

7. Михайлов, К. В. Экспериментальная баллистика. Приборы и методы баллистических измерений [Текст] / К. В. Михайлов – София: ВТС, 1976. – 388 с.
8. Patent 2691761 США, МКИ G 01 S 13/58. Microwave measuring of projectile speed [Text] / Smith J. N., Oak R., Tenn. – № 6088; claimed. 03.02.1948; published 12.10.1954, НКИ 342/105; 73/167. – 6 р.
9. Patent 4457206 США, МКИ G 01 S 13/58; F 42 C 17/04. Microwave – type projectile communication apparatus for guns [Text] / Touslios P. P., Hartman K. – № 06/269,489; claimed 02.06.1981; published 03.07.1984, НКИ 89/14.5. – 37 р.
10. Patent 0415906 Германия, МКИ G 01 S 13/58; G 01 P 3/66. Method and device for the determination of parameters of motion [Text] / Reinhard, B., Bernhard Z. – № 19900809; claimed 09.08.1990; published 10.02.1993, НКИ G 01 S 13/58 F; G 01 P 3/66 B. – 8 р.
11. Крюков, О. М. Проблеми вимірювального контролю параметрів внутрішньобалістичних процесів [Текст] / О. М. Крюков, О. А. Александров // Честь і закон. – 2009. – № 2. – С. 79–89
12. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М. Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.
13. Высокоточный широкодиапазонный измеритель длины волны [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://solarlaser.com/ru/products/high-resolution-wavelength-meters/high-resolution-wide-range-wavelength-meter-model-shr/>
14. Гониометр-спектрометр [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.rostest.ru/Goniometer%20spectrometer%20GS-2.php>

*Проаналізовано причини відмов циліндрових втулок бурових помп. Розроблено метод вібраційно-відцентрового зміцнення для забезпечення надійності деталей типу «втулка». Адаптовано вібромашину об'ємного оброблення для поверхневого вібраційно-відцентрового зміцнення, приведено принципову схему установки та технологічне оснащення для його реалізації. Опрацьовано та проаналізовано профілограми віброзміцнених поверхонь. Намічено шляхи подальших досліджень*

*Ключові слова: технологія, надійність, безвідмовність, циліндрова втулка, поверхневий шар, вібраційно-відцентрове зміцнення*

*Проанализированы причины отказов цилиндрических втулок буровых насосов. Разработан метод вибрационно-центробежного упрочнения для обеспечения надежности деталей типа "втулка". Адаптирована вибромашина объемной обработки для поверхностного вибрационно-центробежного упрочнения, приведена принципиальная схема установки и технологическая оснастка для его реализации. Обработаны и проанализированы профилограммы виброупрочненных поверхностей. Намечены пути дальнейших исследований*

*Ключевые слова: технология, надежность, безотказность, цилиндрическая втулка, поверхностный слой, вибрационно-центробежное упрочнение*

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36336

## РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВІБРАЦІЙНО- ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

**Я. М. Кусий**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: jarkym@ukr.net

**А. М. Кук**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: andrij.kuk@gmail.com

\*Кафедра технології машинобудування  
Національний університет «Львівська політехніка»  
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

### 1. Вступ

Науково-технічний прогрес сприяв інтенсивному зростанню складності машин і систем [1], що спричинило ускладнення технологій виготовлення виробів та складання вузлів.

Пріоритетним завданням при проектуванні раціональних технологічних процесів виготовлення деталей машин є взаємодія (узгодження) їх якісних і кількісних показників. При реалізації сучасних технологій намагаються, як правило, забезпечити високий рівень технічних вимог, високу продуктивність процесу та максимально можливе завантаження технологічного обладнання.

Однак нерідко ігноруються характеристики надійності, які проявляються під час експлуатації виробів (рис. 1), хоча саме безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність і збережливість, як основні показники надійності, забезпечують бажаний ресурс роботи деталей машин [2, 3]. Критерій надійності – один з основних критеріїв при створенні складних технічних систем [4], причому рівень надійності в значній мірі визначає розвиток техніки по основних напрямках: автоматизації виробництва, інтенсифікації робочих процесів, економії матеріалів і енергії [5, 6]. Від надійності залежать безпека, економічність, ресурсозбережливість, конкурентоздатність [7, 8].



Рис. 1. Життєвий цикл машини

Досвід експлуатації машин, приладів, апаратів переконливо свідчить, що їх безвідмовність і довговічність залежать від характеру контактування спряжених деталей одна з одною або з рідким, газовим та іншим середовищем, що визначає стан поверхневого шару контактних деталей [9].

Однією з важливих характеристик надійності є безвідмовність, яка характеризується як безрозмірними параметрами (ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ ), так і числовими величинами (інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ , середнє напрацювання на відмову  $T_{cp}$ , напрацювання до відмови  $T_0$ , середнє напрацювання між відмовами  $T'_{cp}$ , параметр потоку відмов  $\omega(t)$ ) [4, 10].

Зниження металоємності та маси сучасних виробів призвело до підвищення легковаговості машин і збільшення кількості нежорстких деталей [11]. Поширеними у конструкціях машин є нежорсткі пустотілі циліндричні вироби типу «втулка» (клас 71 згідно технологічного класифікатора ЄСКД), підвищена трудомісткість виготовлення яких визначається, пе-

реважно, специфікою їх конструктивної будови – як правило, велика маса при незначній поперечній жорсткості та значних лінійних розмірах [12, 13]. Найхарактернішим видом пошкодження таких виробів, як встановлено на підставі аналізу умов їх експлуатації, є зношування, що виникає при терті спряжених поверхонь [2, 8].

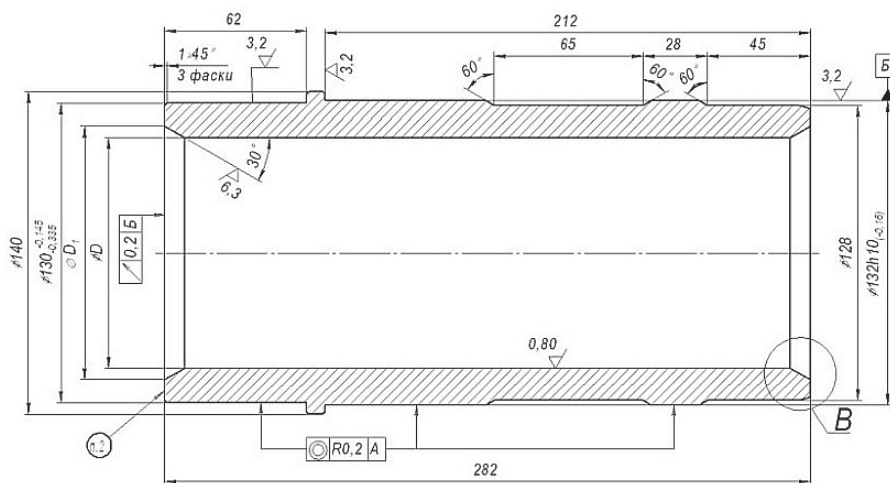
Деталі типу «втулка» виконують різноманітне функціональне призначення [14]. Зокрема, циліндрові втулки pomp НБ32 призначені для нагнітання промивної рідини (суміші води та глинястого розчину) в свердловину при геологорозвідувальному та структурно-пошуковому бурінні на нафту і газ (рис. 2).

