



Прийнято 13.12.2025. Прорецензовано 20.12.2025. Опубліковано 30.12.2025.

УДК 621.91:621.785

DOI: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-85-100

ТЕХНОЛОГІЧНЕ УСПАДКОВУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ У ПРОЦЕСІ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЦИЛІНДРОВИХ ВТУЛОК БУРОВИХ ПОМП

Кусий Я. М. *

Доктор технічних наук, професор
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5741-486X>
e-mail: yaroslav.m.kusyi@lpnu.ua

Синенький Р. В.

Магістр
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна
<https://orcid.org/0009-0008-1117-5865>
e-mail: roman.synenkyi.mmptm.2024@lpnu.ua

Брухаль П. Р.

Аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-7649-3094>
e-mail: Pavlo.R.Brukhal@lpnu.ua

Кусень Н. А.

Асистент
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-8782-3992>
e-mail: Nazarii.A.Kusen@lpnu.ua

Конюх О. І.

Аспірант
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна
<https://orcid.org/0009-0004-6670-4198>
e-mail: oleg.koniukh.asp.2025@lpnu.ua

Запропоноване посилання: Кусий, Я. М., Синенький, Р. В., Брухаль, П. Р., Кусень, Н. А. & Конюх, О. І. (2025). Технологічне успадковування параметрів у процесі механічного оброблення циліндрових втулок бурових pomp. Науковий вісник ІФНТУНГ, 2(59), 85-100. doi: 10.31471/1993-9965-2025-2(59)-85-100

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Анотація. Зміна пріоритетів у проектуванні сучасних технологій виготовлення відповідальних деталей нафтогазовидобувного обладнання, зокрема циліндрових втулок бурових pomp, із забезпечення регламентованих параметрів точності та шорсткості на досягнення необхідних експлуатаційних характеристик і показників надійності суттєво обмежує ефективність традиційних методів фінішного лезового або абразивного оброблення. Це зумовлює необхідність переходу до альтернативних методів формування поверхневого шару, серед яких особливе місце займають процеси обробки тиском методами поверхневого пластичного деформування. Розроблені у «Львівській політехніці» спеціалізовані технологічні системи поверхневого пластичного деформування для методу вібраційно-відцентрового зміцнення на заключних етапах формоутворення деталей виробів дозволяють покращити параметри мікрорельєфу, підвищити поверхневу мікротвердість та забезпечити залишкові напруження стиску у поверхневому шарі за умови досягнення регламентованої точності оброблення на попередніх технологічних операціях. Адаптована під машини об'ємного вібраційного оброблення технологічна система вібраційно-відцентрового зміцнення забезпечує відповідно до принципу технологічного успадковування параметрів значне покращання як висотних параметрів шорсткості функціональної внутрішньої поверхні циліндрових втулок НБ 32.02.102-04 (y 8,69–16,77 разів), так і крокових характеристик (y 1,97–4,12 разів), одночасно сприяючи збільшенню відносної опорної довжини профілю t_m у 1,7 разів. Подальші дослідження будуть спрямовані на прогнозування поведінки елементів технологічних систем вібраційно-відцентрового зміцнення методами інженерії надійності, застосування методів імітаційно-реологічного моделювання для аналізу процесу викінчувального оброблення та аналіз результатів теоретико-експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання операцій формоутворення функціональних поверхонь відповідальних деталей нафтогазовидобувного обладнання.

Ключові слова: якість, технологічний процес, поверхнєве пластичне деформування, вібраційно-відцентрове зміцнення.

Вступ

Сучасне машинобудування проходить етап масштабної трансформації, зумовленої глибокою інтеграцією цифрових технологій у важливі етапи та стадії життєвих циклів відповідальних виробів – від конструкторсько-технологічного проектування та розроблення раціональних технологій формоутворення деталей і складання машин до їхньої подальшої експлуатації [1, 2]. Інноваційні підходи до проектування та виготовлення деталей стають визначальним чинником конкурентоспроможності промисловості й одним із головних рушіїв її сталого розвитку [3, 4]. Поширення штучного інтелекту, цифрових двійників, адитивних технологій, кіберфізичних систем і промислового інтернету речей змінює уявлення про виробництво, забезпечуючи підвищення/покращання регламентованих показників, адаптивність і економію ресурсів [5, 6].

Паралельно з цифровізацією зростають вимоги до екологічної відповідальності. Принципи сталого виробництва передбачають скорочення енергоспоживання, зниження вуглецевого сліду, повторне використання матеріалів, впровадження замкнених циклів тощо. Саме поєднання цифрових інструментів і екологічних підходів визначає нову парадигму розвитку машинобудівної галузі, узгоджену з основними концепціями Індустрії 4.0/5.0 [7, 8].

Поряд з тим нафтогазовидобувна промисловість, як одна з важливих галузей вітчизняної економіки, безпосередньо залежить від технологічного забезпечення показників надій-

ності й експлуатаційних характеристик вузлів та робочих органів машин. Устаткування, що працює під час буріння, транспортування й перекачування вуглеводнів, зазнає сильних механічних і корозійних впливів, дії абразивних частинок, температурних коливань, вібрацій тощо. Такі умови викликають прискорений знос поверхневого шару відповідальних деталей, що знижує їхню працездатність і ресурс роботи, може призвести до раптових відмов і створення аварійних ситуацій [9, 10].

У конструкції бурової установки pompa НБ-32 відповідає за подачу бурового розчину в свердловину, забезпечуючи циркуляцію шламу та охолодження долота. Циліндрові втулки (рис. 1) виконують роль напрямних для поршнів із манжетами та транспортних ланок для переміщення розчинів у обидва напрямки: у свердловину та назовні. Пара «поршень – втулка» працює в умовах граничного або змішаного тертя за недостатнього змащування, що значно підвищує вимоги до мікротопології поверхні, поверхневої мікротвердості та необхідності формування залишкових напружень стиску [11, 12].

Надійність помпи та тривалість служби окремих деталей визначаються високою зносоустійкістю, герметичністю та стабільністю геометричних параметрів функціональної внутрішньої поверхні циліндрових втулок. Втрата герметичності або порушення співвідносності призводить до зниження тиску подачі, підвищеного енергоспоживання, зростання температури тертя і може спричинити відмову всієї

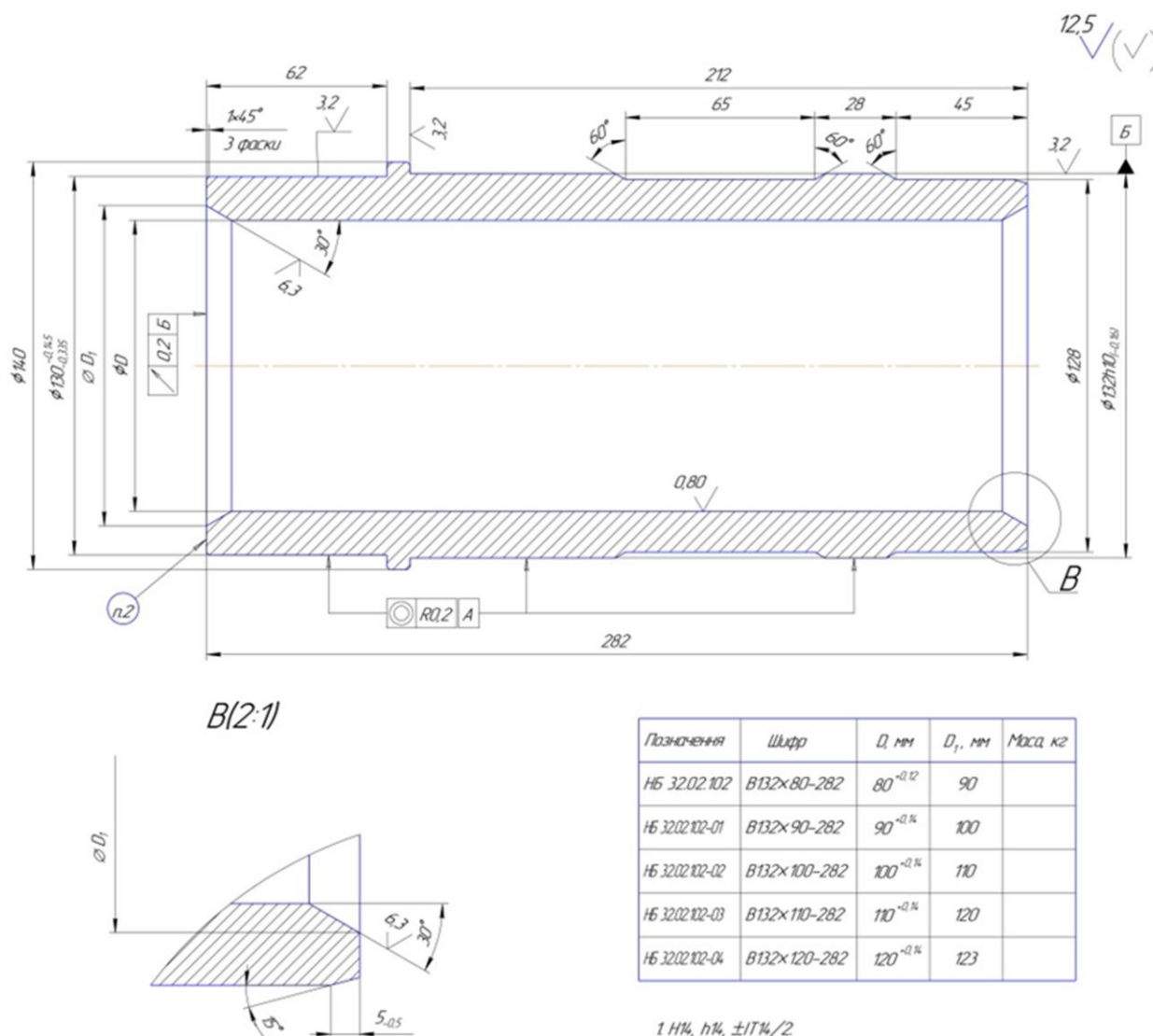


Рисунок 1 – Робоче креслення циліндрової втулки НБ 32.02.102 бурової помпи НБ-32 зі сталі 70 ДСТУ 8429 2015

