

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Брижан Тетяна Михайлівна**

УДК 621.9.02:621.90.17

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ЛЕЗОВОЇ ТА АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ**  
**ОТВОРІВ У ДЕТАЛЯХ ГІДРАВЛІЧНОЇ АПАРАТУРИ**

05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет”  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Новіков Федір Васильович,**  
Харківський національний економічний університет  
імені Семена Кузнеця,  
завідувач кафедри “Техніка та технології”

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Марчук Віктор Іванович,**  
Луцький національний технічний університет,  
завідувач кафедри “Приладобудування”

доктор технічних наук, професор  
**Лавріненко Валерій Іванович,**  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
Національної академії наук України,  
завідувач відділу технології алмазно-абразивної  
та фізико-технічної обробки

Захист відбудеться “ 23 ” жовтня 2015 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400-А

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1

Автореферат розісланий “20” вересня 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Ю. М. Свінар'юв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підвищення точності, якості й продуктивності обробки деталей машин є головною запорукою створення конкурентоспроможної машинобудівної продукції. У значній мірі це відноситься до виготовлення високоточних отворів у деталях гідравлічної апаратури авіаційного та машинобудівного призначення, де забезпечення високих показників точності обробки отворів пов'язано з високою трудомісткістю фінішних операцій доведення вільним абразивом внаслідок підвищених фізико-механічних властивостей оброблюваних матеріалів (спеціальних сталей і сплавів). Тому основною умовою зниження трудомісткості обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури є зменшення питомої ваги операцій доведення вільним абразивом у загальному технологічному циклі виготовлення отворів, забезпечуючи їхню задану точність фактично на операціях лезової обробки (розгортання, розточування, фрезерування) й внутрішнього шліфування, які передують операціям доведення й характеризуються більш високою продуктивністю. Однак для цього необхідно підвищити точність обробки отворів на цих операціях за рахунок зниження силової напруженості процесу різання, що вимагає пошуку нових технологічних рішень, у тому числі шляхом розробки математичних моделей формування похибок обробки й визначення раціональних умов їхнього усунення. Це пов'язане з тим, що при дослідженні, як правило, обмежуються проведенням дослідів і в меншій мірі вирішують питання аналітичного опису закономірностей виникнення й умов усунення похибок обробки отворів, а це не дозволяє встановити узагальнені теоретичні рішення й на їхній основі виявити, обґрунтувати й реалізувати потенційні можливості високоточної обробки отворів. У зв'язку із цим актуальним є завдання забезпечення високоточної лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури на основі зниження силової напруженості процесу різання й науково обґрунтованого вибору раціональних параметрів операцій. Рішення даної задачі є актуальним як для науки, так і для розвитку вітчизняного машинобудування.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Робота виконана відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 516 від 18.04.2006 р. “Державна програма розвитку машинобудування на період 2006–2011 р.р.”, Постанови Кабінету Міністрів України № 1130 від 12.09.2011 р. “Державна програма розвитку внутрішнього виробництва” і Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості до 2010 року (затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України від 12.12.2001 р.), а також відповідно до тематичного плану робіт ДВНЗ “ПДТУ”: “Розробка прогресивної технології й оснащення для виготовлення робочих поверхонь гідро- та пневмоциліндрів” 2014 р. (№ держреєстрації 0115U000180). Здобувач приймав безпосередню участь у виконанні робіт як відповідальний виконавець.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є забезпечення точності лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури на основі зниження силової напруженості процесу різання й науково обґрунтованого вибору раціональних параметрів операцій.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

- теоретичне обґрунтування технологічних закономірностей формування похибок обробки отворів на фінішних операціях із застосуванням лезових та абразивних інструментів і визначення умов підвищення точності обробки;
- розробка математичної моделі утворення пружних переміщень у технологічній системі при обробці отворів із припуском, що знімається нерівномірно, осьовими багатолезовими інструментами й визначення впливу положення зубів інструмента в процесі обробки та їхньої кількості на параметри точності оброблюваного отвору й причини виникнення коливань;
- розробка математичної моделі визначення складових сили різання при обробці отворів із припуском, що знімається нерівномірно, розгортками з нахильними зубами й обґрунтування ефективності їхнього застосування;
- теоретичне визначення умов зменшення шорсткості поверхні при внутрішньому шліфуванні;
- проведення експериментальних досліджень основних технологічних параметрів фінішної лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури й оцінювання вірогідності отриманих теоретичних рішень;
- розробка й впровадження у виробництво ефективних технологій фінішної механічної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси фінішної механічної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури.

*Предмет дослідження* – теоретичне та експериментальне визначення умов забезпечення точності лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури на основі зниження силової напруженості процесу різання й науково обґрунтованого вибору раціональних параметрів операцій.

*Методи дослідження.* Методологічною основою роботи є системний підхід до дослідження й опису технологічних закономірностей формування параметрів точності обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури. Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії різання матеріалів, теоретичної механіки, теорії коливань, опору матеріалів, математичного аналізу й математичного моделювання. Експериментальні дослідження виконані із застосуванням контрольної-вимірної машини “Wenzel”, профілографа-профілометра типу “Калібр ВЕИ-201”, твердоміра ПМТ-3, універсального мікроскопа УИМ-23 і мікроскопа БМИ, кругломіра ВЕ-20А.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Отримала подальший розвиток математична модель визначення похибок обробки отворів, викликаних виникненням у технологічній системі пружних переміщень, що дозволило з єдиних позицій обґрунтувати умови забезпечення точності лезової й абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури та визначити значні технологічні можливості розгортання отворів розгортками із нахиленими та різнонахиленими зубами.

2. Вперше теоретично визначено умови зменшення основного часу обробки отвору при розточуванні з урахуванням обмеження за точністю розміру оброблюваного отвору, які полягають у встановленні оптимальної кількості проходів ін-

струмента й розподілу припусків за проходами у відповідності до закону геометричної прогресії, що убуває, та реалізації режиму високошвидкісного різання.

3. Вперше теоретично доведена незалежність пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі при розгортанні отвору в умовах знімання нерівномірного припуску, від положення зубів розгортки, чим визначено можливість стабільного протікання процесу обробки в часі та ефективність його здійснення за рахунок застосування розгорток із нахиленими та різнонахиленими зубами, які дозволяють суттєво знизити інтенсивність виникаючих коливань й тим самим забезпечити необхідну точність обробки.

4. Розроблено математичну модель визначення з позиції косокутного різання сили різання в умовах знімання нерівномірних припусків при обробці отворів розгортками із нахильними зубами та показано, що зі збільшенням кута нахилу зуба розгортки тангенціальна та радіальна складові сили різання й відповідно похибки обробки отвору зменшуються, а врахування в розрахунках сили тертя, яка діє уздовж різального зуба розгортки, приводить у відповідність розрахункові й експериментальні значення складових сили різання.

5. Теоретично обґрунтовані умови суттєвого зменшення шорсткості оброблюваної поверхні при внутрішньому шліфуванні за рахунок зменшення різновисотного розташування різальних зерен на робочій поверхні круга та показані можливості зменшення в зв'язку з цим трудомісткості наступних фінішних операцій обробки вільним абразивом, що дозволило забезпечити високоякісну та продуктивну обробку отворів у деталях гідравлічної апаратури.

**Практична цінність отриманих результатів** полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблені ефективні технології фінішної механічної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури, виготовлених з матеріалів з підвищеними фізико-механічними властивостями, що дозволило підвищити точність обробки. Запропоновано методику розрахунку оптимальних умов фінішної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури. Розроблені технології фінішної механічної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури впроваджені в основне виробництво ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД”; технології й оснащення для виготовлення робочих поверхонь гідрота пневмоциліндрів – у ВАТ ММК “Азовсталь”, ВАТ “Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча”, ТОВ “Енергореле” (м. Маріуполь) та ЗАТ “Азовський машинобудівний завод” (м. Бердянськ); технології обробки отворів у деталях редукторів – у ПАТ “Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” із загальним економічним ефектом 256194,8 гривень на рік.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет” під час проведенні лекційних і практичних занять за дисциплінами “Сучасні технології обробки” та “Основи наукових досліджень” для студентів спеціальності “Технологія машинобудування”, а також під час проведення лабораторних робіт з дисципліни “Сучасні технології обробки” для студентів спеціальностей “Технологія машинобудування” та “Металорізальні верстати й інструменти”.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно й опубліковані в 22 наукових працях. Поста-

