

ВПЛИВ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОГО ЗМІЩЕННЯ НА ПАРАМЕТРИ БЕЗВІДМОВНОСТІ ВТУЛОК БУРОВИХ ПОМП

Кусий Я. М., Кук А. М., Топільницький В. Г.

1. Вступ

У сучасному машинобудуванні зростають вимоги до надійності виробів, що обумовлено складністю сучасної техніки, зростанням навантажень під час роботи систем і елементів, умовами їх експлуатації, підвищенням вимог до якості виробів, частковою або повною автоматизацією процесів виробництва [1–4]. Від надійності в значній мірі залежать експлуатаційні характеристики: зносостійкість, втомна міцність, корозійна стійкість тощо, а також безпека, економічність, ресурс роботи та конкурентоздатність продукції [1, 5, 6].

На сучасному етапі розвитку машинобудування із ускладненням конструкцій, технологій виготовлення та складання машин, підвищенням відповідальності вирішуваних ними завдань проблема забезпечення надійності стає актуальнішою. Успішне розв'язання цієї проблеми залежить від якості організаційного, технічного, інформаційного та методологічного забезпечення (рис. 1) [6].

Організаційне забезпечення охоплює планування та реалізацію робіт щодо параметрів надійності, організацію відповідних служб, економічно-правові та адміністративні відношення між замовником, розробником і виробником продукції.

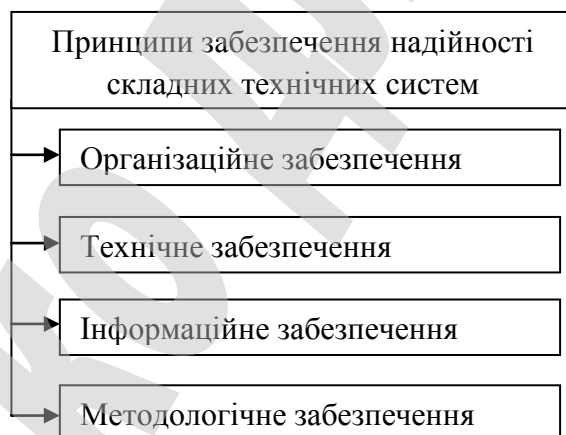


Рис. 1. Принципи забезпечення надійності складних технічних систем

Технічне забезпечення характеризується оснащенням галузі ПЕОМ (персональними електронно-обчислювальними машинами), прикладним програмним забезпеченням, експериментальною та виробничою базою, рівнем технології та метрології.

Інформаційне забезпечення – це засоби та способи збирання, накопичення, опрацювання та використання даних про процеси розроблення й експлуатації систем, результатів аналізу відмов і дефектів. Окрім цього аналізуються дані про зміни документації, порушення стабільності виробництва, недотримання термінів й інших факторів відхилення від запланованого ходу розробки та застосування техніки.

Методологічне забезпечення містить в собі теоретичну базу та інженерні методи аналізу надійності систем на різноманітних стадіях життєвого циклу машини, а також методи та алгоритми, що використовують під час реалізації та аналізі результатів впровадження програм забезпечення надійності.

Забезпечення надійності, як одна з основних задач розроблення та застосування складних технічних систем, реалізується в рамках організаційної структури машинобудування. Тому одним з напрямків щодо забезпечення надійності, зокрема відповідальних деталей бурового інструменту та його технологічного оснащення, полягає в удосконаленні самої організаційної структури, а також в розробленні та реалізації додаткових заходів. Ці заходи будуть стимулювати забезпечення надійності та підвищення рівня параметрів організаційної структури.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження – викінчувально-зміцнювальна технологічна операція та реалізуюче її устаткування й оснащення для забезпечення показників надійності втулок бурових pomp.

Техніко-економічні показники бурових робіт залежать від ефективності бурових інструментів. Однак довговічність бурового інструменту, зокрема шарошкового типу, в значній мірі залежить від своєчасного нагнітання промивної рідини (води, глинястого розчину) в свердловину при геологорозвідувальному та структурно-пошуковому бурінні на нафту і газ. Це забезпечується буровими помпами (НБ32, НБ50 тощо) [7]. До найнавантажениших частин помпи, зокрема НБ32, відносять деталі гідравлічної частини: поршні, циліндрові втулки, штоки поршнів і повзунів, клапани і сідла клапанів. Забезпечення надійності та підвищення ресурсу відповідальних деталей pomp, зокрема циліндрових втулок, технологічними методами підвищить конкурентоздатність та ефективність бурового обладнання.

Сучасна технологія виготовлення будь-яких деталей ставить високі вимоги як до продуктивності використовуваного обладнання, так і до точності та якості оброблюваних поверхонь [1]. У той же час, досвід експлуатації машин, приладів, апаратів переконливо свідчить, що надійність та довговічність залежать від характеру контактування спряжених деталей одна з одною або з рідким, газовим та іншим середовищем. Це визначає стан поверхневого шару контактних деталей [1, 2, 5]. Крім того, багаточисельними дослідженнями встановлено, що якість поверхні деталей машин суттєво визначає зносостійкість, міцність, корозійна стійкість та інші експлуатаційні властивості деталей машин.

Формування параметрів якості, експлуатаційних характеристик і показників надійності відбувається на фінішних і викінчувально-зміцнювальних операціях технологічних процесів виготовлення виробів. Методи механічного оброблення, що реалізують фінішні технологічні операції, дозволяють керувати якістю поверхневого шару лише у вузьких межах, при цьому резерви міцності матеріалів залишаються невикористаними [1]. Для реалізації викінчувально-зміцнювальних операцій технологічних процесів застосовують хіміко-термічні методи оброблення та нанесення покриттів і

методи обробки тиском (поверхневого пластичного деформування). При використанні хіміко-термічних методів оброблення та нанесення покриттів необхідне залучення працівників високої кваліфікації для обслуговування специфічного устаткування. Та й широке промислове використання хіміко-термічних методів гальмується надзвичайно високою енергомісткістю процесу.