помпувальної секції. Тому технологічне забезпечення шорсткості і стану поверхневого шару циліндрових втулок є одним із ключових факторів у процесі виготовлення даних деталей бурових pomp [9, 12].

Комплексний аналіз експлуатаційних умов свідчить, що стан поверхневого шару є інтегральним показником, який відображає дію технологічних, силових та фізико-хімічних чинників. Тому вивчення закономірностей зародження, формування, трансформації та деградації поверхневих шарів із врахуванням технологічного успадковування властивостей є важливою передумовою підвищення ефективності роботи нафтогазовидобувного обладнання та розроблення ефективних технологій його виготовлення й відновлення [13, 14].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності деталей машин реалізується проектуванням функціонально-орієнтованих технологій (рис. 2) [15, 16]. У даній статті обмежимося аналізом процесів механічної обробки різанням та поверхневого пластичного деформування (ППД).

Успішне вирішення завдань на етапі конструкторської підготовки виробництва досягається раціональною взаємодією CAD/CAE систем, перша з яких забезпечує формування цифрового макету виробу, а друга оптимізує конструкцію, моделюючи експлуатаційні умови. Поряд з тим, технологічна підготовка виробництва реалізована в умовах функціонально-орієнтованого проектування раціональною

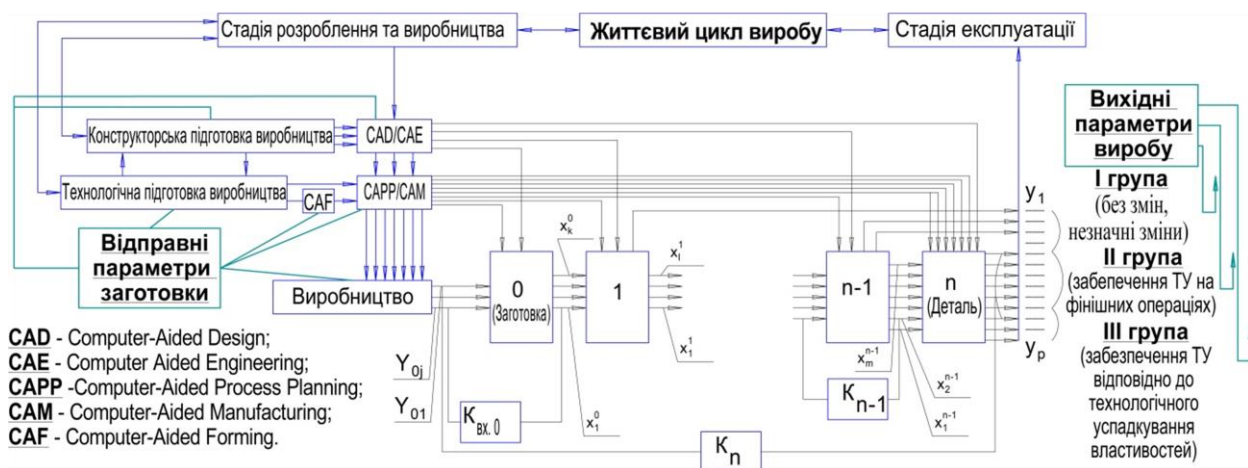


Рисунок 2 – Принципова схема забезпечення взаємозв'язків для функціонально-орієнтованих технологій

взаємодією CAPP/CAF систем, перша з яких забезпечує автоматизоване проєктування технологій формоутворення виробів і їхнє подальше складання, а друга оптимізує технологічні процеси, моделюючи процеси механічного оброблення відповідно до експлуатаційних умов. На підставі узгодження результатів CAD/CAE і CAPP/CAF систем формуються відправні дані для розроблення програми для обладнання з ЧПК у САМ системі (рис. 2) [14, 17].

Вихідні (кінцеві) параметри виробів після n технологічних операцій, що містять операції механічної обробки різанням, тиском (ППД) і термічного оброблення, а також контрольні операції ($K_{\text{вх. } 0}$, $K_1, \dots$), формують три основні групи. Група I вихідних параметрів охоплює незначну кількість показників, які не змінюються взагалі від першої до останньої технологічної операції або змінюються несуттєво. Вихідні показники групи II формуються на фінішних або викінчувальних технологічних операціях, забезпечуючи регламентовані технічними умовами (ТУ) параметри точності, шорсткості, відхилень форми і їхнього взаємного розташування тощо. Вихідні показники групи III формуються відповідно до принципів технологічного успадкування властивостей деталей і машин (рис. 2) [15, 16].

На сучасному етапі розвитку технологій важливим є комплексне забезпечення вихідних показників різних груп, зокрема II і III, під час проєктування раціональних технологічних процесів.

Проблема «технологічного успадкування» властивостей виробів, що охоплює терміни «технологічного успадкування» та «технологічної спадковості», є пріоритетною в сучасній

теорії та практиці машинобудування, оскільки вона визначає складність і різноманіття взаємозв'язків між різними етапами технологічного циклу. Під технологічним успадкуванням зазвичай розуміють процес передачі та трансформації фізико-механічних і структурних характеристик матеріалу або поверхневого шару деталей від попередніх до наступних етапів виробництва. Одночасно термін «технологічна спадковість» підкреслює збереження вже набутого рівня властивостей та параметрів, сформованих на попередніх етапах обробки [18, 19].

Сучасні наукові підходи трактують технологічне успадкування, технологічне успадкування та технологічну спадковість як комплексні категорії, що інтегрують часові, фізико-хімічні та структурні аспекти життєвого циклу технічного об'єкта. Вони дозволяють відстежувати безперервність взаємозв'язків між фазами виробництва, експлуатації та відновлення виробу, фіксуючи його стан у конкретний момент часу [12, 16].

Відповідальні деталі нафтогазовидобувного обладнання, зокрема циліндрові втулки бурових pomp, піддаються впливам на їхній стан різноманітних процесів і явищ – теплових, механічних, енергетичних, структурних тощо. Відповідно до принципу переходу кількісних змін у якісні, розвиток технічних систем не обмежується поступовим нарощуванням параметрів, а передбачає виникнення нового якісного стану внаслідок накопичення попередніх кількісних змін [10, 11].

У цьому контексті технологічне успадкування можна розглядати як систему взаємозв'язків між компонентами технологічного середовища включно з технологічними пере-

ходами, операціями та процесами в межах повного виробничого циклу. Наприклад, у рамках окремої технологічної операції ця система включає взаємодію металорізального верстата, технологічного пристрою, металорізального інструмента та заготовки виробу, що формують єдину інтегровану інформаційну структуру [13, 15].

Поряд з тим, раціональний вибір фінішних технологічних операцій для формування відповідальних деталей нафтогазовидобувного обладнання вимагає розв'язання багатоваріантних завдань для конкретних експлуатаційних умов, зокрема, покращання параметрів шорсткості раціональними методами обробки відповідно до вимог сталого механічного оброблення та «розумного» виробництва (Sustainable Machining & Smart Manufacturing) [4, 7].

