

МЕХАНІКА МАТЕРІАЛІВ

УДК 621.77(075.8)

DOI: 10.31471/1993-9965-2019-2(47)-7-14

ВПЛИВ ЗМІЦНЮЮЧОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

З. М. Одосій, В. Я. Шиманський, Б. В. Піндра

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727158,
e-mail: bzhhd@nimg.edu.ua

Ефективність зміцнення деталей машин поверхневим пластичним деформуванням необхідно розглядати як формування всього комплексу параметрів якості поверхні та поверхневого шару і їх вплив на експлуатаційні властивості деталей. Основними параметрами якості поверхні, які впливають на експлуатаційні властивості деталей машин, є геометричні (мікрогеометрія, хвилястість, шорсткість, форма нерівностей, величина опорної поверхні, напрям слідів обробки) та фізичні (структура, ступінь і глибина наклепу, залишкові напруження в поверхневому шарі) параметри. В машинобудуванні ефективно застосовуються досить багато способів зміцнення деталей машин поверхневим пластичним деформуванням, які відрізняються здебільшого схемою силового впливу деформуючого елемента на оброблювану поверхню. Проаналізувавши результати досліджень зміцнення поверхневим пластичним деформуванням поверхневих шарів та поверхонь деталей, встановлено, що практично всі виниклі при цьому структурні зміни сприяли зміцненню матеріалу поверхневого шару і підвищенню опору пластичній деформації. Збільшення щільності дислокацій та виділення карбідів блокують зсуви за площинами ковзання і створюють переешкоди руху дислокацій. Завдяки цим змінам підвищується опір утворенню та поширенню втомних тріщин. Глибина наклепу, величина залишкових напружень та приріст твердості залежать від вихідної структури і хімічного складу матеріалу. Істотний вплив на зносостійкість чинять режими зміцнення. Застосування алмазного вигладжування, віброобробки, комбінованих методів (поверхнєве пластичне деформування в поєднанні з іншими способами зміцнення, а також використання комбінованого інструменту) відкриває нові можливості у підвищенні характеристик якості поверхні та поверхневого шару деталей, а отже, підвищенні їх експлуатаційних властивостей при всьому розмаїтті та складності процесів експлуатації. На основі результатів проведених досліджень запропоновано практичні рекомендації щодо застосування методів зміцнюючої обробки поверхневим пластичним деформуванням поверхонь деталей машин та методику проектування технологічних процесів їх виготовлення з врахуванням виробничих можливостей.

Ключові слова: поверхнєве пластичне деформування; поверхневий шар; технологічний процес; зміцнений шар; якість поверхні; комбінований інструмент.

Эффективность упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием необходимо рассматривать как формирование всего комплекса параметров качества поверхности и поверхностного слоя и их влияние на эксплуатационные свойства деталей. Основными параметрами качества поверхности, которые влияют на эксплуатационные свойства деталей машин, являются геометрические (микрогеометрия, волнистость, шероховатость, форма неровностей, величина опорной поверхности, направление следов обработки) и физические (структура, степень и глубина наклепа, остаточные напряжения в поверхностном слое) параметры. В машиностроении эффективно применяется достаточно много способов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием, которые отличаются схемой силового воздействия деформирующего элемента на обрабатываемую поверхность. Анализ результатов исследований по упрочнению поверхностным пластическим деформированием поверхностных слоев

и поверхностей деталей установлено, что практически все возникшие при этом структурные изменения способствуют упрочнению материала поверхностного слоя и повышению сопротивления пластической деформации. Увеличение плотности дислокаций и выделение карбидов блокируют сдвиги по плоскостям скольжения и создают препятствия движению дислокаций. Благодаря этим изменениям, повышается сопротивление образованию и распространению усталостных трещин. Глубина наклепа, величина остаточных напряжений и прирост твердости зависят от исходной структуры и химического состава материала. На износостойкость существенно влияют режимы упрочнения. Применение алмазного выглаживания, виброобработки, комбинированных методов (поверхностное пластическое деформирование в сочетании с другими способами упрочнения, а также использование комбинированного инструмента) открывает новые возможности повышения характеристик качества поверхности и поверхностного слоя деталей, и, соответственно, повышение их эксплуатационных свойств при всем разнообразии и сложности процессов эксплуатации. Согласно результатов проведенных исследований предложены практические рекомендации по применению методов упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием деталей машин и методика проектирования технологических процессов их изготовления с учетом производственных возможностей.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование; поверхностный слой; технологический процесс; упрочненный слой; качество поверхности; комбинированный инструмент.