Технологічний процес буріння здійснюється у тісному взаємозв'язку всіх комплексів обладнання, що мають різне функціональне призначення, при цьому відмова або несправність одного вузла або елемента призводить до виходу з ладу об'єкта системи або комплексу загалом [14].

Досвід експлуатації деталей машин, зокрема і циліндрових втулок бурових pomp, переконує, що всі відмови виробу пов'язані з технологією, оскільки саме вона визначає рівень якості та всі властивості, отримані в процесі виготовлення деталей і складання вузлів. Технологічний процес виготовлення, складання та контролю виробу повинен з найменшими витратами часу і засобів забезпечити необхідний рівень якості продукції, зокрема і надійність [2, 3].

Очевидно, що проблема надійності виробів, зокрема і циліндрових втулок бурових pomp – комплексна, тому створення передумов для її вирішення є пріоритетним напрямком у галузі машинобудування.

12.5



B(2:1)

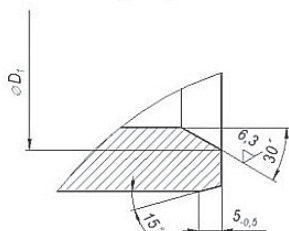


Рис. 2. Ескіз втулки циліндрової бурової помпи НБ32

Позначення	Шифр	D, мм	D <sub>1</sub> , мм
НБ 32.02.102	B132-80-282	80 <sup>+0,12</sup>	90
НБ 32.02.102-01	B132-90-282	90 <sup>+0,14</sup>	100
НБ 32.02.102-02	B132-100-282	100 <sup>+0,16</sup>	110
НБ 32.02.102-03	B132-110-282	110 <sup>+0,18</sup>	120
НБ 32.02.102-04	B132-120-282	120 <sup>+0,20</sup>	130

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Особливістю проблеми надійності є її зв'язок зі всіма етапами стадії створення машини (рис. 1), оскільки кожний з етапів вносить свій внесок у розроблення машини необхідного рівня надійності з найменшими витратами часу і засобів. На етапі конструкторсько-технологічної підготовки виробництва закладаються показники надійності вибором матеріалів, розробленням прогресивних конструкцій вузлів і робочих креслень деталей із обґрунтованими технічними вимогами, проектуванням раціональних технологічних процесів механічного оброблення виробів і складання вузлів. При виготовленні машин забезпечується їх надійність, причому реалізуються характеристики безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності та збережливості лише на стадії експлуатації (рис. 1).

При цьому необхідно виявляти зв'язки між показниками надійності і можливістю щодо їх підвищення на кожному з етапів стадії створення машини та її експлуатації [2, 7].

Загальні аспекти теорії надійності та фізики відмов висвітлені у працях М. Г. Бруевича, Б. В. Гнеденко, Г. В. Дружиніна, Б. І. Костецького, І. В. Крагельського, З. М. Левіної, В. О. Острейковського, А. М. Половко, О. С. Пронікова, Д. М. Решетова, Б. С. Сотскова, В. М. Труханова, Ф. Боудена, Дж. Неймана, А. Пірса, К. Шеннона тощо.

Питанням технологічного забезпечення надійності виробів присвячені роботи І. С. Афтаназіва, Л. М. Александровської, В. М. Браславського, Б. І. Бутаківа, А. М. Дальського, М. Б. Дьомкіна, П. О. Киричка, І. В. Кудрявцева, Я. М. Литвиняка, Д. Д. Папшева, Ю. Г. Проксурякова, А. О. Маталіна, О. С. Пронікова, Е. В. Рижова, А. Г. Сусліва, Л. О. Хворостухіна, П. І. Ящерицина та багатьох інших науковців.

В роботах [2, 3] відзначається, що безпосередньо встановити зв'язок параметрів технологічного процесу та показників надійності досить складно (рис. 3).

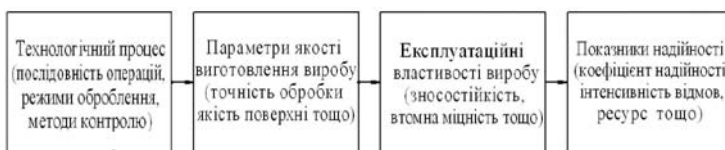


Рис. 3. Схема залежності показників надійності від рівня технологічного процесу [2]

На практиці, як правило, аналізують та досліджують основні параметри якості поверхні у взаємозв'язку із експлуатаційними властивостями деталей машин і приладів, які вони визначають. Зокрема, в роботі [7] на основі теоретичного та емпіричного опису експлуатаційних властивостей деталей машин встановлений їх взаємозв'язок із параметрами якості поверхонь.

Однак залежність експлуатаційних властивостей виробу від показників якості готового виробу вельми складна та неоднозначна із наступних міркувань [2]: процес втрати працездатності підкоряється законам випадкових функцій через зміну умов експлуатації та нестабільності технологічного процесу; через складності більшості технологічних

процесів і супутніх побічних явищ важко виявити всі ті параметри процесу, які дійсно впливають на експлуатаційні властивості виробу. Розкриття залежностей між якістю виробу і його експлуатаційними властивостями базується на вивченні фізичних процесів руйнування матеріалів [2, 8, 9].

Не менш важливим і відповідальним етапом проектування машин і приладів, пов'язаним з вирішенням складних завдань, є нормування геометричних і фізичних (фізико-механічних) параметрів якості поверхні. Ця складність обумовлена, з одного боку, багатофакторністю залежностей і зв'язків службових властивостей деталей з якістю їх поверхонь і їх недостатньою вивченістю, з іншої – недостатньою досконалістю способів фінішної обробки, заснованих на різанні матеріалів [9].

Дослідженнями [2, 8] встановлено, що загалом формування вихідних параметрів якості та пов'язаних з ними експлуатаційних характеристик відбувається на фінішних і викінчувально-зміцнювальних операціях, причому більшість параметрів операцій безпосередньо визначають надійність технологічного процесу. Однак слід враховувати явище «технологічної спадковості», пов'язане із впливом попередніх операцій на параметри фінішних і викінчувально-зміцнювальних операцій [11, 15].

Таким чином, фінішні та викінчувально-зміцнювальні операції технологічного процесу мають безпосередній і істотний вплив на показники надійності, хоча ці зв'язки складні та багатоетапні, і не є очевидними.

Розв'язання проблеми забезпечення надійності та підвищення довговічності деталей типу «втулка» нафтогазовидобувного обладнання, коли вичерпані ресурси матеріалів, з яких вони виготовлені, на нашу думку, може бути здійснене за рахунок комплексного вирішення як з точки зору покращання конструктивної будови, так і за рахунок вибору оптимальних технологічних методів оброблення зазначених виробів і, що особливо важливо, розроблення конкурентоздатного технологічного оснащення для їх реалізації [12, 16].

