезионные взаимодействия соответствующих карбидов и оксидов с обрабатываемым материалом, можно выбирать поверхностные слои с минимальным адгезионным взаимодействием, что существенно уменьшит адгезионный износ покровтия на РИ и снизит силы резания, что повысит с учётом образования наноструктур (НС) работоспособность и эффективность режущих инструментов.

Работа выполнена в рамках программы

© Г. И. Костюк, А. Г. Тимофеев, 2018

Министерства образования и науки Украины «Новые и ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» (подсекция 13 «Аэрокосмическая техника и транспорт») по темам: «Создание физико-технических основ повышения качества материалов аэрокосмических конструкций» и «Разработка технологических основ интегрированных технологий плазменно-ионной обработки деталей аэрокосмической техники» (подсекция 6 «Физико-технические проблемы материаловедения»), «Концепция создания наноструктур, нано- и традиционных покрытий с учётом влияния адгезии на эффективность и работоспособность деталей АТ, АД и РИ», «Экспериментально-теоретическое исследование получения наноструктур при действии ионных и светолучевых потоков на конструкционные материалы и РИ», хозяйственных работ и договоров о сотрудничестве.

Состояние вопроса. В настоящее время широко рассматривается вопрос о создании высокоэнтропийных сплавов, которые могут найти широкое применение в технике за счёт высокой твёрдости, высокой прочности при значительных температурах, существенно снижается ползучесть по сравнению с традиционными конструкционными материалами, что тоже является важной характеристикой [1–5]. В то же время вопрос получения НС как на высокоэнтропийных сплавах, так и в покрытиях из составляющих этих сплавов, даже экспериментально практически не изучен (существуют отрывочные данные о возможности получения НС), а работ в теоретическом плане по получению НС, за исключением наших [6–11], нет.

Всё это говорит о том, что есть существенная необходимость в развитии работ по получению покрытий из карбидов и силицидов соединений в случае образования высокоэнтропийного покрытия. Вышеизложенное говорит о важности и актуальности проводимых теоретических исследований в направлении получения высокоэнтропийных карбидных и силицидных наноструктурных покрытий.

Результаты и их обсуждение. Была исследована возможность создания высокоэнтропийных карбидных и силицидных покрытий на сверхтвёрдом материале (СТМ) кортините, рассматривалась возможность нанесения карбидов и силицидов гафния, циркония, молибдена, вольфрама, иттрия и никеля. Для этого на основе совместной задачи теплопроводности и термоупругости определялся объём зерна и глубины его залегания для рассмотренных элементов – углерода и кремния.

Получение карбидов требует подачи ионов углерода, которые можно получать непосредственно из углеродного электрода при использовании магнетрона или из газов, содержащих углерод.

Для углерода зависимости объёма зерна (рис. 1, а), минимальной (рис. 1, б) и максимальной (рис. 1, в) глубин залегания позволяют получить пространственную картину образования зерна в зоне действия иона углерода. Видно, что нано-зерно может быть получено при энергиях ионов от 200 до 2000 эВ,

тогда как вблизи 20 КэВ вероятность его образования невысока, а при зарядовых числах 2 и 3 вообще невозможна. Диапазон минимальных глубин залегания составляет величины $9,09 \cdot 10^{-10} \dots 8,79 \cdot 10^{-8}$ м, а максимальные – $3,13 \cdot 10^{-9} \dots 9,64 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 1). Видно, что в этом случае достигается максимальная глубина зоны, где образуется зерно, увеличивается практически до десятка микрометров, что в последнем случае образует субмикрозерно.

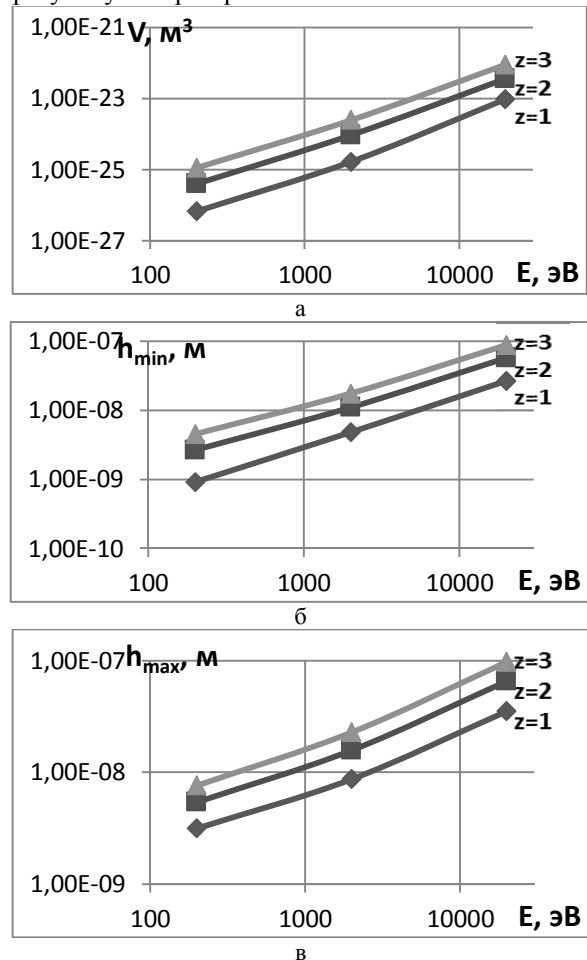


Рис. 1 – Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов углерода (C^+) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для СТМ кортинита

В дальнейшем в зависимости от того, какую последовательность слоёв мы хотим получить, исходя из адгезионных [2] и прочностных [3] характеристик покрытия, мы выбираем поверхностный слой покрытия и их чередование. Для выполнения условия высокоэнтропийности определяем долю гафния, участвующего в процессе с учётом требования, чтобы циркония было не более 30 %, а потом оцениваем скважность импульсов напряжения на испарителе с катодом ЦГ 20 и долю остальных компонентов, для которых необходимо иметь один катод двухкомпонентный, с соотношением компонентов 50 % / 50 %, и два испарителя с однокомпонентными катодами (причём объединяя в двухкомпонентном катоде эле-менты с близкими парциальными давлениями при одинаковых температурах).

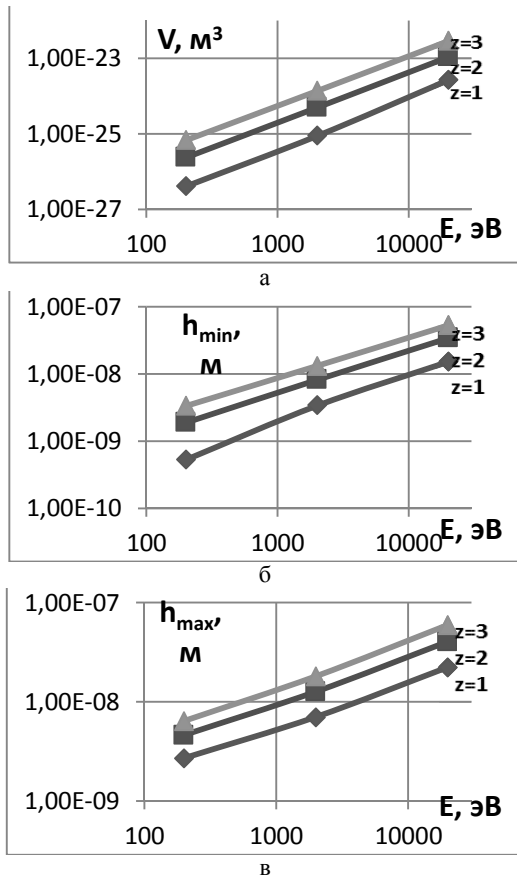


Рис. 2 – Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов кремния (Si⁺) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) для СТМ кортинита

Далее рассматриваем (в зависимости от выбранной последовательности слоёв, первый слой – наружный, для него выбираем диапазон глубин: минимальный и максимальный, а также размер зерна. Вторым по глубине будет слой из соединений, элементов или интерметаллидов) в зависимости от характера работы РИ: если РИ работает с ударной нагрузкой, то второй слой должен быть из чистого металла (интерметаллидный) или соединения демпфирующего деформацию первого слоя. Последующие слои могут быть из химических соединений.

На рис. 3 для ионов гафния представлены все три зависимости. Видно, что объём, соответствующий НС реализуется до энергии ионов порядка 700–800 эВ и глубины: для минимальной 7,44·10⁻¹⁰...5,21·10⁻⁸ м; для максимальной – 2,96·10⁻⁹...5,94·10⁻⁸ м. Видно, что с ростом массы иона объёмы НС и глубины их залегания существенно уменьшаются. Эта тенденция прослеживается практически для всех рассмотренных ионов

Перейдя к зависимостям для циркония (Zr⁺) (рис. 4), получим, что практически для всех исследуемых энергий реализуются НС. Диапазоны глубины залегания составляют: минимальная – 5,22·10⁻¹⁰...4,6·10⁻⁸ м (рис. 4, б); максимальная – 2,72·10⁻⁹...5,29·10⁻⁸ м (рис. 4, в).

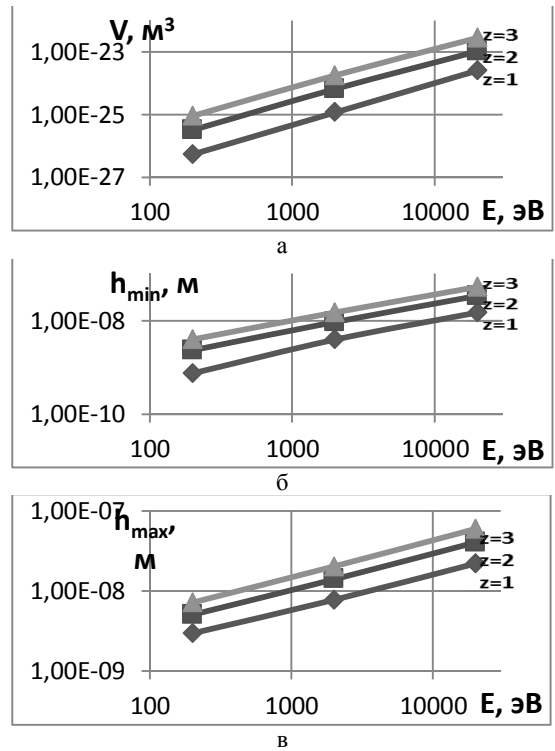


Рис. 3 – Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов гафния (Hf⁺) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) для СТМ кортинита

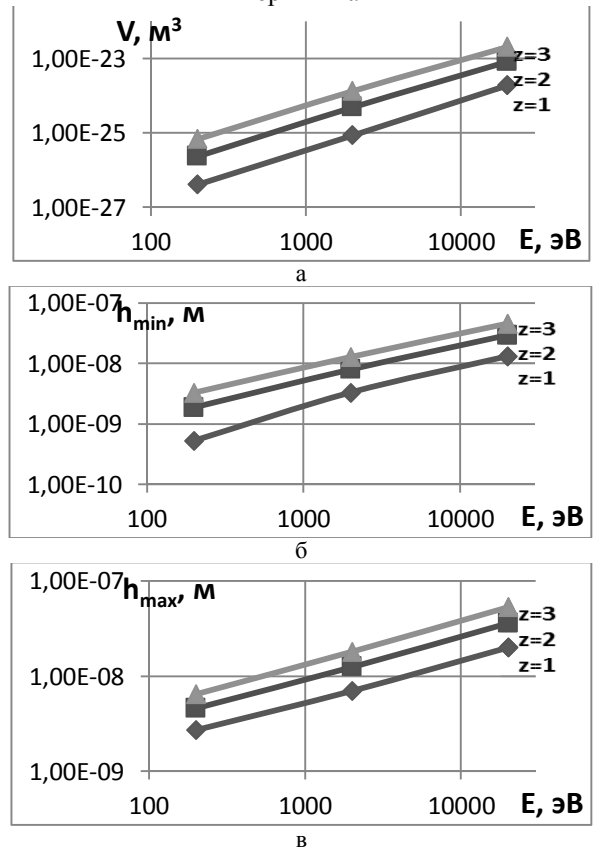


Рис. 4. – Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов циркония (Zr⁺) с различным зарядом (z = 1, z = 2, z = 3) для СТМ кортинита

Для молибдена (Mo⁺) глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $5,32 \cdot 10^{-10}$... $3,34 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $2,73 \cdot 10^{-9}$... $6,45 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $3,32 \cdot 10^{-9}$... $1,3 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $7,02 \cdot 10^{-9}$... $1,81 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $1,31 \cdot 10^{-8}$... $4,62 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $2,00 \cdot 10^{-8}$... $5,32 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 5).

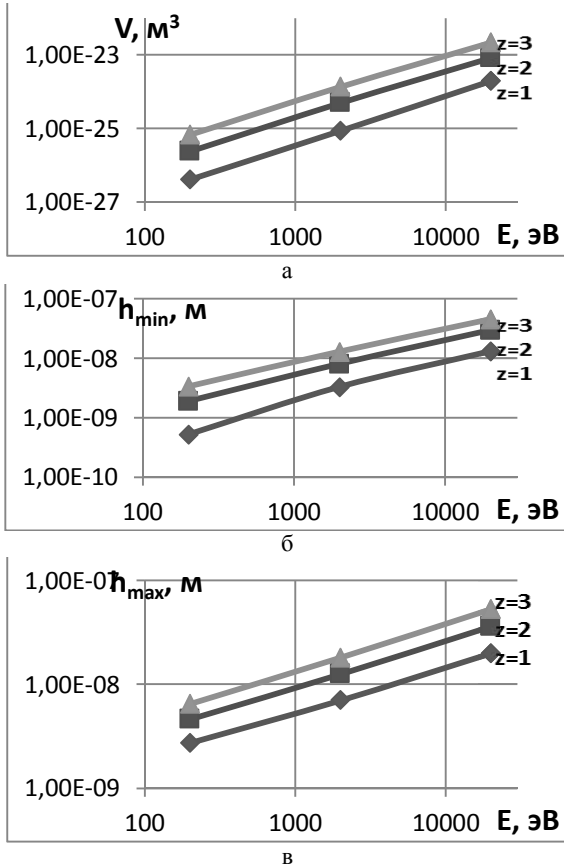


Рис. 5 – Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов молибдена (Mo⁺) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для СТМ кортинита

Для ионов вольфрама (W⁺) представлены аналогичные графики (рис. 6). Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $7,56 \cdot 10^{-10}$... $4,01 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $2,97 \cdot 10^{-9}$... $7,16 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $3,98 \cdot 10^{-9}$... $1,51 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $7,80 \cdot 10^{-9}$... $2,03 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $1,51 \cdot 10^{-8}$... $5,24 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $2,23 \cdot 10^{-8}$... $5,98 \cdot 10^{-8}$ м.

Для ионов иттрия (Y⁺) аналогичные зависимости представлены на рис. 7. Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $5,18 \cdot 10^{-10}$... $3,29 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $2,72 \cdot 10^{-9}$... $6,42 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $3,27 \cdot 10^{-9}$... $1,28 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $6,98 \cdot 10^{-9}$... $1,79 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $1,3 \cdot 10^{-8}$... $4,58 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,99 \cdot 10^{-8}$... $5,29 \cdot 10^{-8}$ м (рис. 7).

Для никеля (Ni⁺) зависимости объёма НС и минимальной и максимальной глубины залегания представлены на рис. 8.

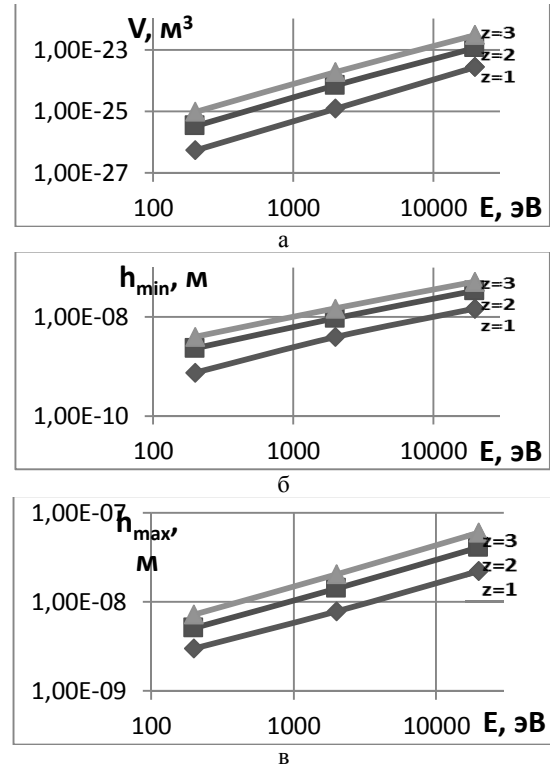


Рис. 6 – Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов вольфрама (W⁺) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для СТМ кортинита

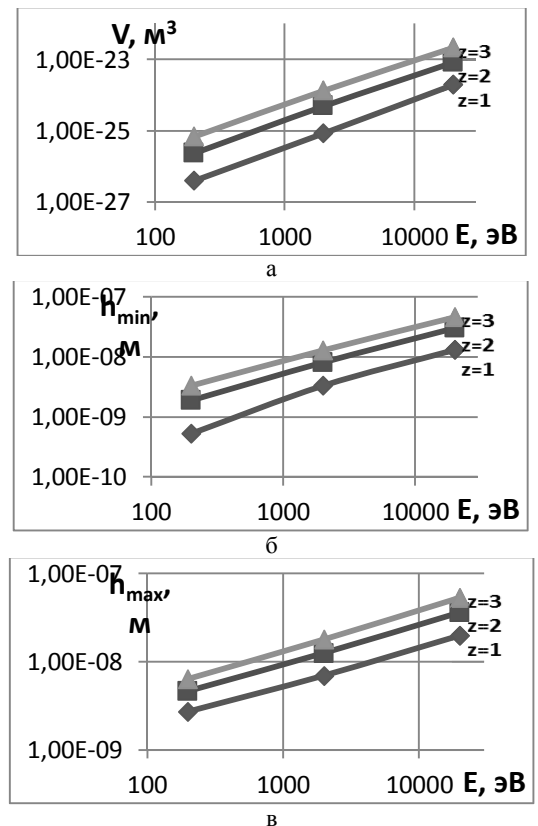


Рис. 7 – Зависимости объёма НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов иттрия (Y⁺) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для СТМ кортинита

Глубины залегания НС при энергии 200 эВ составляют: минимальная – $4,43 \cdot 10^{-10} \dots 3,06 \cdot 10^{-9}$ м, максимальная – $2,63 \cdot 10^{-9} \dots 6,17 \cdot 10^{-9}$ м. При энергии 2000 эВ: минимальная – $3,06 \cdot 10^{-9} \dots 1,21 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $6,71 \cdot 10^{-9} \dots 1,72 \cdot 10^{-8}$ м. При 20 КэВ: минимальная – $1,25 \cdot 10^{-8} \dots 4,44 \cdot 10^{-8}$ м; максимальная – $1,94 \cdot 10^{-8} \dots 5,13 \cdot 10^{-8}$ м.