Результати численних досліджень переконливо свідчать, що зниження абсолютних значень висотних параметрів шорсткості R_z і R_{max} забезпечує вагоме зростання зносостійкості поверхонь для різних режимів тертя, підвищення втомної міцності, корозійної стійкості, тепловідбивних властивостей та герметичності з'єднань, причому саме R_z і R_{max} відіграють визначальну роль у формуванні експлуатаційних характеристик. Водночас зменшення крокових параметрів S і S_m дозволяє досягнути нормативних значень зносостійкості, втомної міцності, тепловідбиття та герметичності для різних умов тертя, що обумовлює їхній пріоритетний вплив на процес формування поверхневого шару. Зниження абсолютного значення параметра R_p супроводжується зростанням опору зношуванню, покращенням пиловидведення, тепловідбивних властивостей і герметичності спряжень. До того ж даний параметр також істотно впливає на характер структуроутворення поверхні. Провідна роль параметра R_q проявляється у забезпеченні необхідного рівня зносостійкості, ефективності пиловидалення та тепловідбиття. Збільшення значення параметра t_m позитивно позначається на роботі трибологічних спряжень, сприяючи зростанню основних показників експлуатаційної надійності виробу. Параметр R_a є інтегральною характеристикою, що включає результуючу кінематичних складових процесу різання (Δ_1), висотну складову, зумовлену коливаннями металорізального інструмента (Δ_2), а також складову напружено-деформованого стану поверхневого шару (Δ_3), причому вплив кожної з цих складових є неоднаковим. Зменшення компоненти Δ_1 забезпечує підвищення зносостійкості, втомної міцності, корозійної стійко-

сті, тепловідбиття, пиловидаленості та герметичності з'єднань, що визначає її домінуючий вплив безпосередньо на процес різання. Зниження величини складової Δ_2 переважно сприяє зростанню втомної міцності, корозійної стійкості, тепловідбиття, ефективності пиловидалення та герметичності. Водночас зменшення абсолютного значення складової Δ_3 сприяє покращенню показників втомної міцності, тепловідбивних властивостей, пиловидаленості та герметичності спряжених поверхонь [4, 11].

Обмеженість традиційних технологій різання та термічної обробки в умовах вимог Індустрії 4.0/5.0 створює передумови для впровадження у виробництво принципово нових методів фінішної обробки, серед яких особливе місце займає поверхневе пластичне деформування (ППД). Технології ППД базуються на локальному прикладанні високих питомих тисків до поверхневого шару деталей машин, що спричиняє ущільнення матеріалу, вирівнювання мікрорельєфу, створення оливних кишень та формування залишкових напружень стиску. Це особливо важливо для виробів, які експлуатуються під дією циклічних навантажень [20, 21].

Застосування ППД у технологічних процесах виготовлення циліндрових втулок pomp НБ-32 має значні переваги. Робочі поверхні таких втулок функціонують у режимі граничного тертя в абразивному середовищі, тому підвищення мікротвердості та зниження абсолютних значень основних характеристик шорсткості забезпечує підвищення зносостійкості спряжень. Формування залишкових напружень стиску у поверхневому шарі запобігає розвитку втомних тріщин, що істотно продовжує ресурс деталей за умов змінних гідравлічних навантажень. Окрім того, ППД слугує «технологічним бар'єром» в умовах технологічного успадкування властивостей виробів і дозволяє керувати процесом формування регламентованих показників [11, 12].

Додатково ППД сприяє зниженню коефіцієнта тертя завдяки утворенню регулярного мікрорельєфу з системою оливних «кишень», які утримують змащувальну плівку. Це покращує роботу ущільнювальної пари «поршень – втулка», зменшує енергетичні втрати на тертя та стабілізує робочий тиск подачі помпи [10, 20].

Проведений огляд переконливо свідчить, що технології виготовлення циліндрових втулок потребують модернізації, зокрема на етапі проектування фінішних технологічних операцій.

Метою роботи є удосконалення технології викінчувального оброблення циліндрових втулок бурових pomp. У даній статті об'єктом досліджень є фінішна (викінчувальна) технологічна операція механічного оброблення циліндрових втулок НБ 32.02.102-04 pomp бурових типу НБ-32, а предметом дослідження – елементи технологічної системи фінішної (викінчувальної) обробки тиском циліндрових втулок. Для досягнення мети необхідно розробити фінішну (викінчувальну) технологічну операцію ППД та реалізуючу її технологічну систему.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Складність дослідження явища технологічного успадкування обумовлена різноманітністю станів технологічних систем, численністю факторів впливу та динамічністю переходів між ними. Водночас наявність інформації про попередні етапи обробки полегшує прогнозування поведінки комплексної технічної системи, включаючи поверхневий шар деталі, і сприяє прийняттю обґрунтованих рішень [5]. Заготівка разом із сформованим після операцій поверхневим шаром акумулює відомості про минулі механічні, термічні та структурні впливи, які виступають носіями технологічного успадкування та передаються через умовні технологічні бар'єри, наприклад, термообробку або операції ППД [6, 12].

Застосування концепцій теорії технічних систем [22, 23] дозволяє формалізувати закономірності трансформації властивостей у виробництві. Передавання параметрів відбувається поетапно: від вихідної заготівки до заготівки виробу під час формоутворення та далі – до кінцевої деталі. У загальному вигляді зміну властивостей на різних етапах можна представити залежністю [24]:

$$[x_1^0, \dots, x_k^0] \xrightarrow{1-a \text{ TO}} [x_1^1, \dots, x_l^1] \xrightarrow{2-a \text{ TO}} \dots \xrightarrow{(n-1) \text{ TO}} [x_1^{n-1}, \dots, x_m^{n-1}] \xrightarrow{(n) \text{ TO}} [y_1, \dots, y_p], \quad (1)$$

де $x_1^0, \dots, x_k^0$ – (1, 2, ..., k) параметри початкової заготівки після її формоутворення відповідно; $x_1^{n-1}, \dots, x_m^{n-1}$ – (1, 2, ..., m) параметри заготівки виробу після (n-1)-ої технологічної операції відповідно; $y_1, y_2, \dots, y_p$ – (1, 2, ..., p) параметри готової деталі відповідно; 1-а TO, 2-а TO, ..., (n-1)TO, (n)TO – (1, 2, ..., (n-1), n) операції у технологічному маршруті відповідно.

У разі виникнення технологічних бар'єрів, які змінюють успадковані властивості, залежність (1) трансформується [24]:

$$[x_1^0, \dots, x_k^0] \xrightarrow{1-a \text{ TO}} [x_1^1, \dots, x_l^1] \xrightarrow{2-a \text{ TO}} \dots \xrightarrow{(n-1) \text{ TO}} [x_1^{n-1}, \dots, x_m^{n-1}] \xrightarrow{(n) \text{ TO- "технологічний бар'єр"}} [y_1', \dots, y_p'], \quad (2)$$

де $y_1', \dots, y_p'$ – (1, 2, ..., p) показники деталі, що формуються після проходження визначеного «технологічного бар'єру» відповідно.

Якщо фінішна або викінчувальна операція складається із кількох переходів або формує комбінацію фінішних/викінчувальних операцій, що впливають на вихідні показники деталі, то залежність (2) уточнюється [24]:

$$[x_1^0, \dots, x_k^0] \xrightarrow{1-a \text{ TO}} [x_1^1, \dots, x_l^1] \xrightarrow{2-a \text{ TO}} \dots \xrightarrow{(n-1) \text{ TO}} [x_1^{n-1}, \dots, x_m^{n-1}] \xrightarrow{(n) \text{ TO- "технологічний бар'єр"}} \begin{bmatrix} y_1^{z'}, \dots, y_n^{z'} \\ y_1^{(z-1)'}, \dots, y_h^{(z-1)'} \\ \dots \\ y_1^{1'}, \dots, y_g^{1'} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $y_1^{1'}, \dots, y_g^{1'}$ – (1, 2, ..., g) – параметри заготівки деталі після першого технологічного переходу для фінішної (викінчувальної) операції відповідно; $y_1^{z'}, \dots, y_p^{z'}$ – (1, 2, ..., n) параметри деталі після останнього переходу для фінішної (викінчувальної) операції відповідно; (1, 2, ..., n) показники визначених технологічних операцій/переходів, що формуються після подолання «технологічного бар'єру».

Дослідження показують, що раціональне керування технологічним успадкуванням дозволяє зберігати властивості матеріалу. Це позитивно впливає на функціональну надійність і ресурс деталей, одночасно нейтралізуючи або мінімізуючи вплив негативних чинників на ранніх етапах виробництва. Небажані параметри доцільно усувати під час заготівельних або чорнових операцій, коли структура матеріалу піддається корекції, а ті характеристики, що забезпечують високу якість, слід підтримувати та поступово розвивати до завершальних етапів – фінішної обробки та складання. Формування обмежень для технологічних параметрів деталей дозволяє досягти оптимального балансу між функціональною надійністю та технологічною стабільністю, забезпечуючи не лише

сталість геометричних характеристик, але й контрольований розвиток властивостей матеріалу відповідно до умов його експлуатації [12, 14].

Важливим завданням після проходження технологічного бар'єра є формування параметрів якості виробу, з огляду на забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності. З цієї точки зору, розроблення методів ППД для технологічного забезпечення фінішних (викінчувальних) операцій має пріоритетніше значення, ніж методів термічного і хіміко-термічного зміцнення, які вимагають кваліфікованого персоналу, спеціалізованого устаткування та є одними із найенергомісткіших на даний час [11, 13].