Сучасні дослідження переконливо свідчать, що немає універсального методу забезпечення надійності та підвищення довговічності циліндричних виробів [3, 9, 11–13]. Однак досвід промислового впровадження ефективних енергоощадних технологій переконливо свідчить, що одними із найефективніших посеред відомих фінішних і викінчувально-зміцнювальних операцій стосовно оброблення різноманітних деталей машин, що працюють в умовах зношування та знакозмінних навантажень, є вібраційні технології завдяки достатньо широкому технологічним можливостям і здатності якісного зміцнювального оброблення поверхонь виробів [9, 13, 17–19].

Інженери-практики констатують, що наразі в Україні обмаль надійних конструкцій власного виробництва, а машини провідних світових компаній надзвичайно дорогі. Тому, попри всі негаразди, слід розширювати та вдосконалювати власне виробництво різноманітних машин, механізмів і деталей, які за ціною були б доступні вітчизняним споживачам, володіли достатнім запасом надійності та конкурентоздатності [16]. Причому на сучасному етапі розвитку машинобудування в умовах кризи доцільно не проєк-

тувати нове ефективне, однак вартісне технологічне обладнання та реалізує його оснащення, а адаптувати під конкретні вимоги перевірені часом конструкції [12]. З іншої сторони, застосування теоретичних та практичних основ теорії надійності для підвищення ресурсу широкої номенклатури виробів, зокрема і деталей типу «втулка» нафтогазовидобувного обладнання, сприятиме проектуванню та впровадженню у виробництво ефективних енергоощадних машин [13, 16].

### 3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження полягає в розробленні методу вібраційно-відцентрового зміцнення та реалізуючого його технологічного оснащення для забезпечення надійності циліндрових втулок бурових pomp на викінчувально-зміцнювальній операції технологічного процесу виготовлення.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1) провести огляд і аналіз літературних джерел стосовно методів забезпечення надійності, зокрема безвідмовності, деталей машин типу «втулка», зокрема, циліндрових втулок бурових pomp;

2) встановити технологічні можливості, область використання та класифікаційні ознаки методу вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин типу «втулка», як одного з найраціональніших для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик виробів;

3) розробити технологічне оснащення для реалізації вібраційно-відцентрового зміцнення деталей типу «втулка»;

4) експериментально дослідити впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри поверхневого шару та характеристики безвідмовності циліндрових втулок.

### 4. Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення деталей типу «втулка»: технологічні можливості, область використання, технологічне оснащення, методи досліджень

#### 4.1. Технологічні можливості, область використання та класифікаційні ознаки методу вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин типу «втулка»

Згідно [13] всі способи фінішного та викінчувально-зміцнювального оброблення включають 5 груп методів: класичні методи оброблення різанням із зняттям стружки, методи хіміко-термічного оброблення та нанесення покриттів, методи оброблення тиском (поверхневе пластичне деформування (ППД)), суміщені методи викінчувального оброблення та комбіновані методи. Найпредставницькою є група методів, що базується на поверхневому деформуванні матеріалу. З поміж способів оброблення ППД найбільшої уваги за рахунок контактно-ударної взаємодії на деталь робочих тіл чи інструменту заслуговують методи динамічної дії. Розроблений у Національному університеті «Львівська політехніка» метод вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ) деталей форми тіл обертання завдяки завдяки змінно-контактній взаємодії зміцнювального інструменту із оброблюваною поверхнею деталі належить до

групи методів динамічного зміцнення. Переваги даного методу полягають у забезпеченні високого рівня енергії деформування, високій продуктивності, простоті, надійності, компактності та універсальності зміцнювальних пристроїв, можливості якісного оброблення внутрішніх поверхонь нежорстких втулок. Процес зміцнення ВВЗ не змінює геометричної форми деталі та не вимагає спеціального припуску під оброблення. Метод ВВЗ може бути використаний для зміцнення виробів, виготовлених як із кольорових металів та сплавів, так і з різних марок сталей, які піддаються деформуванню у холодному стані; при цьому, завдяки широкому діапазону регулювання легко підібрати оптимальні режими зміцнювального оброблення. Особливо ефективне ВВЗ для зміцнення деталей, які піддаються в процесі експлуатації значозмінним циклічним навантаженням [13].

На рис. 4 представлена класифікація різновидів вібраційно-відцентрового зміцнення деталей, де як критерії поділу використані тип оброблюваної поверхні, розташування зміцнювальних пристроїв відносно оброблюваної поверхні, форма деформівних тіл, рух виконавчого органу зміцнювальних пристроїв, характер подачі, тип використовуваного приводу, з'єднання елементів приводу із виконавчими органами зміцнювальних пристроїв.

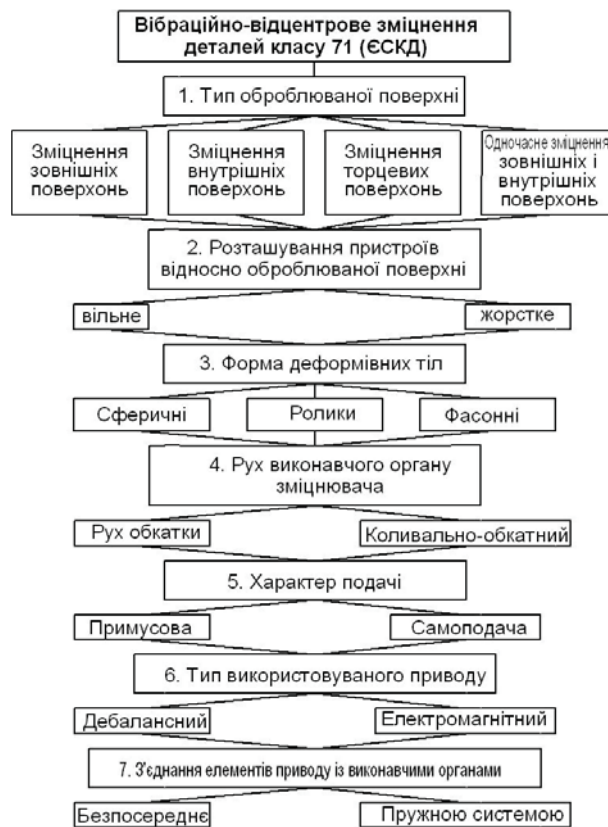


Рис. 4. Класифікаційні критерії вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин класу 71 згідно ЕСКД

Ця класифікація охоплює лише основні кінематичні та конструктивні ознаки зміцнювального обладнання при використанні методу ВВЗ для оброблення деталей форми тіл обертання, зокрема нежорстких. Крім цього, зміцнювальні пристрої відрізняються за кількістю та

розташуванням деформівних елементів (одно-, дворядні тощо), характером відбитка, що спричиняють деформівні тіла (каплеподібний, еліпсоїдний), за конструкцією деталей для закріплення деформівних елементів тощо.