Ефективним технологічним методом реалізації викінчувально-зміцнювальних операцій технологічних процесів з метою забезпечення показників надійності виробів машинобудування є поверхнєве зміцнення за допомогою різноманітних способів поверхневого пластичного деформування, зокрема з використанням вібрацій.

Для технологічного забезпечення показників якості поверхні деталей машин і механізмів розроблений метод вібраційно-відцентрового зміцнення [1, 2]. Найпоширеніше у машинобудівній практиці технологічне устаткування й оснащення для вібраційно-відцентрових пристроїв з дебалансним і електромагнітним приводом має свої переваги й недоліки, що обмежує область їх використання. Не завжди ефективними були спроби адаптувати вібромашини об'ємного оброблення для вібраційно-відцентрового зміцнення виробів.

Тому проблема надійності виробів сучасного машинобудування, зокрема циліндрових втулок бурових pomp, яка проникає у сфери виробництва та експлуатації машин, вимагає системності у прийнятті технологічних рішень. А також вимагає розроблення нових і вдосконалення існуючих технологічних процесів виготовлення виробів [1, 2, 6, 8].

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – аналіз впливу методу вібраційно-відцентрового зміцнення та реалізуючого його технологічного оснащення на показники безвідмовності циліндрових втулок бурових pomp на викінчувально-зміцнювальній операції технологічного процесу виготовлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Адаптувати метод об'ємного вібраційного оброблення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндрових втулок бурової помпи НБ32 та спроектувати технологічне оснащення для його реалізації.

2. Експериментально дослідити та провести натурні випробування стосовно впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри безвідмовності циліндрових втулок.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Особливістю проблеми надійності є її зв'язок зі всіма етапами життєвого циклу машини (рис. 2), починаючи з етапу формування й обґрунтування ідеї її створення, і закінчуючи прийняттям рішення про списання (утилізацію) виробу чи механізму. При розрахунку та проектуванні параметри надійності закладаються у проект, при виготовленні – забезпечуються, при експлуатації – реалізуються [8–12].

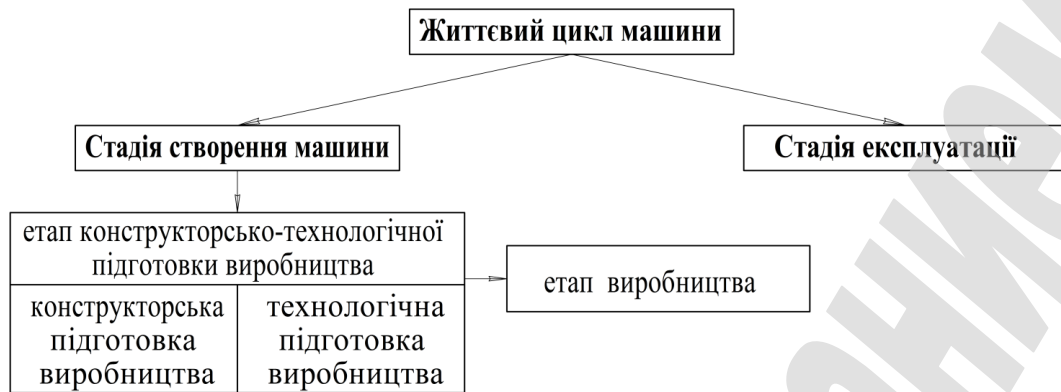


Рис. 2. Життєвий цикл машини

На даний час в теорії надійності отримані фундаментальні результати в двох основних напрямках досліджень: ймовірно-статистичному (для технічних систем зі складною структурою і складними зв'язками між елементами) і детермінованому, пов'язаному з дослідженням фізики відмов. В межах першого напрямку розроблені математичні методи оцінки надійності, статистичного оброблення результатів випробувань і експлуатації, розроблення високонадійних структур технічних систем, планування випробувань, контролю та прогнозування надійності. В межах другого напрямку вивчені механізми процесів, які здійснюють основний вплив на надійність, розроблені методи розрахунку на міцність і зношування, розробляються нові технологічні методи підвищення надійності матеріалів, елементів та об'єктів загалом. В даний час спостерігається процес злиття цих двох напрямків, при цьому методи та результат із однієї області використовуються в іншій, і на цій основі виникає єдина загальна наука про надійність технічних об'єктів [8–12].

Сучасна теорія надійності базується на фундаментальних законах математики і природничих наук [8, 9, 13–16]. Експлуатаційна надійність і працездатність машин і обладнання бурових комплексів відносять до базових критеріїв, що забезпечують рентабельність сучасного бурового виробництва [7].

Технологічний процес буріння здійснюється у тісному взаємозв'язку всіх комплексів обладнання різноманітного функціонального призначення, при якому відмова або несправність одного вузла або елемента приводить до виходу з ладу об'єкта системи або усього комплексу загалом. При цьому перебої в процесі буріння часто супроводжуються виникненням аварій, що ускладнюють технологічний простій організацією аварійно-ліквідаційних робіт [7].

Технологічний процес виготовлення, складання та контролю виробу повинен з мінімальними витратами часу та засобів забезпечити необхідний рівень якості продукції та показники надійності [1, 2, 17–23]. Однак ці дві сторони нерідко вступають в протиріччя: підвищення продуктивності супроводжується зниженням якості, і, навпаки, вища якість досягається при нижчій продуктивності. Однак нерідко ігноруються характеристики надійності, які проявляються під час експлуатації виробів (рис. 2, 3), хоча саме безвідмовність і довговічність забезпечують бажаний ресурс роботи деталей машин, зокрема нафто- і газовидобувного обладнання [1, 2, 7].

Безпосередньо встановити зв'язок між відправними, поточними і вихідними параметрами технологічного процесу та показниками надійності надскладно (рис. 3) [8, 9]. Показники надійності пов'язані з експлуатаційними властивостями виробів – зносостійкістю, корозійною стійкістю, втомною міцністю, теплостійкістю тощо, а параметри технологічного процесу з точністю оброблення та характеристиками мікрорельєфу поверхневого шару. Тому на практиці, як правило, аналізують та досліджують основні параметри якості поверхні у взаємозв'язку з експлуатаційними властивостями машин і приладів, які вони визначають [1–3, 5, 8, 14].