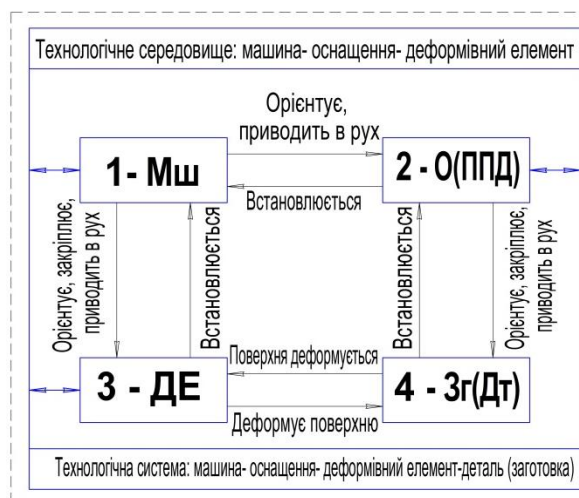
Незважаючи на негативний вплив вібрацій на формування параметрів якості у процесах формоутворення деталей виробів, у Національному університеті «Львівська політехніка» технології із застосуванням вібрацій підвищують ефективність виробничих процесів. Зокрема, розроблений під керівництвом проф. І. С. Афтаназіва метод вібраційно-відцентрового зміцнення (ВВЗ) підвищує втомну міцність, зносостійкість та інші експлуатаційні характеристики довговимірних циліндричних деталей, виробів із концентраторами напружень, зубчастих коліс тощо [20, 21].

Метод ВВЗ доцільно використати на фінішній (викінчувальній) технологічній операції формоутворення втулки НБ 32.02.102-04.

Технологічний маршрут механічного оброблення функціональної поверхні циліндрової втулки НБ 32.02.102-04 діаметром 120Н10 мм відповідно до заводського варіанту технологічного маршруту (ПП «Техноресурс») складається із чорнового точіння, чистового точіння, шліфування однократного та хонінгування. Відповідно до поставленого завдання потрібно модернізувати технологічний маршрут оброблення функціональної поверхні в розмір діаметр 120Н10 мм зокрема і технологічний маршрут механічного оброблення втулки загалом [13].

Технологічну систему механічного оброблення ППД, яка відмінна від традиційної системи механічного оброблення різанням, для ВВЗ циліндрових втулок, наведено на рис. 3.

Вона складається із вібраційної машини 1, технологічного оснащення 2, в якому закріплюється оброблювана заготовки виробу 4, та деформівний елемент 3, який контактує із функціональною поверхнею заготовки виробу 4 [11, 12].



1 – машина для процесу ППД; 2 – оснащення для процесу ППД; 3 – деформівний елемент; 4 – заготовка (деталь)

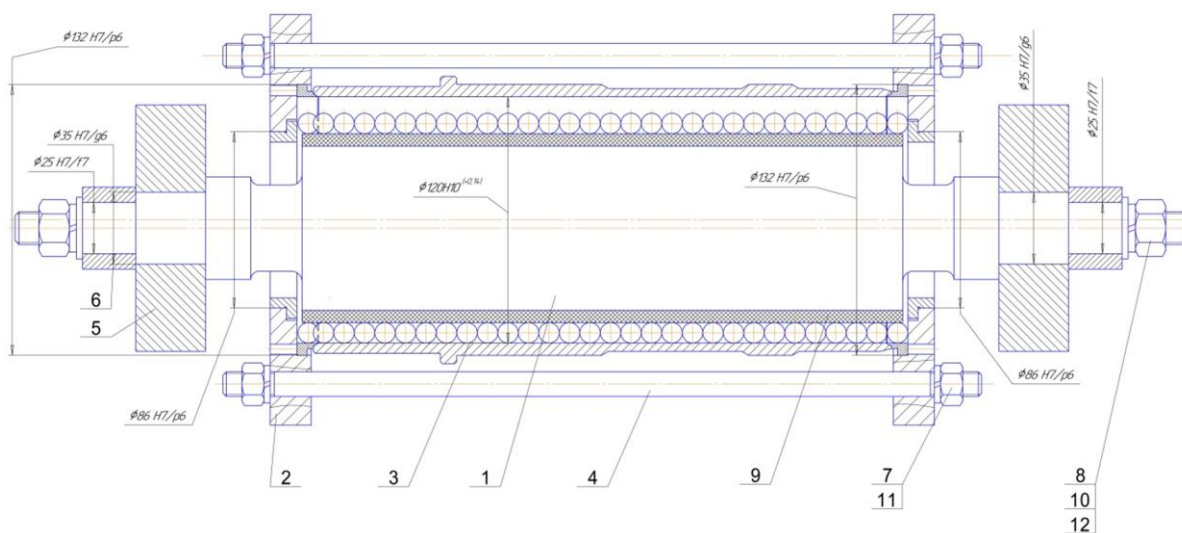
Рисунок 3 – Принципова схема технологічної системи фінішної обробки поверхневим пластичним деформуванням технологічне середовище, що її реалізує

Важливим сучасним напрямком у розвитку вібраційних технологій викінчувального оброблення відповідальних деталей машин є адаптування машин об'ємного вібраційного оброблення під різновиди методів поверхневого оброблення, зокрема під ВВЗ циліндрових втулок [13].

Технологічне оснащення для викінчувального оброблення ВВЗ циліндрових втулок, розроблене під машину об'ємного вібраційного оброблення, приведене на рис. 4.

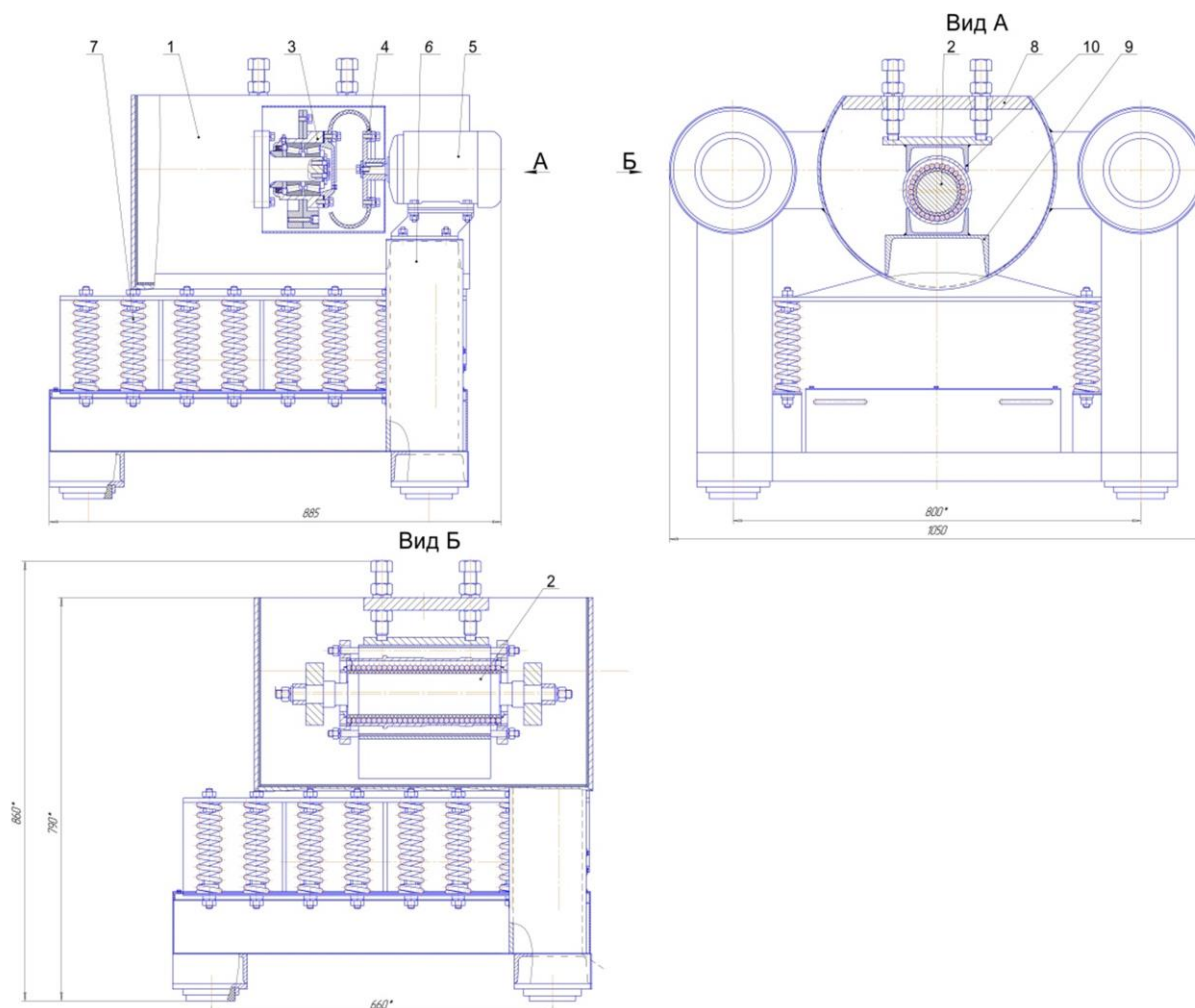
Армований поліуретаном ударний обкатник 1 встановлений вільно відносно оброблюваної поверхні в діаметр 120Н10 мм оброблюваної втулки 3, яка з обох сторін закріплена торцевими кришками 2. Торцеві кришки 2 фіксуються та закріплюються шпильками 4, гайками 7 і шайбами 11. Між зовнішньою поверхнею ударного обкатника 1 та внутрішньою поверхнею втулки 3 розміщені деформівні елементи – кульки 9. На хвостовиках обкатника 1 з обох сторін базуються фланці 5, які закріплюються через втулки 6 гайками 8 і шайбами 10, 12. Ударний обкатник 1 для забезпечення якісної обробки внутрішньої поверхні втулки має можливість радіального та осьового переміщення.