На підставі класифікаційних критеріїв розроблені різноманітні принципові схеми ВВЗ, які відрізняються формою, характером фіксування та особливостями руху деформівних тіл, характером подачі зміцнювального пристрою, типом використовуваного приводу та характером здійснюваних переміщень виконавчого органу зміцнювальних пристроїв.

Широка гама деталей, що обробляються методами ППД, не дозволяє розробити одну принципову схему та спроектувати один універсальний пристрій, який можна було б використовувати при виготовленні всіх деталей. Відмінність у фізико-механічних властивостях матеріалів, із яких виготовлені деталі, їх маса, габарити, поздовжня та поперечна жорсткості, верстатне чи позаверстатне оброблення зміцненням, тип виробництва та інші фактори в кожному окремому випадку змушують конструктора й технолога шукати оптимальні варіанти проектування нових пристроїв для оброблення деталей ППД з тим, аби забезпечити за високих техніко-економічних показників отримання готових виробів із прогнозованими властивостями [3, 9, 11, 13].

Разом із тим, для здійснення поверхневого зміцнення методом ВВЗ в умовах кризи доцільно адаптувати під конкретні умови існуюче технологічне обладнання та оснащення, зокрема, машини об'ємного вібраційного оброблення, яке за умови спорядження його додатковими нескладними пристроями та системами керування піддається автоматизації, забезпечуючи при цьому високу продуктивність.

#### 4. 2. Технологічне оснащення для реалізації вібраційно-відцентрового зміцнення деталей типу «втулка»

У Національному університеті «Львівська політехніка» здійснено перші спроби адаптації обладнання об'ємного вібраційного оброблення (вібрамашини об'ємного оброблення) для реалізації методу вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ) деталей машин форми тіл обертання, розробленого у «Львівській політехніці». Методом ВВЗ обробляли внутрішні поверхні циліндрових втулок бурової помпи НБ32 (рис. 2). Принципова схема установки для реалізації методу ВВЗ приведена на рис. 5.

Класична конструкція вібрамащини об'ємного оброблення із дебалансним приводом використана нами для оброблення ВВЗ внутрішніх поверхонь циліндрових втулок бурової помпи НБ32.

У порожнину оброблюваної втулки 6 вільно встановлюють обкатник 7, армований поліуретаном, і засипають деформівні тіла 8, об'єм яких встановлюють експериментальним шляхом або на підставі рекомендацій. З торців втулки закривають кришками 10, 11 із компенсаційними втулками 12, 13 і стягують гвинтами 24 із гайками 25 і шайбами 26. Для якісного оброблення внутрішньої циліндричної поверхні вздовж твірних обкатнику забезпечують осьове переміщення.

На посадні шийки обкатників встановлюють втулки 16, 17, причому гайки 18, 19 із шайбами 20, 21 обмежують їх осьове переміщення. Масу обкатників розраховують за умови забезпечення необхідного зусилля оброблення поверхонь виробів. Після цього оброблювану втулку 6 із спорядженням, описаним вище, базують по зовнішній циліндричній поверхні на опорі 9 – швелері, привареному до плити, що встановлюється за допомогою фаски на внутрішній обгумованій поверхні віброконтейнера 4 ( базування в призмі). Закріплення втулки 6 здійснюється за допомогою прихвата 10, реалізованого за допомогою швелера, привареного до плити, і планки 14, що розпираються двома центрально розташованими під'ятниками 14. Планка 14 встановлюється за допомогою фаски на внутрішній обгумованій поверхні віброконтейнера 4. Переміщення під'ятників здійснюється за допомогою різі у планці 14. Для запобігання пошкодження різі під час вібрацій контейнера і для надійного закріплення служать гайки 22 [12].

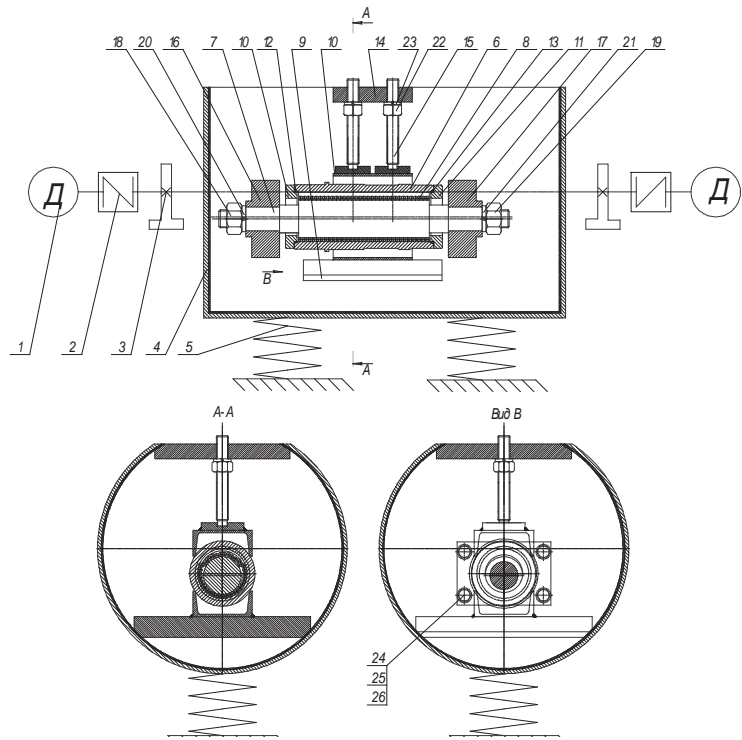


Рис. 5. Принципова схема установки для реалізації вібраційно-відцентрового зміцнення на вібрамащині об'ємного оброблення

Оздоблювально-викінчувальне оброблення внутрішніх поверхонь циліндрових втулок бурової помпи НБ32 здійснюють у такій послідовності. При подачі напруги на обмотки двигунів 1 через пелюсткові муфти 2 крутні моменти передають на дебаланси 3, обертання яких спричиняє коливання із заданою амплітудою віброконтейнера 4. За рахунок вібрацій контейнера 4 вільно встановлений у втулці 6 обкатник 7 самовтягується у режим вібраційного підтримання обертання, який супроводжується обкочуванням по внутрішній оброблюваній поверхні циліндричної деталі 6. Обкочування обкатника 7 відбувається по вільно розміщених між ним і оброблюваною поверхнею деформівних тілах 8 (у даному

випадку – сталених загартованих кульках). У дискретний проміжок часу контактування внутрішньої поверхні втулки 6 із обкатником 7 відбувається через незначну кількість деформівних тіл 8, розташованих вздовж твірних оброблюваної поверхні деталі. Контакткування деталі з черговою групою кульок відбувається з ударом, причому тілами, що співударяються, є масивні обкатник 7 і деталь 6. Наявність співударянь втулки біз обкатником 7 при контактуванні їх через незначну кількість деформівних тіл приводить до розвитку великих контактних напружень у матеріалі оброблюваної деталі в місцях контакту, в результаті чого оброблюваний матеріал пластично деформується, зміцнюється.