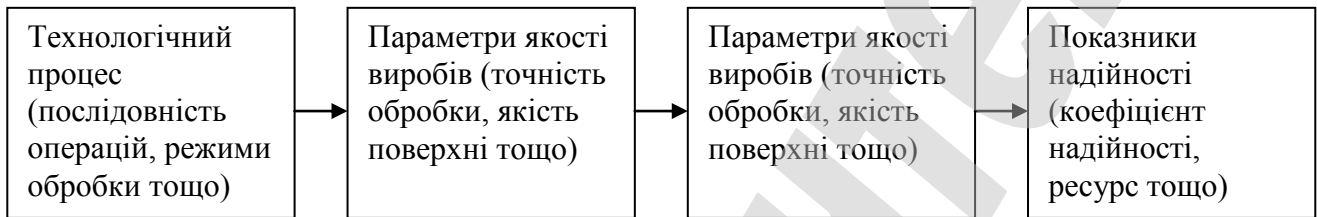


Рис. 3. Схема залежності показників надійності від рівня технологічного процесу [8]

Стосовно виробів машинобудування, зокрема деталей бурового інструменту, розрізняють потенційну надійність, що досягається в процесі його розроблення та конструювання, і фактичну надійність, яка забезпечується в процесі виготовлення залежно від конструкторсько-технологічної підготовки виробництва [7].

Потенційна надійність об'єкту Π_0 визначає його максимально досяжне значення надійності [7]:

$$\Pi_0 = \Pi_{\text{констр.}} \cdot \Pi_{\text{елем.}} \cdot \Pi_{\text{вир.}}, \quad (1)$$

де $\Pi_{\text{констр.}}$, $\Pi_{\text{елем.}}$, $\Pi_{\text{вир.}}$ – потенційні, відповідно, надійність конструкції, комплектуючих елементів і виробничих процесів.

Потенційна надійність конструкції $\Pi_{\text{констр.}}$ визначається як ймовірність того, що обумовлені в нормативній документації технічні вимоги бурового обладнання залишатимуться в межах заданих параметрів, якщо не відбудеться раптова відмова.

Потенційна надійність комплектуючих елементів $\Pi_{\text{елем.}}$ визначається як ймовірність того, що елементи будуть працювати нормально протягом визначеного часу при заданих силових режимах і експлуатаційних умовах:

$$\Pi_{\text{елем.}} = k_i \cdot k_y \cdot k_o, \quad (2)$$

де k_i – коефіцієнт, що враховує інтенсивність відмов елементів даного типу за визначений проміжок часу; k_y – коефіцієнт, що враховує експлуатаційні умови (температура, вологість тощо); k_o – коефіцієнт, що характеризує тип обладнання (силове, підймальне тощо).

Потенційна надійність виробничих процесів $P_{\text{вир.}}$ визначається як ймовірність того, що окремі технологічні операції завершаються без допустимих дефектів.

В реальних експлуатаційних умовах розрив між потенційною та практичною надійністю є відчутним з огляду на приховані та явні дефекти (40–85 % від загальної кількості). Ці дефекти закладені на стадії створення машини (рис. 3), що спричинюють відмови на стадії експлуатації [7, 8, 14].

Технологові зазвичай важко подати вагоме обґрунтування того або іншого заходу, пов'язаного з підвищенням надійності виробу, оскільки його результати проявляються лише через тривалий проміжок часу і не у сфері діяльності даного підприємства. В той же час вся організація виробництва даного виробу, використовувани технологічні процеси та методи контролю мають вирішальний вплив на показники надійності. Встановлено [1, 2, 9, 17–23], що 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.

Одним з основних складових надійності є безвідмовність – здатність виробу безперервно зберігати робоздатність протягом деякого періоду або напрацювання, основними параметрами якої стосовно втулок бурових помп є [6, 7]:

- ймовірність безвідмовної роботи (коефіцієнт надійності) $P(t)$;
- середнє напрацювання до відмови $T_{\text{сер.}}$;
- середнє напрацювання на відмову T_0 ;
- параметр потоку відмов $\alpha(t)$;
- інтенсивність відмов $\lambda(t)$;
- ймовірність відмови визначеного виду q_0 .

Проблема надійності у сучасному машинобудуванні – комплексна. Вона проникає у сфери виробництва та експлуатації машин, для її вирішення притягуються різні галузі знань, вона вимагає ухвалення нових організаційно-технічних рішень [8].

Тому використання теоретичних та практичних основ теорії надійності для підвищення ресурсу деталей типу «гільза», «циліндр» нафтогазовидобувного обладнання та реалізація ефективних фінішних і викінчувально-зміцнювальних операцій технологічних процесів їх виготовлення сприятиме розробленню ефективних конструкцій бурового обладнання.

5. Методи досліджень

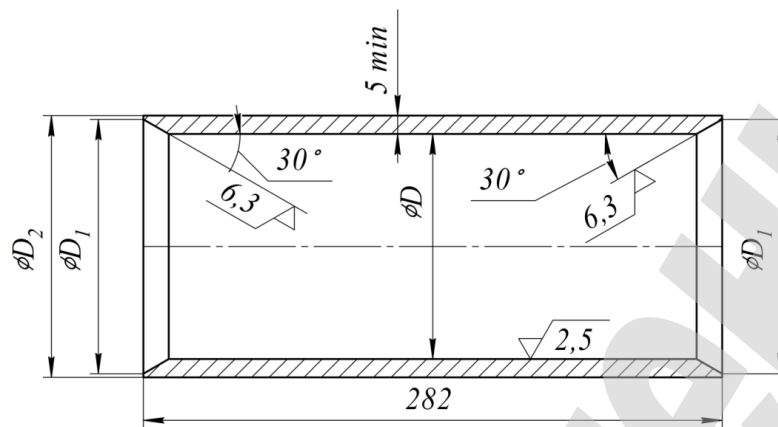
5.1. Матеріали та експериментальні зразки

З огляду на те, що більшість деталей типу «циліндр», «втулка» нафтогазовидобувного обладнання виготовляють з конструкційних сталей, для проведення експериментальних досліджень використали дослідні зразки втулок з двох матеріалів:

- сталі 70 ГОСТ 1050-88 (згідно ТУ);
- сталі 20 (як альтернативний варіант).