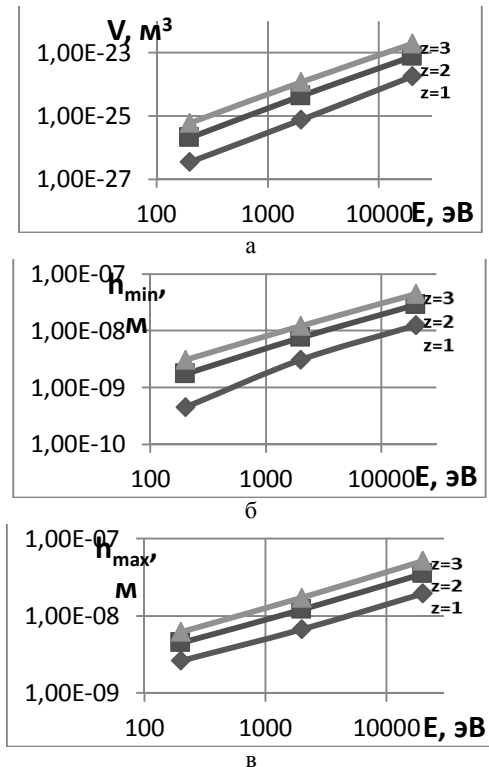


Рис. 8 – Зависимости объема НК (а), минимальной (б) и максимальной (в) глубины залегания НК при действии ионов никеля (Ni⁺) с различным зарядом ($z = 1, z = 2, z = 3$) для СТМ кортинита

Уменьшаются минимальная и максимальная глубины залегания зерна с увеличением массы иона, а также незначительно уменьшаются объемы зерна. Зона энергии, где возможно получение наноструктур, увеличивается, что положительно сказывается на физико-механических характеристиках покрытия, которое при наноструктурном зерне имеет большую микротвердость, предел текучести, предел прочности, повышается также коррозионная стойкость, при этом увеличивается способность воспринимать ударные нагрузки за счет снижения модуля упругости. Это позволяет выдерживать высокие нагрузки в зоне упругости, то есть при больших деформациях мы имеем невысокие напряжения.

Мы рассмотрели возможность образования карбидов и силицидов с учетом пространственного характера действия основных металлов. Реализовать высоко-энтропийное покрытие с 6-ю металлами можно в установке ВУ2-МБС, где есть четыре испарителя, в двух из которых будут находиться катоды из чистых металлов, а в остальных 2-х – двухкомпонентные катоды. Вот так, например, если один из катодов будет из ЦГ20 (20%Нf+80%Zr), для того чтобы обеспечить получение высокоэнтропийного покрытия

необходимо, чтобы гафния было 7,5 %, а циркония 30 % – максимально возможное количество одного компонента в высокоэнтропийном покрытии. Тогда расчеты показывают, что остальные элементы должны составлять 15,6225 % как в 2-х однокомпонентных катодах, так и в 2х компонентном катоде.

Выводы. В результате совместного действия всех рассмотренных сортов ионов мы можем получить высокоэнтропийное покрытие, а с учетом действия ионов кремния и углерода (выбрав соответствующую энергию ионов) получаем высокоэнтропийное карбидное и силицидное наноструктурное покрытие.

Благодаря созданию слоёв из высокоэнтропийных карбидных и оксидных наноструктурных покрытий и выбрав последовательность слоёв (первый на поверхности с учетом адгезионного взаимодействия с обрабатываемым материалом), мы можем конструировать эффективный режущий инструмент, обладающий высокой работоспособности.

Показано, что для получения эффективных высокоэнтропийных покрытий необходимо за счет управления установкой обеспечить соответствующий пространственно-временной закон распределения подачи ионов в материал РИ.

Предложен алгоритм выбора технологических режимов получения высокоэнтропийного карбидного и силицидного нанопокртия с чередующимися слоями с учетом адгезионного взаимодействия поверхностного слоя с обрабатываемым материалом. Построенные графики позволяют выбирать технологические режимы и размер пятна луча, позволяющие получать наилучшие режимы для упрочнения твердого сплава, а значит и обеспечивать конструирование твердого сплава с учетом его упрочнения за счет образования наноструктур.

Список литературы

1. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с нанопокртиями и наноструктурными модифицированными слоями: монография-справ. в 2 кн. Кн.1. Плазменно-ионные и ионно-лучевые технологии / Г.И. Костюк – Харьков: «Планета-Принт», 2016. — 735 с.
2. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: выбор технологических параметров и установок, производительность обработки, физико-механические характеристики наноструктур: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2014. – 472 с.
3. Костюк, Г. И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы: монография / Г. И. Костюк. – Киев: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.
4. Костюк, Г. И. Наноструктуры и нанопокртия: перспективы и реальность: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2009. – 406 с.
5. Костюк, Г. И. Научные основы создания современных технологий: учеб. пособ. / Г. И. Костюк. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2008. – 552 с.
6. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: монография-справочник / Г. И. Костюк. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2007. – 633 с.
7. Костюк, Г. И. Эффективный режущий инструмент с покрытием и упрочненным слоем: справочник / Г. И. Костюк. – Киев: Вид-во АНУ, 2003. – 412 с.
8. Гречихин, Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. – Москва: УП «Технопринт», 2004. – 397 с.
9. Аксенов, И. И. Вакуумная дуга в эрозийных источниках плазмы /

И. И. Аксенов. – Харьков: Изд-во НИИ «ХФТИ», 2005. – 211 с.
 10. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. – Москва: Физматлит, 2005. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

1. *Kostyuk, G.I.* Effective cutting tool with nanocoatings and nanoscale modified layers: monograph-reference. in 2 books. Book 1. Plasma-ion and ion-beam technologies. Kharkov: "Planet-Print", 2016. 735 p.
2. *Kostyuk, G.I.* Nanotechnologies: selection of technological parameters and installations, processing capacity, physical and mechanical characteristics of nanostructures: monograph. Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2014. 472 p.
3. *Kostyuk, G.I.* Nanotechnology: theory, experiment, technology, perspectives: monograph. Kiev: Publ. center of Intern. Academy of Sciences and Innovation. technologies, 2012. 648 p.
4. *Kostyuk, G.I.* Nanostructures and nanocoatings: perspectives and reality: Proc. Help. Kharkov: The national. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2009. 406 p.
5. *Kostyuk, G.I.* Scientific foundations of the creation of modern technologies: Textbook. Help. G.I. Kostyuk. - Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2008. 552 p.
6. *Kostyuk, G.I.* Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a monograph-reference book. - Kharkov: Nats. aerospace. University of Kharkov. aviats. in-t », 2007. 633 p.
7. *Kostyuk, G.I.* Effective cutting tool with a coating and a reinforced layer: a reference book. Kiev: View of AINU, 2003. 412 p.
8. *Grechikhin, L.I.* Physics of Nanoparticles and Nanotechnologies Moscow: UP "Technoprint", 2004. 397 p.
9. *Aksenov, I.I.* Vacuum arc in erosive plasma sources. Kharkov: Publishing house of scientific research institute "Kharkov Institute of Physics and Technology ", 2005. 211 p.
10. *Gusev, A.I.* Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies. Gusev. - Moscow: Fizmatlit, 2005. 416 p.

Поступила (received) 05.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Костюк Геннадій Ігорович (Костюк Геннадий Игоревич, Kostyuk Gennady Igorovich) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ», м. Харків, Україна, тел.: (057)-788-42-06, e-mail: gennadiykostyuk206@gmail.com.

Тимофєєв Олександр Геннадійович (Тимофеев Александр Геннадиевич, Timofeev Alexander Gennadievich) – директор ООО «ХимПром», тел. (067)-575-07-98.

Г. И. ИЩЕНКО, Р. М. СТРЕЛЬЧУК

О ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН

Для обеспечения задач по внедрения в конструкцию паровых турбин новых лопаток из титановых сплавов с современной геометрией, которая позволяет повысить экономичность паротурбинных установок, необходимо повышение технического уровня их производства. Совершенствование технологии изготовления лопаток, изыскание новых более совершенных методов финишной обработки, обеспечение норм точности изготовления частей лопаток, а также снижение шероховатости поверхностей являются весьма актуальными задачами как с точки зрения повышения надежности и экономичности турбин, так и с точки зрения снижения их себестоимости. Рассмотрено влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования рабочей части лопаток паровых турбин из титанового сплава. Для оценки оптимальности процесса при плоском шлифовании периферией круга использовали показатели производительности обработки, относительного расхода шлифовального круга, удельной себестоимости обработки, шероховатости обработанной поверхности, контактной температуры резания. Оптимальность процесса шлифования определялась с применением методики многофакторного планирования эксперимента.

Ключевые слова: технология изготовления лопаток; финишная обработка; титановые сплавы; производительность; шероховатость; методика многофакторного планирования эксперимента.

Г. І. ІЩЕНКО, Р. М. СТРЕЛЬЧУК

ПРО ФІНІШНУ ОБРОБКУ РОБОЧОЇ ЧАСТИНИ ЛОПАТОК ПАРОВИХ ТУРБІН

Для забезпечення завдань по впровадженню в конструкцію парових турбін нових лопаток з титанових сплавів із сучасною геометрією, яка дозволяє підвищити економічність паротурбінних установок, необхідно підвищення технічного рівня їх виробництва. Удосконалення технології виготовлення лопаток, пошук нових більш досконалих методів фінішної обробки, забезпечення норм точності виготовлення частин лопаток, а також зниження шорсткості поверхонь є дуже актуальними завданнями як з точки зору підвищення надійності і економічності турбін, так і з точки зору зниження їх собівартості. Розглянуто вплив режимів шліфування і характеристик абразивного інструменту на вихідні параметри плоского шліфування робочої частини лопаток парових турбін з титанового сплаву. Для оцінки оптимальності процесу при плоскому шліфуванні периферією круга використовували показники продуктивності обробки, відносної витрати шліфувального круга, питомої собівартості обробки, шорсткості обробленої поверхні, контактної температури різання. Оптимальність процесу шліфування визначалася із застосуванням методики багатofакторного планування експерименту.

Ключові слова: технологія виготовлення лопаток; фінішна обробка; титанові сплави; продуктивність; шорсткість; методика багатofакторного планування експерименту.

G. I. ISHCENKO, R. M. STRELCHUK

ABOUT FINISHING THE WORKING PIECE OF STEAM TURBINES

To ensure the tasks of introducing new blades of titanium alloys with modern geometry into the design of steam turbines, which makes it possible to increase the economics of steam turbine units, it is necessary to increase the technical level of their production. Improving the technology of making blades, finding new improved methods for finishing, ensuring the accuracy standards for the manufacture of blade parts, and reducing the surface roughness are very urgent tasks both in terms of increasing reliability and economy of turbines, and in terms of reducing their cost. The influence of grinding modes and characteristics of the abrasive tool on the output parameters of the flat grinding of the working part of the blades of steam turbines made of titanium alloy is considered. To assess the optimality of the process for flat grinding, the periphery of the circle was used to measure the processing capacity, the relative consumption of the grinding wheel, the specific cost of processing, the roughness of the treated surface, the contact cutting temperature. The optimality of the grinding process was determined using the multifactor design of the experiment.

Key words: blade technology; finishing; titanium alloys; performance; roughness; method of multifactorial experiment planning.

Введение. Энергорынок на территории Украины начал развиваться с начала семидесятых годов. Украина, в силу ее потенциала и географического положения, играла в советском стратегическом планировании развития энергетики особую роль. За сравнительно короткий период времени в Украине были сооружены пять АЭС, преимущественно блоками по 1000МВт, притом вблизи границ с бывшими странами СЭВ. Эти станции обеспечивали не только внутренние потребности Украины, но и участвовали в обеспечении поставок электроэнергии в бывшие страны – члены СЭВ, потребности которых достигали суммарно 4500-5000 МВт. Строительство атомных станций происходило в ущерб модернизации, реконструкции и развития тепловых электростанций. В силу этого, на сегодняшний день тепловая энергетика Украины находится в весьма сложном положении не только из-за дефицита энергоресурсов, но и по причине

физического и морального износа основных фондов.

Выполненные маркетинговые исследования показали, что на тепловых электростанциях Украины работает 91 паровая турбина разной мощности, в том числе 48 турбин производства ОАО «Турбоатом», 43 турбины производства «ЛМЗ» (г. Санкт-Петербург, Россия), кроме того, 17 паровых турбин мощностью 220 МВт и 1000 МВт работают на АЭС Украины и стран дальнего зарубежья (Финляндии, Венгрии, Болгарии). Значительная часть этих турбин: 91,3% мощностью 150 и 200 МВт; 92,7% мощностью 300 МВт – находятся в эксплуатации от 20 до 40 лет, их лопаточные аппараты отработали свой расчетный, продленный ресурс или приближаются к этому и требуют модернизации и замены. Замена и модернизация этих турбин предусмотрены Энергетической стратегией Украины на период до 2030 года. Замена турбин должна проводиться на

современном техническом уровне с повышением их мощности и внутреннего КПД. Это достигается, в первую очередь, за счет внедрения в конструкцию турбин новых лопаток с современной геометрией, которая позволяет повысить экономичность паротурбинных установок на 4-5% и сделать их конкурентоспособными по этому параметру на внешнем и внутреннем рынках.

Для обеспечения этих задач настоятельно необходимо повышение технического уровня механообрабатывающего производства лопаток.

Лопаточный аппарат паровых турбин характеризуется, кроме сложности конструкции, большой трудоемкостью изготовления. В среднем его трудоемкость составляет 30-35% общей трудоемкости изготовления турбины. Поэтому совершенствованию операций изготовления элементов лопатки (рабочего профиля, хвоста и головки) уделялось ранее и в настоящее время повышенное внимание технологов и исследователей. Одной из наиболее важных проблем энергетического машиностроения является совершенствование конструкции паровых и гидравлических турбин.

Лопаточный аппарат является самой ответственной и наиболее дорогой частью турбины и составляет 25-30% общей трудоемкости производства турбин. К проектированию пера лопатки предъявляются повышенные требования по точности и качеству. Точность изготовления рабочей части составляет 0,01 мм. При проектировании закладывается точность расчета 0,001 мм. Вторым важным требованием является качество поверхности (шероховатость поверхности Ra 0,32-0,16 мкм - близка к зеркальной поверхности).

Для увеличения срока службы лопаток турбин предложен вариант их изготовления из сплава на основе титана. Совершенствование технологии изготовления лопаток, изыскание новых более совершенных методов финишной обработки, обеспечение норм точности изготовления частей лопаток, а также снижение шероховатости поверхностей являются весьма актуальными задачами как с точки зрения повышения надежности и экономичности турбин, так и с точки зрения снижения их себестоимости [12].

Основная причина плохой обрабатываемости шлифованием сплавов на основе титана объясняется высокой адгезионной активностью металла к абразивному материалу [8]. Если в качестве критерия интенсивности адгезионного взаимодействия пары абразивный материал-металл рассматривать количество абразивного материала, перенесенного при шлифовании на поверхность металла [10], то среди d-переходных элементов по данному критерию титановый сплав относится к группе наиболее активных металлов [6]. Именно адгезионная активность титана и сплавов на его основе является причиной интенсивного износа абразивного инструмента, большой силы резания и шероховатости обработанной поверхности [7]. При шлифовании время взаимодействия пары абразив-металл существенно

выше, что увеличивает негативное влияние адгезионного взаимодействия на показатели процесса. Использование специального абразивного инструмента, оптимизация режимов обработки и постоянная правка круга позволяют снизить интенсивность контактных процессов при шлифовании [11].

В данном исследовании рассмотрено влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на выходные параметры плоского шлифования заготовок лопаток турбин из титанового сплава.