Експериментальний зразок технологічного оснащення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних деталей приведений на рис. 6, а, б.



Рис. 6. Технологічне оснащення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних виробів на вібромашині об'ємного оброблення: а – вібраційно-відцентровий обкатник із циліндровою втулкою, б – обкатник із технологічним оснащенням у вібромашині

Товщину зміцненого шару, ступінь та рівномірність зміцнення регулюють за допомогою зміни часу оброблення, типорозмірів деформівних тіл, маси обкатника, амплітуди коливань.

Армування обкатника поліуретаном замість гуми суттєво підвищує стійкість інструменту. Для оброблення циліндрової втулки іншого типорозміру (100<sup>+0,14</sup> мм, 110<sup>+0,14</sup> мм, 120<sup>+0,14</sup> мм тощо) виготовляють інший обкатник і армують його поліуретаном.

### 4. 3. Методика реалізації експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводили на машині об'ємного вібраційного оброблення та визначали параметри якості поверхневого шару, зокрема геометричні. Оскільки визначення геометричних параметрів якості поверхні, зокрема шорсткості, відноситься до неруйнівних методів контролю, то експериментальні дослідження проводили на циліндричних втулках бурової помпи НБ32 із діаметрами робочої поверхні Ø 100<sup>+0,14</sup> мм і Ø 110<sup>+0,14</sup> мм (рис. 2). Матеріал втулок згідно технічних вимог – сталь 70 ГОСТ 1050-74. З метою зменшення собівартості виготовлення втулок та для оцінки параметрів безвідмовності в досліджуваних виробів було замінено матеріал на сталь 20 ГОСТ 1050-74.

Оброблення ВВЗ здійснювали у такій послідовності:

- 1) оброблення деформівними тілами – сталеними загартованими кульками Ø 10 мм;
- 2) зміцнення внутрішньої поверхні виробів кульками Ø 8,5 мм;

3) очищення обробленої поверхні від бруду після попередніх обробок за допомогою ураліту («морських камінців»);

4) нанесення твёрдосплавного покриття ВК8 для підвищення зносостійкості.

Перед обробленням деформівні тіла змочили водою для зменшення тертя та покращання умов обкочування. За установкою збирали вузол із оброблюваної деталі, деформівних тіл і обкатника, після чого закріплювали на установці.

Параметри режимів оброблення: амплітуда коливань контейнера – А=3–4 мм; осьовий хід обкатника – 2–5 мм; заповнення робочого об'єму деформівними тілами між внутрішньою поверхнею втулки та зовнішньою поверхнею обкатника – 0,75–0,85.

Тривалість оброблення на кожному переході – 10–15 хв.

Особливістю вібраційно-відцентрового зміцнення є можливість формування твёрдосплавного покриття на виконавчій поверхні виробу [12, 16].

Після обробки виробу оснащення розбирали та визначали геометричні параметри шорсткості за допомогою вимірювального комплексу, принципова схема якого приведена на рис. 7, а фотографія – на рис. 8.

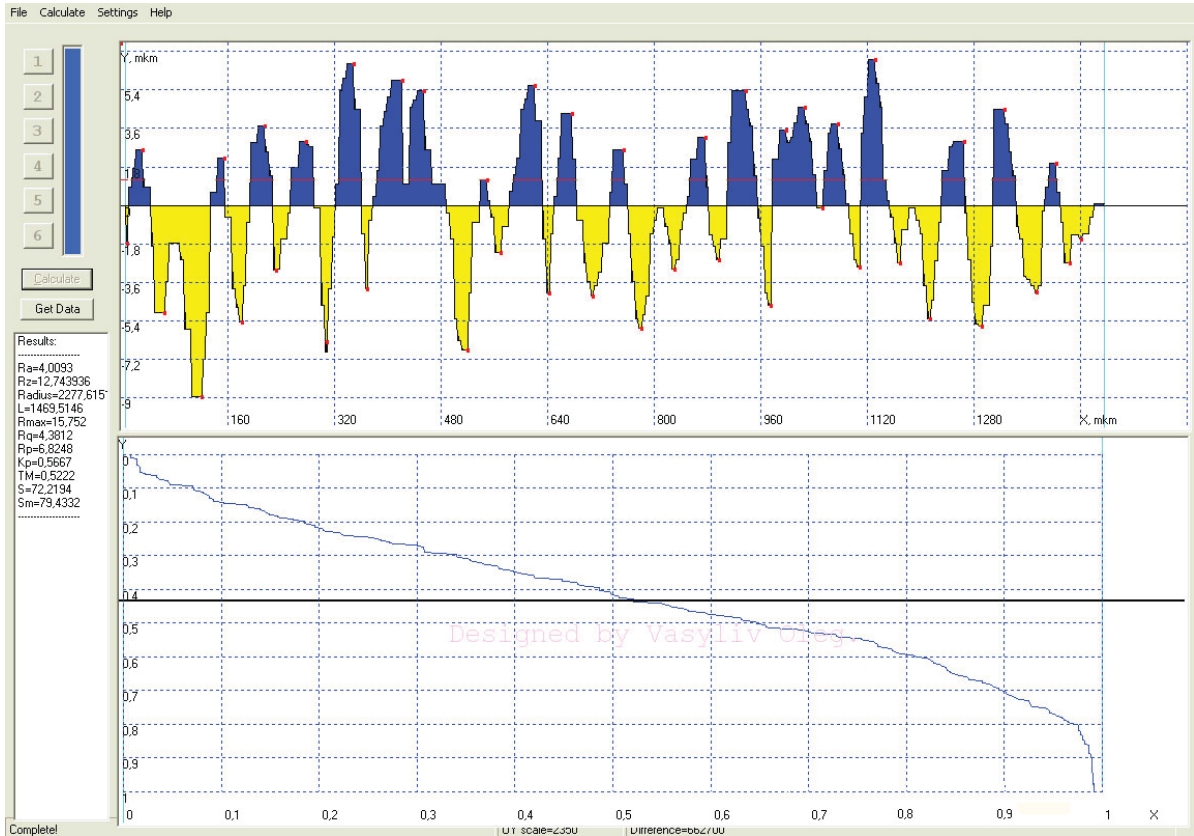


Рис. 7. Принципова схема вимірного комплексу для проведення експериментальних досліджень



Рис. 8. Комплекс для вимірювання геометричних параметрів якості поверхні виробів

Опрацювання профілограм з метою підвищення точності і зменшення трудомісткості розрахунку топографічних характеристик мікрогеометрії поверхневого шару на основі профілограм виконували при використанні комп'ютерної програми Roughness Plot Analyzer (рис. 9, а, б) [20].



a



b

Рис. 9. Результати комп'ютерного опрацювання мікрорельєфу поверхневого шару: а – профілограма відправної поверхні; б – профілограма поверхні з нанесеним твердосплавним покриттям

Важливе значення на фінішних і оздоблюваль-но-викінчувальних операціях технологічних процесів виготовлення виробів має контроль як параметрів технологічного процесу, так і характеристик виробів згідно технічних вимог. Методи апаратного контролю складніші, трудомісткіші та вартісніші, однак, як правило, забезпечують вищу точність порівняно із методами безапаратного контролю. Серед методів безапаратного контролю заслуговує на увагу метод контролю технологічного процесу, під час якого контролюється не мікрогеометрія поверхні та фізико-механічні параметри поверхневого шару, а технологічний процес, всі умови та режим обробки контрольованої поверхні [9].