The performance of the machines part reinforcement using surface plastic deformation shall be considered as formation of the whole complex of surface parameters and quality and their impact on the operational properties of these parts. The main surface quality parameters, affecting the performance of machine parts are geometric (microgeometry, wavelength, roughness, shape of inequalities, the size of the supporting surface, the direction of the traces of processing); physical parameters (structure, degree and slander depth, residual stresses in the surface layer). In the machine building, many methods of superficial plastic deformation are used for part reinforcement; these methods essentially differ in the scheme of impact of the surface deforming part to be treated. After analyzing the results obtained by scientists, involved in research on surface plastic deformation of surface layers and surfaces of parts, it was found that after hardening, practically all structural changes contribute to reinforcement of the surface layer material and increase the plastic deformation resistance. Increasing the density of dislocations and the separation of carbides, which block the shear slides and create obstacles to the movement of dislocations. Due to these changes, resistance to formation and spread of fatigue cracks have increased. The treatment depth, magnitude of residual stresses and increase in hardness depends on the original structure and chemical composition of the material. Reinforcement regimes have significant effects on the wear resistance. Use of diamond smoothing, vibration processing, combined methods (surface plastic deformation in combination with other reinforcement methods, as well as the use of a combined tool) opens up new possibilities for increasing the quality characteristics of the surface and the surface layer of parts, and accordingly, increasing their operational properties with all the diversity and complexity of used processes. Based on the results of the studies, practical recommendations on the application of methods of hardening by surface plastic deformation of machine parts and a methodology for designing technological processes for their manufacture considering manufacturing capabilities are proposed.

Key words: surface plastic deformation; surface layer; technological process; reinforced layer; surface quality; combined tool.

Вступ. Однією з основних задач машинобудування є підвищення надійності, довговічності та точності машини, яка тісно пов'язана з удосконаленням технології виготовлення їх складових (деталей), зокрема забезпечення необхідних показників якості поверхні та поверхневого шару. Ці показники, в основному, і визначають експлуатаційні властивості деталей машин. Так, у ході експлуатації під дією оточуючого середовища, тиску та температури фізико-технічні властивості поверхневого шару деталі та його напружений стан змінюються. Матеріал поверхневого шару піддається пружно-пластичному деформуванню і в ньому спостерігаються зміни структури, хімічного та фазового складу. Негативні зміни в поверхневому шарі сприяють зародженню та розвитку втоми металу (особливо при циклічних навантажен-

нях), що часто призводить до передчасного зношування чи руйнування деталі.

Вдосконалення технологічних процесів виготовлення деталей для забезпечення заданих показників якості поверхні та поверхневого шару сприяє покращенню їх експлуатаційних властивостей. При вирішенні цих завдань важливе місце відводиться процесам зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням, яке може забезпечити оптимальні характеристики якості поверхні та поверхневого шару, з точки зору експлуатаційних показників [1-10].

Ефективність зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням залежить від способів, режимів та умов обробки, конструкції інструмента, форми і геометричних розмірів деформуючих елементів. Приклади успішного застосування поверхневого пластичного дефор-

мування при обробці поверхонь і покращенні за рахунок цього експлуатаційних властивостей деталей свідчить про невичерпні можливості цих процесів.

Метою роботи є дослідження впливу зміцнення поверхонь деталей машин пластичним деформуванням на їх експлуатаційні властивості. На основі результатів досліджень запропоновано шляхи вдосконалення технологічних процесів виготовлення деталей для забезпечення заданих показників якостей поверхні та поверхневого шару деталей з метою покращення їх експлуатаційних властивостей.

Об'єкт дослідження – технологія зміцнюючої обробки поверхонь деталей машин поверхневим пластичним деформуванням.

Предмет досліджень – закономірності впливу процесів зміцнюючої обробки поверхонь деталей машин на їх експлуатаційні властивості.

Відомо, що ефективність зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (підвищення границі витривалості, зносостійкості тощо) неможливо пояснити зміною тільки одного з показників якості поверхні чи поверхневого шару, оскільки експлуатаційні характеристики відображають весь комплекс змін, які виникають в металі. До них відносяться, насамперед, структурні, які обумовлюють підвищення фізико-механічних властивостей матеріалу зміцнених деталей, твердості поверхні і створення стискаючих залишкових мікро- та макронапружень. Комплексний їх вплив на експлуатаційні властивості деталей не дозволяє виділити частку впливу на підвищення властивостей того чи іншого окремо взятого показника. У зв'язку з цим необхідно розглядати формування всього комплексу показників якості поверхні та поверхневого шару і їх вплив на експлуатаційні властивості зміцнених деталей машин.

Складність та розмаїття впливу різних параметрів якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей машин вимагають забезпечення високої якості поверхні деталі машин [11].

Ця вимога обумовлюється:

- підвищенням вимог до надійності, довговічності та інших експлуатаційних характеристик машин;
- залежністю всіх експлуатаційних характеристик, які тією чи іншою мірою залежать від якості поверхні машин;
- підвищення вимог до якості поверхонь, впровадження нових характеристик, які потребують технологічного забезпечення, таких як величина опорної поверхні, форма та розташування мікронерівностей.