Вібраційна машина об'ємної обробки із двостороннім розташуванням дебалансних приводів у поперечному напрямку для ВВЗ ППД циліндрових втулок наведена на рис. 5. На рамі 6 із підвіскою 7 з витих пружин роз-



1 – обкатник ударний; 2 – торцева кришка; 3 – втулка циліндрова; 4 – штилька; 5 – фланець;
6 – втулка; 7, 8 – гайка; 9 – кулька; 10 – шайба; 11, 12 – шайба

Рисунок 4 – Технологічне оснащення для ВВЗ циліндрових втулок



1 – контейнер вібраційний; 2 – пристрій зміцнювальний; 3 – вузол дебалансний; 4 – муфта;
5 – електродвигун; 6 – рама; 7 – підвіска; 8 – прихват; 9 – опора нижня; 10 – опора верхня

Рисунок 5 – Машина вібраційна і технологічне оснащення для ВВЗ циліндрових втулок

ташовано вібраційний контейнер 1 із привареними опорними елементами, до яких з обох сторін приєднано дебалансні віброзбудники. Кожний із віброзбудників містить дебалансний вузол 3, муфту 4 і електродвигун 5. Зміцнювальний пристрій 2, будова якого наведена на рис. 4, базується на нижній опорі 9 і фіксуються прихватом 8 через верхню опору 10.

Внутрішню поверхню циліндрової втулки, що входить до складу зміцнювального пристрою 2, зміцнюють таким чином. Після подачі живлення на обмотки електродвигунів 5 крутний момент через муфти 4 передається на дебалансні вузли 3. Обертний рух кожного із дебалансних вузлів 3 збуджує коливання вібраційного контейнера 1 із амплітудою, величину якої регулюють розведенням дебалансів у вузлах 3. Внаслідок вібрацій контейнера 1 ударний обкатник у зміцнювальному пристрої 2, що вільно розташований відносно оброблюваної поверхні оброблюваної втулки, входить у режим вібраційного підтримання коливань. За рахунок цього він починає обертатися навколо власної осі внаслідок інерційної сили і здійснювати осьове переміщення. Внаслідок складного руху ударного обкатника 1 відбувається його обкочування по оброблюваній поверхні циліндрової втулки, яке здійснюється по деформівних елементах, розташованих між зовнішньою поверхнею обкатника і внутрішньою поверхнею втулки. Траєкторія руху локального деформівного елемента – гвинтова лінія. У кожен момент часу часу контактування внутрішньої поверхні втулки із ударним обкатником реалізується через незначну кількість кульок, розташованих вздовж твірних оброблюваної поверхні деталі. Наявність контактної взаємодії масивних ударного обкатника та оброблюваної втулки через незначну кількість деформівних тіл створює значні питомі контактні напруження у місцях контакту. Це спричинює пластично деформування та зміцнення поверхневого шару оброблюваної втулки.

Удосконалений технологічний маршрут механічного оброблення функціональної поверхні циліндрової втулки НБ 32.02.102-04 в діаметр 120Н10 мм складається із чорнового точіння, чистового точіння – попередня обробка для забезпечення необхідної точності IT10 та віброоброблення кульками діаметром 10 мм, віброоброблення кульками діаметром 8,5 мм, і модифікування поверхневого шару твердим сплавом – для досягнення регламентованих параметрів шорсткості та стану поверхневого шару для забезпечення зносостійкості в умовах гідроабразивного зношування.

На підставі рекомендацій і виробничого досвіду вибрано такі технологічні параметри ВВЗ: амплітуда коливань контейнера – $A=4-5$ мм (за умови осьового ходу ударного обкатника – $2-5$ мм). У даному випадку «корисний» робочий об'єм (заповнений проміжок між внутрішньою поверхнею втулки і зовнішньою поверхнею обкатника) дорівнює $0,75-0,85$ [12, 13].

Після кожного технологічного переходу вимірювали та опрацьовували параметри мікрорельєфу у середовищі Surface Plot Analyser [25].

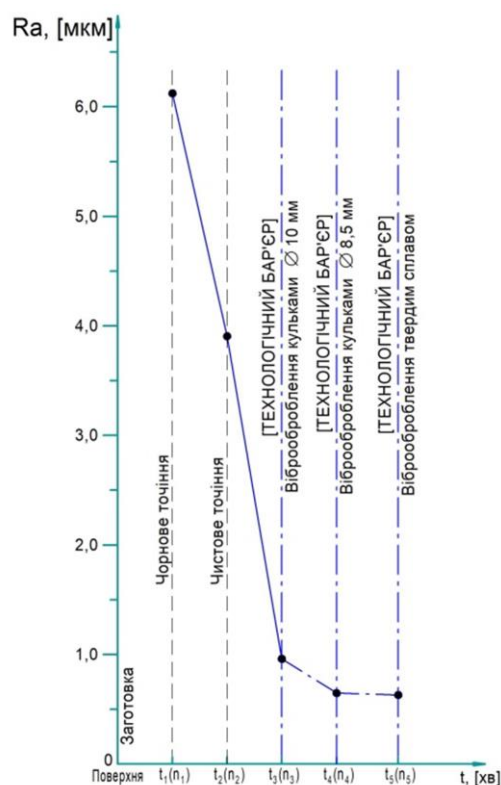
У рамках завдань наукових досліджень контролювали параметри шорсткості ДСТУ ISO 4287:2012.

В якості досліджуваних характеристик шорсткості визначено: її висотні параметри, зокрема, Ra – середньоарифметичне відхилення профілю, [мкм]; Rz – висоту нерівностей профілю по десяти точках, [мкм]; R_{max} – найбільшу висоту профілю шорсткості, [мкм]; Rq – середньоквадратичне відхилення профіля, [мкм]; Rp – висоту згладжування профіля шорсткості, [мкм]; її крокові параметри, зокрема, S – середній крок місцевих виступів профілю, [мкм]; S_m – середній крок нерівностей профілю по середній лінії, [мкм]; безрозмірний параметр, t_m – відносну опорну довжину профіля по середній лінії [12, 13].

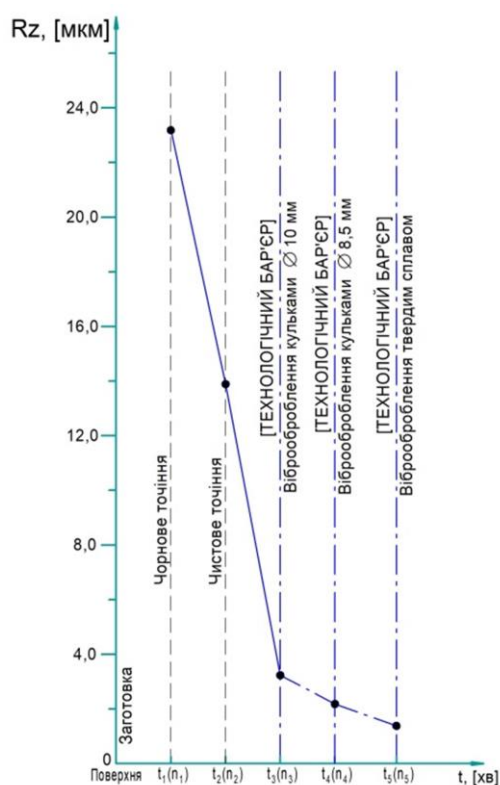
Динаміку зміни основних параметрів шорсткості наведено на рис. 6-9.

Аналіз побудованих графічних залежностей (рис. 6-9) свідчить, що після віброоброблення кульками діаметром 10 і 8,5 мм та подальшого модифікування твердим сплавом циліндрових втулок НБ 32.02.102-04 бурових pomp НБ-32 спостерігається стійка тенденція до зниження абсолютних значень висотних характеристик мікрорельєфу функціональної поверхні в діаметр 120Н10 мм.

Зокрема, параметр середньоарифметичного відхилення профілю Ra зменшується майже у десять разів – від 6,1245 мкм після чорнового точіння до 0,6314 мкм після завершальної обробки твердим сплавом. Аналогічна динаміка характерна і для параметра Rz , який знижується з 23,1865 до 1,3829 мкм, що відповідає зменшенню у 16,8 разів. Максимальна висота профілю R_{max} також істотно зменшується – з 28,2412 до 3,2514 мкм, тобто майже у дев'ять разів. Середньоквадратичне відхилення профілю Rq демонструє зниження з 7,3245 до 0,8345 мкм, що еквівалентно зменшенню у 8,79 разів, тоді як висота згладжування профілю Rp зменшується з 11,4523 до 1,2184 мкм (приблизно у 9,4 рази).