Рациональне поєднання методів контролю сприятиме підвищенню продуктивності опрацювання результатів при забезпеченні необхідної точності вимірювань та зменшенню загальних витрат. Зокрема, в даних дослідженнях контролювали параметри щорсткості методом апаратного контролю при використанні вимірювального комплексу, після чого зміцнені втулки із сталі 20 разом із оригінальними шліфіваними та термозміцненими втулками із сталі 70 скеровувалися на бурову для оцінки їх працездатності.

Критерієм працездатності служило середнє напрацювання на відмову  $T_{ср.}$ , напрацювання до відмови  $T_0$ , як основні показники безвідмовності виробу. На підставі результатів випробувань складено відповідний акт.

**5. Результати експериментальних досліджень впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри поверхневого шару та характеристики безвідмовності циліндрових втулок**

Результати експериментальних досліджень параметрів мікрорельєфу поверхні приведено у табл. 1.

Таблиця 1

Зміна параметрів рельєфу поверхні у процесі оброблення ВВЗ

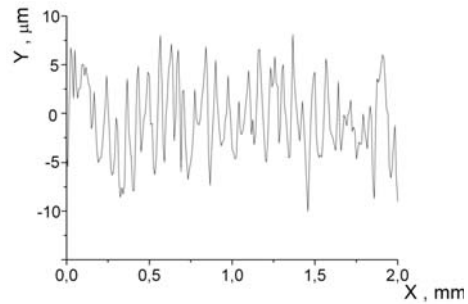
Послідовність віброоб-роблення	Параметри рельєфу поверхні, мкм				
	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	S	$S_m$
відправна поверхня	4,0093	12,7439	15,7520	72,2194	79,4332
оброблення кульками $\varnothing$ 10 мм	0,5487	2,1325	3,0464	50,654	288,00
оброблення кульками $\varnothing$ 8,5 мм	0,8774	1,1734	6,8524	128,737	358,33
очищення уралітом	1,0470	4,1642	4,9040	45,6760	112,90
нанесення покриття ВК8	0,6915	1,3829	3,1914	29,7087	85,3398

Побудова профілограм після переходів вібраційно-відцентрового зміцнення виконана на рис. 10, а–д.

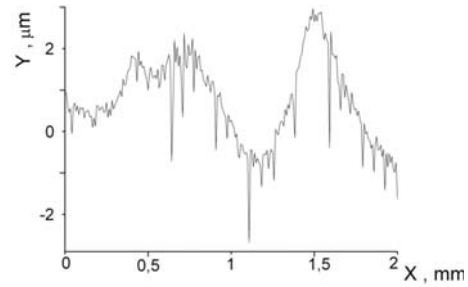
Криві опорних поверхонь після переходів вібраційно-відцентрового зміцнення приведено на рис. 11, а–д.

Акт про проведення випробувань приведено на рис. 12.

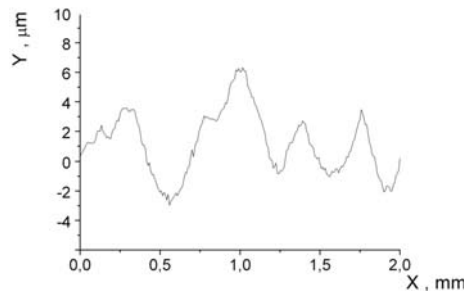
Експериментальні дослідження стосовно впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри поверхневого шару виробів проводилися у Національному університеті «Львівська політехніка», натурні випробування віброзміцнених втулок здійснювалися за участю ПП «Техноресурс».



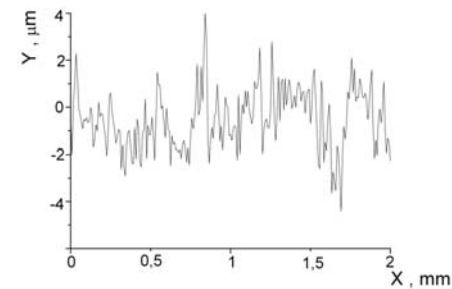
а



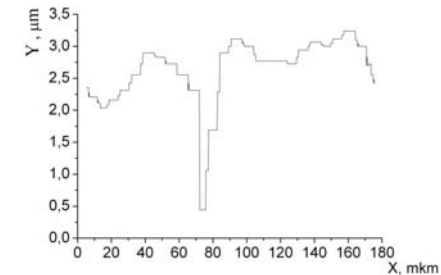
б



в



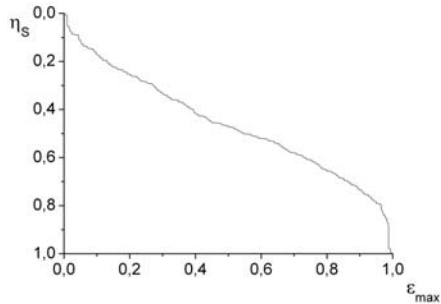
г



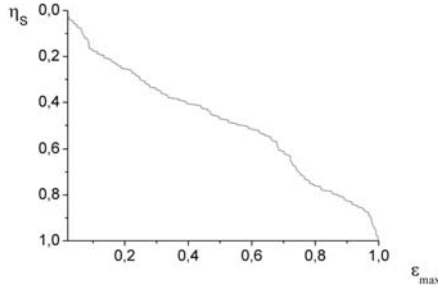
д

Рис. 10. Профілограми поверхні після переходів ВВЗ: а – відправної поверхні; б – оброблення кульками  $\varnothing$  10 мм; в – оброблення кульками  $\varnothing$  8,5 мм; г – очищення уралітом; д – нанесення покриття ВК8

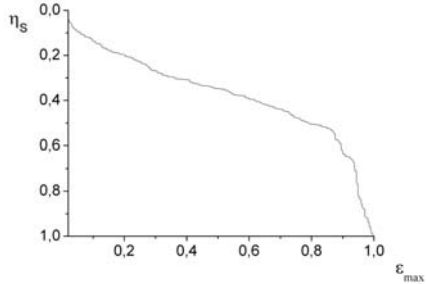




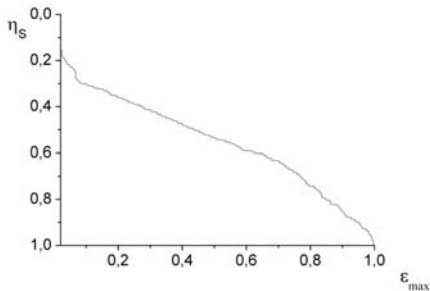
a



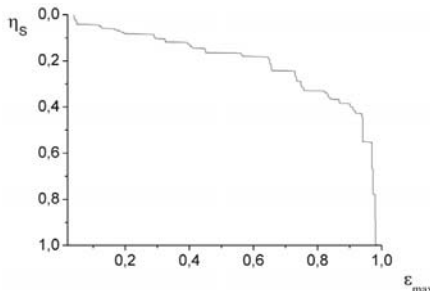
б



в



г



д

Рис. 11. Криві опорних поверхонь після переходів ВВЗ: а – відправна поверхня; б – оброблення кульками  $\varnothing 10$  мм; в – оброблення кульками  $\varnothing 8,5$  мм; г – очищення уралітом; д – нанесення покриття ВК8