Условия и порядок проведения исследований и техника эксперимента. Сравнительные технологические испытания выполняли на экспериментальной установке, смонтированной на базе плоскошлифовального станка мод. 3Е711ВФ2. Для измерения силы прижима $P_{с.пр}$ и средней контактной температуры T использовали автоматизированное рабочее место (АРМ), которое включает полусинтетическую термопару для измерения средней контактной температуры, закрепленную в универсальном динамометре УДМ-100. УДМ-100 устанавливают на столе плоскошлифовального станка 3Е711ВФ2. Термопара и УДМ-100 подключены с помощью кабеля интерфейсного к восьмиканальному измерительному усилителю, соединенному с помощью интерфейсного кабеля с восьмиканальным аналого-цифровым преобразователем (АЦП), который непосредственно подключается к персональному компьютеру, удовлетворяющему требованиям операционной системы Windows XP с использованием специальной программы.

Применяли схему плоского шлифования периферией круга, которая осуществлялась кругами прямого профиля ПП-200×40×32 производства ПАО "ТУРБОАТОМ" (СТП 880- 2017) на керамической связке К5 с зёрнами из электрокорунда нормального марки 15А, диапазоном зернистости 32 мкм, 16 мкм и 8 мкм, и номеров структуры – 4 ($V_3=54\%$), 9 ($V_3=44\%$), 14 ($V_3=34\%$). Перед испытаниями шлифовальные круги проверяли на соответствие их основным геометрическим параметрам и требованиям ГОСТ 2424. Величина допускаемого дисбаланса шлифовальных кругов не превышала значений, определяемых ГОСТ 3060 и ГОСТ 19534. Твердость и механическая прочность кругов соответствовали требованиям ГОСТ 12.3.028. Твердость контролировали акустическим методом с помощью прибора «Звук-203М», механическую прочность кругов определяли на стенде «СИП-800». Перед установкой на испытательный стенд все круги проверяли на наличие сколов и трещин. В процессе сравнительных испытаний проводили статическую балансировку шлифовальных кругов на стенде. Шлифовальные круги предварительно правились и прирабатывались в течении 2-3 минут. После испытаний диаметр шлифовального круга контролировали микрометром МК 200 (ГОСТ 4381, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 175...200 мм, погрешность измерения $\pm 0,002$ мм).

Режимы резания проводили при следующих параметрах: силу прижима $P_{с.пр}$ варьировали в пределах 25, 35, 45 Н, скорость круга V варьировали в пределах 25, 35, 45 м/с.

Исследование проводили на образцах из материала – титанового сплава ВТ3-1 с пределом прочности $\sigma_B=930$ МПа. Образцы для проведения испытаний изготавливали из одной партии материалов, которые соответствовали требованиям стандартов по химическому составу и физико-механическим свойствам. Рассеивание предела прочности образцов не превышало + 3,5 %. Перед началом каждой серии опытов партию заготовок вышлифовывали в один размер с допуском по 7 квалитету и шероховатостью по параметру $Ra < 1,6$ мкм. Отклонение шероховатости поверхности в партии образцов не превышало 8 ... 10 %. Размеры образцов соответствовали размерам $100 \times 80 \times 15$ мм.

Размеры образцов до и после обработки контролировали универсальными инструментами: штангенциркулем ШЦ-II-250-0,05 (ГОСТ 166, цена деления 0,05 мм, диапазон измерения 0...250 мм, погрешность измерения + 0,025 мм); микрометром МК25 (ГОСТ 4381, цена деления 0,01 мм, диапазон измерения 0...25 мм, погрешность измерения $\pm 0,002$ мм).

Состояние рельефа обработанной поверхности исследовали на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D LoVac, соединившего в себе последние мировые достижения в области физических методов контроля качества поверхности. Микроскоп позволяет проводить электронномикроскопические исследования состояния рельефа в широком диапазоне увеличений с высокой разрешающей способностью и контрастностью изображения. Поворотный предметный столик позволяет вращать объект в горизонтальной плоскости на 360° и наклонять в вертикальной на угол от -15° до $+90^\circ$ с автоматическим позиционированием анализируемого участка поверхности. Исследование химического состава выполнено на этом же приборе методом локального микрорентгеноспектрального анализа.

Среднее арифметическое отклонение профиля шлифованной поверхности Ra и другие параметры шероховатости измеряли на профилометре SURTRONIC 3+ фирмы TAYLOR – HOBSON (рис. 1).

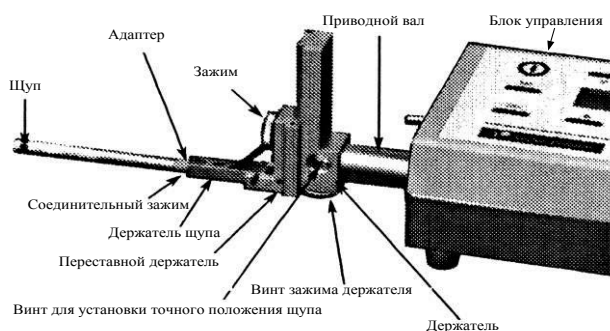


Рис. 1 - Общий вид прибора Surtronic 3+

Для наглядной интерпретации результатов измерений снимались соответствующие профилограммы исследуемых объектов; они были получены на универсальной измерительной станции HOMMELWERKE T8000, общий вид которой представлен на рис. 2.

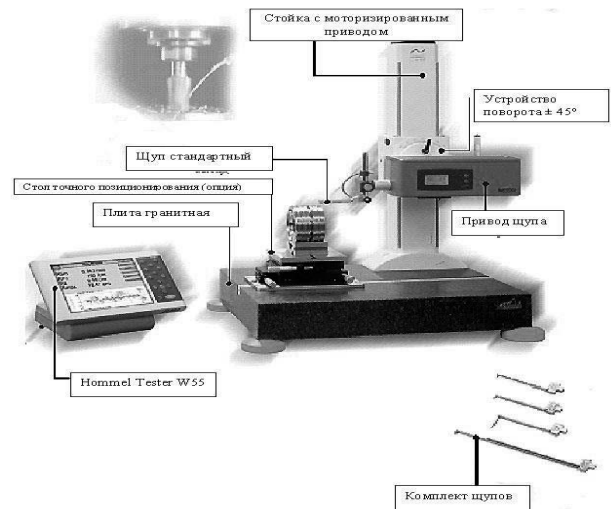


Рис. 2 - Общий вид универсальной измерительной станции HOMMELWERKE T8000

Универсальная измерительная станция HOMMELWERKE T8000 с моторизированным перемещением по вертикали предназначена для измерения шероховатости, профиля и волнистости поверхности сложных, криволинейных поверхностей. В ней встроен принтер для распечатки результатов измерений и профилограмм шероховатости поверхности. К особенностям станции относится возможность позиционирования щупа под 90° к направлению подачи.

Для оценки оптимальности процесса при плоском шлифовании периферией круга использовали перечисленные ниже параметры:

1. Производительность обработки – Q (мм³/мин),
2. Относительный расход шлифовального круга – q (мг/г),
3. Удельная себестоимость обработки – C (грн/см³),
4. Шероховатость обработанной поверхности – Ra (мкм),
5. Контактная температура резания – T (°C).

Математическое планирование экспериментов, состав и количество опытов. Оптимальность процесса шлифования определялась с применением методики многофакторного планирования экспериментов, позволяющей описать процесс в виде уравнений регрессии, т. е. получить математические модели параметров оптимизации. При этом необходимо знать область изменения независимых переменных, соответствующую наилучшему значению изучаемого параметра оптимизации [1, 3], что дает возможность правильно выбрать интервалы варьирования факторов, т. е. определить наиболее рациональный диапазон условий

практического применения кругов.

Ввиду того, что основным параметром оптимизации являлась удельная себестоимость обработки, находилась область факторного пространства с минимальным ее значением. При этом ограничение условий шлифования проводилось по качественным показателям процесса – шероховатости обработанной поверхности и контактной температуре. Поэтому интервалы варьирования факторов выбирались в диапазоне условий шлифования, обеспечивающих наименьшую удельную себестоимость обработки и наилучшие показатели обработанной поверхности.

Исследование факторного пространства, прилежащего к оптимуму, проводилось с помощью планирования второго порядка, так как линейное уравнение регрессии не может адекватно описывать поверхность отклика из-за крутизны гиперплоскостей факторного пространства и возможной значимости эффектов взаимодействия факторов и квадратичных эффектов.

В настоящее время математическая теория планирования экспериментов предлагает большое количество видов планов, а, следовательно, и матриц планирования. Поэтому определенное значение приобретает выбор плана, наиболее приемлемого для конкретных задач. Наиболее широко применяемыми в настоящее время планами второго порядка являются следующие: ортогональные, рототабельные, и планы, близкие к Д-оптимальному.

Использование ортогональных и рототабельных планов при исследовании работоспособности шлифовальных кругов связано с определенными затруднениями, так как часто бывает невозможно реализовать уровни для дискретных значений факторов (например, зернистость), кодированное значение которых дробное (например, 1,125 или 1,68).

При исследовании процесса шлифования наибольший интерес представляют планы, близкие к Д-оптимальным, построенные на кубе, поскольку в данном случае факторы варьируются только на трех уровнях, причем верхний и нижний уровни симметричны относительно центра плана и имеют целочисленные значения [5]. Таким образом, предпочтение было отдано плану, близкому к Д-оптимальному и обозначенному в литературе как *B4* для 4-х факторов: сила прижима *Pc.np*, скорости резания *V*, зернистости *Z* и № структуры круга (объем зерен *Vz*, %).

Необходимо отметить, что поверхность отклика наиболее целесообразно описывать полным уравнением второго порядка [6]:

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^K b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq K} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K b_{ii} x_i^2, \quad (6)$$

где: \hat{y} – выборочная оценка изучаемой функции; b_0 , b_i , b_{ij} , b_{ii} – выборочные коэффициенты регрессии; x_i , x_j – независимые переменные; K – общее число независимых переменных.

Коэффициенты полинома (уравнения регрессии)

рассчитывались по офисной программе MS Excel. Гипотеза об адекватности модели проверялась по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (7)$$

где S_{ad}^2 – дисперсия адекватности, S_y^2 – дисперсия воспроизводимости.

Дисперсия адекватности S_{ad}^2 рассчитывалась по формуле:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N n(\bar{y} - \hat{y})^2}{N - \lambda}, \quad (8)$$

где \bar{y} – среднее значение отдельного наблюдения, \hat{y} – расчетное значение критерия по уравнению регрессии, n – число повторений данного опыта, N – общее число опытов, λ – число коэффициентов уравнения.

Дисперсия воспроизводимости S_y^2 определяется из выражения:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{N(n-1)}, \quad (9)$$

где N – общее число опытов, n – число повторений данного опыта, y_{ij} – результаты отдельного наблюдения, \bar{y}_i – среднее арифметическое значение критерия.

Найденное из уравнения (7) значение F сравнивалось с табличным. Если $F_{табл} > F_{расч}$, то с выбранной доверительной вероятностью уравнение считалось адекватным, в противном случае модель не адекватна (табл.1). Табличное значение F при доверительной вероятности 0,95 составляет 2,32 [2].

Таблица 1 - Статистические характеристики уравнений регрессии (4.11 ... 4.13)

Параметры оптимизации	S_{ad}^2	S_y^2	$F_{расч}$	$F_{табл.}$
Q	1132,59	541,11	2,09	2,32
q	3,17	2,38	1,33	2,32
C	18581,90	13739,66	1,35	2,32
Ra	0,005	0,008	0,62	2,32
T	2698,81	1336,53	2,02	2,32

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялась для оценки влияния отдельных факторов на параметры оптимизации. Для того, чтобы не вызывать искажения модели, отсеив незначимых факторов не проводился. С целью уменьшения ошибок экспериментов проводилась проверка однородности дисперсии по критерию Кохрена:

$$G = \frac{S_{max}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (10)$$

где S_{max}^2 – максимальная дисперсия в эксперименте, $\sum_{i=1}^N S_i^2$ – сумма всех дисперсий.

Расчетные значения критерия Кохрена (табл. 2) меньше табличного значения $G_{табл} = 0,2354$ [9], поэтому дисперсии считались однородными.

Таблица 2 - Расчетные значения критерия Кохрена

Параметры оптимизации	$G_{расч.}$	$G_{табл}$
Q	0,092	0,2354
q	0,196	0,2354
C	0,153	0,2354
Ra	0,082	0,2354
T	0,128	0,2354

После проведения канонических преобразований анализ поверхности отклика осуществляли с помощью двумерного сечения. Для анализа влияния отдельных факторов на показатели работоспособности кругов строились однофакторные зависимости (расчет канонических преобразований и однофакторные зависимости были получены по программе MS Excel). Значение факторов, уровней и интервалов их варьирования для планируемого эксперимента второго порядка по плану (В4), близкому к Д-оптимальному, приведено в табл. 3. Матрица планирования и результаты экспериментов приведены в табл. 4.

Таблица 3 - Обозначение факторов, уровней и интервалов их варьирования

Факторы	$Pc, нр, Н$	$V, м/с$	$Z, мкм$	структура круга № ($V_3, \%$)
Условное обозначение факторов	x_1	x_2	x_3	x_4
Нулевой уровень (0)	35	35	20	9 (44)
Верхний уровень (+)	45	45	32	4 (54)
Нижний уровень (-)	25	25	8	14 (34)
Интервал варьирования	10	10	12	5 (10)

После расчетов коэффициентов получены следующие уравнения регрессии.

1. Для производительности:

$$y_Q = 640,22 + 116,19x_1 + 74,52x_2 - 103,01x_3 + 99,70x_4 + 20,46x_1x_2 + 16,60x_1x_3 + 17,34x_1x_4 - 44,90x_2x_3 + 31,74x_2x_4 - 77,37x_3x_4 - 34,66x_1^2 - 131,79x_2^2 + 36,86x_3^2 + 88,89x_4^2. \quad (11)$$

2. Для относительного расхода шлифовального круга:

$$y_q = 7,65 - 2,91x_1 - 1,99x_2 + 0,27x_3 + 3,19x_4 + 0,72x_1x_2 - 0,58x_1x_3 - 1,58x_1x_4 - 0,57x_2x_3 - 1,06x_2x_4 - 2,38x_3x_4 - 3,05x_1^2 - 0,18x_2^2 + 1,58x_3^2 + 2,58x_4^2. \quad (12)$$

3. Для удельной себестоимости обработки:

$$y_C = 594,71 - 229,31x_1 - 132,57x_2 + 59,99x_3 - 21,41x_4 + 52,46x_1x_2 - 39,17x_1x_3 - 8,08x_1x_4 - 36,67x_2x_3 - 12,42x_2x_4 - 183,54x_3x_4 - 51,28x_1^2 + 88,38x_2^2 + 138,22x_3^2 - 19,62x_4^2. \quad (13)$$

4. Для шероховатости обработанной поверхности:

$$y_{Ra} = 0,848 + 0,103x_1 - 0,084x_2 + 0,146x_3 - 0,118x_4 - 0,003x_1x_2 + 0,030x_1x_3 + 0,030x_1x_4 - 0,015x_2x_3 - 0,034x_2x_4 + 0,061x_3x_4 + 0,006x_1^2 + 0,079x_2^2 + 0,054x_3^2 + 0,233x_4^2. \quad (14)$$

5. Для контактной температуры резания:

$$y_T = 768,46 + 133,97x_1 + 67,01x_2 - 104,36x_3 + 115,68x_4 + 15,68x_1x_2 - 10,38x_1x_3 + 8,79x_1x_4 - 47,23x_2x_3 + 25,67x_2x_4 - 81,29x_3x_4 - 48,04x_1^2 - 172,04x_2^2 + 61,13x_3^2 + 100,63x_4^2. \quad (15)$$

Таблица 4 - Матрица планирования и результаты экспериментов

№№ опытов	Факторы				Значения параметров оптимизации				
	x_1	x_2	x_3	x_4	\bar{Q} , мм3/мин	\bar{q} , мг/г	\bar{C} , грн/с м3	\bar{Ra} , мкм	\bar{T} , °C
1	+	+	+	+	732	2,69	305	1,366	902
2	-	+	+	+	428	9,88	585	0,975	522
3	+	-	+	+	540	6,63	377	1,609	673
4	-	-	+	+	375	19,87	1098	1,317	481
5	+	+	-	+	1233	6,57	416	0,902	1306
6	-	+	-	+	849	14,65	866	0,683	997
7	+	-	-	+	858	11,78	700	1,024	1028
8	-	-	-	+	578	21,32	1244	0,927	706
9	+	+	+	-	582	4,68	584	1,414	684
10	-	+	+	-	382	8,06	1110	1,341	456
11	+	-	+	-	562	7,24	916	1,609	702
12	-	-	+	-	369	13,42	1633	1,366	452
13	+	+	-	-	747	1,94	366	1,219	893
14	-	+	-	-	478	2,86	621	1,170	554
15	+	-	-	-	535	1,74	406	1,366	624
16	-	-	-	-	341	3,96	774	1,219	380
17	+	0	0	0	656	3,83	410	1,024	794
18	-	0	0	0	555	5,37	677	0,683	646
19	0	+	0	0	543	6,92	637	0,853	565
20	0	-	0	0	474	8,02	729	1,000	627
21	0	0	+	0	574	7,80	665	0,975	699
22	0	0	-	0	780	10,65	801	0,829	960
23	0	0	0	+	828	14,16	792	0,974	975
24	0	0	0	-	630	6,31	358	1,187	763

Обработка результатов исследования. На рис. 3–14 приведены трехмерные поверхности отклика, позволяющие осуществлять выбор режимов шлифования для производительности обработки, относительного расхода шлифовального круга и удельной себестоимости обработки.