новка наукових завдань, обговорення результатів досліджень проводилися разом з науковим керівником. У роботах, опублікованих в співавторстві, здобувачу належать: аналітичне визначення параметрів зрізів при розгортанні отворів та умов безударної обробки [2]; розроблена математична модель визначення складових сили різання та умови їх зменшення при розгортанні отворів [3]; аналітичний огляд методів лезової та абразивної обробки з погляду зменшення параметрів силової напруженості процесу різання [4]; аналітичний опис параметрів силової напруженості процесу механічної обробки та обґрунтування умов зменшення складових сили різання [5]; аналітичний опис енергоємності механічної обробки та аналіз умов її зменшення [6]; результати експериментальних досліджень параметрів точності та шорсткості обробки при розгортанні отворів [8]; результати теоретичних та експериментальних досліджень технологічних параметрів обробки отворів вібростійким інструментом [9]; запропоновані конструкції розверток [13, 14, 15] та пневматичної трамбівки [16].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на XIX і XX Міжнародних науково-технічних конференціях “Фізичні і комп’ютерні технології”, м. Харків, 2014 р.; XXII Міжнародному науково-технічному семінарі “Високі технології: тенденції розвитку”, м. Харків – Одеса, 2014 р.; науково-технічній конференції “Нові і нетрадиційні технології в ресурсо- і енергозбереженні”, м. Одеса – Київ, 2014 р.; VI науково-технічній конференції “Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні й металургії”, м. Харків, 2014 р.; 4 Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні інновації в науці та техніці”, м. Курськ, 2014 р.; 2 Міжнародній науково-практичній конференції “Якість у виробничій та соціально-економічній системах”, м. Курськ, 2014 р.; 4 Міжнародній науково-практичній конференції “Інновації, якість та сервіс в техніці та технологіях”, м. Курськ, 2014 р. Роботу в повному обсязі заслухано та схвалено на розширених наукових семінарах кафедри “Технологія машинобудування” ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет” (2015 р.), кафедри “Технологія машинобудування” Одеського національного політехнічного університету (2015 р.) та кафедри “Техніка та технології” Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця (2015 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 22 наукових працях, у тому числі 6 наукових праць у виданнях, рекомендованих МОН України, 6 – в закордонних виданнях, включених в перелік міжнародних наукометричних баз, та в 4 патентах України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів з висновками, загальних висновків, списку використаних літературних джерел та 14 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 232 сторінки, з них 87 ілюстрацій на 35 сторінках, 16 таблиць за текстом; 2 таблиці на 1 сторінці, 160 найменувань використаних літературних джерел на 17 сторінках; 14 додатків на 31 сторінці.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, у котрій обґрунтовано актуальність, новизну та практичне значення отриманих результатів, сформульо-

вано мету і задачі досліджень. Наведено особистий внесок здобувача у виконану роботу й результати апробації дисертації.

**У першому розділі** показані основні недоліки діючих технологічних процесів механічної обробки високоточних отворів у деталях гідравлічної апаратури, пов'язані з нестабільністю параметрів точності й високою трудомісткістю фінішних операцій обробки вільним абразивом внаслідок підвищених фізико-механічних властивостей оброблюваних матеріалів. Відзначається, що підвищити ефективність обробки отворів можна вдосконаленням попередніх операцій лезової обробки (розточування, фрезерування, розгортання) та внутрішнього шліфування з метою підвищення параметрів точності та зниження долі трудомістких фінішних операцій обробки вільним абразивом у загальному технологічному циклі виготовлення отворів. Тому в останні роки завдяки використанню сучасних верстатів зі ЧПУ типу "обробний центр" з'явилася можливість підвищення точності, якості й продуктивності обробки отворів за рахунок застосування прогресивних методів високошвидкісного розточування й фрезерування отворів твердосплавними інструментами зі зносостійкими покриттями. Однак, у більшості випадків попередня обробка отворів у деталях гідравлічної апаратури як і раніше виконується традиційними механічними методами розсвердлювання, розточування, розгортання та шліфування. Отже, вдосконалювання цих механічних методів обробки має велике практичне значення. У зв'язку із цим у роботі проведений аналіз літературних джерел з погляду оцінки технологічних можливостей зазначених механічних методів обробки отворів і показано, що їхнім основним недоліком є висока силова напруженість процесу різання, яка приводить до виникнення в технологічній системі пружних переміщень та інтенсивних коливань, а відповідно до зниження показників точності й шорсткості оброблюваних поверхонь та продуктивності обробки. Тому підвищити ефективність фінішної обробки отворів можна в першу чергу за рахунок зменшення силової напруженості процесу різання шляхом застосування прогресивних різальних лезових та абразивних інструментів, наприклад, розгорток з різнонахиленими зубами, які дозволяють істотно зменшити інтенсивність коливань при обробці. Однак, для ефективного застосування цих інструментів необхідно знати їхні технологічні можливості, що вимагає розробки математичних моделей утворення похибок обробки отворів і на цій основі науково обґрунтованого вибору раціональних параметрів фінішної лезової та абразивної обробки. Виходячи із цього, основними науковими передумовами роботи стали важливі теоретичні рішення по забезпеченню точності лезової та абразивної обробки отворів, отримані Маталіним О.А., Остаф'євим В.О., Лінчевським П.А., Якимовим О.В., Румбештою В.О., Євтушенко В.О. та іншими вченими. Виходячи із цього, сформульована мета й завдання досліджень.

**У другому розділі** аналітично обґрунтовані технологічні можливості підвищення точності обробки отворів лезовими та абразивними інструментами з позиції зменшення пружних переміщень, що виникають у технологічній системі. Теоретично доведено, що найменшу величину пружного переміщення при обробці отворів із припуском, що знімається рівномірно, можна отримати на операціях розгортання. Це пов'язане з рівністю радіальних складових сили різання, що діють на протилежних зубах розгортки. При обробці отворів із припуском, що зні-

мається нерівномірно, із застосуванням процесів розточування, фрезерування й внутрішнього шліфування основною умовою зменшення величини пружного переміщення  $y = P_y / c$  є зменшення радіальної складової сили різання  $P_y = \sigma \cdot F / K_{piz}$ , де  $c$  – жорсткість технологічної системи, Н/м;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{piz} = P_z / P_y$ ;  $P_z$  – тангенціальна складова сили різання, Н;  $F$  – площа поперечного перерізу зрізу, м<sup>2</sup>.

Так, при розточуванні отвору  $F = S \cdot t$ , а продуктивність обробки  $Q = F \cdot V$ , де  $S$  – подача, м/об;  $t$  – глибина різання, м;  $V$  – швидкість різання, м/с. Отже, зменшити параметри  $F$ ,  $P_y$  і одночасно збільшити  $Q$  можна збільшенням  $V$ , тобто застосуванням високошвидкісної обробки.

При внутрішньому шліфуванні площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами  $F = \frac{Q}{V_{кр}} = S \cdot t \cdot \frac{V_{дет}}{V_{кр}}$ , де  $Q = S \cdot V_{дет} \cdot t$ ;  $V_{кр}$ ,  $V_{дет}$  – швидкості круга й деталі, м/с. Отже, зменшити параметри  $F$ ,  $P_y$  і одночасно збільшити  $Q$  можна збільшенням  $V_{кр}$ . Така ж закономірність має місце й при фрезеруванні отвору кінцевою фрезою, тому що  $F = \frac{Q}{V_{фр}} = S \cdot t \cdot \frac{V_{дет}}{V_{фр}}$ , де  $V_{фр}$  – швидкість обертання фрези, м/с. У цьому випадку ефективно збільшувати  $V_{фр}$ , тобто застосовувати високошвидкісне фрезерування.

Основною умовою зменшення похибок обробки отвору розгортками при зніманні нерівномірних припусків є зрівноважування радіальних складових сил різання, які діють на протилежних зубах розгортки. Однак, відсутність у науково-технічній літературі аналітичних залежностей для визначення параметрів  $P_y$  і у стосовно операцій розгортання отворів утрудняє обґрунтування умов підвищення точності обробки та порівняння різних механічних методів обробки за критерієм точності. Тому в роботі отримала подальший розвиток математична модель визначення закономірностей формування похибок механічної обробки отворів із припуском, що знімається нерівномірно, викликаних виникненням у технологічній системі пружних переміщень. На першому етапі отримана уточнена аналітична залежність для визначення величини пружного переміщення при обробці свердлом із двома лезами з урахуванням неспіввісності інструменту й оброблюваного отвору, тобто з урахуванням нерівномірності припуску, що знімається (рис. 1):

$$y = \frac{(P_{y1} - P_{y2})}{c} = \frac{(t_1 - t_2)}{\left(2 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta \cdot \cos \alpha}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta \cdot \cos \alpha}{\varepsilon}, \quad (1)$$

де  $P_{y1} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_1 - y) \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{piz}}$ ,  $P_{y2} = \frac{\sigma \cdot S \cdot (t_2 + y) \cdot \cos \varphi}{2 \cdot K_{piz}}$  – радіальні складові сили різання, що діють на обидва леза свердла, Н;  $\varphi$  – половина головного кута свердла в плані;  $t_1$ ,  $t_2$  – поточні номінальні глибини різання, м;  $(t_1 - t_2) = 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha$ ;  $\Delta$  –



зсув осі свердла відносно осі оброблюваного отвору, м;  $\alpha$  – кут, що визначає положення лез свердла;  $\varepsilon = 1 + \frac{c \cdot K_{pi3}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}$  – уточнення на розмір на проході свердла.