**АКТ**

про результати випробувань  
втулок циліндричних бурових насосів НБ-32

Ми, що нижче підписалися, представник ПП "Техноресурс" – головний технолог Федішин В.М. та представник Калуської НГРС ДП «Укразхідгеологія» – головний механік Гоц В.П., склали цей акт про результати випробувань циліндричних втулок бурових насосів НБ-32:

було проведено дослідно-промислові випробування циліндричних втулок бурових насосів НБ-32, виготовлених із сталі 20 ГОСТ 1050-74. На оздоблювально-викінчувальній технологічній операції при виготовленні циліндричних втулок бурових насосів НБ-32 здійснено вібраційно-відцентрове зміцнення у Національному університеті «Львівська політехніка» на кафедрі «Технологія машинобудування».

Застосування вібраційно-відцентрового зміцнення у ТП виготовлення циліндричних втулок бурових насосів НБ-32 дозволило при збереженні вимог нормативної документації забезпечити експлуатаційний ресурс не менший, ніж у базових втулок, виготовлених із сталі 70 ГОСТ 1050-74, зокрема, під час проведених випробувань ресурс базових втулок із сталі 70 - 420 год, віброзміцнених втулок із сталі 20 - 752 год. Крім цього, використання вібраційно-відцентрового зміцнення сприяло зменшенню загальної працездатності механічного оброблення та собівартості виготовлення виробу.

Акт складений у трьох примірниках.

Головний технолог  
ПП "Техноресурс" \_\_\_\_\_ Федішин В.М.

Головний механік  
Калуської НГРС  
ДП "Укразхідгеологія" \_\_\_\_\_ Гоц В.П.

Рис. 12. Акт про результати випробувань циліндричних втулок

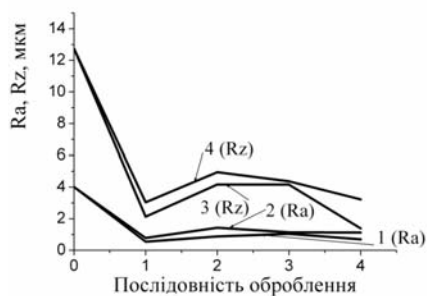
**6. Опрацювання результатів досліджень та висновки за результатами досліджень**

Результати статистичного опрацювання експериментальних досліджень приведено на рис. 13, а–в і рис. 14.

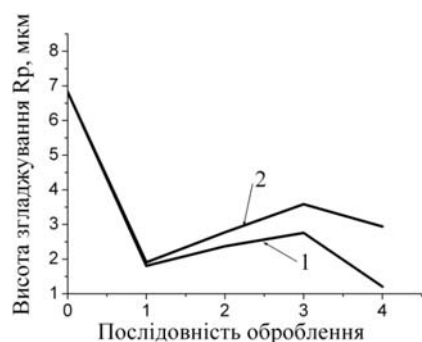
Формування мікрогеометрії поверхні тертя відбувається в результаті процесів пластичного та пружного деформування мікронерівностей, їх втомного руйнування, а в деяких випадках, мікрорізання та глибокого виривання. Тому, очевидно, мікронерівностям на фінішних або оздоблювально-викінчувальних операціях необхідно надати плосковершинну форму. На згладжених нерівностях краще формується плівка мастильного матеріалу, створюються сприятливі умови для створення пружного контакту поверхонь, попереджується перегрів в зоні контакту та зміна в'язкості мастила.

На підставі опрацювання профілограм (рис. 10) вдалося виявити складну форму опорних кривих (рис. 11). В процесі віброзміцнення форма кривої опорної поверхні змінюється – вона стає пологішою (висота до 70 % мікровиступів становить 0,5...0,6  $R_{max}$ ), що свідчить про наближення рельєфу поверхні до плосковершинного. Відомо, що для забезпечення нормальної роботи пари тертя необхідно, щоб поверхні тертя спряжених

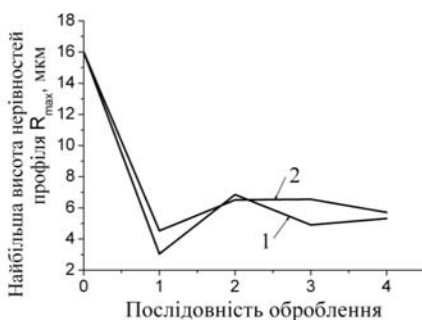
деталей володіли певною олівовісткістю, а висоти мікронерівностей для підвищення здатності пари тертя і забезпечення опору їх деформації в пружному режимі були впорядковані.



а



б



в

Рис. 13. Зміна висотних параметрів після оброблення деталі ВВЗ: а – зміна параметрів Ra, Rz; б – зміна параметра Rp; в – зміна параметра R<sub>max</sub>

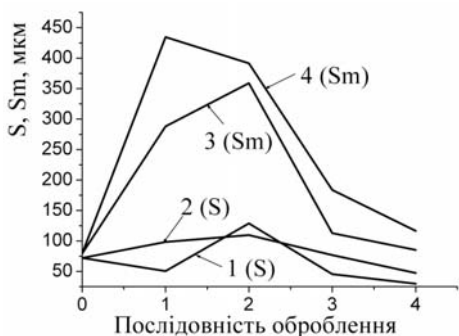


Рис. 14. Зміна крокових параметрів (S, S<sub>m</sub>) після оброблення деталі ВВЗ

На підставі аналізу статистичного опрацювання результатів досліджень (рис. 13, а–в, рис. 14) можна зробити висновки. Оброблення деталі ВВЗ дозволяє зменшити висотні параметри її поверхні ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_{max}$ ) у 3–5,8 разів. Стосовно зміни крокових параметрів, то після нанесення твёрдосплавного покриття середній крок нерівностей по вершинах S зменшується в 1,5–2,4 рази, а середній крок нерівностей профілю  $S_m$  практично не змінюється порівняно із відправною поверхнею. Це свідчить про зрізання чи деформування вершин мікроступів рельєфу поверхні у процесі віброзміцнення.

На підставі акту про результати натурних випробувань циліндричних втулок бурових pomp НВЗ2 (рис. 12) можна зробити такі висновки. Після вібраційно-відцентрового зміцнення циліндричних втулок бурових pomp середнє напрацювання на відмову  $T_{cp}$  підвищилось в 1,79 рази порівняно з оригінальними шліфованими та термообробленими втулками, крім цього економічний ефект забезпечується при зміні матеріалу зі сталі 70 на сталь 20.