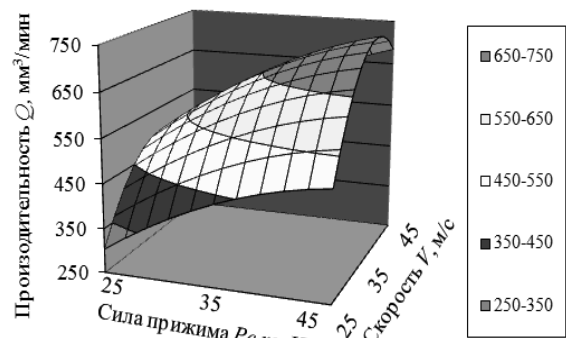


Рис. 3 - Трехмерная поверхность отклика $Q = f(Pc, V)$: $Z=20\text{мкм}$; №9

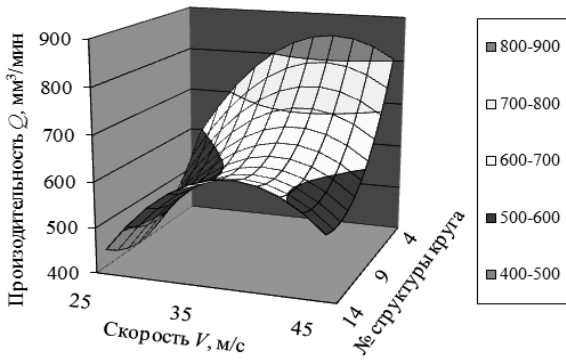


Рис.4 - Трехмерная поверхность отклика $Q - f(V, \text{№})$:
 $P_{с.пр} = 35 \text{ Н}; Z = 20 \text{ мкм}$

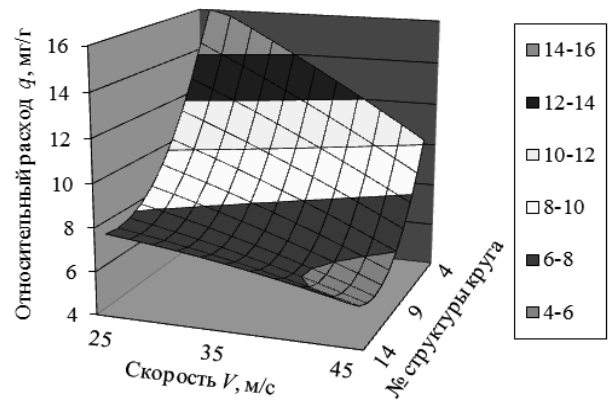


Рис.8 - Трехмерная поверхность отклика $q - f(V, \text{№})$:
 $P_{с.пр} = 35 \text{ Н}; Z = 20 \text{ мкм}$

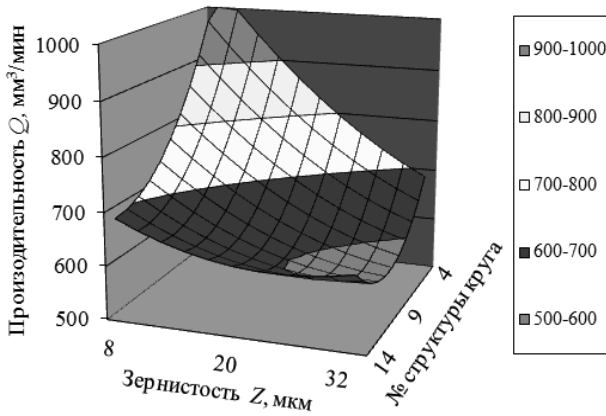


Рис.5 - Трехмерная поверхность отклика $Q - f(Z, \text{№})$:
 $P_{с.пр} = 35 \text{ Н}; V = 35 \text{ м/с}$

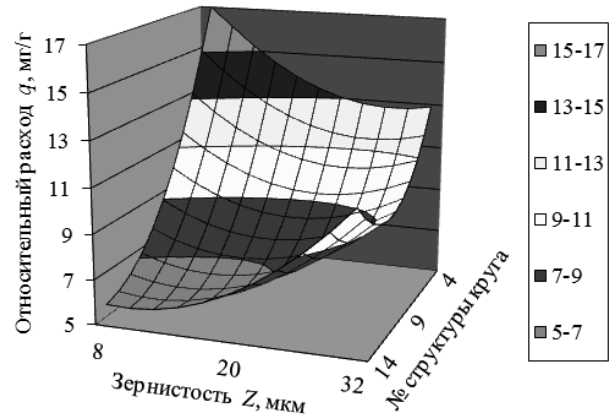


Рис.9 - Трехмерная поверхность отклика $q - f(Z, \text{№})$:
 $P_{с.пр} = 35 \text{ Н}; V = 35 \text{ м/с}$

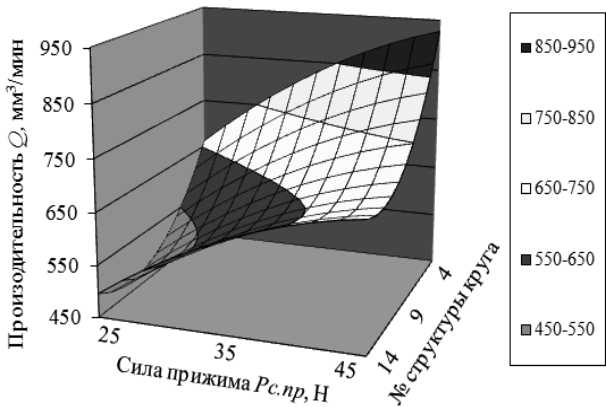


Рис.6 - Трехмерная поверхность отклика $Q - f(P_{с.пр}, \text{№})$:
 $Z = 20 \text{ мкм}; V = 35 \text{ м/с}$

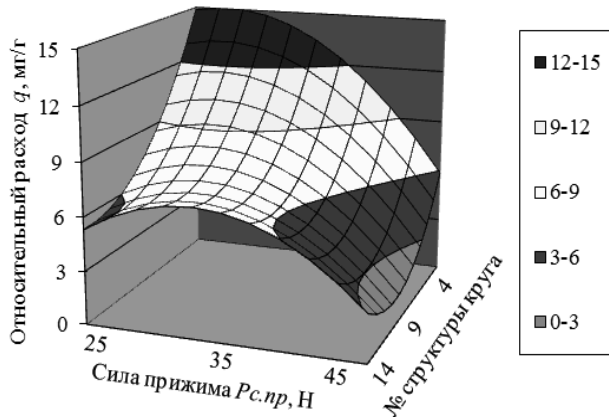


Рис.10 - Трехмерная поверхность отклика $q - f(P_{с.пр}, \text{№})$:
 $Z = 20 \text{ мкм}; V = 35 \text{ м/с}$

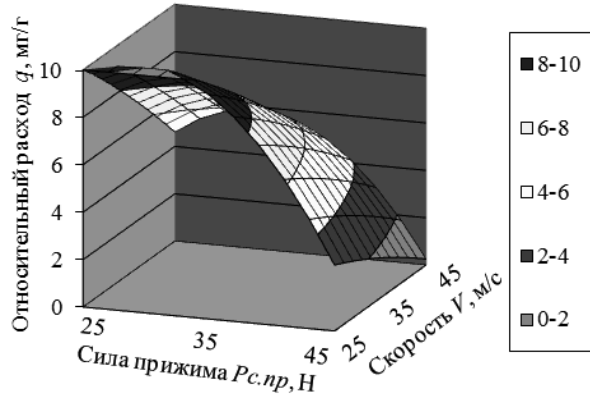


Рис.7 - Трехмерная поверхность отклика $q - f(P_{с.пр}, V)$:
 $Z = 20 \text{ мкм}; \text{№}9$

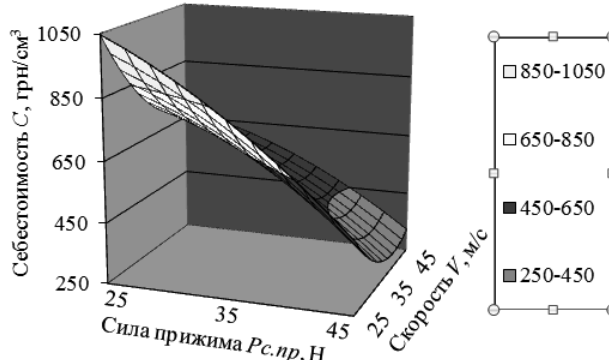


Рис.11 - Трехмерная поверхность отклика $C - f(P_{с.пр}, V)$:
 $Z = 20 \text{ мкм}; \text{№}9$

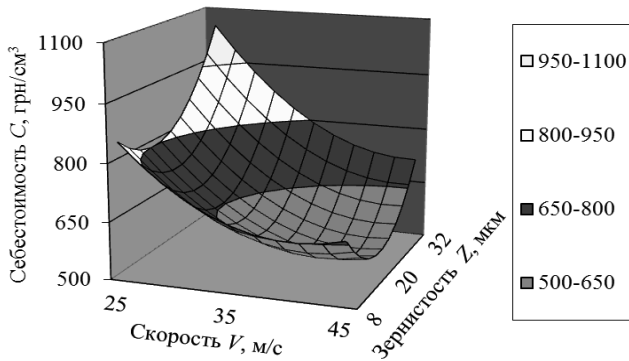


Рис. 12 - Трехмерная поверхность отклика $S - f(V, Z)$:
 $P_{c.pr}=35=35 \text{ Н}$; №9

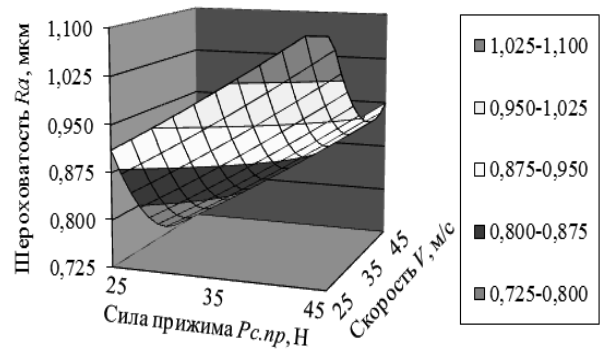


Рис. 15 - Трехмерная поверхность отклика $Ra - f(P_{c.pr}, V)$:
 $Z=20\mu\text{m}$; №9

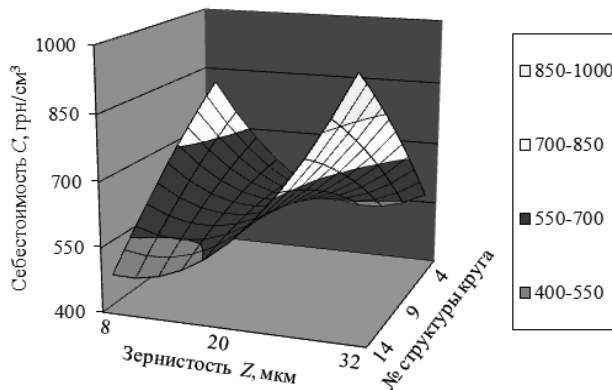


Рис. 13 - Трехмерная поверхность отклика $S - f(Z, \text{№})$:
 $P_{c.pr}=35=35 \text{ Н}$; $V=35\text{m}/\text{c}$

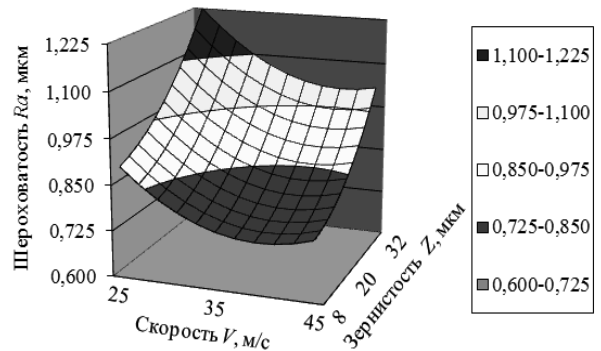


Рис. 16 - Трехмерная поверхность отклика $Ra - f(V, Z)$:
 $P_{c.pr}=35=35 \text{ Н}$; №9

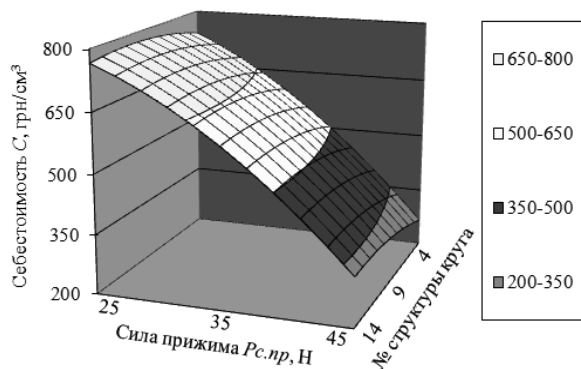


Рис. 14 - Трехмерная поверхность отклика $S - f(P_{c.pr}, \text{№})$:
 $Z=20\mu\text{m}$; $V=35\text{m}/\text{c}$

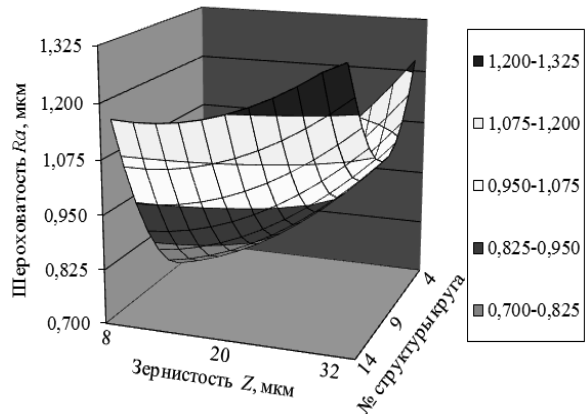


Рис. 17 - Трехмерная поверхность отклика $Ra - f(Z, \text{№})$:
 $P_{c.pr}=35\text{H}$; $V=35\text{m}/\text{c}$

На рис. 15–20 приведены трехмерные поверхности отклика, позволяющие осуществлять выбор режимов шлифования и характеристик абразивных кругов для оптимизации шероховатости обработки и контактной температуры. Оценка значимости коэффициентов уравнений регрессии и характер расположения линий равного отклика показывают, что режимы шлифования и характеристики абразивных кругов в исследуемом диапазоне существенно влияют на шероховатость поверхности и контактную температуру.

Выводы. Увеличение производительности тем больше, чем тверже шлифовальный круг, что можно объяснить повышением так называемой динамической твердости инструмента, обусловленной уменьшением нагрузки на режущие абразивные зерна при увеличении его скорости вращения.

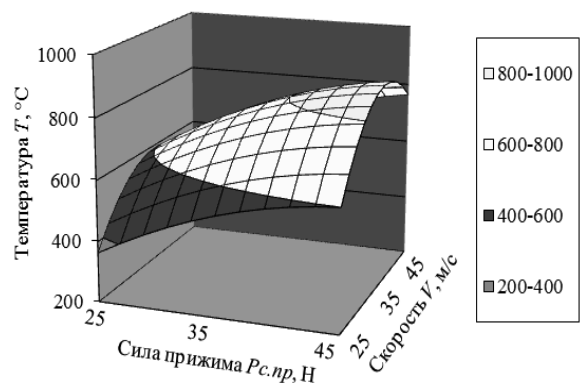


Рис. 18 - Трехмерная поверхность отклика $T - f(P_{c.pr}, V)$:
 $Z=20\mu\text{m}$; №9

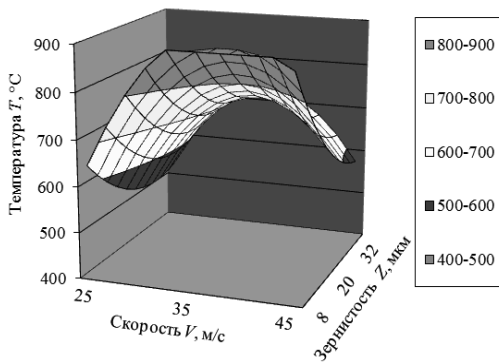


Рис.19 - Трехмерная поверхность отклика $T = f(V, Z)$:
Рс.пр=35 Н; №9

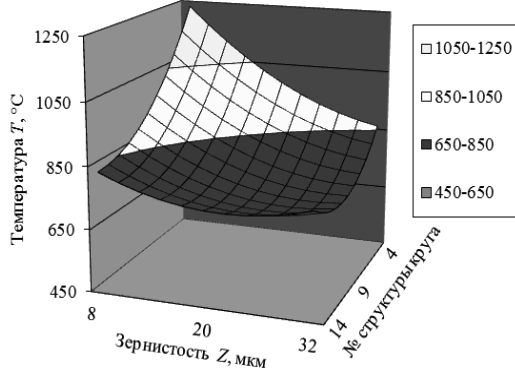


Рис.20 - Трехмерная поверхность отклика $T = f(Z, N)$:
Рс.пр=35 Н; $V=35$ м/с

Рекомендуется применять для высокопроизводительного шлифования титановых сплавов без использования смазочно-охлаждающих средств высокоструктурные абразивные круги на керамических связках, у которых плотность и твердость должны соответствовать определенному скоростному режиму. Размер абразивных зерен в шлифовальном круге определяется требованиями по производительности процесса и шероховатости обработанной поверхности детали.