Розрахунками встановлено, що положення осі свердла за його один оберт залежно від положення лез описується рівнянням окружності діаметром  $A$  (рис. 1):

$$z^2 + \left(x - \frac{A}{2}\right)^2 = \frac{A^2}{4}, \quad (2)$$

$$\text{де } A = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pi3}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}.$$

Як видно, при розсвердлюванні отвору внаслідок участі в різанні двох протилежно розташованих лез свердла відбувається збільшення діаметра отвору на величину пружного переміщення. Це приводить до розбивки отвору й знижує точність обробки. Тому, чим менше параметр  $A$ , тим точніше буде оброблюваний отвір.

Важливою умовою зменшення похибок обробки отвору слід розглядати розсвердлювання за  $n$  проходів інструмента:

$$y_n = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pi3}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n} = \frac{\Delta}{\varepsilon^n}. \quad (3)$$

Як впливає із залежності (3), зі збільшенням  $n$  величина  $y_n$  зменшується за законом геометричної прогресії, що убуває. Однак при цьому похибка розміру отвору  $\Delta y_n$  буде залишатися незмінною, рівною похибці розміру отвору, утвореного після першого проході свердла (рис. 2). Тому для зменшення величини  $\Delta y_n$  необхідно кожний наступний прохід здійснювати свердлом більшого діаметра. Оскільки діаметр свердла не входить у залежність (3) для визначення величини

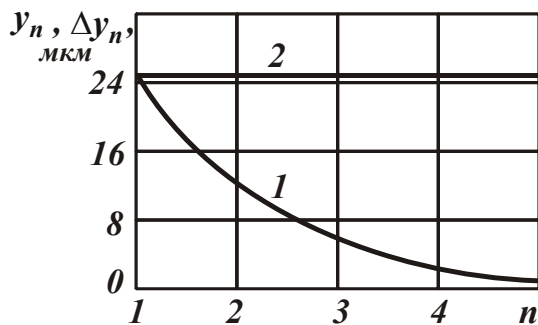


Рис. 2. Залежності  $y_n$  (1) і  $\Delta y_n$  (2) від  $n$  для  $\Delta = 50$  мкм і  $\varepsilon = 2$

пружного переміщення, це дозволить виконати умову  $y_n = \Delta y_n \rightarrow 0$  й виключити розбивку отвору, викликану зніманням нерівномірного припуску. Використовуючи отримане теоретичне рішення (рис. 1), визначена величина пружного переміщення при розточуванні отвору:

$$y = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pi3}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{pi3}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}, \quad (4)$$

де  $R$  – радіус свердла, м;  $r$  – початковий радіус оброблюваного отвору, м.

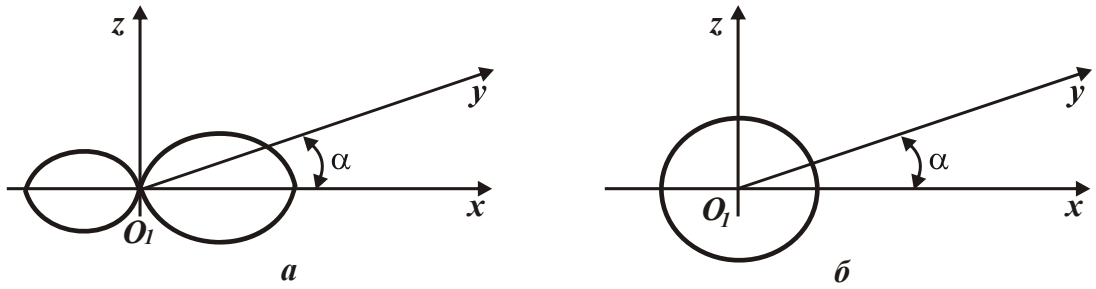


Рис. 3. Траєкторія руху осі розточувальної системи за її один оберт для  $\Delta > 0$  (а) і  $\Delta = 0$  (б)

При розточуванні отвору, у зв'язку з тим, що в різанні приймає участь лише одне лезо, виникнення в технологічній системі пружного переміщення не приводить до перевищення діаметра оброблюваного отвору номінального значення (рис. 3). Це визначає принципову відмінність умов формування похибок обробки при розсвердлюванні й при розточуванні отворів і вказує на ефективність застосування методу розточування.

Установлено, що найменше значення величини пружного переміщення досягається при обробці отвору за схемою виходжування за  $n$  проходів різця:

$$y_n = \frac{(R - r + \Delta)}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n}. \quad (5)$$

Для встановлення оптимальної кількості проходів різця  $n$  вирішене завдання визначення найменшого основного часу обробки отвору при розточуванні:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot \cos \varphi \cdot \sigma \cdot \left(\sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1\right) \cdot n}{c \cdot K_{piz} \cdot V}, \quad (6)$$

де  $l$ ,  $D$  – довжина й діаметр оброблюваного отвору, м;  $S$  – подача, м/об;  $V$  – швидкість різання, м/с;  $\varepsilon_{сум} = t / y_n$  – сумарне уточнення на розмір.

Установлено, що найменший основний час обробки досягається при  $n \rightarrow \infty$ :

$$\tau_{min} = \frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot \cos \varphi \cdot \sigma \cdot \ln \varepsilon_{сум}}{c \cdot K_{piz} \cdot V}. \quad (7)$$

Подача  $S$  визначається залежністю:

$$S = \frac{c \cdot K_{piz}}{\left(\sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1\right) \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}. \quad (8)$$

Розрахунки, виконані на основі залежностей (6) і (7) за умови  $\frac{\pi \cdot D \cdot l \cdot \cos \varphi \cdot \sigma}{c \cdot K_{piz} \cdot V} = 1$ с ( $D = 10$  мм;  $l = 50$  мм;  $c = 3 \cdot 10^3$  Н/мм;  $\sigma = 3 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>;  $K_{piz} = 1$ ;  $\cos \varphi = 1$ ;  $V = 1570$  мм/с), показали (рис. 4), що основний час обробки  $\tau$  зі збільшенням кількості проходів інструмента  $n$  спочатку (у межах 1–3 проходів) інтенсивно зменшується, потім асимптотично наближається до значення  $\tau_{min}$ . Тому

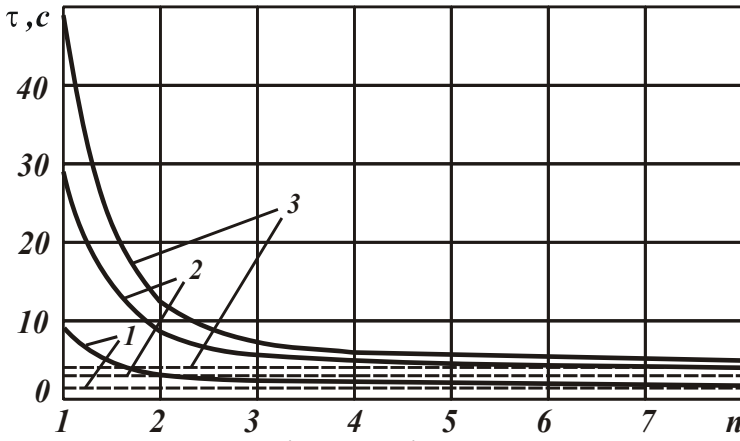


Рис. 4. Залежність  $\tau$  від  $n$ : 1 -  $\varepsilon_{\text{сум}}=10$ ;

2 -  $\varepsilon_{\text{сум}}=30$ ; 3 -  $\varepsilon_{\text{сум}}=50$

знімання нерівномірного припуску при розточуванні отвору доцільно здійснювати за 2 - 3 проходи інструмента в умовах високошвидкісного різання, зменшуючи з кожним наступним проходом глибину різання за законом геометричної прогресії, що убуває. Це погоджується з відомими рекомендаціями з ефективного застосування методу розточування отворів.

У роботі визначено вплив положення зубів осьового ін-

струмента на похибки обробки отвору при зніманні нерівномірного припуску у зв'язку з неврівноваженістю радіальних й тангенціальних складових сили різання. Так, при обробці отвору зенкером або розгорткою з 4 лезами суми проєкцій радіальних  $P_y$  й тангенціальних  $P_z$  складових сили різання від роботи всіх зубів інструмента по осі  $ox$  і  $oz$  (рис. 5) визначаються залежностями:

$$(P_y)_x = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot \cos \alpha + (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \cos(90^\circ - \alpha) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2 \cdot K_{\text{піз}}}; \quad (9)$$

$$(P_y)_z = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot \sin \alpha - (P_{y2} - P_{y4}) \cdot \sin(90^\circ - \alpha) = 0; \quad (10)$$

$$(P_z)_x = (P_{z1} - P_{z3}) \cdot \sin \alpha + (P_{z2} - P_{z4}) \cdot \sin(90^\circ - \alpha) = 0; \quad (11)$$

$$(P_z)_z = (P_{z1} - P_{z3}) \cdot \cos \alpha - (P_{z2} - P_{z4}) \cdot \cos(90^\circ - \alpha) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{2}, \quad (12)$$

$$\text{де } (P_{y1} - P_{y3}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{\text{піз}}} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha; \quad (P_{y2} - P_{y4}) = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4 \cdot K_{\text{піз}}} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos(90^\circ - \alpha);$$

$$(P_{z1} - P_{z3}) = (P_{y1} - P_{y3}) \cdot K_{\text{піз}} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos \alpha;$$

$$(P_{z2} - P_{z4}) = (P_{y2} - P_{y4}) \cdot K_{\text{піз}} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{4} \cdot 2 \cdot \Delta \cdot \cos(90^\circ - \alpha).$$

Відповідно, величини пружного переміщення по осях  $ox$  і  $oz$  визначаються:

$$y = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{2 \cdot c \cdot K_{\text{піз}}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta}{(2 \cdot \varepsilon - 1)}; \quad (13)$$

$$z = \frac{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{2 \cdot c} \cdot (\Delta - y). \quad (14)$$

Із залежностей (13) і (14) виходить, що похибки обробки отвору при зніманні нерівномірного припуску обумовлені неврівноваженістю радіальних і тангенціальних складових сили різання. Це принципово нове рішення, оскільки прийнято

вважати, що похибки обробки отвори обумовлені невірноваженістю лише радіальної складової сили різання.