Основні параметри якості поверхні, які визначають експлуатаційні властивості деталей машин, наведені в таблиці 1.

Для забезпечення необхідних показників якості поверхні та поверхневого шару деталей машин у металооброблювальній промисловості знайшли ефективне застосування численні способи зміцнення деталей машин поверхневим пластичним деформуванням. Вони відрізняються здебільшого схемою силового впливу деформуючого елемента на оброблювану поверхню. За цією ознакою у відповідності до ГОСТ 18296-72 виділено вісім груп технологічних процесів поверхневого пластичного деформування [12], наведені на рисунку 1.

За формою зміцнюваної поверхні і видом деформуючих елементів процес поверхневого пластичного деформування поділяють на класи та підкласи [11].

Поверхневий шар пластичних матеріалів у процесі зміцнення сильно деформується і втрачає свою рівновісну структуру, набуваючи специфічної волокнистої будови. При цьому тонка кристалічна структура істотно змінюється: відбувається подрібнення блоків, розпад залишкового аустеніту, міжкристалічні мікроперекручування кристалічних ґраток. Як наслідок, змінюються фізичні властивості поверхні та інші властивості матеріалу.

За невисоких інтенсивностей деформації відбувається подрібнення зерен і утворення орієнтованої структури. Зі зростанням навантаження локалізованого контакту подрібнення зерен досягає такої інтенсивності, що в тонкому шарі вже не спостерігається кристалічної будови матеріалу. При зміцненні поверхневим пластичним деформуванням загартованих сталей зникає орієнтація зерен, а структура металу найчастіше виявляється неупорядкованим нагромадженням безформових пластин мартенситу [12].

Після зміцнення поверхонь деталей поверхневим пластичним деформуванням спостерігаються такі закономірності структурних змін: в незагартованих сталях збільшується кількість перліту біля поверхні за рахунок заміщення більш м'якої структурної складової – фериту; у загартованих сталей з мартенситною структурою суттєво зменшується кількість залишкового аустеніту, відбувається виділення дрібнодисперсної карбідної фази, вихід вуглецю з ґратки тетрагонального мартенситу, який частково розпадається; у сталей з аустенітною структурою відбувається інтенсивне утворення α -фази [9, 13]. При цьому щільність дислокації підвищується в 2–3 рази.

Таблиця 1 – Основні параметри якості поверхні, які визначають експлуатаційні властивості деталей машин

Параметри якості поверхні	Експлуатаційні властивості, які визначаються вказаним параметром
Геометричні показники	
Макрогеотермія (відхилення форми)	1 Правильність відносного розташування та переміщення спряжених деталей 2 Міцність з'єднання
Хвилястість	1 Зносостійкість 2 Міцність з'єднання
Шорсткість	1 Зносостійкість 2 Втомна міцність 3 Корозійна стійкість 4 Відбиття світлових та електромагнітних хвиль 5 Міцність з'єднання
Форма нерівностей	1 Зносостійкість 2 Втомна міцність 3 Корозійна стійкість 4 Відбиття світлових та електромагнітних хвиль 5 Міцність з'єднання
Величина опорної поверхні	1 Зносостійкість 2 Втомна міцність 3 Корозійна стійкість 4 Відбиття світлових та електромагнітних хвиль 5 Міцність з'єднання
Напрямок слідів обробки	1 Тертя між спряженими поверхнями 2 Зносостійкість
Фізичні параметри	
Структура	1 Міцність 2 Зносостійкість
Ступінь і глибина наклепу	1 Міцність з'єднання 2 Втомна міцність 3 Зносостійкість
Залишкові напруження в поверхневому шарі	1 Зносостійкість 2 Втомна міцність

Слід зауважити, що практично всі структурні зміни сприяють зміцненню матеріалу поверхневого шару і підвищенню опору пластичної деформації матеріалу деталі, особливо за умов прикладання циклічних експлуатаційних навантажень. Збільшення щільності дислокації та виділення карбідів блокують зсуви за площинами ковзання і створюють перешкоди руху дислокацій. Завдяки цим змінам підвищується опір утворенню та розширенню втомних тріщин і, як наслідок, підвищення границі витривалості зміцнених деталей.

Зміцнення поверхневого шару деталей поверхневим пластичним деформуванням супроводжується його наклепом. Глибина наклепу та величина залишкових напружень залежать від вихідної структури та хімічного складу сталі. Найбільш глибоко наклепуються маловуглецеві пластичні сталі. Загартовані вуглецеві та леґо-

вані сталі наклепуються на меншу глибину, але величина залишкових напружень у них вища, ніж у маловуглецевих пластичних сталей.