Креслення дослідного зразка наведено на рис. 4.

$\sqrt{Rz40}$ (✓)



Позначення	D , мм	D_1 , мм	$D_{2\min}$, мм
НБ 32.02.102-02	$100^{+0,4}$	110	110
НБ 32.02.102-02	$110^{+0,4}$	120	120

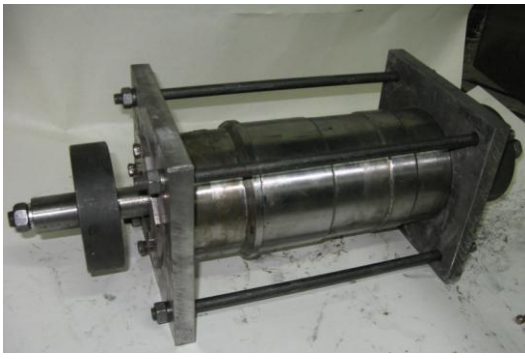
Рис. 4. Креслення дослідного зразка

5.2. Технологічне обладнання та оснащення для реалізації вібраційно-відцентрового зміцнення деталей типу «втулка»

Технологічні можливості, область використання та класифікаційні ознаки методу вібраційно-відцентрового зміцнення деталей машин типу «втулка» описано в [2].

Універсальність вібраційно-відцентрового зміцнення дозволяє використовувати для своєї реалізації спорядження інших методів вібраційно-відцентрового зміцнення. У Національному університеті «Львівська політехніка» (Україна) було здійснено перші спроби адаптації обладнання об'ємного вібраційного оброблення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних виробів, зокрема циліндрових втулок бурової помпи НБ32. Окрім цього, спроектовано технологічне оснащення для його реалізації. Технологічне оснащення (рис. 5) складається з обкатника, зовнішня поверхня якого армована поліуретаном, кришок та шпилькових з'єднань, з допомогою яких обкатник встановлюють в отворі деталі та закривають об'єм між ними, заповнений деформівними тілами (кульками).

На рис. 6 зображено принципову схему вібраційно-відцентрового зміцнювального пристрою із дебалансним приводом для оброблення внутрішньої поверхні деталей типу «втулка». Обертний рух передається корпусам віброзбудників 6 від електродвигунів 3 через муфти 5. Вали обох електродвигунів 3 обертаються синхронно та синфазно в одному напрямку. Від механічних пошкоджень і зовнішнього впливу віброзбудники захищені кожухами 8.



a



б

Рис. 5. Технологічне оснащення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних виробів на вібр машині об'ємного оброблення: *a* – технологічне оснащення із втулкою у зборі; *б* – технологічне оснащення у вібр машині із втулкою у зборі