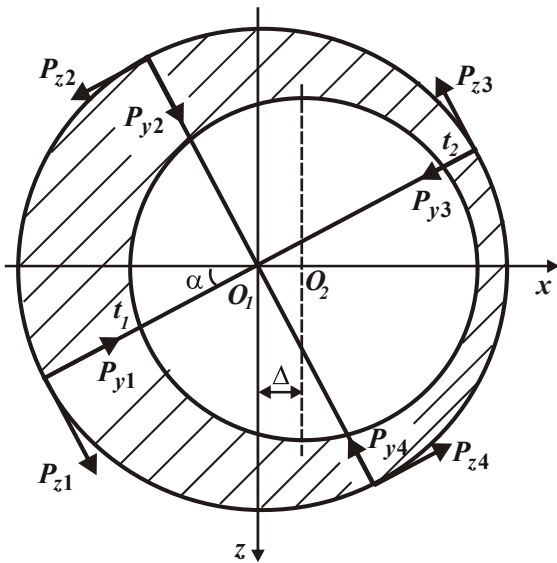


Рис. 5. Розрахункова схема похибки обробки отвору осьовим інструментом із 4 лезами

Порівнюючи аналогічні залежності (13) і (1), видно, що при розгортанні отвору, на відміну від розсвердлювання отвору, положення вигнутої осі розгортки в сталому процесі обробки залишається незмінним незалежно від положення зубів розгортки, що визначається кутом  $\alpha$ . Із цього зроблений висновок, що при неспіввісному розташуванні розгортки й оброблюваного отвору можливе виникнення змушених коливань у технологічній системі у зв'язку з утворенням хвиль на оброблюваній поверхні протягом початкового несталого процесу обробки, коли величина пружного переміщення  $y$  змінюється від нуля до значення, що визначається залежністю (13). Тому, усуваючи хвилі, що утворюються, наприклад, за рахунок

застосування розгортки з різнонахиленими зубами можна суттєво зменшити інтенсивність коливань та підвищити точність обробки, що погодиться з відомими експериментальними даними.

Порівнюючи залежність (13) із залежністю (1), видно, що при обробці отвору розгорткою величина  $y$  є меншою, тому що знаменник залежності (13) є більшим. Цим теоретично засвідчена ефективність застосування операцій розгортання (або зенкерування) отвору після його розсвердлювання для зменшення похибок обробки отвору. Із залежностей (4) і (13) також виходить, що при розгортанні отворів величина  $y$  є меншою, аніж при розточуванні.

Розрахунками встановлено, що при обробці отворів розгортками з 6; 8; 16 і більшою кількістю зубів залежності (13) і (14) залишаються без зміни. Отже, збільшення кількості зубів розгортки не приводить до зменшення пружних переміщень  $y$  і  $z$ . Це свідчить про ефективність застосування розгортки із невеликою кількістю зубів. Зменшити пружні переміщення  $y$  і  $z$ , особливо при обробці глибоких отворів, можна зменшенням радіальних й тангенціальних складових сили різання, наприклад, за рахунок застосування розгортки із нахиленими зубами та ін.

У третьому розділі розроблено математичну модель визначення тангенціальної  $P_z$ , радіальної  $P_y$  й осьової  $P_x$  складових сили різання при обробці отворів розгортками з нахиленими зубами з позиції косокутного різання з урахуванням сили тертя  $P_{mp}$ , що діє вздовж ріжучого зуба (рис. 6):

$$P_z = \sigma \cdot S \cdot t \cdot \left[ \cos \omega + \left( f \cdot \cos \varphi - \frac{\sin \varphi}{K_{pi3}} \right) \cdot \sin \omega \right]; \quad P_y = \sigma \cdot S \cdot \frac{\Delta}{2} \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{K_{pi3}} + f \cdot \sin \varphi \right);$$

$$P_x = \sigma \cdot S \cdot t \cdot \left[ \sin \omega + \left( \frac{\sin \varphi}{K_{\text{піз}}} - f \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos \omega \right], \quad (15)$$

де  $t$  – глибина різання, м;  $\omega$  – кут нахилу зубів розгортки;  $f$  – коефіцієнт тертя інструментального й оброблюваного матеріалів.

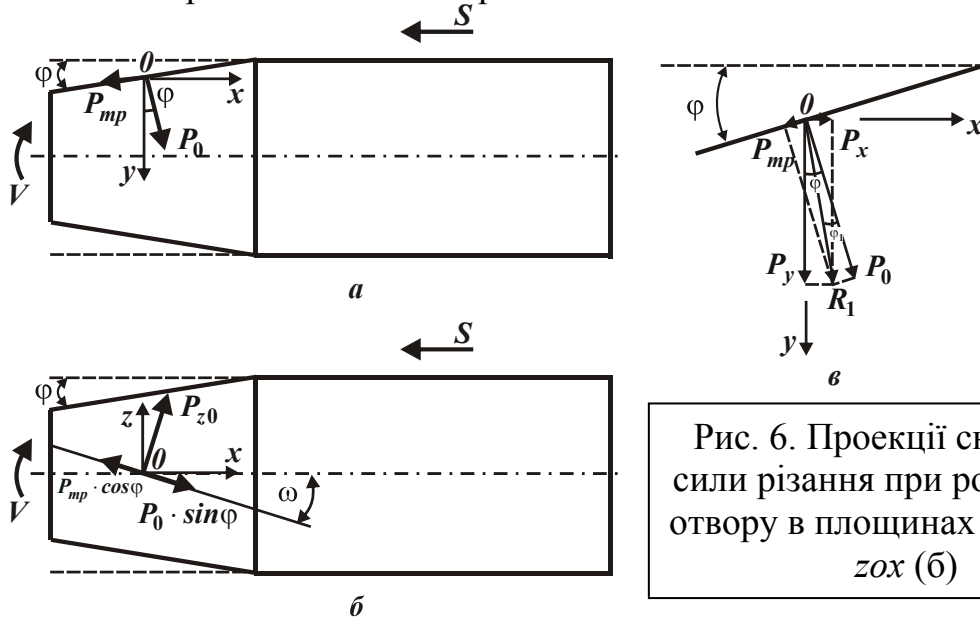


Рис. 6. Проекції складових сили різання при розгортанні отвору в площинах  $uox$  (а, в) і  $zox$  (б)

На рис. 6 показані: тангенціальна складова сили різання  $P_{z0} = \sigma \cdot S_z \cdot t$  (при куті  $\omega = 0$ ); сила тертя  $P_{mp} = P_{z0} \cdot f$ , що діє уздовж зуба розгортки; сила  $P_0 = P_{z0} / K_{\text{піз}}$ , перпендикулярна зубу розгортки; результуюча  $R_1 = \sqrt{P_0^2 + P_{mp}^2}$ ;  $\text{tg} \varphi_1 = \frac{P_{mp}}{P_0} = f \cdot K_{\text{піз}}$ . Параметри  $\sigma$  й  $K_{\text{рез}}$  визначаються:  $\sigma = \sigma_{cm} \cdot \frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1}$ ;  $\frac{(K_L - \sin \gamma_1)}{\cos \gamma_1} = \frac{1}{K_{\text{піз}}} \cdot (1 + \sqrt{1 + K_{\text{піз}}^2})$ , де  $\sigma_{cm}$  – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м<sup>2</sup>;  $K_L \geq 1$  – коефіцієнт усадки стружки (установлюється експериментально). Фактичний передній кут зуба розгортки  $\gamma_1$  визначається із залежності:  $\cos \gamma_1 = \cos \gamma \cdot \cos \omega_1$  (де  $\gamma$  – вихідний передній кут зуба розгортки), а кут  $\omega_1$  – із залежності  $\text{tg} \omega_1 = \text{tg}(\omega - \psi_1) \approx (0,2 \dots 0,4) \cdot \text{tg} \omega$ .

Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кута нахилу зубів розгортки  $\omega$  тангенціальна  $P_z$  складова сили різання при обробці отвору зменшується, а осьова  $P_x$  складова, навпаки, збільшується (рис. 7,а). Радіальна  $P_y$  складова сили різання в явному вигляді не залежить від кута  $\omega$ , а визначається величиною  $P_z$ . Тому її зменшення зі збільшенням кута  $\omega$  сприяє зменшенню невірноваженої радіальної сили, величини пружного переміщення й підвищенню точності обробки отвору із припуском, що знімається нерівномірно.