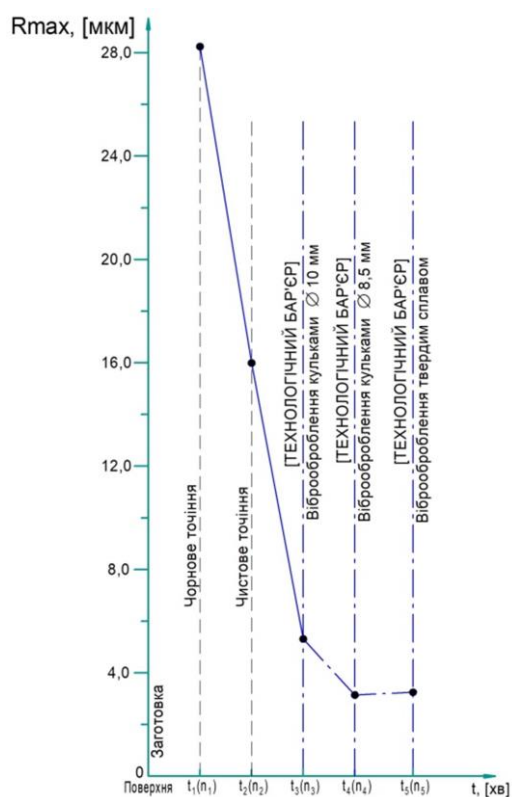


а)

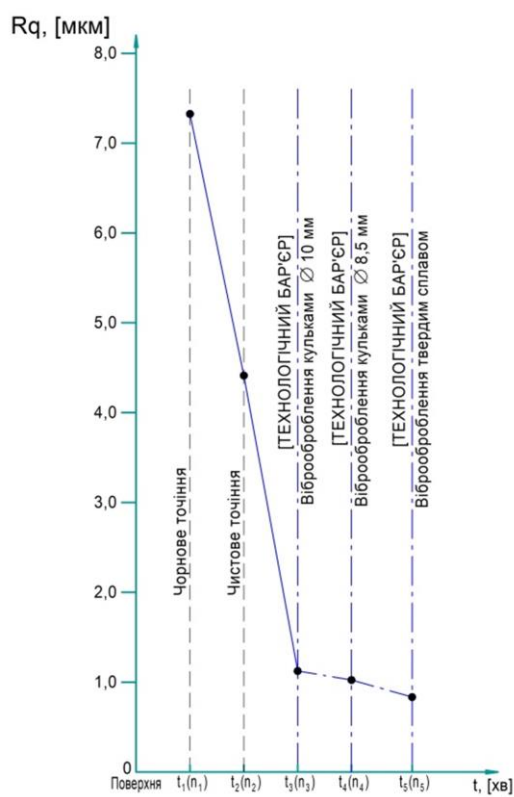


б)

Рисунок 6 – Динаміка зміни середньоарифметичного відхилення профілю Ra (а), висоти нерівностей профілю по десяти точках Rz (б) у поверхневому шарі заготовки втулки

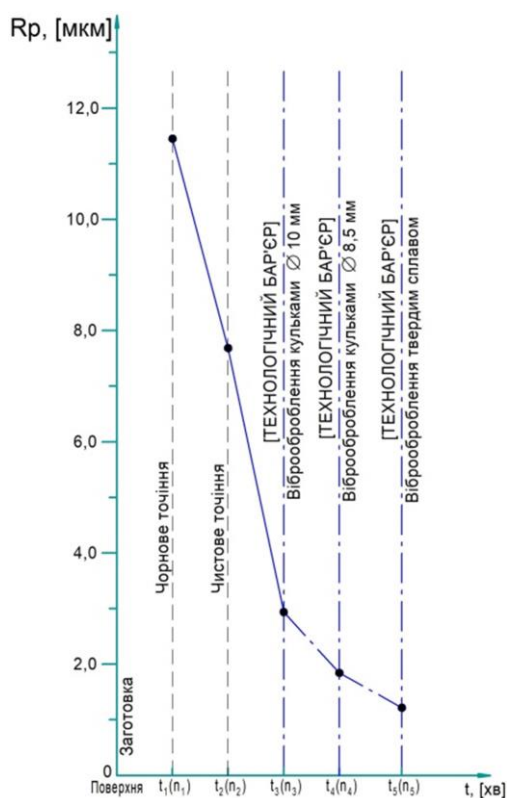


а)

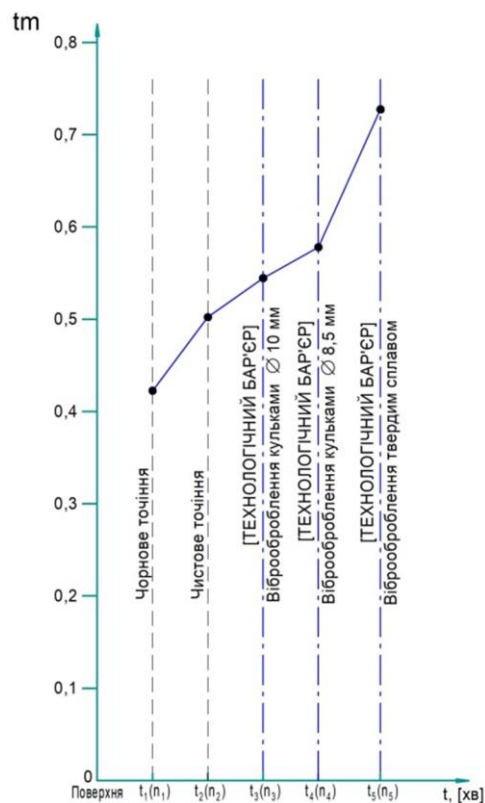


б)

Рисунок 7 – Динаміка зміни найбільшої висоти профілю шорсткості R_{max} (а), середньоквадратичного відхилення профіля Rq (б) у поверхневому шарі заготовки втулки

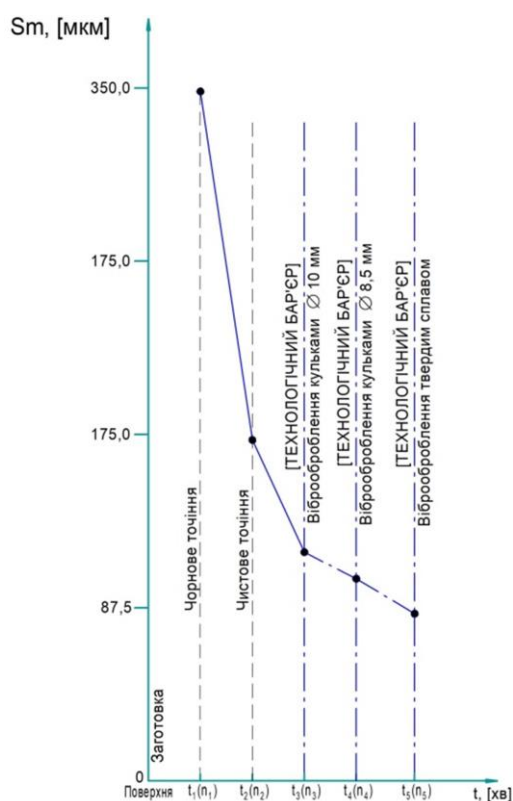


а)

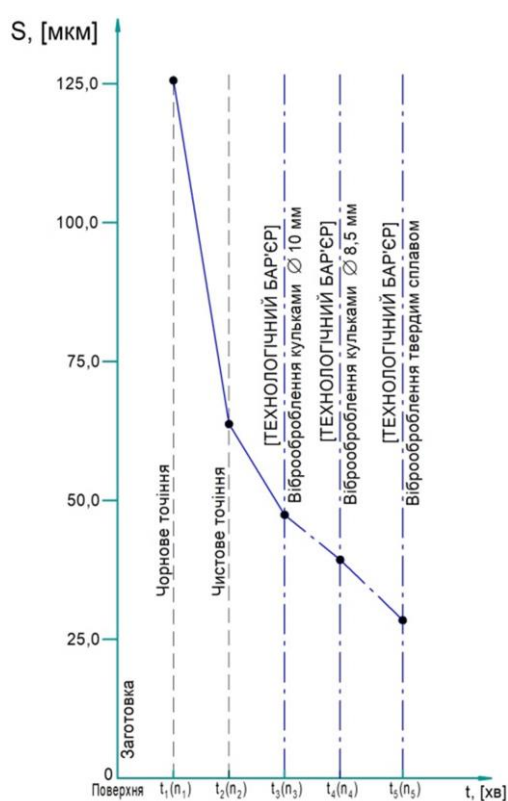


б)

Рисунок 8 – Динаміка зміни висоти згладжування профілю шорсткості R_p (а), відносної опорної довжини профілю по середній лінії t_m (б) у поверхневому шарі заготовки втулки



а)



б)

Рисунок 9 – Динаміка зміни середнього кроку нерівностей профілю по середній лінії S_m (а), середнього кроку місцевих виступів профілю S (б) у поверхневому шарі заготовки втулки

Аналогічна тенденції у динаміці змін спостерігається і для крокових параметрів шорсткості: абсолютне значення середнього кроку локальних виступів профілю S зменшується більше, ніж у чотири рази – з 125,6354 до 28,4687 мкм, а середнього кроку нерівностей по середній лінії S_m у 4,12 разів – з 348,3326 до 84,4655 мкм. Водночас величина відносної опорної довжини профілю t_m , навпаки, зростає з 0,4226 до 0,7276, тобто приблизно у 1,7 разів, що свідчить про формування стійкої опорної поверхні після завершального етапу оброблення.