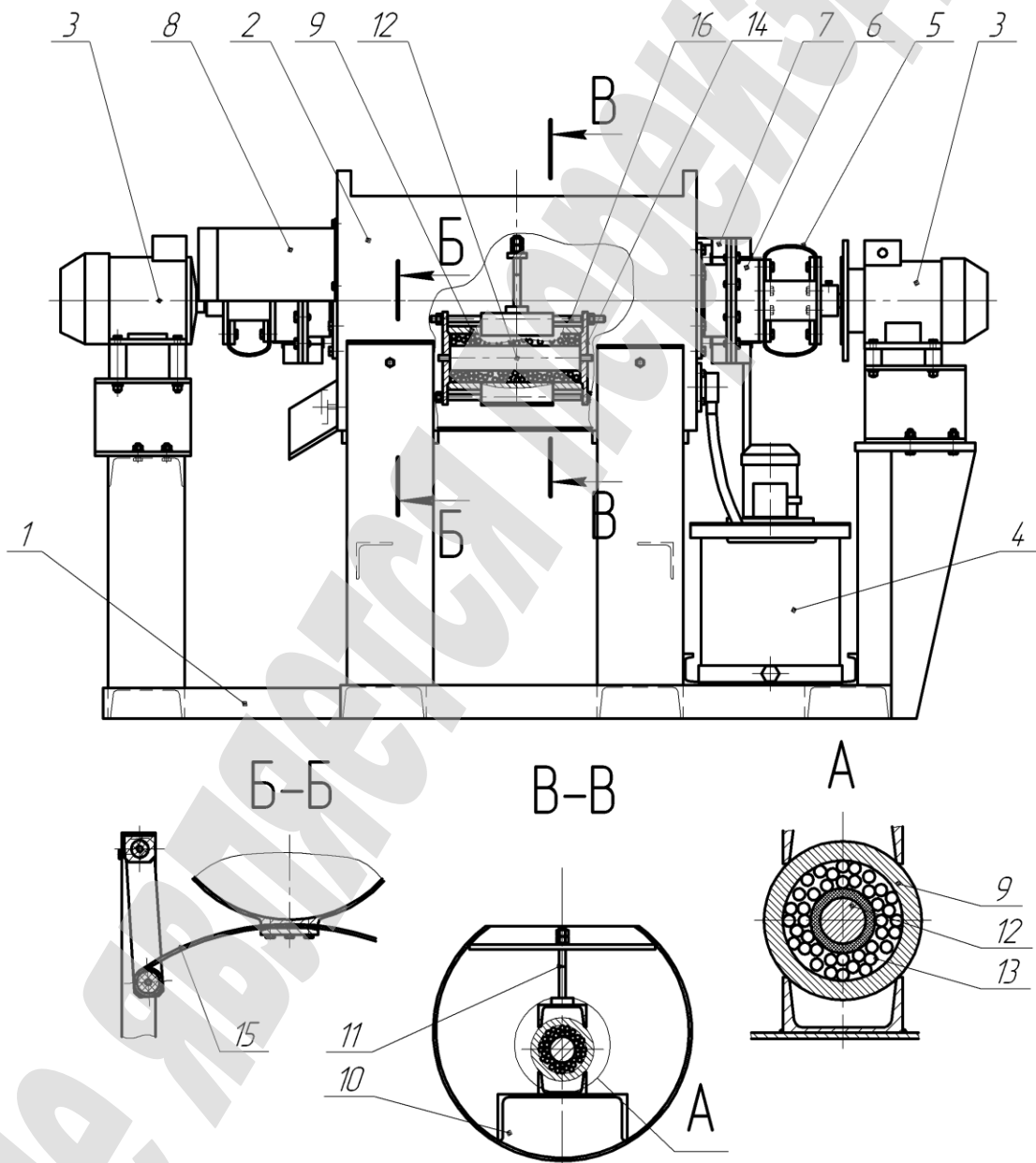


Рис. 6. Принципова схема дебалансного зміцнювального пристрою

Викінчувально-зміцнювальне оброблення внутрішніх поверхонь втулки здійснюють у такій послідовності. При подачі напруги на обмотки двигунів 3 надають обертового руху дебалансам віброзбудників 7. Обертання дебалансів спричиняє збудження плоскопаралельних коливань оброблюваної деталі 9 із заданою амплітудою у площині, перпендикулярній до її геометричної осі. За рахунок коливань заготовки встановлений у ній обкатник 12 самовтягується у режим вібраційного підтримання обертання, який супроводжується обкочуванням по внутрішній оброблюваній поверхні довгомірної циліндричної деталі 9.

Викінчувально-зміцнювальне оброблення внутрішніх поверхонь втулки здійснюють у такій послідовності. При подачі напруги на обмотки двигунів 3 надають обертового руху дебалансам 7 віброзбудників 6. Обертання дебалансів 7 спричиняє збудження плоскопаралельних коливань оброблюваної деталі 9 із заданою амплітудою у площині, перпендикулярній до її геометричної осі. За рахунок коливань заготовки встановлений у ній обкатник 12 самовтягується у режим вібраційного підтримання обертання, який супроводжується обкочуванням по внутрішній оброблюваній поверхні циліндрової втулки бурової помпи 9.

Обкочування обкатника 12 відбувається по розміщених між ним та оброблюваною деталлю деформівних тілах 13. У дискретний проміжок часу контактування внутрішньої поверхні заготовки 9 із обкатником 12 відбувається через незначну кількість кульок 13, розташованих вздовж твірних оброблюваної поверхні деталі. Контактуювання деталі з черговою групою кульок відбувається з ударом, причому тілами, що співударяються, є масивні обкатник 12 і деталь 9. Наявність співударянь заготовки із обкатником при контактуванні їх через незначну кількість деформівних елементів приводить до розвитку великих контактних напружень у матеріалі оброблюваної деталі в місцях контакту, в результаті чого оброблюваний матеріал пластично деформується, зміцнюється.

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 ($100^{+0,14}$ мм, $110^{+0,14}$ мм, $120^{+0,14}$ мм тощо) виготовляють інший обкатник і армують його поліуретаном.

5.3. Методика реалізації експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проведено на машині об'ємного вібраційного оброблення. До проведення дослідів визначено вихідну шорсткість поверхні дослідного зразка, отриману після токарної обробки.

Перед обробленням деформівні тіла було змочено водою для зменшення тертя і покращення умов обкочування. За установкою збирали вузол із оброблюваної деталі, деформівних тіл і обкатника, після чого закріплювали на установці. Час вібраційно-відцентрової обробки дослідного зразка – 15 хв. Після оброблення втулки скеровувалися на натурні випробування.

6. Результати досліджень

6.1. Результати натурних випробувань втулок бурових pomp

Оброблені вібраційно-відцентровим зміцненням втулки бурових pomp із сталі 20 і оригінальні втулки із сталі 70 у парі було встановлено на бурові помпи. Під час натурних випробувань фіксувалося напрацювання втулки до відмови, результати приведено у табл. 1. Акт про проведення випробувань приведено на рис. 7.

Таблиця 1

Результати натурних випробувань втулок бурових pomp

Напрацювання базової втулки T_i	420	405	417	410	391	415	382	389	408	417
Напрацювання віброзміцненої втулки T_i	752	643	683	708	630	638	609	651	674	706



АКТ

про результати випробувань
втулок циліндрових бурових насосів НБ-32

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

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

Застосування вібраційно-відцентрового зміцнення у ПП виготовлення циліндрових 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 "Укрзахідгеологія"

Гоц В.П.

Рис. 7. Акт про результати випробувань циліндрових втулок

6.2. Визначення основних параметрів безвідмовності виробів

Для визначення основних показників надійності виробів побудуємо графік (рис. 8), розбивши час напрацювання на інтервали з границями $t_1 = 100$ год, $t_2 = 200$ год, $t_3 = 300$ год, $t_4 = 400$ год, $t_5 = 500$ год, $t_6 = 600$ год, $t_7 = 700$ год, $t_8 = 800$ год.