Установлено, що при куті  $\omega > 30^\circ$  розбіжність розрахункових і експериментальних значень складових сили різання є незначною (у межах 10%), рис. 7,б. При менших кутах нахилу зубів ця розбіжність більша й обумовлена збільшенням тем-

ператури різання. Отже, з метою підвищення точності розрахунків необхідно враховувати зменшення межі міцності на стиск оброблюваного матеріалу й коефіцієнта тертя інструментального й оброблюваного матеріалів у зв'язку зі збільшенням температури різання. Установлено також, що розбіжність розрахункових і експериментальних значень відношення  $P_z / P_x$  (рис. 7,в) у широкому діапазоні зміни кута нахилу зубів розгортки (від 0 до  $45^\circ$ ) не перевищує 15 %. Це свідчить про вірогідність розробленої математичної моделі визначення складових сили різання при розгортанні отворів і вказує на те, що в умовах косокутного різання урахування сили тертя, що діє вздовж ріжучого зуба, приводить у відповідність розрахункові й експериментальні значення складових сили різання.

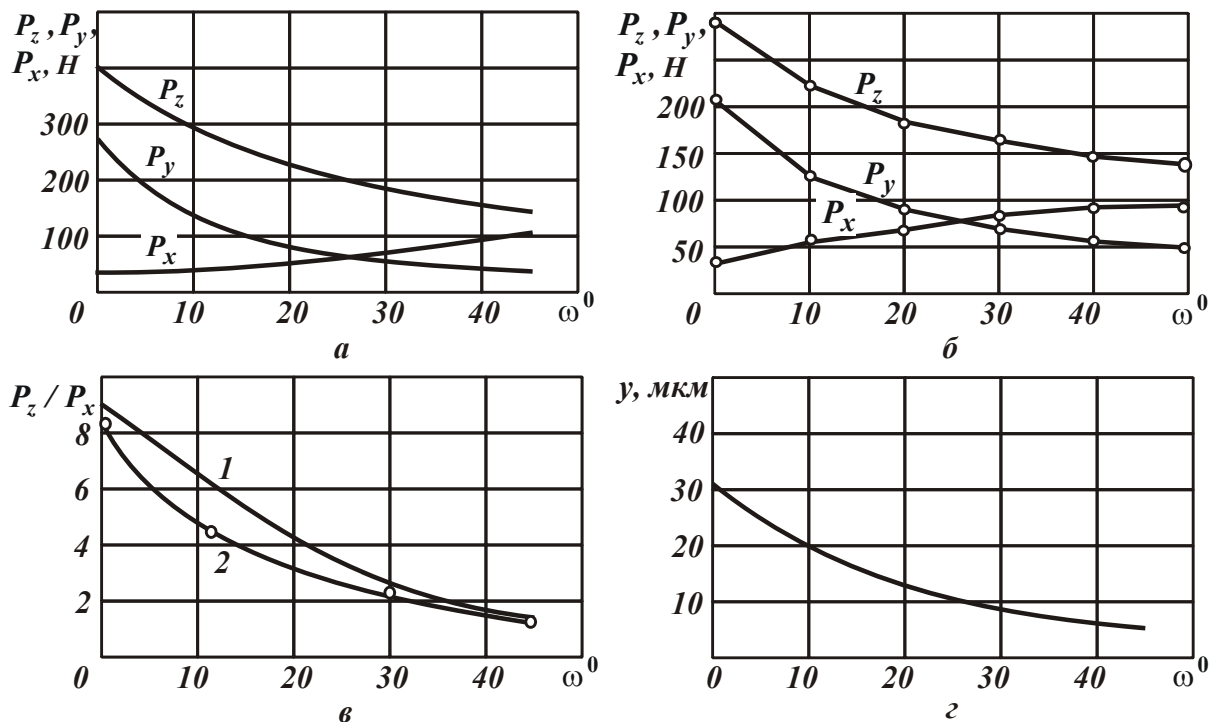


Рис. 7. Розрахункові (а) та експериментальні (б) залежності складових сили різання  $P_z, P_y, P_x$ , відношення  $P_z / P_x$  (в) та величини пружного переміщення  $y$  (г) від кута нахилу зубів розгортки  $\omega$ : 1 – розрахунок; 2 – експеримент; вихідні дані розрахунків і умови проведення експерименту: оброблюваний матеріал - сталь 40Х;  $\sigma_{cm} = 800$  Н/мм<sup>2</sup>;  $f = 0,35$ ;  $\gamma = 5^\circ$ ;  $\varphi = 13^\circ$ ;  $S = 0,6$  мм;  $t = 0,2$  мм;  $V = 0,12$  м/с;  $\Delta = 0,13$  мм;  $z = 6$

Розрахунок величини пружного переміщення  $y$  (з урахуванням жорсткості технологічної системи  $c = 6500$  Н/мм) вказує на її зменшення зі збільшенням кута нахилу зубів розгортки  $\omega$  (рис. 7,г). Цим теоретично обґрунтована фізична сутність ефекту підвищення точності обробки отвору від застосування розгортки із нахиленими зубами.

У четвертому розділі теоретично й експериментально обґрунтовані основні напрямки підвищення точності обробки отворів при розгортанні зі зніманням нерівномірних припусків. У зв'язку із цим розроблені нові конструкції розгортки зі швидкорізальної сталі Р6М5 (які характеризуються підвищеною жорсткістю й віб-ростійкістю) з конхoidalною, різнонахильною та сферичною формами робочої ча-

стини. Експериментально встановлено, що при обробці отворів у деталях зі сталі ОХ18Н10Т розгортками ( $D=20$  мм;  $z=6$ ;  $\varphi=15^\circ$ ;  $\gamma=5^\circ$ ;  $\alpha=7^\circ$ ;  $V=0,15$  м/с;  $S=0,4$  мм/об;  $t=0,15$  мм) на токарному верстаті стабільно забезпечується відхилення від круглості отвору в межах 3 мкм (рис. 8, 9 та 10). Це цілком відповідає вимогам до точності обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури. Установлено, що найменші значення відхилення від круглості отвору досягаються при застосуванні тягнучої схеми розгортання, напрям руху розвертки (рис. 9) у якій протилежний від напрямку руху при традиційній схемі розгортання. Доведено, що тягнучу схему розгортання найбільш ефективно використовувати при обробці глибоких отворів.

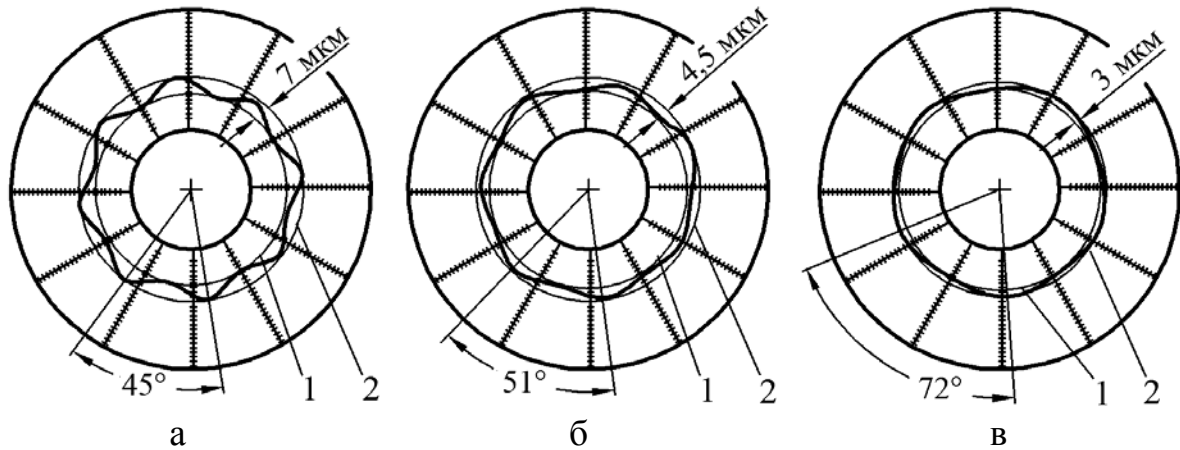


Рис. 8. Круглограми відхилення від круглості отворів після розгортання розгортками з прямолинійними (а) й різнонахиленими (б) зубами та після застосування тягнучої схеми розгортання розгорткою з різнонахиленими зубами (в): 1 - вписана окружність; 2 - описана окружність