Список литературы

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.,
2. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.].
3. Душинский В. В., Пуховский Е. С., Радченко С. Г. Оптимизация технологических процессов в машиностроении. – К.: Техніка, 1977. – 176 с
4. Ефимов В. Н. Совершенствование рабочих процессов технологии, методов обработки резанием - важнейший резерв машиностроения. / Ефимов В. Н., Подураев В. Н.// Вестник машиностроения. - 1990. - №12. - С. 3 - 5.
5. Налимов В. В., Чернова Н. А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
6. Носенко В.А. Критерий интенсивности взаимодействия обрабатываемого и абразивного материалов при шлифовании /

7. Полетаев В.А. Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога / В.А. Полетаев, Д.И. Волков.- М.: Машиностроение, 2009. - 272 с.
8. Саютин Г. И., Носенко В. А. Шлифование деталей из сплавов на основе титана. - М.: Машиностроение, 1987. - 80 с.
9. Семко М. Ф., Узуян М. Д., Юфа Э.П. Экономическое обоснование выбора алмазного круга. – Х.: Прапор, 1971. – 100 с.
10. Силин С.С. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов // С.С. Силин, Б. Н. Леонов, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, В. А. Полетаев, Э. Б. Данченко // Вестник машиностроения, 1989, №1. С. 43-45.
11. Старков В.К. Шлифование высокопористыми кругами. - М.: Машиностроение, 2007. - 688 с.
12. Савчук, В.И. Технологические возможности финишных способов обработки абразивными брусками / В.И. Савчук, В.А. Иванов, М.А. Телетов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2005. – №11(83). – С. 140–145.

References (transliterated)

1. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. *Planirovanie jeksperimentov pri poiske optimal'nyh uslovij* [Planning experiments in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976. 279 p.
2. Bondar A. G., Statyukha G. A. *Planirovanie jeksperimenta v himicheskoy tehnologii* [Planning of the experiment in chemical technology]. Kiev. Vishcha school, 1976. 184 p.].
3. Dushinsky V. V., Pukhovskiy E.S., Radchenko S. G. *Optimizacija tehnologicheskikh processov v mashinostroenii* [Optimization of technological processes in mechanical engineering]. - Kiev. Technique, 1977. - 176 p.
4. Efimov V. N., Poduraev V. N. *Sovershenstvovanie rabochih processov tehnologii, metodov obrabotki rezaniem - vazhnejshij rezerv mashinostroenija* [Improving the working processes of technology, cutting techniques - the most important reserve of engineering]. Bulletin of Machine Building. 1990. No12. pp. 3 - 5.
5. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Statisticheskie metody planirovanija jekstremal'nyh jeksperimentov* [Statistical methods for planning extreme experiments]. Moscow: Nauka, 1965. 340 p.
6. Nosenko V. A. *Kriterij intensivnosti vzaimodejstviya obrabatyvaemogo i abrazivnogo materialov pri shlifovanii* [Criterion for the intensity of interaction between the treated and abrasive materials during grinding] Problems of machine building and machine reliability. 2001. No 5. P. 85.
7. Poletaev V. A. *Glubinnoe shlifovanie lopatok turbin: biblioteka tehnologa* [Deep grinding of turbine blades: library of a technologist] / V.A. Poletaev, D.I. Volkov. Moscow. Mechanical Engineering, 2009. 272 p.
8. Sayutin G. I., Nosenko V. A. *Shlifovanie detalej iz splavov na osnove titana* [Grinding of details from alloys based on titanium]. Moscow. Mechanical Engineering, 1987. 80 p.
9. Semko M. F., Uzuyan M. D., Yufa E. P. *Jekonomicheskoe obosnovanie vybora almaznogo kruga* [Economic justification for choosing a diamond circle]. H.: Prapor, 1971. 100 p.
10. Silin S. S., Leonov B. N., Khrul'kov V. A., Lobanov A. V., Poletaev V. A., Danchenko E. B. *Osobennosti glubinnogo shlifovanija titanovyh splavov* [Features of deep grinding of titanium alloys]. Bulletin of Machine Building, 1989, №1. pp. 43-45.
11. Starkov V. K. *Shlifovanie vysokoporistymi krugami* [Grinding with high porosity wheels]. Moscow. Mechanical Engineering, 2007. 688 p.
12. Savchuk, V. I., Ivanov V. A., Teletov M. A. *Tehnologicheskie vozmozhnosti fynyshnyh sposobov obrabotki abrazivnyimi bruskami* [Technological possibilities of finish ways of machining by abrasive bars] Visnyk of Sumy State University. Series: Technical Sciences. – 2005. – No. 11 (83). – pp. 140–145.

Поступила (received) 05.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ищенко Григорий Иванович (Ищенко Григорий Иванович, Ishchenko Grigoriy Ivanovich) - ПАО «Турбоатом», м. Харків, Україна; e-mail: mikelmik@i.ua.

Стрельчук Роман Михайлович (Стрельчук Роман Михайлович, Strelchuk Roman Mikhailovich) - кандидат технічних наук, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7221-031X>; e-mail: r.m.strelchuk@gmail.com.

Ф.В.НОВИКОВ, О.О. КЛОЧКО, О.А. ОХРИМЕНКО, О.О. АНЦИФЕРОВА, Є.В. БАСОВА

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОАПРУЖЕНОСТІ ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНОГО ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ

Разроблена математична модель теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування. Переривчасте шліфування застосовується для зменшення нагрівання поверхні, що шліфується за рахунок періодичного переривання її контакту з колом, тобто контакт при шліфуванні здійснюється зміни від шліфування до різання за рахунок наявності різальних крайок за рахунок формоутворення круга. Запропоновано імпульсне зубошліфування, де забезпечується постійний контакт шліфувального круга з оброблюваним зубчастим колесом, але імпульс зйому метала забезпечується за рахунок виконання пазів під кутом λ . Для цього на периферії кола виконуються пази. Розроблено різні форми пазів зубошліфувальних кругів, які забезпечують змішаний процес різання: швидкісного фрезерування за рахунок наявності різальних крайок і безпосередньо абразивного шліфування, що забезпечує зменшення нагрівання поверхні зубчатого колеса за рахунок періодичного змуну процесу зйому метала та значне зменшення засолювання шліфувального круга за рахунок переходу шліфування в різання.

Ключові слова: математична модель, теплонапруженість, імпульсне переривчасте зубошліфування, зменшення нагрівання, формоутворення круга, змішаний процес різання, швидкісне фрезерування, різальні леза, абразивне шліфування, періодична зміна процесу зйому метала, зменшення засолювання шліфувального круга.

Ф.В.НОВИКОВ, А.А. КЛОЧКО, О.А. ОХРИМЕНКО, О.А. АНЦИФЕРОВА, Е.В. БАСОВА МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОГО ПЕРЕРЫВИСТОГО ШЛИФОВАНИЯ

Разработана математическая модель теплонапряженности процесса импульсного прерывистого шлифования. Прерывистое шлифование применяется для уменьшения нагревания поверхности, которая шлифуется за счет периодического прерывания ее контакта с кругом, то есть контакт при шлифовании осуществляется изменения от шлифования к резанию за счет наличия резательных покровок за счет формообразования круга. Предложено импульсное зубошлифование, где обеспечивается постоянный контакт шлифовочного круга с обрабатываемым зубчатым колесом, но импульс съема металла обеспечивается за счет выполнения пазов под углом λ . Для этого на периферии круга выполняются паза. Разработаны разные формы пазов зубошлифовальных кругов, которые обеспечивают смешанный процесс резания: скоростного фрезерования за счет наличия резательных покровок и непосредственно абразивного шлифования, которое обеспечивает уменьшение нагревания поверхности зубчатого колеса за счет периодического изменения процесса съема металла и значительное уменьшение засолки шлифовочного круга за счет перехода шлифования в резание.

Ключевые слова: математическая модель, теплонапряженность, импульсное прерывистое зубошлифование, уменьшение нагревания, формообразования круга, смешанный процесс резания, скоростное фрезерование, резательные лезвия, абразивное шлифование, периодическое изменение процесса съема металла, уменьшение засолки шлифовочного круга.

F. NOVIKOV, A. KLOCHKO, O. OHRIMENKO, O. ANTSYFEROVA, Ye. BASOVA MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL STRESS OF PULSED DISCONTINUOUS GRINDING PROCESS

Mathematical model of thermal stress process of the impulsive irregular polishing. The irregular polishing is used for reduction of heating of surface that is polished due to the periodic breaking in of her contact with a circle, a contact at polishing comes true changes from polishing to cutting due to the presence of cutting backing due to shaping of circle. The impulsive offers gear grinding, where the permanent contact of grinding circle with processed a gear-wheel is provided, but the impulse of output of metal is provided due to implementation of slots under a corner λ . For this purpose on periphery of circle slots are executed. The different forms of slots of gear-grinding circles that provide the mixed process of cutting are worked out: speed milling due to the presence of cutting backing and directly abrasive polishing that provides reduction of heating of surface of gear-wheel due to periodic change of process output of metal and considerable reduction of pickling of grinding circle due to passing of polishing to cutting.

Keywords: mathematical model, thermal stress, impulsive irregular gear grinding, reduction of heating, shaping of circle, mixed process of cutting, speed milling, cutting blades, abrasive polishing, periodic change of process output of metal, reduction of pickling of grinding circle.

Постановка проблеми. Одним з головних напрямків розвитку машинобудування є підвищення працездатності деталей та вузлів при одночасному зростанні кількості та різноманіття вироблених виробів. Проблема якості стосується не тільки готових конструкцій та деталей машин, але й найважливіше місце належить зубчастим колісам. Зубчасті передачі мають істотне значення для правильного функціонування багатьох пристроїв, а технологія їх виготовлення визначає якість і стабільність роботи вузлів і механізмів в різних умовах експлуатації. Безперервно підвищуються також вимоги по відношенню до якості вироблених зубчастих коліс. Крім високої міцності, жорсткості і точності високі вимоги пред'являються до властивостей і

характеристик поверхневого шару зубів зубчастих шлей, що формується на остаточних етапах їх виготовлення. Розробляються нові методи обробки зубчастих вінців, удосконалюються вже існуючі методи, а також впроваджуються у виробництво нове обладнання і матеріали з тим, щоб в результаті обробки отримати відповідно сформований стан поверхневого шару зубчастих коліс в залежності від експлуатаційних навантажень. Тому значно підвищується інтерес до остаточної обробки зубчастих коліс, в тому числі, особливо до шліфування зубів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У роботах [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] в досліджено різні методи технологічного й організаційно-технологічного проектування виробничих систем, автоматизованого

нормування їхньої роботи в умовах дрібної серійності виготовлення деталей, обліку особливостей ерготехнічної системи, створення імітаційного моделювання процесів роботи.

Шліфування дозволяє досягати задану конструктором точність зубів зубчастого колеса, гарантуючи одночасно високу якість зубчастого вінця, що не означає, що цей процес також одночасно сприяє досягненню необхідного стану поверхневого шару. Це пов'язано з наявністю під час реалізації процесу шліфування численних факторів, що впливають на формування властивостей і характеристик поверхневого шару. Слід зазначити, що мова йде, перш за все, про такі зубчасті колеса, які піддавалися термічній або термохімічній обробці, і мали твердість понад 30 HRC. Тому процес шліфування повинен здійснюватися таким чином, щоб були відсутні прижоги, зберігалася висока мікротвердість поверхневого шару і т.п. Слід зауважити, що зміна стану поверхневого шару в процесі будь-якого технологічного впливу залежить не тільки від умов здійснення самого процесу, а й від конструктивних особливостей деталі (зубчастого колеса), які спільно з подальшою обробкою визначають формування стану поверхневого шару готової деталі. Тому процес формування необхідного, за умовами експлуатації, стану поверхневого шару зуба колеса необхідно розглядати в аспекті комплексного впливу конструктивних і технологічних факторів, що визначають в кінцевому рахунку, довговічність деталі і надійність роботи всього механізму - машини.

Мета роботи – забезпечення теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування за рахунок формоутворення круга.

Виклад основного матеріалу

Переривчасте шліфування застосовується для зменшення нагрівання поверхні, що шліфується за рахунок періодичного переривання її контакту з колом, тобто контакт при шліфування здійснюється зміни від шліфування до різання за рахунок наявності різальних крайок за рахунок формоутворення круга. [1, 2, 3, 11]. Запропоновано імпульсне зубошліфування, де забезпечується постійний контакт шліфувального круга з оброблюваним зубчастим колесом, але імпульс зйому метала забезпечується за рахунок виконання пазів під кутом λ . Для цього на периферії кола виконуються пази. Розроблено різні форми пазів зубошліфувальних кругів, які забезпечують змішаний процес різання: швидкісного фрезерування за рахунок наявності різальних крайок і безпосередньо абразивного шліфування (рис.1). Таким чином, зменшується нагрівання поверхні зубчастого колеса за рахунок періодичного змуну процесу зйому метала, що забезпечує значне зменшення засолювання шліфувального круга за рахунок переходу шліфування в різання.

Переривання процесу різання знижує температуру в зоні різання і збуджує високочастотні коливання в пружній системі, зменшуючи тим самим енергоємність процесу. При переривчастому шліфуванні зменшення температури відбувається по двох каналах: за рахунок переривання процесу різання до того моменту, поки температура не досягла квазістаціонарного стану, і за

рахунок формоутворення круга поєднання двох ефектів створює нове рішення проблеми зниження теплонапруженості шліфування.

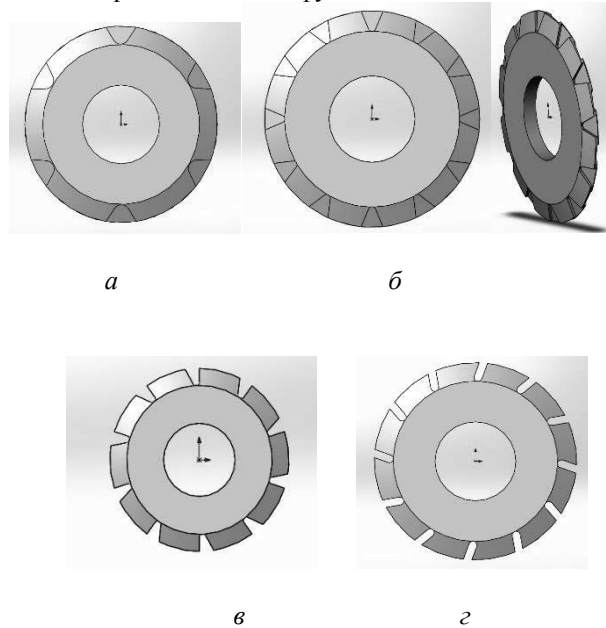


Рис. 1 - Шліфувальні круги для імпульсного зубошліфування з формою кішені: а – з наскрізним пазом з кутом 90° ; б – двостороння форми кішені типу V з кутом λ позитивним переднім кутом $+\lambda$; в – з наскрізним пазом по типу дискової фрези з негативним переднім кутом $-\lambda$

Жоден з відомих процесів шліфування по технологічним можливостям не може наблизитися до цього виду обробки. Системний підхід до вирішення цієї проблеми встановив передатні функції між вхідними фізичними і вихідними технологічними параметрами процесу шліфування, оцінити пайовий вклад роботи шліфування, що витрачається на різання і тертя в загальному енергетичному балансі процесу обробки. При імпульсному шліфуванні переривчастими кругами припуск віддаляється окремими шарами на рис. 2.

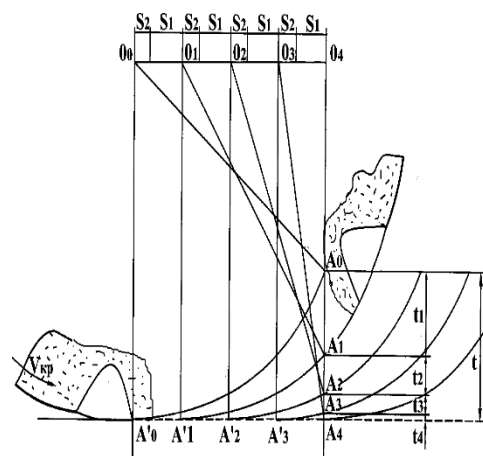


Рис. 2 – Схема пошарового видалення припуску при імпульсному шліфуванні кругами з кішенями

Згідно з цією схемою, шліфувальний круг здійснює зворотно поступальний рух відносно шліфованого зубчастого колеса в межах зони контакту. Час роботи одним ріжучим лезом:

$$\tau_1 = \frac{S_1}{V_{дем}} = \frac{l_1}{V_{сп}}$$

Шліфувальний круг переміщується на величину:

$$S_1 = \frac{V_{дем} \cdot l_1}{V_{сп}}$$

а за час різання ріжучим лезом:

$$\Delta\tau = \frac{S_2}{V_{дем}} = \frac{l_2}{V_{сп}}$$

шліфувальний круг переміщується на величину 1.

де l_1 - довжина різального виступу; l_2 - довжина паза між виступами; $V_{сп}$ - швидкість круга; $V_{дем}$ - швидкість переміщення деталі.

Число різальних виступів, що контактують з металом за час руху центру шліфувального круга над зоною контакту, визначається по формулі :

$$n = \frac{\sqrt{Dt}}{(S_1 + S_2)} = \frac{\sqrt{Dt} \cdot V_{сп}}{V_{дем}(l_1 + l_2)}$$

Переріз A_0A_1 (рис.2) можна представити як адиабатичний стержень, до якого в точці A_0 прикладено теплове джерело постійної інтенсивності q . В цьому випадку диференціальне рівняння теплопровідності можна записати у виді:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

При початкових і граничних умов:

$$T(x, \tau)_{\tau=0} = T_0,$$

$$T(x, \tau)_{\tau=0} = T_u$$

$$\left. \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0$$

рішення цього диференціального рівняння має вигляд:

$$T = 2q \sqrt{\frac{\tau}{C_{pm}\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}}\right) \quad (3)$$

де T_0 - початкова температура деталі дорівнює температурі середовища, °C; T_u - температура теплового джерела (зони контакту), °C; C - теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/кг·°C; ρ - щільність оброблюваного матеріалу, кг/м³; λ - коефіцієнт теплопровідності, Дж/м·с·°C.