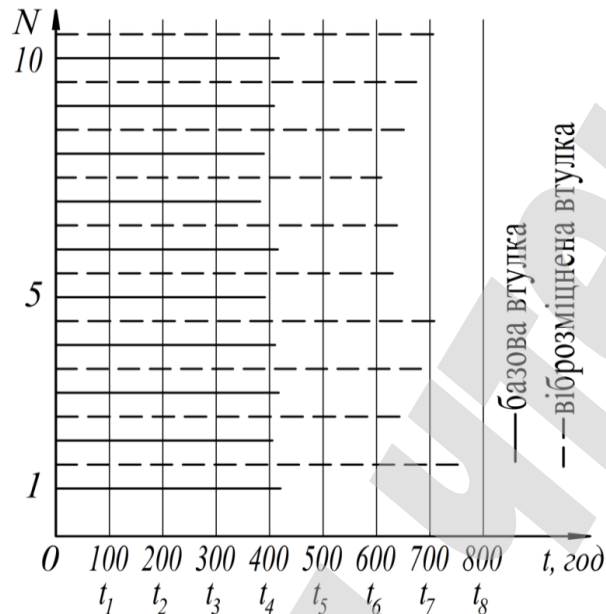


Рис. 8. Результати натурних випробувань втулок

6.2.1. Ймовірність безвідмовної роботи (коефіцієнт надійності) $\hat{P}(t_i)$

Ймовірність безвідмовної роботи $\hat{P}(t_i)$ визначають за формулою:

$$\hat{P}(t_i) = \hat{P}(0, t_i) = \frac{N_{t_i}}{N}, \quad (3)$$

де N_{t_i} – кількість виробів, що допрацювали до закінчення заданого інтервалу;
 N – загальна кількість виробів.

Для базової втулки:

$$\hat{P}(t_1) = \hat{P}(0, t_1) = \frac{N_{t_1}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_2) = \hat{P}(0, t_2) = \frac{N_{t_2}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_3) = \hat{P}(0, t_3) = \frac{N_{t_3}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_4) = \hat{P}(0, t_4) = \frac{N_{t_4}}{N} = \frac{7}{10} = 0,7;$$

$$\hat{P}(t_5) = \hat{P}(0, t_5) = \frac{N_{t_5}}{N} = \frac{0}{10} = 0;$$

$$\hat{P}(t_6) = \hat{P}(0, t_6) = \frac{N_{t_6}}{N} = \frac{0}{10} = 0;$$

$$\hat{P}(t_7) = \hat{P}(0, t_7) = \frac{N_{t_7}}{N} = \frac{0}{10} = 0;$$

$$\hat{P}(t_8) = \hat{P}(0, t_8) = \frac{N_{t_8}}{N} = \frac{0}{10} = 0.$$

Для віброміцненої втулки:

$$\hat{P}(t_1) = \hat{P}(0, t_1) = \frac{N_{t_1}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_2) = \hat{P}(0, t_2) = \frac{N_{t_2}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_3) = \hat{P}(0, t_3) = \frac{N_{t_3}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_4) = \hat{P}(0, t_4) = \frac{N_{t_4}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_5) = \hat{P}(0, t_5) = \frac{N_{t_5}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_6) = \hat{P}(0, t_6) = \frac{N_{t_6}}{N} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$\hat{P}(t_7) = \hat{P}(0, t_7) = \frac{N_{t_7}}{N} = \frac{3}{10} = 0,3;$$

$$\hat{P}(t_8) = \hat{P}(0, t_8) = \frac{N_{t_8}}{N} = \frac{0}{10} = 0.$$

Гістограма функції надійності для базової та зміцненої втулок приведена на рис. 9. Умовну ймовірність визначають за формулою:

$$P(t_k, t_i) = \frac{P(t_i)}{P(t_k)}. \quad (4)$$

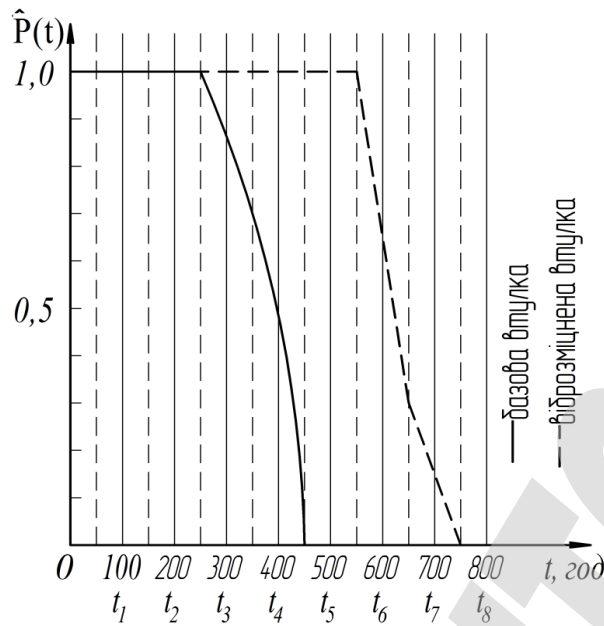


Рис. 9. Гістограма функції надійності

Для базової втулки:

$$P(0, t_1) = \frac{P(0, t_1)}{P(0)} = \frac{N(t_1)}{N(0)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_1, t_2) = \frac{P(0, t_2)}{P(0, t_1)} = \frac{N(t_2)}{N(t_1)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_2, t_3) = \frac{P(0, t_3)}{P(0, t_2)} = \frac{N(t_3)}{N(t_2)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_3, t_4) = \frac{P(0, t_4)}{P(0, t_3)} = \frac{N(t_4)}{N(t_3)} = \frac{7}{10} = 0,7;$$

$$P(t_4, t_5) = \frac{P(0, t_5)}{P(0, t_4)} = \frac{N(t_5)}{N(t_4)} = \frac{0}{7} = 0;$$

$$P(t_5, t_6) = \frac{P(0, t_6)}{P(0, t_5)} = \frac{N(t_6)}{N(t_5)} = \frac{0}{0} = 0;$$

$$P(t_6, t_7) = \frac{P(0, t_7)}{P(0, t_6)} = \frac{N(t_7)}{N(t_6)} = \frac{0}{0} = 0;$$

$$P(t_7, t_8) = \frac{P(0, t_8)}{P(0, t_7)} = \frac{N(t_8)}{N(t_7)} = \frac{0}{0} = 0.$$