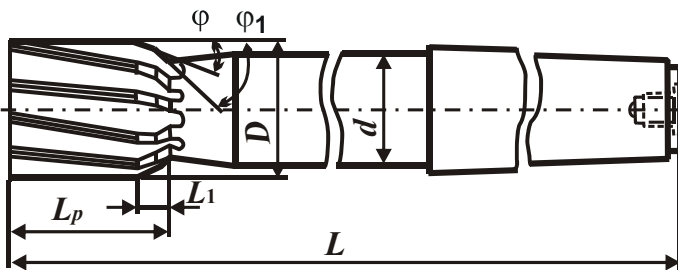


Рис. 9. Розгортка для тягнучої схеми розгортання

Виконано вибір ефективних технологічних середовищ для обробки отворів розгортками з різнонахильними зубами. Експериментально встановлено, що застосування технологічних середовищ на основі технічного олона й моноетаноламіда забезпечує стабільні результати за точністю й шорсткістю оброблюваної поверхні  $Ra=0,3-0,8$  мкм і підвищує стійкість розгортки на 25–30%. Отримані результати дозволяють розширити технологічні можливості забезпечення точності обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури. Так, установлено, що діюча технологія обробки отвору в клапані, виготовленого із двох матеріалів (сталі 12Х18Н10Т і електротехнічної сталі, зварених між собою), що включає операції свердління, фрезерування, розточування й ручного доведення алмазною пастою АСМ 7/5 НОМГ до розміру  $\varnothing 10,01^{+0,02}$  мм, не забезпечує вимог по якості обробки. При остаточному ручному доведенні отвору має місце неточність обробки в декількох місцях по всій довжині оброблюваного отвору та не забезпечується необхідна шорсткість поверхні ( $Ra=0,63$  мкм), що призводить до значних втрат від браку оброблених деталей (до 40 %). Тому з метою вдосконалення технології запропоновано після розточування отвору замість ручного доведення за-

ваної поверхні  $Ra=0,3-0,8$  мкм і підвищує стійкість розгортки на 25–30%. Отримані результати дозволяють розширити технологічні можливості забезпечення точності обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури. Так, установлено, що діюча технологія обробки отвору в клапані, виготовленого із двох матеріалів (сталі 12Х18Н10Т і електротехнічної сталі, зварених між собою), що включає операції свердління, фрезерування, розточування й ручного доведення алмазною пастою АСМ 7/5 НОМГ до розміру  $\varnothing 10,01^{+0,02}$  мм, не забезпечує вимог по якості обробки. При остаточному ручному доведенні отвору має місце неточність обробки в декількох місцях по всій довжині оброблюваного отвору та не забезпечується необхідна шорсткість поверхні ( $Ra=0,63$  мкм), що призводить до значних втрат від браку оброблених деталей (до 40 %). Тому з метою вдосконалення технології запропоновано після розточування отвору замість ручного доведення за-

стосовувати операцію розгортання твердосплавною розгорткою  $\varnothing 10,03$  мм із шістьма різнонахиленими зубами з режимом різання:  $V=9,4$  м/хв;  $S=0,1$  мм/об. Це дозволило забезпечити вимоги по точності й шорсткості обробки та усунути втра-ти від браку оброблених деталей.

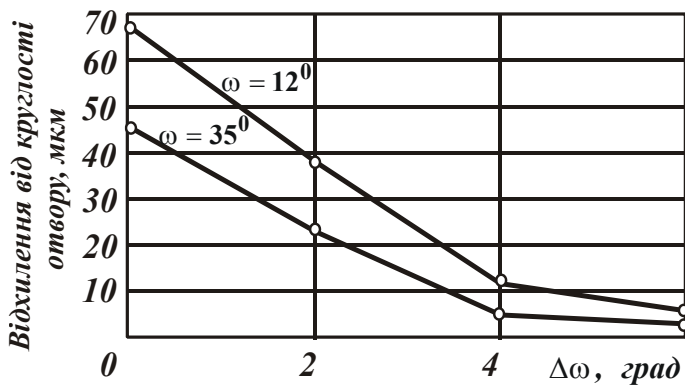


Рис. 10. Залежність відхилення розміру від різнонахиленості зубів розвертки  $\Delta\omega$

логічній системі й розбивку отвору. Обробка виконувалася на токарному верстаті з частотою обертання деталі  $n=300$  об/хв і подачею  $S=0,05$  мм/об.

У роботі теоретично обґрунтовані технологічні можливості суттєвого зменшення шорсткості оброблюваної поверхні  $R_{max2}$  при внутрішньому шліфуванні за рахунок зменшення різновисотності розташування різальних зерен на робочій поверхні круга  $b_2$  у відповідності з отриманою аналітичною залежністю:

$$R_{max2} = \left( \frac{3 \cdot b_2^2 \cdot H_{max1}^2}{b_1} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left( \frac{1}{4 \cdot t} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (16)$$

де  $H_{max1}$  – максимальна товщина зрізу окремим зерном при шліфуванні кругом з одновисотним виступанням зерен на величину  $b_1$ , м;  $t$  – глибина шліфування, м.

Для порівняння виконані розрахунки параметра шорсткості оброблюваної поверхні  $R_{max1}$  при внутрішньому шліфуванні кругом з одновисотним виступанням зерен на величину  $b_1$  за залежністю, запропонованою Новіковим Ф.В.:

$$R_{max1} = \left( \frac{H_{max1}^6}{4 \cdot t} \right)^{\frac{1}{5}}. \quad (17)$$

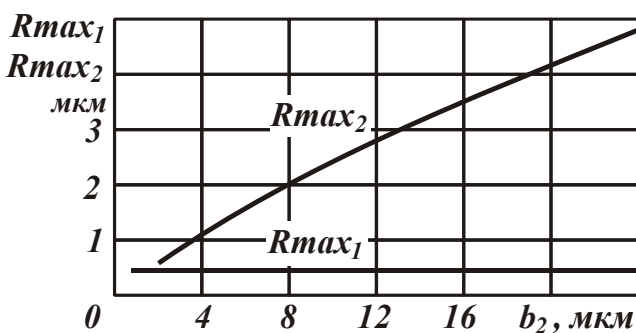


Рис. 11. Розрахункові значення параметрів  $R_{max1}$  і  $R_{max2}$

Застосування розгортки діаметром  $\varnothing 8,9^{+0,02}$  мм зі швидкорізальної сталі P18 із різнонахиленими зубами замість розгортки із прямими зубами також дозволило забезпечити необхідну точність обробки отвору в штоці, виготовленому зі сталі 30X2HВФА твердістю HRC<sub>e</sub> 32,0...38,5, на рівні 8 мкм та шорсткість поверхні  $Ra=1,25$  мкм. Ефект обробки досягнуто за рахунок усунення коливань у техно-

логічній системі й розбивку отвору. Обробка виконувалася на токарному верстаті з частотою обертання деталі  $n=300$  об/хв і подачею  $S=0,05$  мм/об.

У роботі теоретично обґрунтовані технологічні можливості суттєвого зменшення шорсткості оброблюваної поверхні  $R_{max2}$  при внутрішньому шліфуванні за рахунок зменшення різновисотності розташування різальних зерен на робочій поверхні круга  $b_2$  у відповідності з отриманою аналітичною залежністю:

$$R_{max2} = \left( \frac{3 \cdot b_2^2 \cdot H_{max1}^2}{b_1} \right)^{\frac{2}{5}} \cdot \left( \frac{1}{4 \cdot t} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (16)$$

де  $H_{max1}$  – максимальна товщина зрізу окремим зерном при шліфуванні кругом з одновисотним виступанням зерен на величину  $b_1$ , м;  $t$  – глибина шліфування, м.

Для порівняння виконані розрахунки параметра шорсткості оброблюваної поверхні  $R_{max1}$  при внутрішньому шліфуванні кругом з одновисотним виступанням зерен на величину  $b_1$  за залежністю, запропонованою Новіковим Ф.В.:

$$R_{max1} = \left( \frac{H_{max1}^6}{4 \cdot t} \right)^{\frac{1}{5}}. \quad (17)$$

Виходячи з рис. 11, за рахунок забезпечення “утопання” зерен у зв'язку круга та їхнього розмірного зношування параметр шорсткості поверхні  $R_{max2}$  для вихідних даних:  $H_{max1}=1$  мкм;  $b_1=3$  мкм;  $t=30$  мкм, може зменшитися з 4,8 до 0,5 мкм, тобто наблизитися до значення  $R_{max1}$ . Це погоджується з експериментальними даними, отриманими при внутрішньому врізному шліфу-



ванні (із частотами обертання деталі й круга 600 і 7000 об/хв, швидкістю радіальної подачі 0,11 мм/хв) та доведенні алмазною пастою АСМ 14/10 НОМГ отворів у деталі “шестерня”, виготовленої зі сталі 16Х3 НВФМБ-Ш твердістю HRC 59-61 (рис. 12).