Для математичного опису теплових процесів, що протікають в зоні контакту переривчастого круга,

розглянемо теплову схему, представлену на рис. 3. Для формування теплового імпульсу застосуємо принцип суперпозиції, тобто змістивши початок координат у напрямі осі τ на величину $ti / \omega i$, що відповідає часу роботи різального виступу, прикладемо до поверхні негативне (уявний) теплове джерело. Температуру на глибині x від проходження першого різального виступу можна розрахувати, якщо скласти два вираження, що описують температури для позитивного (q_1) і негативного ($-q_1$) теплових джерел. Після проходження западини, тобто через час, в роботу вступає другий різальний виступ.

$$T_2 = 2q_1 \sqrt{\frac{\tau - \frac{t_1}{\omega} - \Delta\tau}{C_{pm}\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x - t_1 - t_2}{2\sqrt{\alpha(\tau - \frac{t_1}{\omega} - \Delta\tau)}}\right);$$

$$T_1 = -2q_1 \sqrt{\frac{\tau - 2\frac{t_1}{\omega} - \Delta\tau}{C_{pm}\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x - t_1 - t_2}{2\sqrt{\alpha(\tau - \frac{t_1}{\omega} - \Delta\tau)}}\right); \quad (4)$$

Вираження для визначення температури на глибині x від дії до різальних виступів таке:

$$T = \frac{2}{\sqrt{C_{pm}\lambda}} \left[\sum_{i=1}^n q_i \sqrt{\tau - (i-1)\left(\frac{t_1}{\omega} + \Delta\tau\right)} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x - \sum_{j=1}^i t_j}{2\sqrt{\alpha\left(\tau - (i-1)\left(\frac{t_1}{\omega} + \Delta\tau\right)\right)}}\right) - \sum_{i=1}^{n-1} q_i \sqrt{\tau - i\frac{t_1}{\omega} - (i-1)\Delta\tau} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x - \sum_{j=1}^i t_j}{2\sqrt{\alpha\left(\tau - i\frac{t_1}{\omega} - (i-1)\Delta\tau\right)}}\right) \right] \quad (5)$$

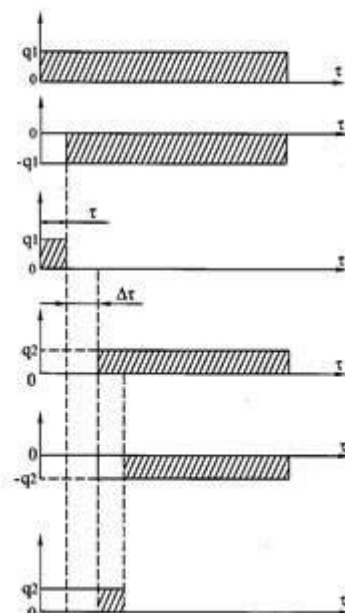


Рис. 3— Формування теплових імпульсів від роботи окремих різальних виступів за рахунок формування кола

Лінійні і тимчасові параметри, що входять в це рівняння, можна виразити через параметри режиму шліфування і геометричні параметри переривчастого круга:

$$\tau = \frac{\sqrt{Dt}}{V_{\text{дб}}}; \Delta \tau = \frac{l_2}{V_{\text{дб}}}; \tau_1 = \frac{l_1}{V_{\text{дб}}} = \frac{t_1}{a_1}; x = t$$

Після підстановки цих параметрів в рівняння (5), отримуємо:

$$T_z = \frac{2}{\sqrt{C_{\text{дб}}}} \left[\sum_{i=1}^k q_i \sqrt{\frac{\sqrt{Dt}}{V_{\text{дб}}}} - (i-1) \left(\frac{l_1+l_2}{V_{\text{дб}}} \right) \times \text{ierf} \left[\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2\sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{D}{V_{\text{дб}}} - (i-1) \left(\frac{l_1+l_2}{V_{\text{дб}}} \right)}} \right] - \sum_{i=1}^k q_i \sqrt{\frac{\sqrt{Dt}}{V_{\text{дб}}}} - (i-1) \left(\frac{l_1+l_2}{V_{\text{дб}}} \right) \times \text{ierf} \left[\frac{t - \sum_{i=1}^k t_i}{2\sqrt{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{Dt}}{V_{\text{дб}}} - i \frac{l_1}{V_{\text{дб}}} - (i-1) \left(\frac{l_2}{V_{\text{дб}}} \right)}} \right] \right]$$

Як відомо [8-11], при переривчастому шліфуванні сила P_z пропорційна глибини різання $t^{0,855}$ ($P_z = t^{0,855}$). Щільність теплового потоку q прямопропорційна силі різання P_z , отже, пропорційна $t^{0,855}$

$$q = \frac{P_z \cdot V_{\text{сп}} \cdot 0,8}{\sqrt{Dt} \cdot B}; q = \frac{t^{0,855}}{t^{0,5}}$$

Якщо зробити вимір потужності, що витрачається на різання, то можна розрахувати середню щільність теплового потоку

$$q_{\text{ср}} = \frac{0,8N}{\sqrt{Dt} \cdot B};$$

де B - ширина зразка, м; N - потужність, що витрачається на різання, Вт (визначається експериментально). Щільність теплового потоку q в різних точках по ширині зони контакту розраховується по формулі

$$q_i = \frac{q_{\text{ср}} t_i^{0,355}}{t_{\text{ф}}^{0,355}}$$

де $t_{\text{ф}}$ - середня товщина зрізу по ширині зони контакту:

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{t}{n}$$

Для оцінки теплонпруженности процесів суцільного і переривчастого шліфування кругами з кішнями були зроблені розрахунки для зубчастого колеса зі 40ХНМ.

В таблиці 1 представлені розрахункові значення температур, возни-кающих на глибині зрізуваного припуску, у міру видалення шарів в перерізі A_0A_4 (рис.2) різними різальними виступами.

$$L = \left[1 - \frac{T_{\text{нр}}}{T_{\text{сн}}} \right] \cdot 100.$$

Показує, на скільки відсотків знижується температура при переривчастому шліфуванні в порівнянні з температурою суцільного шліфування.

На рис. 4 показані осцилограми температур при суцільному і переривчастому шліфуванні, отримані при швидкостях розгортки променя осцилографа моделі 3

розгортки променя осцилографа при переривчастому шліфуванні до 1,2-10" с/см розширило щільність температурних сплесків на осцилограмі, але не дозволило записати температурні сплески від усього 12 різальний виступ за час проходження круг над зона контакт.

Таблиця 1 - Розрахункові значення температур, що виникають на глибині зрізуваного припуску, у міру видалення шарів в перерізі A_0A_4 (рис.2) різними різальними виступами

Номер зрізуваного шару, К	Глибина зрізуваного шару, мм	T °С Суцільний круг	T °С Круг з кишнями	Ступінь зниження температури в, %
1	2,404 · 10 ⁻⁶	295,7	230,9	21,9
2	2,20 · 10 ⁻⁶	433,5	321,4	25,8
3	1,9910 ⁻⁶	526,6	384,2	27,0
4	1,78 · 10 ⁻⁶	597,6	432,7	27,6
5	1,57 · 10 ⁻⁶	654,5	470,4	28,1
6	1,4 · 10 ⁻⁶	698,8	498,5	28,7
7	1,2 · 10 ⁻⁶	733,1	519,6	29,1
8	0,93 · 10 ⁻⁶	755,9	533,4	29,4
9	0,72 · 10 ⁻⁶	767,4	538,6	29,8
10	0,51 · 10 ⁻⁶	767,3	534,9	30,3

Слід зауважити, що температурні сплески на осцилограмах відповідають температурам, що виникають в зоні контакту круга з деталлю при перерізанні термопари. Величина температурних сплесків на осцилограмі пропорційна глибинам шарів у міру урізування круга на величину зрізуваного припуску в перерізі A_0A_4 (рис.2).

З аналізу (рис. 4) видно зростання усередненої температури деталі. При проходженні різального виступу над термопарою відбувається сплеск температури, а при проходженні западини - експоненціальне її пониження. Слід зазначити, що за період проходження кишени на крузі температура знижується приблизно на 50-60% в порівнянні із з проходженням по суцільному кругу. При проходженні першого різального виступу температурний сплеск на осцилограмі дорівнює 67 мм, за період проходження западини температурний сплеск зменшився на 33 мм. При проходженні другого різального виступу відносний приріст температурного сплеску на осцилограмі дорівнює 37 мм, а величина пониження температури дорівнює 32 мм. Після проходження третього і четвертого різальний виступ на тлі зростаючий усереднений температура дорівнює 14 мм.

При звичайному шліфуванні (рис. 4, а) шліфувальний круг знаходиться в постійному контакті із зрізуваною термопарою. Отже, відбувається нагрів торця адіабатичного стержня упродовж усього періоду проходження круга над зоною контакту. Кількість тепла, що виділяється, в зоні різання пропорційна швидкості занурення круга в метал. Швидкість занурення різальних зерен круга в метал визначається по формулі:

$$\omega_i = \frac{V_{кр} t_i}{l_1} \quad (6)$$

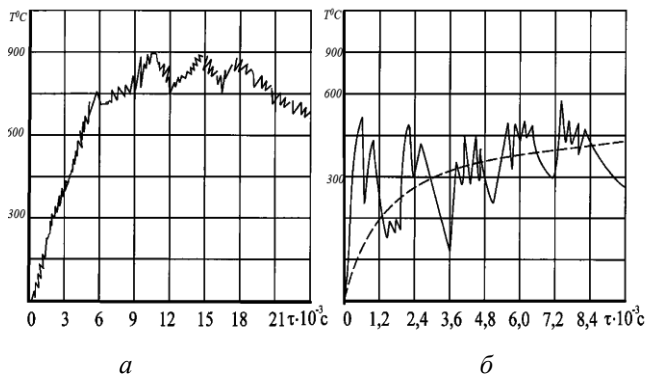


Рис. 4— Зміни температури на площині зрізу при звичайному (а) і переривчастому (б) шліфуванні кругами з кішенями ($l_x=30$ мм, $l_2=22,4$ мм) $V_{кр}=35$ м/с; $S_{обр}=1,2$ м/хв; $t=0,10$ мм.

З аналізу формули (6) видно, що швидкість занурення зерен в метал ω_i пропорційна товщині зрізу період урізування круга на глибину t зменшується.

Висновки. Переривчасте шліфування застосовується для зменшення нагрівання поверхні, що шліфується за рахунок періодичного переривання її контакту з колом, тобто контакт при шліфування здійснюється зміни від шліфування до різання за рахунок наявності різальних крайок за рахунок формоутворення круга.

Імпульсне зубошліфування забезпечує постійний контакт шліфувального круга з оброблюваним зубчастим колесом, але імпульс зйому метала забезпечується за рахунок виконання пазів під кутом λ .

Розроблено різні форми пазів зубошліфувальних кругів, які забезпечують змішаний процес різання: швидкісного фрезерування за рахунок наявності різальних крайок і безпосередньо абразивного шліфування.

Зменшується нагрівання поверхні зубчатого колеса за рахунок періодичного змуну процесу зйому метала, що забезпечує значне зменшення засолювання шліфувального круга за рахунок переходу шліфування в різання.

References (transliterated)

1. Анділахай О. О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями: автореф. дис. докт. техн. наук : спец. 05.02.08 "Технологія машинобудування" / О. О. Анділахай. – Одеса : ОНПУ, 2013. – 47 с.
2. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М. : Машиностроение, 2005. – 736 с.
3. Кленов О. С. Повышение производительности и качества механической обработки на основе применения прогрессивных режущих инструментов / О. С. Кленов, Ф. В. Новиков, А. Г. Крюк // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2013. – № 42 (1015). – С. 90-95.
4. Степанов М. С. Исследование структурных превращений и их влияние на поверхностный слой при зубошлифовании / М. С. Степанов, А. А. Клочко, О. А. Анцыферова // Вісник НТУ «ХПІ».

- Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – №40 (1149). С. 113-116. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-004X
5. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А.А. Клочко, Е.В. Мироненко, О.А. Анцыферова, Л.А. Макарова, В.Е. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – Вып. 37. – С. 105–112.
 6. Ларшин В.П. Повышение производительности плоского шлифования на основе анализа трудоемкости процесса. – Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2002, вып.1(17). – С.60-64.
 7. Ларшин В.П., Гречиха А.А. О механизме действия твердых смазок на силы резания при шлифовании. – Вісник інженерної академії України, 2000, спец. вип. – С.215-218.
 8. Новіков Ф.В. Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / Ф. В. Новіков, В. В. Нежебовський, В. Г. Шкурупій // Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ"ХПІ", 2013. – № 5(979). – С. 199–210.
 9. Якимов А.В., Новіков Ф.В., Новіков Г.В., Якимов А.А. Алмазная обработка: Учеб. пособие. – К.: ІЗМН, 1996. – 168 с.
 10. Савчук, В.И. Технологические возможности финишных способов обработки абразивными брусками / В.И. Савчук, В.А. Иванов, М.А. Телетов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2005. – №11(83). – С. 140–145.
 11. Якимов А.В. и др. Тепловые процессы при обычном и прерывистом шлифовании. – Одесса: ОГПУ, 1998. – 272 с.
 12. John Cooper, Bruce DeRuntz, 2007, The Relationship Between the Workpiece Extension Length/Diameter Ratio and Surface Roughness in Turning Applications, Journal of Industrial Technology, Volume 23, Number 2, April 2007 through June 2007, p.p. 2 - 7

References (transliterated)

1. Andilakhay O. Naukov, the basis of the effective ozdobyuvnoyi abrasive parts of the parts by flooded strings: the author's abstract. dis. Doct. tech. Sciences: spec. 05.02.08 "Technology of machine-building". O.O. Andilakhay. Odessa: ONPU, 2013. 47 p.
2. Bazzrov B.M. The fundamentals of engineering technology. Moscow. Machine-building, 2005. 736 p.
3. Klenov O.S, Novikov F.V., Kryuk A.G. Increase the productivity and quality of machining based on the use of progressive cutting tools. Вісник НТУ "ХПІ". Zbirnik naukovykh prat. Series: New solutions in modern technologies. Kharkiv. NTU "KhPI". 2013. No. 42 (1015). pp. 90-95.
4. Stepanov M.S., Klochko A.A., Antsyferova O.A. Investigation of structural transformations and their influence on the surface layer during tooth grinding. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. - Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. No40 (1149). pp. 113-116. - Bibliography: 8 references. - ISSN 2079-004X.
5. Klochko A.A., Mironenko E.V., Antsyferova O.A., Makatrova L.A., Kireev. VETechnological processes of formation of the surface layer of gears of heavy lathes with numerical control. Tool reliability and optimization of technological systems: Sat. sci. tr. Kramatorsk: DGMA, 2015. Issue. 37. P. 105-112.
6. Larshin V.P. Increase the productivity of flat grinding on the basis of the analysis of the labor intensity of the process. - Tr. Odessa. polytechnical. University. Odessa, 2002, vol.1 (17). pp.60-64.
7. Larshin V.P., Grechikh A.A. On the mechanism of action of solid lubricants on cutting forces during grinding. Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine. 2000. pp.215-218.
8. Novikov F.V., Nezhebov'sky V.V., Shkurupiy V.G., A mathematical model of the viscous shorstkosti surface with abrasive obrobitsi. Вісник НТУ "ХПІ". Zbirnik naukovykh prat. Series: Mathematical modeling in engineering and technology. Kharkiv NTU "KhPI", 2013. No5 (979). pp. 199-210.
9. Yakimov A.V., Novikov F.V., Novikov G.V., Yakimov A.A. Al- osmosis treatment: Proc. allowance. Kiev. 1996. 168 p.
10. Savchuk, V. I., Ivanov V.A., Teletov M.A. Tehnologicheskyye vozmozhnosti fynyshnykh sposobov obrabotky abrazyvnyim bruskamuy [Technological possibilities of finish ways of machining by abrasive bars]. Visnyk of Sumy State University. Series: Technical Sciences. 2005. No. 11 (83). – pp. 140–145.
11. Yakimov A.V. Thermal processes during conventional and

intermittent grinding. - Odessa: OGPU, 1998. 272 p.

- 12 John Cooper, Bruce DeRuntz, 2007, The Relationship Between the Workpiece Extension Length/Diameter Ratio and Surface Roughness in Turning Applications, *Journal of Industrial Technology*, Volume 23, Number 2, April 2007 through June 2007, p.p. 2 - 7.