Для віброзміцненої втулки:

$$P(0, t_1) = \frac{P(0, t_1)}{P(0)} = \frac{N(t_1)}{N(0)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_1, t_2) = \frac{P(0, t_2)}{P(0, t_1)} = \frac{N(t_2)}{N(t_1)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_2, t_3) = \frac{P(0, t_3)}{P(0, t_2)} = \frac{N(t_3)}{N(t_2)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_3, t_4) = \frac{P(0, t_4)}{P(0, t_3)} = \frac{N(t_4)}{N(t_3)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_4, t_5) = \frac{P(0, t_5)}{P(0, t_4)} = \frac{N(t_5)}{N(t_4)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_5, t_6) = \frac{P(0, t_6)}{P(0, t_5)} = \frac{N(t_6)}{N(t_5)} = \frac{10}{10} = 1,0;$$

$$P(t_6, t_7) = \frac{P(0, t_7)}{P(0, t_6)} = \frac{N(t_7)}{N(t_6)} = \frac{3}{10} = 0,3;$$

$$P(t_7, t_8) = \frac{P(0, t_8)}{P(0, t_7)} = \frac{N(t_8)}{N(t_7)} = \frac{0}{3} = 0.$$

6.2.2. Інтенсивність відмов $\lambda(t)$

Оцінку інтенсивності відмов виконують за формулою:

$$\lambda(t_i, t_{i+1}) = \frac{\Delta Q_{i+1}}{\Delta t} = \frac{\Delta n_{i+1}}{N_{t_i} \cdot \Delta t}, \quad (5)$$

де Δn_{i+1} – кількість відмов на заданому інтервалі; N_{t_i} – кількість виробів, що допрацювали до закінчення попереднього інтервалу, Δt – часовий інтервал, год.

Для базової втулки:

$$\lambda(0, t_1) \approx \lambda(t_1) = \frac{0}{(10-0) \cdot (100-0)} = 0;$$

$$\lambda(t_1, t_2) \approx \lambda(t_2) = \frac{0}{(10-0) \cdot (200-100)} = 0;$$

$$\lambda(t_2, t_3) \approx \lambda(t_3) = \frac{0}{(10-0) \cdot (300-200)} = 0;$$

$$\lambda(t_3, t_4) \approx \lambda(t_4) = \frac{3}{(10-0) \cdot (400-300)} = 0,003 \text{ 1/год};$$

$$\lambda(t_4, t_5) \approx \lambda(t_5) = \frac{7}{(10-3) \cdot (500-400)} = 0,01 \text{ 1/год}.$$

Для віброзміщеної втулки:

$$\lambda(0, t_1) \approx \lambda(t_1) = \frac{0}{(10-0) \cdot (100-0)} = 0;$$

$$\lambda(t_1, t_2) \approx \lambda(t_2) = \frac{0}{(10-0) \cdot (200-100)} = 0;$$

$$\lambda(t_2, t_3) \approx \lambda(t_3) = \frac{0}{(10-0) \cdot (300-200)} = 0;$$

$$\lambda(t_3, t_4) \approx \lambda(t_4) = \frac{0}{(10-0) \cdot (400-300)} = 0;$$

$$\lambda(t_4, t_5) \approx \lambda(t_5) = \frac{0}{(10-0) \cdot (500-400)} = 0;$$

$$\lambda(t_5, t_6) \approx \lambda(t_6) = \frac{0}{(10-0) \cdot (600-500)} = 0;$$

$$\lambda(t_6, t_7) \approx \lambda(t_7) = \frac{7}{(10-0) \cdot (700-600)} = 0,007 \text{ 1/год};$$

$$\lambda(t_7, t_8) \approx \lambda(t_8) = \frac{3}{(10-7) \cdot (800-700)} = 0,01 \text{ 1/год}.$$

6.2.3. Середнє напрацювання втулки до відмови $T_{сер.}$

Середнє напрацювання втулки до відмови $T_{сер.}$ визначають за формулою:

$$T_{сер.} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{відм.}} t_i + N_{безвідм.} \cdot T_{випр.}}{N}, \quad (6)$$

де $N_{відм.}$ – число виробів, що відмовили за час випробувань; t_i – напрацювання кожного виробу, що відмовив; $N_{безвідм.}$ – число виробів, що безвідмовно пропрацювали протягом часу випробувань, $T_{випр.}$ – тривалість випробування (або сумарне напрацювання в експлуатації).

Для визначення $T_{сер.}$ час випробувань приймаємо рівним – для базової втулки $T_{випр.} = 420$ год, для зміцненої $T_{випр.} = 752$ год.

Для базової втулки:

$$T_{сер.} = \frac{405 + 417 + 410 + 391 + 415 + 382 + 389 + 408 + 417 + 1 \cdot 420}{10} = 405,4 \text{ год}.$$

Для зміцненої втулки:

$$T_{сер.} = \frac{643 + 683 + 708 + 630 + 638 + 609 + 651 + 674 + 706 + 1 \cdot 752}{10} = 669,4 \text{ год.}$$

На підставі акту про результати натурних випробувань циліндрових втулок бурових pomp НБ32 (рис. 9) і визначення їх основних параметрів безвідмовності можна зробити такі висновки. Після вібраційно-відцентрового зміцнення циліндрових втулок бурових pomp динаміка зміни коефіцієнта надійності, умовної ймовірності та інтенсивності відмов для віброзміцнених втулок є кращою, ніж для базових втулок, виготовлених за типовим технологічним процесом. Середнє напрацювання на відмову $T_{сер.}$ віброзміцнених втулок підвищилося в 1,65 рази порівняно з базовими втулками. Окрім цього, зміна матеріалу зі сталі 70 на сталь 20 для віброзміцнених втулок також забезпечить складову економічного ефекту.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Переваги досліджуваного методу полягають у забезпеченні високого рівня енергії деформування, високій продуктивності, простоті, надійності, компактності та універсальності зміцнювальних пристроїв, можливості якісного оброблення внутрішніх поверхонь деталей форми тіл обертання. Процес вібраційно-відцентрового зміцнення не змінює геометричної форми деталі, не вимагає спеціального припуску під оброблення та може бути використаний для зміцнення виробів як із кольорових металів та сплавів, так і з різних марок сталей. Особливо ефективним вібраційно-відцентрове зміцнення є для оброблення деталей, які піддаються в процесі експлуатації знакозмінним циклічним навантаженням і різним видам зношування, зокрема, відповідальних деталей бурового інструменту [1, 2].