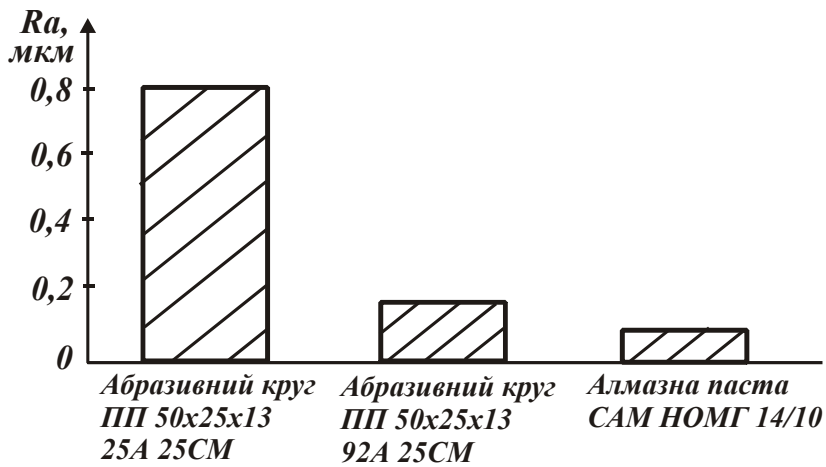


Рис. 12. Значення параметра шорсткості поверхні  $Ra$  при внутрішньому шліфуванні й доведенні отвору алмазною пастою

На основі даної закономірності розроблена ефективна схема фінішної обробки отвору пневмоциліндра, яка забезпечує взаємне перетинання оброблювальних рисок після розточування й шліфування фетровим кругом з наклеєним абразивним порошком, і досягнення шорсткості поверхні  $Ra=0,04$  мкм. Практична реалізація теоретичних рішень указує на їхню вірогідність, а також на мож-

ливість суттєвого зменшення шорсткості поверхні (до рівня обробки вільним абразивом) при шліфуванні отворів у деталях гідравлічної апаратури при одночасному зниженні трудомісткості наступних фінішних операцій обробки вільним абразивом.

Розроблені технології фінішної механічної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури впроваджені в основне виробництво ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД”; технології й оснащення для виготовлення робочих поверхонь гідро- та пневмоциліндрів – у ВАТ ММК “Азовсталь”, ВАТ “Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча”, ТОВ “Енергореле” (м. Маріуполь) та ЗАТ “Азовський машинобудівний завод” (м. Бердянськ); технології обробки отворів у деталях редукторів – у ПАТ “Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” із загальним економічним ефектом 256194,8 гривень на рік. Результати досліджень роботи використовуються також у навчальному процесі ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет” при проведенні лекційних, практичних і лабораторних занять.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішене актуальне науково-практичне завдання забезпечення точності лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури на основі зниження силової напруженості процесу різання й обґрунтованого вибору раціональних параметрів операцій.

1. У роботі теоретично на основі аналізу сил різання й пружних переміщень, що виникають у технологічній системі, з єдиних позицій обґрунтовані технологічні закономірності формування похибок лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури при зніманні нерівномірних припусків і визначені знач-

ні можливості забезпечення точності обробки отворів за рахунок застосування розгортки із нахиленими й різнонахиленими зубами.

2. Теоретично доведена можливість зменшення основного часу обробки при розточуванні отвору з урахуванням обмеження по точності оброблюваної поверхні за рахунок застосування багатопрхідного високошвидкісного різання, зменшуючи з кожним наступним проходом інструмента глибину різання за законом геометричної прогресії, що убуває.

3. Розрахунками встановлено, що при розгортанні отвору, в умовах неспіввісного розташування розгортки й оброблюваного отвору, похибки обробки обумовлені неврівноваженістю як радіальної, так і тангенціальної складових сили різання. При цьому положення вигнутої осі інструмента в сталому процесі обробки залишається незмінним незалежно від положення й кількості лез інструмента. Із цього зроблений висновок про можливість виникнення вимушених коливань у технологічній системі через утворення хвиль на оброблюваній поверхні протягом початкового несталого процесу обробки, коли величина пружного переміщення змінюється від нуля до сталого значення. Тому, усуваючи хвилі, що утворюються, за рахунок застосування розгортки із різнонахиленими зубами, можна суттєво зменшити інтенсивність коливань і підвищити точність обробки отвору, що погоджується з відомими експериментальними даними.

4. Теоретично й експериментально встановлено, що зі збільшенням кута нахилу зубів розгортки при зніманні нерівномірного припуску відбувається зменшення тангенціальної й радіальної складових сили різання, а відповідно зменшення пружного переміщення й підвищення точності обробки отвору. Розрахунками встановлено, що в умовах косокутного різання урахування сили тертя, що діє вздовж ріжучого зуба розгортки, приводить до зменшення розбіжності теоретичних і експериментальних значень складових сили різання в межах 10–15 %.

5. Розроблено нові конструкції розгортки із конхoidalною, різнонахильною та сферичною формами робочої частини, які характеризуються підвищеною жорсткістю й вібростійкістю. Експериментально встановлено, що їхнє застосування стабільно забезпечує відхилення від круглості отвору в межах 3 мкм і шорсткість поверхні  $Ra=0,3-0,8$  мкм. Встановлено також, що найменші значення відхилення від круглості отвору досягаються при застосуванні тягнутої схеми розгортання.

6. Запропоновано нові ефективні технологічні середовища для операцій розгортання отворів на основі технічного олона й моноетаноламіда, які забезпечують підвищення на 10–20 % стабільності параметрів точності й шорсткості оброблюваної поверхні, а також збільшення на 25–30 % стійкості інструмента. Це дозволило розробити ефективні технології розгортання отворів у деталях гідравлічної апаратури.

7. Теоретично й експериментально доведена можливість зменшення шорсткості поверхні до рівня  $Ra=0,05$  мкм і нижче при внутрішньому шліфуванні за рахунок зменшення різновисотності розташування абразивних зерен на робочій поверхні круга й збільшення кількості одночасно працюючих зерен, що дозволяє зменшити трудомісткість наступних фінішних операцій обробки вільним абрази-

вом та забезпечити високоякісну й продуктивну обробку отворів у деталях гідравлічної апаратури.

8. Експериментально обґрунтована ефективність обробки отворів у пневмоциліндрах гнучкими абразивними інструментами, які дозволяють за рахунок “утопання” абразивних зерен у зв'язку інструмента суттєво зменшити шорсткість поверхні. Це послужило основою розробки прогресивної схеми фінішної обробки отвору пневмоциліндра, що забезпечує взаємне перетинання оброблювальних ризок після розточування й шліфування фетровим кругом з наклеєним абразивним порошком, і досягнення шорсткості поверхні  $Ra=0,04$  мкм.

9. Розроблені технології фінішної механічної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури впроваджені в основне виробництво ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД”; технології й оснащення для виготовлення робочих поверхонь гідро- та пневмоциліндрів – у ВАТ ММК “Азовсталь”, ВАТ “Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча”, ТОВ “Енергореле” (м. Маріуполь) та ЗАТ “Азовський машинобудівний завод” (м. Бердянськ); технології обробки отворів у деталях редукторів – у ПАТ “Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” із загальним економічним ефектом 256194,8 гривень на рік. Результати досліджень роботи використовуються в навчальному процесі ДВНЗ “Приазовський державний технічний університет” при проведенні лекційних, практичних і лабораторних занять.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні результати дисертації*

#### *Статті у наукометричних виданнях*

1. Брижан Т.М. Математична модель визначення складових сили різання при механічній обробці глибоких отворів / Т.М. Брижан // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 39 (1082). – С. 10–19.
2. Брижан Т.М. Технологическое обеспечение безвибрационной обработки отверстий / Т.М. Брижан, С.А. Дитиненко // Вісник НТУ “ХПІ”: зб. наук. пр. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2014. – № 43 (1086). – С. 13–19.
3. Брижан Т.М. Теоретический анализ условий повышения точности обработки при развертывании отверстий / Т.М. Брижан, С.А. Дитиненко // Вісник НТУ “ХПІ”: зб. наук. пр. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2014. – № 44 (1087). – С. 21–27.
4. Новиков Ф.В. Аналитическое определение и анализ параметров силовой напряженности процесса резания / Ф.В. Новиков, Т.М. Брижан, А.Г. Крюк, О.С. Кленов // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2014. – № 5 (1048). – С. 149-155.
5. Брижан Т.М. Теоретический анализ условий уменьшения силы резания при механической обработке / Т.М. Брижан, Н.В. Крюкова // Резание и инстру-

мент в технологических системах: Междунар. научн.-техн. сб. – Х: НТУ “ХПИ”, 2014. – Вып. 84. – С. 18-25.

6. Брижан Т.М. Условия уменьшения энергоемкости механической обработки / Т.М. Брижан, Н.В. Крюкова // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2014. – Вип. 9. – С. 9-16.

#### *Статті у фахових виданнях*

7. Брижан Т. М. Виброустойчивые конструкции разверток для обработки глубоких отверстий / Т. М. Брижан // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2003. – Вип. 7. – С. 250-254.

8. Брижан Т. М. Исследование точности и шероховатости при развертывании глубоких отверстий / Т. М. Брижан, А. С. Крепак // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. пр. – Маріуполь: ПДТУ, 2004. – Вип. 14. – С. 187-190.

9. Брижан Т. М. К вопросу тянущего развертывания глубоких отверстий виброустойчивым инструментом / Т. М. Брижан, А.Н. Михайлов, Д.С. Заикин // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Вып. 29. – С. 31–37.

10. Брижан Т. М. Математическая модель определения закономерностей формирования погрешностей механической обработки отверстий / Т. М. Брижан // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 28. – С. 167-173.

11. Брижан Т.М. Теоретический анализ условий повышения точности обработки отверстий осевыми многолезвийными инструментами / Т. М. Брижан // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. – Маріуполь: ПДТУ, 2014. – Вип. 29. – С. 160-168.