Поступила (received) 14.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новіков Федор Васильович (Новиков Федор Васильевич, Fedor Novikov) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця завідувач кафедри; тел.: (067)-689-0342; e-mail: fokusnic1@ Rambler.ru;

Клочко Олександр Олександрович (Клочко Александр Александрович, Alexander Klochko) – доктор технічних наук, професор кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (067) 936-36-64; e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455

Охріменко Олександр Анатолійович (Охрименко Александр Анатольевич, Aleksandr Ohrimenko) – доктор технічних наук, доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ; тел.: (067) 267-69-43; e-mail: alexhobs77@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5446-6987

Анциферова Олеся Олександрівна (Анциферова Олеся Александровна, Olesya Antsyferova) - асистент кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (097)161-50-54; e-mail: ancyferova_olesya@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2154-6614

Басова Євгенія Володимирівна (Басова Евгения Владимировна, Yevheniia Basova) – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування та металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057)-720-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com; ORCID: 0000-0002-8549-4788

С.В.КОВАЛЕВСЬКИЙ, О.С.КОВАЛЕВСЬКА

КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ЯК ОСНОВА СТВОРЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Пропонується система класифікації стосовно верстатів-роботів, що дає можливість описати безліч можливих рішень для аналізу і вибору їх структури. Запропоновано новий підхід із застосуванням фасетного методу класифікації та наведено приклади запропонованої системи кодування конструкцій механізмів з кінематикою паралельної структури. Встановлено, що фасетний метод класифікації стосовно до верстатів-роботів дає можливість описати безліч можливих рішень для аналізу і вибору їх структури. Представлені компоновані рішення у вигляді графів зв'язків у верстатах – роботах.

Ключові слова: верстати з паралельною кінематикою, класифікація, конструкція верстата, кодування.

С.В.КОВАЛЕВСКИЙ, Е.С.КОВАЛЕВСКАЯ

КОДИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Предлагается система классификации станков-роботов, которая позволяет описать множество возможных решений для анализа и выбора их структуры. Предложен новый подход с применением фасетного метода классификации и приведены примеры предложенной системы кодирования конструкций механизмов с кинематикой параллельной структуры. Установлено, что фасетный метод классификации применительно к станкам-роботам дает возможность описать множество возможных решений для анализа и выбора их структуры. Представлены компоновочные решения в виде графов связей в станках - работах.

Ключевые слова: станки с параллельной кинематикой, классификация, конструкция станка, кодирование.

S.V. KOVALEVSKYY, O.S. KOVALEVSKA

CODING OF INFORMATION AS THE BASIS OF CREATION OF INNOVATIVE PRODUCTION SYSTEMS

The classification system for robot machines is offered, which enables to describe a lot of possible solutions for analysis and choice of their structure. A new approach with the use of a facet method of classification is proposed and examples of the proposed coding system for structures of mechanisms with parallel structure kinematics are given. It is established that the facet method of classification with respect to robot machines gives the opportunity to describe a set of possible solutions for analysis and choice of their structure. Composed solutions are presented in the form of a graphs of connections in machine tools - works.

Key words: machine tools with parallel kinematics, classification, design of the machine, coding.

Вступ. Класифікація, як основа наукового системного підходу до об'єктів дослідження, являє собою найважливішу частину наукової діяльності, що визначає успіх подальших наукових дій. Однією з найбільш відомих систем класифікації об'єктів різної природи, є ієрархічна система класифікації.

Ієрархічна система класифікації встановлює підпорядкованість (ієрархію) об'єктів і будується за таким принципом вхідна множина об'єктів класифікації поділяється спочатку за обраною ознакою на великі угруповання, потім кожне з цих угруповань відповідно до вибраної основи поділу розпадається на ряд наступних угруповань, які розпадаються на ще дрібніші, що поступово конкретизують об'єкт або його властивості. Таку систему класифікації можна подати як граф типу дерева. Вихідна множина об'єкта класифікації спочатку на основі ознаки класифікації поділяється на підмножини. Далі кожна підмножина за наступною ознакою класифікації розбивається на ряд дрібніших підмножин, що становлять відповідний рівень класифікації. Аналогічним чином отримують наступні рівні класифікації. Кількість рівнів класифікації, що відповідає кількості ознак, вибраних за основу поділу, характеризує глибину класифікації [1-3]. Основними перевагами ієрархічної системи класифікації є простота її побудови і зручність для ручної обробки. Однак ця система відзначається

жорсткістю структури, оскільки ознаки класифікації та їх послідовність твердо зафіксовані. Зміна хоча б однієї з ознак призводить до зміни всіх класифікаційних згруповань.

В основу кодування інформації відносно виробничих систем запропоновано використання фасетної системи класифікації. Така система класифікації дозволяє створювати і описувати незалежні угруповання з різних аспектів класифікації складних систем, у тому числі - технічних. Вона не має жорсткої класифікаційної структури і наперед побудованих кінцевих угруповань. При такій системі безліч об'єктів з деяким набором, ознак (фасетів), значення яких відповідають їх конкретному вираженню, ділиться багаторазово і незалежно і найчастіше представлені у вигляді простого переліку [4,5]. Фасетна система класифікації дозволяє не тільки утворювати нові класифікаційні угруповання з наявних фасетів, а й включати нові і виключати старі фасета. Тому, в цій системі відсутня жорстка структура класифікаційного коду і заздалегідь побудованих кінцевих угруповань. В її основі лежить аналіз, якому піддаються характерні ознаки об'єктів класифікації і виявляються основні категорії властивостей предмета. Загальний код об'єкта формується з декількох локальних кодів, кожен з яких відноситься до одного з фасетів. Таким чином - являє собою, як правило,

класифікатор з порядкової або серійно-порядкової системою кодування і містить в собі характерні ознаки об'єктів класифікації як результат певної послідовності арифметичних дій над усіма цифрами коду і служить формою контролю інформації, що міститься в ньому [6-8]. Але, недоліками фасетної системи класифікації є неповне використання ємності, обумовлене відсутністю на практиці багатьох з можливих з'єднань фасетів; не традиційні і незвичність в застосуванні.

Основна перевага фасетного методу - гнучкість структури побудованої класифікації, так як зміни в одному з фасетів не впливають на інші. Недолік методу - складність використання подібної класифікації для ручної обробки інформації.

Матеріали та результати дослідження.

Застосування фасетної системи дозволяє здійснювати блокову побудову класифікаторів з виділенням ідентифікаційного блоку.

Даний метод класифікації передбачає дотримання таких вимог:

- ознаки, що використовуються в різних фасетах, не повинні повторюватися;
- з усіх можливих ознак, які характеризують множину об'єктів класифікації, відбираються і фіксуються лише суттєві, що забезпечують вирішення конкретної задачі.

У процесі кодування об'єктам класифікації та їх угрупованням за певними правилами, привласнюються цифрові, літерні чи буквено-цифрові коди (кодові позначення), що забезпечують їх однозначну ідентифікацію за допомогою знаків (символів). Кодування призначене для формалізованого опису заданої множини об'єктів, що дозволяє робити автоматизовану обробку інформації [9]. У ряді випадків фасетна класифікація вимагає [10] ідентифікації кожного елемента такою, що класифікується безліч великого числа фасетів. Тоді застосовують роздільну ідентифікацію і класифікацію об'єктів шляхом введення ідентифікаційних і класифікаційних кодів.

Фасетна система класифікації відзначається великою гнучкістю і зручністю використання. Вона дає можливість будувати угруповання за будь-яким варіантом поєднання обраних ознак. Причому, при побудові класифікаційних угруповань з різних фасет непотрібні фасети можна обминати, що неприпустимо для ієрархічної системи. Оскільки за цією системою класифікації утворюються незалежні угруповання (їх можна змінювати, доповнювати згідно зі зміною характеру завдань), вони є найбільш пристосовані для автоматизованих систем обчислення даних.

Класифікаційна частина коду, в якій кодуються класифікаційні ознаки, будується за допомогою фасетної формули. Таке блокове кодування об'єктів зручне при організації інформаційних масивів, що є наборами записів про ці об'єкти.

Фасетний метод класифікації стосовно до верстатів-роботів дає можливість описати безліч можливих рішень для аналізу і вибору їх структури.

Беручи фасети у вигляді $P_{X_1X_2}$ і $P_{X_3X_4}$:

1. Для позначення номера платформи

використовується перша позиція - $X_1=1$, а нижні шарніри опор P позначаються порядковим номером точки на другій позиції - X_2 . Тоді, частини коду 11,12,13 відповідно описують першу P_{11} , другу P_{12} і третю P_{13} опори платформи 1, а частина коду 21,22 і 23 відповідно описують першу P_{21} , другу P_{22} і третю P_{23} опори платформи 2, з'єднані з нею верхніми шарнірами.

2. Для позначення стрижнів, що з'єднують верхню і нижню платформи і утворюють ребро жорсткості, приймається символ R (від англ. *Rod*). Тоді $R_{X_1X_2X_3X_4}$ означає стрижень, що з'єднує шарнір X_2 платформи X_1 з шарніром X_4 платформи X_3 .

На основі запропонованої класифікації можна описувати структури найбільш поширених конфігурацій механізмів з кінематикою паралельної структури у вигляді матриць $A(P_{X_1X_2})$ - шарнірні опори нижньої платформи, $B(P_{X_3X_4})$ - шарнірні опори верхньої платформи, $C(R_{X_1X_2X_3X_4})$ - стрижні (тяги, плечі), утворюють ребра жорсткості.

Кожен з варіантів має стан Constanta (c) або Variable (v). Тоді безліч варіантів пропонується відображати у вигляді базових компонувальних рішень:

Основні компонувальні рішення:

$A(c) B(c) C(c)$ - верстат;

$A(v) B(c) C(c)$ - ротопод, тетрапод;

$A(c) B(v) C(c)$ - поворотний стіл;

$A(v) B(v) C(c)$ - подвійний ротопод;

$A(c) B(c) C(v)$ - гексапод, δ -механізм;

$A(v) B(c) C(v)$ - промисловий робот;

$A(c) B(v) C(v)$ - ротопод;

$A(v); B(v) C(v)$ - промисловий робот складальний.

Приклади запропонованої системи кодування конструкцій механізмів з кінематикою паралельної структури представлені в таблиці 1.

Оскільки за цією системою класифікації утворюються незалежні угруповання (їх можна змінювати, доповнювати згідно зі зміною характеру завдань), вони є найбільш пристосовані для автоматизованих систем обчислення даних.

Кожне компоноване рішення може бути представлено графом зв'язків в механізмах з кінематикою паралельної структури (рис. 1).

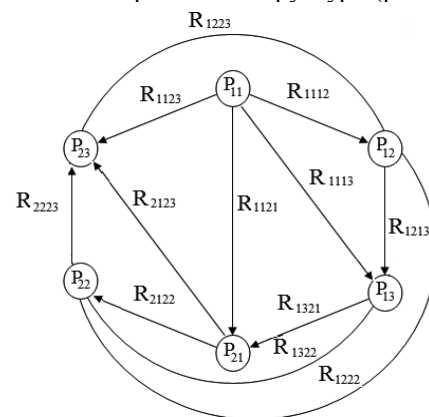






Рис. 1 – Граф зв'язків у верстатах роботах

Таблиця 1 - Приклади кодування структур МКПС

<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">A</td><td colspan="3">Р_{Х1Х2}</td></tr> <tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td>v</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>v</td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td>v</td></tr> </table>	A		Р _{Х1Х2}			11	12	13	Р _{Х1Х2}	11	v		12		v	13			v	<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">B</td><td colspan="3">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х3Х4}</td><td>21</td><td>v</td><td></td></tr> <tr><td>22</td><td></td><td>v</td></tr> <tr><td>23</td><td></td><td></td><td>v</td></tr> </table>	B		Р _{Х3Х4}			21	22	23	Р _{Х3Х4}	21	v		22		v	23			v																			
A			Р _{Х1Х2}																																																							
		11	12	13																																																						
Р _{Х1Х2}	11	v																																																								
	12		v																																																							
	13			v																																																						
B		Р _{Х3Х4}																																																								
		21	22	23																																																						
Р _{Х3Х4}	21	v																																																								
	22		v																																																							
	23			v																																																						
<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">C</td><td colspan="3">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td>c</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>c</td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td>c</td></tr> </table>	C		Р _{Х3Х4}			21	22	23	Р _{Х1Х2}	11	c		12		c	13			c																																							
C			Р _{Х3Х4}																																																							
		21	22	23																																																						
Р _{Х1Х2}	11	c																																																								
	12		c																																																							
	13			c																																																						
Трипод [11] - А ₃ (v)В ₃ (v)С ₃ (c)																																																										
<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">A</td><td colspan="3">Р_{Х1Х2}</td></tr> <tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td></td><td>c</td><td>e</td></tr> <tr><td>12</td><td>c</td><td></td><td>e</td></tr> <tr><td>13</td><td>e</td><td>e</td><td></td></tr> </table>	A		Р _{Х1Х2}			11	12	13	Р _{Х1Х2}	11		c	e	12	c		e	13	e	e		<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">B</td><td colspan="3">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х3Х4}</td><td>21</td><td></td><td>v</td><td>v</td></tr> <tr><td>22</td><td>v</td><td></td><td>v</td></tr> <tr><td>23</td><td>v</td><td>v</td><td></td></tr> </table>	B		Р _{Х3Х4}			21	22	23	Р _{Х3Х4}	21		v	v	22	v		v	23	v	v																
A			Р _{Х1Х2}																																																							
		11	12	13																																																						
Р _{Х1Х2}	11		c	e																																																						
	12	c		e																																																						
	13	e	e																																																							
B		Р _{Х3Х4}																																																								
		21	22	23																																																						
Р _{Х3Х4}	21		v	v																																																						
	22	v		v																																																						
	23	v	v																																																							
<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">C</td><td colspan="3">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>c</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td>c</td></tr> </table>	C		Р _{Х3Х4}			21	22	23	Р _{Х1Х2}	11	c			12		c		13			c																																					
C			Р _{Х3Х4}																																																							
		21	22	23																																																						
Р _{Х1Х2}	11	c																																																								
	12		c																																																							
	13			c																																																						
Промислові роботи Tricert [12] - А ₃ (c)В ₃ (v)С ₃ (c)																																																										
<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">A</td><td colspan="3">Р_{Х1Х2}</td></tr> <tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td></td><td>e</td><td>e</td></tr> <tr><td>12</td><td>e</td><td></td><td>e</td></tr> <tr><td>13</td><td>e</td><td>e</td><td></td></tr> </table>	A		Р _{Х1Х2}			11	12	13	Р _{Х1Х2}	11		e	e	12	e		e	13	e	e		<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">B</td><td colspan="3">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х3Х4}</td><td>21</td><td></td><td>e</td><td>e</td></tr> <tr><td>22</td><td>e</td><td></td><td>e</td></tr> <tr><td>23</td><td>e</td><td>e</td><td></td></tr> </table>	B		Р _{Х3Х4}			21	22	23	Р _{Х3Х4}	21		e	e	22	e		e	23	e	e																
A			Р _{Х1Х2}																																																							
		11	12	13																																																						
Р _{Х1Х2}	11		e	e																																																						
	12	e		e																																																						
	13	e	e																																																							
B		Р _{Х3Х4}																																																								
		21	22	23																																																						
Р _{Х3Х4}	21		e	e																																																						
	22	e		e																																																						
	23	e	e																																																							
<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">C</td><td colspan="3">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td></tr> <tr><td rowspan="3">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td>v</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>v</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td>v</td></tr> </table>	C		Р _{Х3Х4}			21	22	23	Р _{Х1Х2}	11	v			12		v		13			v																																					
C			Р _{Х3Х4}																																																							
		21	22	23																																																						
Р _{Х1Х2}	11	v																																																								
	12		v																																																							
	13			v																																																						
Трипод [13] - А ₃ (c)В ₃ (c)С ₃ (v)																																																										
<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">A</td><td colspan="4">Р_{Х1Х2}</td></tr> <tr><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td></tr> <tr><td rowspan="4">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td>v</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>v</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td>v</td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td>v</td></tr> </table>	A		Р _{Х1Х2}				11	12	13	14	Р _{Х1Х2}	11	v			12		v		13			v	14				v	<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">B</td><td colspan="4">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td></tr> <tr><td rowspan="4">Р_{Х3Х4}</td><td>21</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>22</td><td></td><td>c</td><td></td></tr> <tr><td>23</td><td></td><td></td><td>c</td></tr> <tr><td>24</td><td></td><td></td><td></td><td>c</td></tr> </table>	B		Р _{Х3Х4}				21	22	23	24	Р _{Х3Х4}	21	c			22		c		23			c	24				c	
A			Р _{Х1Х2}																																																							
		11	12	13	14																																																					
Р _{Х1Х2}	11	v																																																								
	12		v																																																							
	13			v																																																						
	14				v																																																					
B		Р _{Х3Х4}																																																								
		21	22	23	24																																																					
Р _{Х3Х4}	21	c																																																								
	22		c																																																							
	23			c																																																						
	24				c																																																					
<table border="1"> <tr><td colspan="2" rowspan="2">C</td><td colspan="4">Р_{Х3Х4}</td></tr> <tr><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td></tr> <tr><td rowspan="4">Р_{Х1Х2}</td><td>11</td><td>c</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td>c</td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td>c</td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td>c</td></tr> </table>	C		Р _{Х3Х4}				21	22	23	24	Р _{Х1Х2}	11	c			12		c		13			c	14				c																														
C			Р _{Х3Х4}																																																							
		21	22	23	24																																																					
Р _{Х1Х2}	11	c																																																								
	12		c																																																							
	13			c																																																						
	14				c																																																					
[13] - А ₄ (v)В ₄ (c)С ₄ (c)																																																										

Рівняння, що встановлюють зв'язок між структурними елементами (1):

$$\begin{aligned}
 R_{1223} + R_{1123} + R_{2123} + R_{2223} &= 0 \\
 R_{2122} + R_{1322} + R_{1222} - R_{2223} &= 0 \\
 R_{1123} + R_{1121} + R_{1113} + R_{1112} &= 0 \\
 R_{1121} + R_{1321} - R_{2123} - R_{2122} &= 0 \\
 R_{1112} - R_{1223} - R_{1213} - R_{1222} &= 0 \\
 R_{1113} + R_{1213} - R_{1321} - R_{1322} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Цей маршрут є своєрідним кодом, що дозволяє визначити актуальні компоновку, структуру і параметри верстатів – роботів та умови їх застосування.