Weaknesses. Незважаючи на переваги методу вібраційно-відцентрового зміцнення, для розроблення практичних рекомендацій для впровадження методу у практику сучасного машинобудування необхідно провести значну кількість експериментальних і натурних випробувань для конкретного класу виробів і їх визначених типорозмірів.

Opportunities. Подальші дослідження у цьому напрямку спрямовані на вибір раціональних режимів оброблення та розроблення практичних рекомендацій по використанню вібраційно-відцентрових зміцнювачів з дебалансним приводом для покращання експлуатаційних характеристик деталей типу «втулка» і прогнозування параметрів їх надійності.

При впровадженні даного винаходу у виробництво можна при виготовленні циліндрових втулок бурових pomp перейти на дешевші матеріали та з огляду на підвищення ресурсу використовувати менше сировини для їх виготовлення.

Threats. При впровадженні даного продукту підприємство повинно додатково витратити кошти на проектування та виготовлення вібромашин, освоєння технології вібраційно-відцентрового зміцнення та навчання персоналу.

8. Висновки

1. Адаптовано метод об'ємного вібраційного оброблення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндрових втулок бурової помпи НБ32 із використанням раніше виготовленої вібраційної техніки. Розроблено та спроектовано технологічне оснащення для його реалізації. Для експериментальних досліджень змінено матеріал втулок із сталі 70 на сталь 20 і зміцнено з використанням вібрацій їх внутрішні виконавчі поверхні.

2. Експериментально досліджено та проведено натурні випробування стосовно впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри безвідмовності циліндрових втулок. Середнє напрацювання на відмову $T_{сер}$ віброзміцнених втулок підвищилося в 1,65 рази порівняно з базовими втулками. Окрім цього, зміна матеріалу зі сталі 70 на сталь 20 для віброзміцнених втулок також забезпечить складову економічного ефекту.

Література

1. Кусий Я. М. Технологічне забезпечення фізико-механічних параметрів поверхневих шарів металевих довгомірних циліндричних деталей вібраційно-відцентровим зміцненням: дис... канд. техн. наук. Львів, 2002. 260 с.

2. Кусий Я. М., Кук А. М. Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технологічного забезпечення безвідмовності деталей машин // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2015. Т. 1, № 7 (73). С. 41–51. doi: [10.15587/1729-4061.2015.36336](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36336)

3. Кусий Я. М., Кузін О. А., Кузін М. О. Вплив технологічного маршруту оброблення на формування міжзеренної пошкоджуваності виливків // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2016. Т. 1, № 5 (79). С. 39–47. doi: [10.15587/1729-4061.2016.59845](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59845)

4. Кузін О. А., Кусий Я. М., Топільницький В. Г. Вплив технологічної спадковості на параметри надійності виробів // Технологический аудит и резервы производства. 2015. Т. 1, № 1 (21). С. 15–21. doi: [10.15587/2312-8372.2015.37678](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.37678)

5. Суслов А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

6. Александровская Л. Н., Афанасьев А. П., Лисов А. А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем: учебник. Л–М.: Логос, 2001. 208 с.

7. Быков И. Ю., Цхадая Н.Д. Эксплуатационная надежность и работоспособность буровых машин: учебное пособие. Ухта: УГТУ, 2004. 196 с.

8. Проников А. С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

9. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 319 с.

10. Skoogh A., Perera T., Johansson B. Input data management in simulation – Industrial practices and future trends // Simulation Modelling Practice and Theory. 2012. Vol. 29. P. 181–192. doi: [10.1016/j.simpat.2012.07.009](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.07.009)

11. Wang L. Data representation of machine models. Dynamic thermal analysis of machines in running state. London: Springer-Verlag, 2014. P. 11–29.

doi:[10.1007/978-1-4471-5273-6_2](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5273-6_2)

12. McDowell D. L. Simulation-assisted materials design for the concurrent design of materials and products // *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 2007. Vol. 59, No. 9. P. 21–25. doi:[10.1007/s11837-007-0111-7](https://doi.org/10.1007/s11837-007-0111-7)

13. Durham S. D., Padgett W. I. Cumulative damage models for system failure with application to carbon fibers and composites // *Technometrics*. 1997. Vol. 39, No. 1. P. 34–44. doi:[10.2307/1270770](https://doi.org/10.2307/1270770)

14. McEvily A. J. *Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention*. John Wiley & Sons, 2013. 480 p. doi:[10.1002/9781118671023](https://doi.org/10.1002/9781118671023)

15. Zohdi T. I., Wriggers P. *An introduction to computational micromechanics // Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*. Springer, 2005. 198 p. doi:[10.1007/978-3-540-32360-0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-32360-0)

16. Kundu T. *Fundamentals of fracture mechanics*. Boca Raton: CRC Press, 2008. 304 p.

17. Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченко В. И. *Технологическая наследственность в машиностроении*. Минск: Наука и техника, 1977. 256 с.

18. Aftanaziv I., Kusyj J., Kuritnyk I.-P. Using vibrations for strengthening of long-sized cylindrical details // *Acta Mechanica Slovaca*. Kosice. 2000. Vol. 3. P. 43–46.

19. Stotsko Z., Kusyj J., Topilnytskyj V. Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindrical long-sized machine parts // *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*. 2012. Vol. 11, No. 1. P. 15–17.

20. Афтаназів І. С. *Технологічне забезпечення надійності деталей машин*. Львів: ДУЛП, 1998. 132 с.

21. Ящерицын П. И., Минаков А. П. *Упрочняющая обработка нежестких деталей в машиностроении*. Минск: Наука и техника, 1986. 215 с.

22. Шнейдер Ю. Г. *Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом*. Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1982. 248 с.

23. *Технологические основы управления качеством машин* / Васильев А. С., Дальский А. М., Клименко С. А. и др. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.