12. Брижан Т. М. Теоретические исследования динамического состояния технологической системы при обработке отверстий / Т. М. Брижан // Захист металургійних машин від поломок: зб. наук. пр. – Маріуполь, 2014. – Вип. 16. – С. 174-179.

#### *Опубліковані праці апробаційного характеру*

13. Брижан Т. М. Розвертка для обробки глибоких отворів / Т.М. Брижан, О.С. Крепак // Патент 71341 А Україна, 7 В23F21/16. – Заявл. 23.12.2003; Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 3 с.

14. Брижан Т. М. Розвертка для обробки глибоких отворів / Т.М. Брижан, О.С. Крепак // Патент 71342 А Україна, 7 В23F21/16. – Заявл. 23.12.2003; Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 3 с.

15. Брижан Т. М. Розвертка для обробки глибоких отворів / Т.М. Брижан, О.С. Крепак // Патент 71343 Україна, 7 В23F21/16. – Заявл. 23.12.2003; Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11. – 3 с.

16. Махінько В. Ф. Пневматична трамбівка / В.Ф. Махінько, Т.М. Брижан, В.І. Гаврилюк, М.І. Сердюк // Патент 6786 Україна, 7 В25D17/00. – Заявл. 22.11.2004; Опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5. – 4 с.

17. Брижан Т.М. Экспериментальные исследования технологических параметров развертывания глубоких отверстий / Т.М. Брижан // Физические и

компьютерные технологии: труды 19-й междунар. научн.-практ. конф. – Х.: ГП ХМЗ “ФЭД”, 2014. – С. 39-45.

18. Брижан Т.М. Выбор варианта финишной обработки отверстий пневмо- и гидроаппаратуры по критерию минимальной трудоемкости / Т.М. Брижан // Физические и компьютерные технологии: труды 20-й междунар. научн.-практ. конф. – Д.: ЛИРА, 2015. – С. 115-121.

19. Брижан Т.М. Повышение качества обработки глубоких отверстий при развертывании / Т.М. Брижан // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы научн.-техн. конф. – г. Одесса. – Киев: АТМ України, 2014. – С. 20-23.

20. Брижан Т.М. Повышение точности обработки глубоких отверстий / Т.М. Брижан // Современные инновации в науке и технике: сб. научн. тр. 4-ой междунар. научн.-практ. конф. В 4-х томах, Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 159-166.

21. Брижан Т.М. Технологическое обеспечение качества обработки глубоких отверстий / Т.М. Брижан // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. научн. тр. 2-ой междунар. научн.-практ. конф. В 2-х томах, Том 2. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 89-91.

22. Брижан Т.М. Условия повышения точности обработки отверстий / Т.М. Брижан // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. научн. тр. 4-ой междунар. научн.-практ. конф. В 3-х томах, Том 1. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. – С. 104-109.

**Брижан Т.М. Забезпечення точності лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури.** - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2015.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної проблеми забезпечення точності лезової та абразивної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури на основі зниження силової напруженості процесу різання й науково обґрунтованого вибору раціональних параметрів операцій. Для цього отримала подальший розвиток математична модель визначення похибок механічної обробки отворів, викликаних виникненням у технологічній системі пружних переміщень. Теоретично доведено незалежність пружного переміщення від положення й кількості лез розгортки при її неспіввісному розташуванні з оброблюваним отвором, що визначає можливість підвищення точності обробки отвору при використанні розгортки із різнонахиленими зубами. Показано, що за рахунок застосування цих розгортки похибки обробки отвору можуть бути меншими, ніж при розточуванні. Теоретично обґрунтовано можливість зменшення радіальної й тангенціальної складових сили різання при розгортанні отворів із припуском, що знімається нерівномірно, зі зменшенням кута нахилу зуба розгортки. Експериментально встановлено, що застосування зазначених вище розгортки стабільно забезпечує відхилення розміру отвору в межах 3 мкм і шорсткість поверхні  $Ra=0,3-0,8$  мкм. Теоретично обґрунтовано можливість суттєво зменшення шорсткості оброблюваної поверхні при

внутрішньому шліфуванні за рахунок зменшення різновисотності розташування ріжучих зерен на робочій поверхні круга. На основі проведених досліджень розроблено та впроваджено на ряді машинобудівних підприємств ефективні технології фінішної механічної обробки отворів у деталях гідравлічної апаратури, що дозволило забезпечити необхідну точність обробки.

**Ключові слова:** точність обробки, шорсткість поверхні, оброблюваний отвір, пружне переміщення, розгортання, розточування.

**Брижан Т.М. Обеспечение точности лезвийной и абразивной обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры.** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной проблемы обеспечения точности лезвийной и абразивной обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры на основе снижения силовой напряженности процесса резания и научно обоснованного выбора рациональных параметров операций. Для этого в работе получила дальнейшее развитие математическая модель определения погрешностей обработки отверстий, вызванных возникновением в технологической системе упругих перемещений, что позволило с единых позиций обосновать условия обеспечения точности лезвийной и абразивной обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры и определить значительные технологические возможности развертывания отверстий развертками с наклонными и разнонаклонными зубьями. Теоретически определены условия уменьшения основного времени обработки отверстия при растачивании с учетом ограничения по точности размера обрабатываемого отверстия, которые состоят в установлении оптимального количества проходов инструмента и распределении припусков по ходам в соответствии с законом убывающей геометрической прогрессии и реализации режима высокоскоростного резания. Теоретически доказана независимость упругого перемещения, возникающего в технологической системе при развертывании отверстия в условиях съема неравномерного припуска, от положения зубьев развертки, чем определена возможность стабильного протекания процесса обработки во времени и эффективность его осуществления за счет применения разверток с наклонными и разнонаклонными зубьями, которые позволяют снизить интенсивность возникающих вынужденных колебаний и тем самым обеспечить необходимую точность обработки. При этом установлено, что величина упругого перемещения обусловлена неуравновешенностью как радиальных, так и тангенциальных составляющих силы резания.

Разработана математическая модель определения с позиции косоугольного резания силы резания в условиях съема неравномерных припусков при обработке отверстий развертками с наклонными зубьями и показано, что с увеличением угла наклона зуба развертки тангенциальная и радиальная составляющие силы резания и погрешность обработки отверстия уменьшаются, а учет в расчетах силы трения, действующей вдоль режущего зуба развертки, приводит в соответствие расчетные и экспериментальные значения составляющих силы резания. На этой основе разработаны новые конструкции разверток с конхоидальной, разнонаклонной и сфериче-

ской формами рабочей части, характеризующиеся повышенной жесткостью и виброустойчивостью. Экспериментально установлено, что их применение стабильно обеспечивает отклонение размера отверстия в пределах 3 мкм и шероховатость поверхности  $Ra=0,3-0,8$  мкм. Предложены новые эффективные технологические среды на основе технического олона и моноэтаноламида, позволяющие на 10–20% повысить стабильность параметров точности и шероховатости обрабатываемой поверхности, а также на 25–30% увеличить стойкость развертки. Теоретически обоснованы условия существенного уменьшения шероховатости обработанной поверхности при внутреннем шлифовании за счет уменьшения разновысотного расположения режущих зерен на рабочей поверхности круга и показаны возможности уменьшения трудоемкости последующих финишных операций обработки свободным абразивом. На основе проведенных исследований разработаны и внедрены в производство эффективные технологии финишной механической обработки отверстий в деталях гидравлической аппаратуры.

**Ключевые слова:** точность обработки, шероховатость поверхности, обрабатываемое отверстие, упругое перемещение, развертывание, растачивание.

**Bryzhan T. M. Ensuring the accuracy of both edge cutting and abrasive machining holes in the hydraulic equipment parts.** - Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.08 - Engineering Technology. - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2015.

The dissertation is devoted to the solving urgent problems of providing precision both edge cutting and abrasive machining holes in parts of the hydraulic equipment based on reducing tension power cutting process and scientifically grounded choice of operations rational parameters. To solve the task it was further developed mathematical model to define machining holes errors which caused by the emergence of technological system of elastic displacements. It was theoretically proved that the elastic displacement is independent to the teeth reamer position and the number of reamer teeth in its misalignment location according to the hole to be machined. It defines the possibility of increasing the accuracy of holes using reamers with unequal directions of teeth. It is shown that by the use of these reamers the hole's accuracy may be more than that in boring. It theoretically justified reducing the radial and tangential force component in the reaming of an uneven stock to be removed with decreasing inclination angle of the reamer tooth. It is experimentally found that the use of the reamers mentioned above consistently provides the size of the hole deviations within 3  $\mu\text{m}$  and  $Ra$  surface roughness up to 0.3 – 0.8  $\mu\text{m}$ . It is theoretically grounded capabilities significantly reduce the roughness of the surface machined during internal grinding by reducing the difference of the heights of cutting grains on the wheel working surface.

On the basis of the research developed and implemented a number of engineering companies efficient technologies finish machining holes in the hydraulic equipment parts, allowing for the necessary machining accuracy.

**Keywords:** precision machining, surface roughness, a hole to be machined, elastic movement, reaming, boring.