Для механізму з паралельною кінематикою, розробленого на базі конструкції дельта – механізму, що має 6 стрижнів та 2 платформи (інструментальну та встановлювальну) є характерною особливістю наявність керованої жорсткості. На рис. 2 представлено компоновальне рішення графом зв'язків для такої структури механізму.

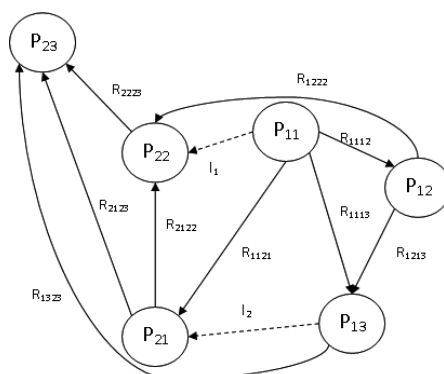


Рис. 2 – Граф зв'язків для дельта – машини, що має 6 ланок та 2 платформи

$$\begin{aligned}
 R_{1112} + R_{1113} + R_{1121} + I_1 &= 0 \\
 R_{1112} - R_{1113} - R_{1222} &= 0 \\
 R_{1113} + R_{1121} + R_{2132} - I_2 &= 0 \\
 R_{1121} + R_{2122} + R_{2123} + I_2 &= 0 \\
 R_{2122} + R_{1222} + R_{2223} + I_1 &= 0 \\
 R_{1323} + R_{2123} + R_{2223} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Такий підхід значно спрощує рішення задачі по вибору поєднання структури, компоновання і параметрів металооброблюючого обладнання для багатонаменклатурного виробництва з урахуванням багато зв'язаних процесів.

Представлений розгорнутий структурний аналіз компоновань мобільних верстатів-роботів дозволив зробити висновок про те, що перспективними компонованнями, з урахуванням вимог реконфігурації механоскладального виробництва і номенклатури оброблюваних деталей, є компоновання типів: «октопод», «дельта», «подвійна дельта».

Метод зв'язкових графів володіє інваріантністю до фізичної природи об'єктів дослідження, що розширює можливості інженерного аналізу і моделювання динаміки механізмів з кінематикою паралельної структури.

Висновки.

При проведенні дослідження було розроблено фасетну систему класифікації конструкцій верстатів – роботів. Вона побудована таким чином, щоб була можливість наповнення класифікатора новими фасетами, категоріями фасетів та підкатегоріями. Запропонована фасетна класифікація дає можливість отримувати код, що зменшує час, необхідний для її виявлення. Вона може змінюватися й розширяться відповідно до виконання поставлених завдань.

Застосування системи кодування, що запропонована в роботі, дозволяє встановити зв'язок між структурою і очікуваною ефективністю проєктованого верстата - робота на основі МКПС і забезпечити їх систематизацію.

Використання кодових позначень дозволяє зменшити витрати на створення документів, перенесення даних на машинні носії, пересилання даних каналами зв'язку, введення в ЕОМ тощо.

Список літератури

1. Климчук С.А. Стратегія розвитку підприємства: проблематика використання фасетної класифікації / С.А. Климчук // Економічний вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". - 2013. - № 10. - С. 206-211
2. Савчук Л.М. Фасетна система класифікації лізингових угод / Л.М. Савчук, І. В. Вишнякова // Академічний огляд. Економіка та підприємництво. – 2002. – № 2. – С. 46–51.
3. Столяр С.Е. Класифікації / Столяр С.Е.// Компьютерные инструменты в образовании. - 2016. - № 2. - С. 34-41
4. Потієнко М. В. Розв'язання задачі ієрархічно – фасетної класифікації за допомогою системи нейронних мереж / Потієнко М. В. // Вісник Запорізького національного університету. – 2011. – № 1. – С. 83–86
5. Мехатроніка в технологічних системах: Уч. Посібник/ Ковалевський С.В.- ДДМА Краматорськ 2017- 103с.
6. Круш П.В. Формування механізму управління транзакційними витратами підприємства / Круш П.В., Макалюк І.В. // Економічний вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". - 2013. - № 10. - С. 212-218
7. Сербін О. Систематизації цифрових ресурсів в контексті формування електронного каталогу / О.О. Сербін // Адаптація завдань і функцій наукової бібліотеки до вимог розвитку цифрових інформаційних ресурсів: матеріали Міжнар. Наук. конф. – 2013. – № 1. С. 8-10
8. Ясєнев В. Н. Автоматизированные информационные системы в экономике: учеб.-метод. по об. / В. Н. Ясєнев. – Н. Новгород, 2007. – С. 80.
9. Селиванов С.Г., Гузаиров М.Б. Системотехника инновационной подготовки производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2012. – 568 с.
10. Маркова Н. А. Эффективная фасетная навигация в электронных коллекциях / Маркова Н. А., Обухова О. Л., Соловьев И. В., Чочиа А. П. // Системы и средства информации. – 2007, №17, с. 214–222
11. Кушнаренко Н. Наукова обробка документів: Підручник / Кушнаренко Н. М., Удалова В.К.— 4-те вид., перероб. і доп. — К.: Знання, 2006. — 334 с.
12. Зупарова Л.Б. Аналитико-синтетическая переработка информации / Зупарова Л. Б., Зайцева Т. А. // М.: ФАИР, 2007. — 400 с.
13. Даник Ю. Г. Фасетна система класифікації інформаційних загроз визначеній цільовій аудиторії в кібернетичному просторі / Даник Ю. Г., Писарчук О. О. // Озброєння та військова техніка. Інформаційні системи. — Житомир, 2016. № 3. – с. 46– 51.

References (transliterated)

1. Klymchuk, S.A. (2013) 'Stratehiia rozvytku pidpriemstva: problematyka vykorystannia fasetnoi klasyfikatsii', *Ekonomichnyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy Kyivskiy politekhnichnyi instytut*, 10, pp. 206-211.
2. Savchuk, L.M. (2002) 'Fasetna systema klasyfikatsii lizynhovyykh ugod', *Akademichnyi ohliad. Ekonomika ta pidpriemnytstvo*, 2, pp. 46–51.
3. Stoljar, S.E. (2016) 'Klasyfikatsii', *Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii*, pp. 34-41.
4. Potienko, M. V. (2011) 'Rozv'iazannia zadachi iierarkhichno – fasetnoi klasyfikatsii za dopomohoiu systemy neironnykh merezh', *Visnyk Zaporizkoho natsionalnoho universytetu*, 1, pp. 83–86.
5. Kovalevskiy, S.V. (2017) 'Mekhatronika v tekhnolohichnykh systemakh: Uch. Posibnyk', *DDMA*, p. 103.
6. Krush, P.V. (2013) 'Formuvannia mekhanizmu upravlinnia transaktsiynymy vytratamy pidpriemstva', *Ekonomichnyi visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy Kyivskiy politekhnichnyi instytut*, 10, pp. 212-218.
7. Serbin, O. (2013) 'Systematyzatsii tsyfrovyykh resursiv v konteksti formuvannia elektronnoho katalohu', *Adaptatsiia zavdan i funktsii naukovoї biblioteki do vymoh rozvytku tsyfrovyykh informatsiynnykh resursiv: materialy Mizhnar. Nauk. Konf.*, 1, pp. 8-10.
8. Jasenev, V. N. (2007) 'Avtomatizirovannye informacionnye systemy v jekonomike: ucheb.-metod', *Novgorod*, p.80.
9. Selivanov, S.G., Guzairov, M.B. (2012) 'Sistemotekhnika innovacionnoj podgotovki proizvodstva v mashinostroenii', *Mashinostroenie*, p. 568.
10. Markova, N. A., Obuhova, O. L., Solov'ev, I. V., Chochia, A. P. (2007) 'Jeffektivnaja fasetnaja navigacija v jelektronnykh kolekcijah', *Sistemy i sredstva informacii*, 17, pp. 214–222.
11. Kushnarenko, N. M., Udalova, V. K. (2006) 'Naukova obrobka dokumentiv: Pidruchnyk', *Znannia*, p.334.
12. Zuparova, L. B. Zajceva, T. A. (2007) 'Analitiko-sinteticheskaja pererabotka informacii', *FAIR*, p. 400.
13. Danyk, Yu. H., Pysarchuk, O. O. 'Fasetna systema klasyfikatsii informatsiynnykh zahroz vyznachenii tsilovii audytorii v kibernetichnomu prostori', *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika. Informatsiini systemy*, 3, pp. 46– 51.

Надійшла (received) 20.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковалевський Сергій Вадимович (Ковалевский Сергей Вадимович, Kovalevskyy Serhiy Vadimovich) – доктор технічних наук, професор, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua.

Ковалевська Олена Сергіївна (Ковалевская Елена Сергеевна, Kovalevska Olena Sergeevna) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, тел. (0626) 41-47-70, e-mail: olenakovalevskaya@gmail.com.

ЗМІСТ

Сліпченко К. В., Петруша І. А., Туркевич В. З. Фізико-механічні властивості cfp композитів зі зв'язками на основі карбідів TI, CR, V в умовах високошвидкісного точіння AISI 316L.....	3
Підгаєцький М.М., Щербина К.К. Дослідження повздовжньої сталості пружно-гвинтового хону.....	8
Єнікєєв О.Ф., Євсюкова Ф.М., Суботін О.В., Приходько О.Ю. Аналіз частотних характеристик систем автоматичного керування параметрами технологічних процесів.....	13
Гермашев А. И., Логоминов В. А., Козлова Е. Б., Кришталь В. А. Основы формирования обработанной поверхности при фрезеровании тонкостенных деталей.....	18
Гаращенко Я.Н. Сложности контуров областей послойного формообразования на основе анализа фрактальной размерности.....	24
Сизый Ю. А., Ушаков А. Н., Слипченко С. Е. Проектирование оптимальных параметров операции врезного шлифования, ограниченных предельно допустимой контактной температурой.....	31
Добротворский С. С., Кононенко С. Н., Басова Е. В. Технологическое обеспечение высокоскоростного фрезерования деталей с неравномерной малой жёсткостью.....	38
Данилейко О.В., Ладенко С.В., Жуков А.Н. Повышение надежности и эффективности торцового уплотнения для компрессора углекислого газа.....	43
Губський С. О., Цебрєнко М.В., Окунь А. О. Дослідження напруженого деформованого стану металоконструкції стєнду механізму підйому вантажу.....	50
Майборода В. С., Слободянюк І. В., Джулій Д. Ю., Тарган Д. В. Вплив магнітно-абразивного оброблення на якість шпонкових фрез із швидкорізальної сталі.....	55
Приходько О.Ю., Слипченко С.Е., Евсюкова Ф.М., Басова Е.В., Иванова М.С. вопросы управления агрегатированными технологическими системами на основе структурного синтеза конечных автоматов.....	60
Добротворский С.С., Сокол Е.И., Гнучих С.С., Добровольская Л.Г. Разработка и внедрение enterprise resource planning (ERP) систем на open source технологиях в машиностроительных предприятиях.....	67
Пермяков О.А., Клочко О.О., Веселовська Н.Р., Синица Ю.О. Технологічне забезпечення підвищення параметрів точності та якості зубчастих рейок важких верстатів з ЧПК.....	72
Костюк Г. И., Екасёва Ю. В. О влиянии доли нитрида тантала в твердых сплавах t12a и t23a на эффективность получения наноструктур при действии фемтосекундного лазера.....	78
Костюк Г. И. Перспективы создания высокоэнтропийных силицидных, нитридных, карбидных, боридных и оксидных нанопокрытий на твёрдом сплаве T12A.....	84
Костюк Г. И., Григор О. Д. Сравнение температурных режимов в зоне лазерной фемтосекундной обработки твердого сплава волкар при использовании теплофизических и термомеханических характеристик, стохастических значений, просчитанных квантово-механическим методом.....	90
Фесенко А. В., Басова Е. В., Иванова М. С., Евсюкова Ф. М., Забара А. С. Анализ конструкции и испытание рабочей зоны роторно-кавитационного активатора.....	95
Герасим В. В., Охрем В. Г. Нові аспекти фізики термоелектричного охолодження.....	101
Гасанов М.І., Клочко О.О., Заковортний О.Ю., Пермінов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчастих передач.....	107
Костюк Г. И., Тимофеев А. Г. Разработка высокоэнтропийных карбидных и силицидных нанопокрытий на стм кортинит.....	113
Ищенко Г. И., Стрельчук Р. М. О финишной обработке рабочей части лопаток паровых турбин.....	119
Новіков Ф.В., Клочко О.О., Охріменко О.А., Анциферова О.О., Басова Є.В. Математична модель теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування.....	127
Ковалевський С.В., Ковалевська О.С. Кодування інформації як основа створення інноваційних виробничих систем.....	133

CONTENTS

<i>Slipchenko K. V., Petrusha I. A., Turkevich V. Z.</i> Physico-mechanical properties of cbn composites with binders based on carbides of TI, CR, V in conditions of high-speed machining of AISI 316L.....	3
<i>Pidgaetskiy M.M., Shcherbina K.K.</i> Study of longitudinal stability of helical hone.....	8
<i>Yenikieiev A., Yeysiukova F., Subotin O., Prihodko O.</i> Analysis of frequency characteristics of systems of automatic control of parameters of technological processes.....	13
<i>Germashev A. I., Logominov V. A., Kozlova Y. B., Krishtal V.A.</i> Bases For Forming The Processed Surface When Milling Thin-Wall Parts.....	18
<i>Garashchenko Y.</i> Evaluation of complexity of field contours of layered building based on the analysis of fractal dimension.....	24
<i>Sizyi Yu., Ushakov A., Slipchenko S.</i> Design of optimal parameters for the grinding operation limited by the maximum permissible contact temperature.....	31
<i>Dobrotvorskiy S., Kononenko S., Basova Ye.</i> Technological support of high-speed milling of parts with uneven low stiffness.....	38
<i>Danileyko O.V., Ladekno S.V., Zhukov A.N.</i> Improving reliability and efficiency of the face seal for carbon dioxide gas compressor.....	43
<i>Gubskiy S. A., Tsebrenko M. V., Okun A.O.</i> Research of the stress-strain state of the metal structure of the load lifting mechanism test bench.....	50
<i>Maiboroda V. S., Slobodianiuk I. V., Dzhulii D. Yu., Tarhan D. V.</i> Influence of magneto-abrasive machining on the quality keyway mills made of high speed steel.....	55
<i>Prihodko O., Slipchenko S., Yeysiukova F., Basova Ye., Ivanova M.</i> Control questions of the aggregated technological systems on the basis of the structural synthesis of finite automata.....	60
<i>Dobrotvorskiy S., Sokol Ye, Gnyshykh S., Dobrovolska L.</i> Development and introduction of enterprise resource planning (ERP) systems on open source technologies in machine-building enterprises.....	67
<i>Permyakov O., Klochko O., Veselovskaya N., Synytsa Yu.</i> Technological maintenance of increase of parameters of accuracy and quality of toothed rails of heavy duty CNC machines.....	72
<i>Kostyuk G., Yekasye Yu.</i> On the influence of the fraction of tantalum nitride in hard alloys T12A and T23A on the efficiency of obtaining nanostructures under the action of a femtosecond laser.....	78
<i>Kostyuk G. I.</i> Prospects of creation of high-entropic silicides, nitride, carbide, boride and oxide nano-coatings on the solid T12A alloy.....	84
<i>Kostyuk G., Grigor O.</i> Comparison of temperature regimes in the zone of laser femtosecond processing of a volcar solid alloy when using thermophysical and thermomechanical characteristics, stochastic means of read quantum mechanical methods.....	90
<i>Fesenko A., Basova Ye., Ivanova M., Yeysykova F., Zabara A.</i> Analysis methods in the processing of survey data of population.....	95
<i>Gerasim V. V., Okrim V. G.</i> New aspects of thermoelectric cooling physics.....	101
<i>Hasanov M., Klochko O., Zakovorotnyi O., Perminov Ye.</i> Technological regulation of optimization of systems of restoration of functional properties of large-sized open gear transmissions.....	107
<i>Kostyuk G., Timofeev O.</i> Development of highly entropic carbide and silicide nanocoatings on stm cortinite.....	113
<i>Ishchenko G. I., Strelchuk R. M.</i> About finishing the working piece of steam turbines.....	119
<i>Novikov F., Klochko A., Ohrimenko O., Antsyferova O., Basova Ye.</i> Mathematical model of thermal stress of pulsed discontinuous grinding process.....	127
<i>Kovalevskyy S.V., Kovalevska O.S.</i> Coding of information as the basis of creation of innovative production systems.....	133

ДЛЯ НОТАТКІВ

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ В МАШИНОБУДУВАННІ**

Збірник наукових праць

№ 6 (1282) 2018

Наукові редактори: Пермяков О.А., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Клочко О. О., д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: Басова Є.В., канд. техн. наук, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск Обухова І. Б., канд. техн. наук

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра технології машинобудування та металорізальних верстатів.
Тел.: (057) 707-66-25; e-mail: e.v.basova.khpi@gmail.com.

Обл.-вид № 7–18.

Підп. до друку 05.06.2018 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 8,0. Облік. -вид. арк. 10.
Тираж 300 пр. Зам. № 301133. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої справи
ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