Слід зазначити, що на роботоздатність циліндрових втулок бурових pomp також впливає зміщення центра крещкопфа у системі «крещкопф – напрямні» за рахунок зносу елементів пари тертя чи геометричних похибок виготовлення/складання [26].

Висновки

Складність розв'язання конструкторсько-технологічних завдань і забезпечення регламентованих параметрів якості циліндрових втулок бурових pomp відповідно до вимог сталого виробництва і концепції Індустрії 4.0/5.0 традиційними методами фінішної лезової та абразивної обробки вимагає пошуку альтернативних технологічних рішень, зокрема із застосування методів поверхневого пластичного деформування.

Розроблений у Національному університеті «Львівська політехніка» метод вібраційно-відцентрового зміцнення забезпечує покращання параметрів мікрорельєфу внутрішньої функціональної поверхні, що, у свою чергу,

підвищує основні експлуатаційні характеристики: зносостійкість, втомну міцність тощо.

Адаптована під машини об'ємного вібраційного оброблення технологічна система вібраційно-відцентрового зміцнення забезпечує покращання висотних (у 8,69-16,77 разів) і крокових (у 1,97-4,12 разів) параметрів шорсткості функціональної внутрішньої поверхні циліндрових втулок бурових pomp НБ 32.02.102-04, а також зростання в 1,7 разів величини відносної опорної довжини профілю t_m .

Отримала подальший розвиток методологія технологічного успадковування параметрів виробів під час розроблення функціонально-орієнтованих технологій.

Наступним етапом дослідження є аналіз елементів технологічної системи вібраційно-відцентрового зміцнення методами інженерії надійності, аналіз процесу викінчувального оброблення методами імітаційно-реологічного моделювання та узгодження результатів теоретико-експериментальних досліджень і комп'ютерного моделювання фінішних (викінчувальних) технологічних операцій формотворення функціональних поверхонь відповідальних деталей нафтогазовидобувного обладнання.

Подяки

Відсутні.

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел

1. Ji X., Abdoli S. Challenges and Opportunities in Product Life Cycle Management in the Context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*. 2023. Vol. 119. P. 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.04.002>
2. Barwasser A., Lentes J., Riedel O., Zimmermann N., Dangelmaier M., Zhang J. Method for the development of Software-Defined Manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*. 2023. Vol. 61(19). P. 6467–6484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2129501>
3. Rucka M. Special Issue: “Non-Destructive Testing of Structures”. *Materials*. 2020. Vol. 13(21). 4996. <https://doi.org/10.3390/ma13214996>
4. Liao Z., la Monaca A., Murray J., Speidel A., Ushmaev D., Clare A., Axinte D., M'Saoubi R. Surface integrity in metal machining - Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 162. 103687. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>
5. Demminger C., Mozgova I., Quirico M., Uhlich F., Denkena B., Lachmayer R., Nyhuis P. The concept of technical inheritance in operation: analysis of the information flow in the life cycle of smart product. *Procedia Technol.* 2016. Vol. 26. P. 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.012>
6. Zmarzły P. Analysis of Technological Heredity in the Production of Rolling Bearing Rings Made of AISI 52100 Steel Based on Waviness Measurements. *Materials*. 2022. Vol. 15(11). 3959. <https://doi.org/10.3390/ma15113959>

7. Psarommatis F., Azamfireic V. Zero Defect Manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. *Journal of Manufacturing Systems*. 2024. Vol. 77. P. 764–779. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.022>
8. Wanga W., Liua W., Fanga Yu., Zhengb Y., Linc C., Jiangd Y., Liuc D. Reliability analysis of subway sliding plug doors based on improved FMECA and Weibull distribution. *Eksploracja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*. 2024. Vol. 26(2). 178275. <https://doi.org/10.17531/ein/178275>
9. Копей В. Б., Копей Б. В. Проектування та міцність колон і з'єднань насосних штанг з полімерних композитів: монографія. Серія «Нафтогазове обладнання»: у 12 т. За заг. ред. Б. В. Копея. Т. 12. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 314 с.
10. Копей Б. В., Максимук О. В., Щербина Н. М., Розгонюк В. В., Копей В. Б. Насосні штанги і труби з полімерних композитів: проектування, розрахунок, випробування. Львів: ППІММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2003. 352 с.
11. Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Дослідження якості поверхні віброзмцнених деталей машин. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні й приладобудуванні. 2013. № 772. С. 196–201. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/handle/123456789/2650>
12. Kusyj J., Kuk A. A centrifugal vibration strengthening method devised to improve technological reliability of machine parts. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 1(7). P. 41–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336>
13. Kusyi Y., Kuk A., Klymash I., Kusen N., Vriukalo V. Technological Inheritability of Parameters of Surface Engineering of Products After Vibrational-Centrifugal Hardening. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. Vol. 1070. P. 198–209. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66271-3_22
14. Stupnytsky V., Xianning S. Comprehensive analysis of tribological factor influence on stress-strain and thermal state of workpiece during titanium alloys machining. *Archive of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 68(2). P. 227–248. <https://doi.org/10.24425/ame.2021.137049>
15. Kusyi Y. M., Stupnytsky V. V., Kuk A. M., Topilnytsky V. G. Development of the fundamental diagram of the formation and transformation of the products properties during their manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1781(1). 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012027>
16. Kusyi Ya. M., Onysko O. R., Kuk A. M., Kostyuk O. S., Solohub B. V. Development of the structure and methodological support of the system for analysis of the details shaping using the technological inheritability of their quality parameters. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2540(1). 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2540/1/012026>
17. Giampieri A., Ling-Chin J., Ma Z., Smallbone A., Roskilly A. P. A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy*. 2020. Vol. 261. 114074. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114074>
18. Wolniak P., Mozgova I., Lachmayer R. Concept for the Implementation of a Scaling Strategy into the Paradigm of Technical Inheritance. *Procedia Manuf.* 2018. Vol. 24. P. 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.012>
19. Folder U. Technological Heredity and Identification of Technological Processes. *Polym. Sci.-Ser. D*. 2015. Vol. 8. P. 219–222. <https://doi.org/10.1134/S199542121503003X>
20. Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strogan O. I., Kuk A. M., Samsin I. L. Improving reliability of drill pipe by strengthening of thread connections of its elements. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 4. P. 22–29. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/8>
21. Aftanaziv I., Shevchuk L., Samsin I., Strutynska L., Strogan O. Development of a technology for the surface strengthening of barrel channels in the large-caliber artillery guns. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3(1-99). P. 11–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167134>
22. Haken H., Portugali J. Information and self-organization II: Steady state and phase transition. *Entropy*. 2021. Vol. 23(6). 707. <https://doi.org/10.3390/e23060707>
23. Haken H. The brain as a Synergetic and physical system. *Understanding Complex Systems*. 2016. Part F1. P. 147–163. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27635-9_10

24. Kusyi Y., Ivanov V., Korniy S., Datsko B., Hatala M. Non-destructive evaluation of quality parameters of Al-Si workpieces after milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16956-z>

25. Широков В. В., Арендар Л. А., Ковальчик Ю. І., Василів Х. Б., Василів О. М. Комп'ютерний обробіток профілограм фрикційних поверхонь. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2005. № 1. С. 93–96. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/157294>

26. Величкович А. С., Шовкопляс М. В., Витвицький В. С., Роп'як Л. Я. Аналіз напруженого стану штока поршневого насоса із функціональним покриттям при геометричних дефектах системи «крейцкопф – напрямні». *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2025. № 1(58). С. 15–24. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2025-1\(58\)-15-24](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2025-1(58)-15-24)

References

1. Ji, X., & Abdoli, S. (2023). Challenges and opportunities in product life cycle management in the context of Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 119, 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.04.002>

2. Barwasser, A., Lentjes, J., Riedel, O., Zimmermann, N., Dangelmaier, M., & Zhang, J. (2023). Method for the development of Software-Defined Manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*, 61(19), 6467–6484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2129501>

3. Rucka, M. (2020). Special issue: “Non-destructive testing of structures”. *Materials*, 13(21), 4996. <https://doi.org/10.3390/ma13214996>