### 7. Загальні висновки та перспектива подальших досліджень

Формування експлуатаційних показників виробів відбувається на фінішних і оздоблювально-вікінчувальних операціях, причому останні мають перевагу за рахунок можливого одночасного підвищення точності, якості оброблення та забезпечення необхідних значень геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару. Саме удосконалення оздоблювально-вікінчувальних операцій у технології виготовлення відповідальних циліндричних деталей сприятиме покращанню їх експлуатаційних характеристик, уможливить знизити їх собівартість і перейти на використання дешевих конструкційних сталей.

Проте, стосовно внутрішніх поверхонь втулок бурових pomp, відомий на сьогодні арсенал оздоблювально-вікінчувальних технологічних операцій і обладнання для його реалізації недостатньо ефективні. Це висуває на перший план потребу удосконалення відомих і розроблення нових вискоефективних оздоблювально-вікінчувальних операцій, які здатні забезпечити експлуатаційні показники металевих виробів із підвищенням продуктивності праці та зниженням енергоємності використовуваного обладнання. Аналіз, проведений на основі класифікацій циліндричних виробів та матеріалів, з яких вони виготовлені, характеристик технологій і обладнання для забезпечення основних параметрів якості поверхні та виробничого досвіду підприємств, переконливо свідчить, що найперспективнішими для покращання експлуатаційних характеристик деталей типу «втулка» серед відомих оздоблювально-вікінчувальних операцій є методи оброблення поверхневим пластичним деформуванням (ППД).

Посеред групи методів ППД заслуговують на увагу, з огляду ефективності застосування, методи вікінчувально-зміцнювального оброблення, що базуються на використанні вібрацій. Проте, як показує аналіз розвитку теоретико-експериментальних досліджень і досвід промислового використання вібрацій для оздо-

бловально-викінчувальних операцій, енергія деформування у практично всіх вібраційних методах оброблення обмежена масою та прискоренням руху окремо взятого оброблювального тіла – сталевий кульки чи ролика, що не завжди забезпечує оптимальні значення експлуатаційних показників. Крім цього, вібраційне оброблення, як і майже всі методи групи динамічного деформування ППД, малоефективна для зміцнення внутрішніх поверхонь трубчастих виробів та одночасного оброблення внутрішніх та зовнішніх поверхонь стержневих виробів.

Мабуть лише вібраційно-відцентрове із відомих методів вібраційного оброблення дозволяє вирішити поставлені завдання.

Вибір методу оздоблювально-викінчувального оброблення визначається забезпечення якості поверхні,

собівартістю оброблення, продуктивністю використуваного обладнання та його універсальністю.

Стосовно універсальності, тобто можливості використання для оброблення різних типорозмірів виробів, то в даний час у Національному університеті «Львівська політехніка» з успіхом здійснено адаптовано обладнання об'ємного вібраційного оброблення (вібрмашини об'ємного оброблення) для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних виробів, зокрема циліндричних втулок бурової помпи НБ32.

Подальші дослідження у цьому напрямку – оптимізація режимів оброблення та розроблення практичних рекомендацій по використанню вібраційно-відцентрових зміцнювачів з дебалансним приводом для покращання експлуатаційних характеристик деталей типу «втулка».

### Література

1. Острейковский, В. А. Теория надежности: учебник для вузов [Текст] / В. А. Острейковский. – М.: Высш. школа, 2003. – 463 с.
2. Проников, А. С. Надежность машин [Текст] / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
3. Афтаназів, І. С. Технологічне забезпечення надійності деталей машин: конспект лекцій для студентів спеціальності 7.090202 «Технологія машинобудування» [Текст] / І. С. Афтаназів. – Львів: ДУЛП, 1998. – 132 с.
4. Труханов, В. М. Надежность технических систем типа подвижных установок на этапе проектирования и испытания опытных образцов [Текст] / В. М. Труханов. – М.: Машиностроение, 2003. – 320 с.
5. Решетов, Д. Н. Надежность машин [Текст] / Д. Н. Решетов, А. С. Иванов, В. З. Фадеев. – М.: Высш. школа, 1983. – 237 с.
6. Половко, А. М. Основы теории надежности [Текст]: уч. пос. / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб, 2006. – 704 с.
7. Александровская, Л. Н. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем [Текст]: учебник / Л. Н. Александровская, А. П. Афанасьев, А. А. Лисов. – М.: Логос, 2001. – 208 с.
8. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
9. Шнейдер, Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом [Текст] / Ю. Г. Шнейдер; 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1982. – 248 с.
10. Надежность технических систем [Текст]: справочник / под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 606 с.
11. Ящерицын, П. И. Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении [Текст] / П. И. Ящерицын, А. П. Минаков. – Минск: Наука и техника, 1986. – 215 с.
12. Широков, В. В. Розроблення технологічного оснащення для покращання експлуатаційних характеристик деталей нафтогазовидобувного обладнання [Текст]: матер. X-ой Пром. конф. с между. участием / В. В. Широков, Я. М. Кусий, І. С. Афтаназів, В. М. Боровець, А. М. Кук // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях. – сгт. Славское, Карпаты, 2010. – С. 243–246.
13. Кусий, Я. М. Технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів поверхневих шарів металевих довгомірних циліндричних деталей вібраційно-відцентровим зміцненням [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Я. М. Кусий. – Львів, [б. в.], 2002. – 260 с.
14. Быков, И. Ю. Эксплуатационная надежность и работоспособность буровых машин [Текст]: уч. пос. / И. Ю. Быков, Н. Д. Цхадая. – Ухта: УГТУ, 2004. – 196 с.
15. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении [Текст] / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченко. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.
16. Кусий, Я. М. Дослідження якості поверхні віброзміцнених деталей машин [Текст] / Я. М. Кусий, В. Г. Топільницький. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні й приладобудуванні». – 2013. – № 772. – С. 196–201.
17. Aftanaziv, I. Using vibrations for strengthening of long-sized cylindrical details [Text] / I. Aftanaziv, J. Kusyj, I.-P. Kuritnyk // Acta Mechanica Slovaca, Kosice. – 2000. – Vol. 3. – P. 43–46.
18. Kusyj, J. Calculations of vibratory-centrifugal strengthening treatment's dynamics by means of application software [Text] / J. Kusyj, V. Topilnitskiyy // Book of abstracts XVII Polish-Ukrainian Conference on «CAD in Machinery Design – Implementation and Educational Problems», 2009. – P. 25–26.
19. Stotsko, Z. Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindric long-sized machine parts [Text] / Z. Stotsko, J. Kusyj, V. Topilnitskiyy // Journal of Manufacturing and Industrial Engineering. – 2012. – Vol. 11, Issue 1. – P. 15–17.
20. Широков, В. В. Комп'ютерний обробіток профілограм фрикційних поверхонь [Текст] / В. В. Широков, Л. А. Арендар, Ю. І. Ковальчик, Х. Б. Василів, О.М. Василів // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2005. – № 1. – С. 93–96.