4. Liao, Z., la Monaca, A., Murray, J., Speidel, A., Ushmaev, D., Clare, A., Axinte, D., & M'Saoubi, R. (2021). Surface integrity in metal machining - Part I: Fundamentals of surface characteristics and formation mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 162, 103687. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103687>

5. Demminger, C., Mozgova, I., Quirico, M., Uhlich, F., Denkena, B., Lachmayer, R., & Nyhuis, P. (2016). The concept of technical inheritance in operation: Analysis of the information flow in the life cycle of smart product. *Procedia Technology*, 26, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.012>

6. Zmarzły, P. (2022). Analysis of technological heredity in the production of rolling bearing rings made of AISI 52100 steel based on waviness measurements. *Materials*, 15(11), 3959. <https://doi.org/10.3390/ma15113959>

7. Psarommatis, F., & Azamfireic, V. (2024). Zero defect manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 764–779. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.022>

8. Wanga, W., Liua, W., Fanga, Y., Zhengb, Y., Linc, C., Jiangd, Y., & Liuc, D. (2024). Reliability analysis of subway sliding plug doors based on improved FMECA and Weibull distribution. *Eksplotacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 26(2), 178275. <https://doi.org/10.17531/ein/178275>

9. Kopei, V. B., & Kopei, B. V. (2021). *Proektuvannia ta mitsnist kolon i z'iednan nasosnykh shtanh z polimernykh kompozytiv: Monohrafiia. Seriiia «Naftohazove obladdnannia»: u 12 t.* [Design and strength of sucker rod strings and joints made of polymer composites: Monograph. Series "Oil and Gas Equipment": in 12 vols.] (Vol. 12; B. V. Kopei, Ed.). IFNTUNG. [in Ukrainian]

10. Kopei, B. V., Maksymuk, O. V., Shcherbyna, N. M., Rozghoniuk, V. V., & Kopei, V. B. (2003). *Nasosni shtanhy i truby z polimernykh kompozytiv: proektuvannia, rozrakhunok, vyprobuvannia* [Sucker rods and pipes made of polymer composites: design, calculation, testing]. IPPMM of NAS of Ukraine. [in Ukrainian]

11. Kusyi, Ya. M., & Topilnytskyi, V. H. (2013). *Doslidzhennia yakosti poverkhni vibrozmitsnenykh detalei mashyn* [Investigation of the surface quality of vibration-strengthened machine parts]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Seriiia: Optymizatsiia vyrobnychkykh protsesiv i tekhnichnyi kontrol u mashynobuduvanni i pryladobuduvanni*, 772, 196–201. [in Ukrainian]

12. Kusyj, J., & Kuk, A. (2015). A centrifugal vibration strengthening method devised to improve technological reliability of machine parts. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(7), 41–51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336>

13. Kusyi, Y., Kuk, A., Klymash, I., Kusen, N., & Vriukalo, V. (2024). Technological inheritability of parameters of surface engineering of products after vibrational-centrifugal hardening. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 1070, 198–209. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66271-3_22

14. Stupnytskyi, V., & Xianning, S. (2021). Comprehensive analysis of tribological factor influence on stress-strain and thermal state of workpiece during titanium alloys machining. *Archive of Mechanical Engineering*, 68(2), 227–248. <https://doi.org/10.24425/ame.2021.137049>
15. Kusi, Y. M., Stupnytskyi, V. V., Kuk, A. M., & Topilnytskyi, V. G. (2021). Development of the fundamental diagram of the formation and transformation of the products properties during their manufacturing. *Journal of Physics: Conference Series*, 1781(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1781/1/012027>
16. Kusi, Ya. M., Onysko, O. R., Kuk, A. M., Kostiuk, O. S., & Solohub, B. V. (2023). Development of the structure and methodological support of the system for analysis of the details shaping using the technological inheritability of their quality parameters. *Journal of Physics: Conference Series*, 2540(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2540/1/012026>
17. Giampieri, A., Ling-Chin, J., Ma, Z., Smallbone, A., & Roskilly, A. P. (2020). A review of the current automotive manufacturing practice from an energy perspective. *Applied Energy*, 261, 114074. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114074>
18. Wolniak, P., Mozgova, I., & Lachmayer, R. (2018). Concept for the implementation of a scaling strategy into the paradigm of technical inheritance. *Procedia Manufacturing*, 24, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.012>
19. Folder, U. (2015). Technological heredity and identification of technological processes. *Polymer Science, Series D*, 8, 219–222. <https://doi.org/10.1134/S199542121503003X>
20. Aftanaziv, I. S., Shevchuk, L. I., Strohan, O. I., Kuk, A. M., & Samsin, I. L. (2019). Improving reliability of drill pipe by strengthening of thread connections of its elements. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 22–29. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-4/8>
21. Aftanaziv, I., Shevchuk, L., Samsin, I., Strutynska, L., & Strogan, O. (2019). Development of a technology for the surface strengthening of barrel channels in the large-caliber artillery guns. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1-99), 11–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.167134>
22. Haken, H., & Portugali, J. (2021). Information and self-organization II: Steady state and phase transition. *Entropy*, 23(6), 707. <https://doi.org/10.3390/e23060707>
23. Haken, H. (2016). The brain as a synergetic and physical system. *Understanding Complex Systems*, 147–163. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27635-9_10
24. Kusi, Y., Ivanov, V., Korniy, S., Datsko, B., & Hatala, M. (2025). Non-destructive evaluation of quality parameters of Al-Si workpieces after milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16956-z>
25. Shyrokov, V. V., Arendar, L. A., Kovalchuk, Yu. I., Vasylyv, Kh. B., & Vasylyv, O. M. (2005). Kompiuternyi obrobitor profilohram fryktsiinykh poverkhon [Computer processing of profilograms of friction surfaces]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, (1), 93–96. [in Ukrainian]
26. Velychkovich, A. S., Shovkoplias, M. V., Vytvytskyi, V. S., & Ropyak, L. Ya. (2025). Analiz napruzhеного стану штовка поршневого насоса із функціональним покриттям при геометричних дефектах системи «крейцкопф – напрямні» [Stress state analysis of a piston pump rod with a functional coating under geometric defects of the "crosshead – guides" system]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*, 1(58), 15–24. [https://doi.org/10.31471/1993-9965-2025-1\(58\)-15-24](https://doi.org/10.31471/1993-9965-2025-1(58)-15-24) [in Ukrainian]

TECHNOLOGICAL INHERITANCE OF PARAMETERS IN THE MACHINING PROCESS OF CYLINDRICAL BUSHINGS FOR DRILLING PUMPS

Kusyi Ya. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
Lviv Polytechnic National University
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5741-486X>
e-mail: yaroslav.m.kusyi@lpnu.ua

Sylenkyi R. V.

Master
Lviv Polytechnic National University
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0008-1117-5865>
e-mail: roman.sylenkyi.mmptm.2024@lpnu.ua

Brukhal P. R.

Postgraduate Student
Lviv Polytechnic National University
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-7649-3094>
e-mail: Pavlo.R.Brukhal@lpnu.ua

Kusen N. A.

Assistant Professor
Lviv Polytechnic National University
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-8782-3992>
e-mail: Nazarii.A.Kusen@lpnu.ua

Konyukh O. I.

Postgraduate Student
Lviv Polytechnic National University
12, S. Bandera Str., Lviv, 79013, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0004-6670-4198>
e-mail: oleg.konyukh.asp.2025@lpnu.ua

Abstract. A shift in priorities when designing modern manufacturing technologies for critical oil and gas production components, specifically cylindrical bushings for drilling pumps, has rendered traditional finishing methods (machining or abrasive processing) less effective. The focus has moved from simply ensuring regulated accuracy and roughness parameters to achieving the required operational characteristics and reliability indicators. This necessitates a transition to alternative surface layer formation methods, among which pressure-based surface plastic deformation (SPD) processes hold a special place. Specialized SPD technological systems for vibrocentrifugal hardening, developed at Lviv Polytechnic National University for the final stages of part forming, can improve microrelief parameters, increase surface microhardness, and induce compressive residual stresses in the surface layer. This is achievable provided the specified machining accuracy is met in preceding technological operations. Adapted for bulk vibratory processing machines, this vibrocentrifugal hardening system, in accordance with the principle of technological parameter inheritance, significantly improves both height (reduced by 8.69–16.77 times) and step (reduced by 1.97–4.12 times) parameters of the functional inner surface roughness of cylindrical bushings NB 32.02.102-04. It simultaneously increases the relative bearing length of the profile (t_m) by a factor of 1.7. Further research will focus on predicting the behavior of vibrocentrifugal hardening system components using reliability engineering methods, applying simulation-rheological modeling to analyze the finishing process, and analyzing the results of theoretical-experimental studies and computer modeling of the forming operations for functional surfaces of critical oil and gas production equipment parts.

Keywords: quality; technological process; surface plastic deformation; vibrocentrifugal hardening.