В результаті наклепу та втрати пластичності зменшується ударна в'язкість сталі в поверхневих шарах. Тому не рекомендується проводити поверхневе зміцнення дрібних деталей, які працюють за динамічних навантажень.

Рекомендується поверхневим пластичним деформуванням зміцнювати деталі, які в процесі експлуатації не нагріваються вище 400°C. Встановлено, що нагрівання вище 400°C різко знижує втомну міцність, а за температури 850°C знижує або повністю ліквідує зміцнення поверхневого шару, створене наклепом.

Інтенсивність наклепу тим вища, чим м'якша сталь. Приріст твердості визначається структурою деформованої сталі. Найбільше підвищення твердості спостерігається в сталях

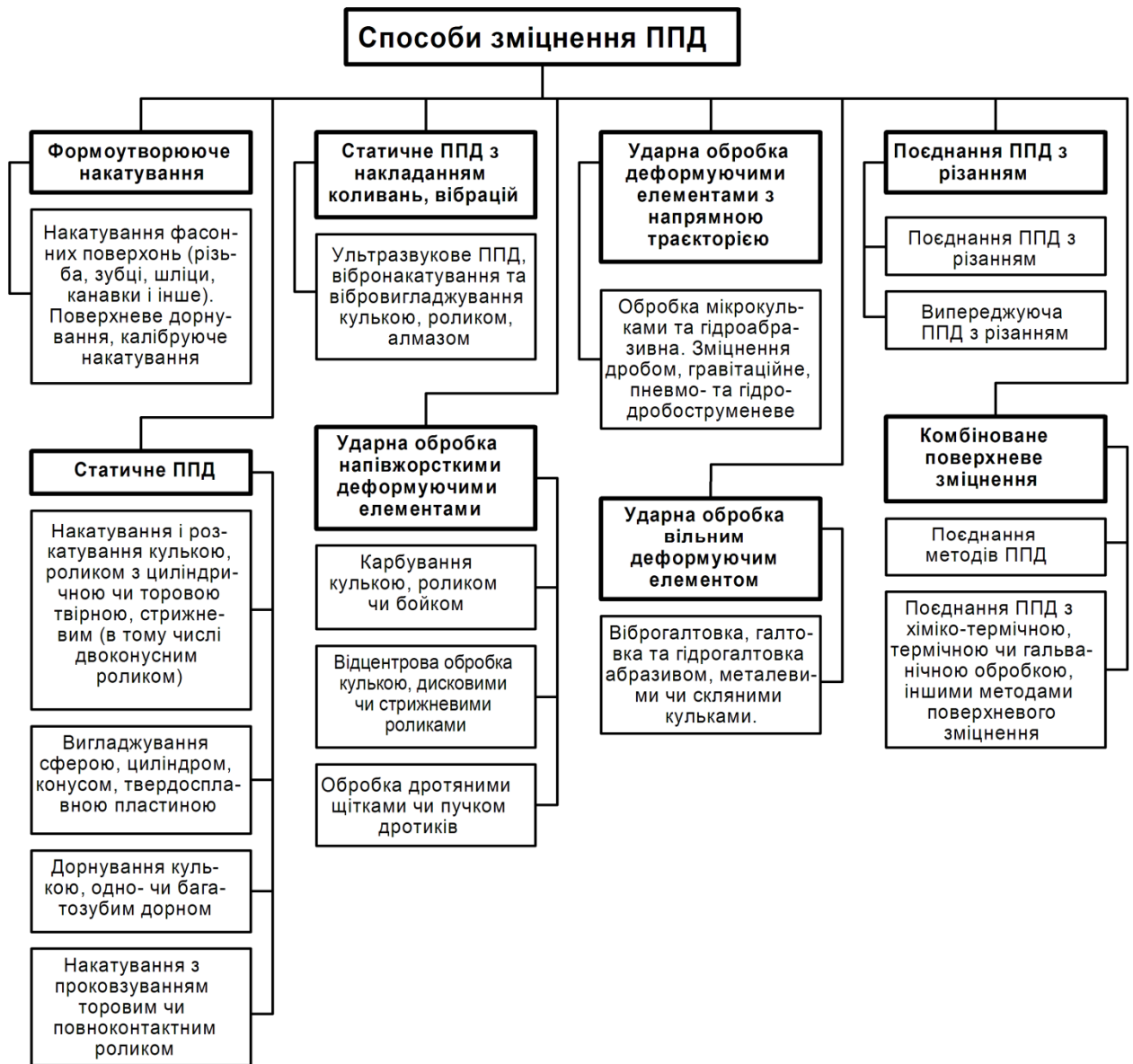


Рисунок 1 – Класифікація способів зміцнення деталей машин поверхневим пластичним деформуванням

зі структурою аустеніту, фериту і мартенситу, найменше – зі структурою перліту та сорбіту (рис. 2). Абсолютний приріст твердості в результаті наклепу для мартенситних структур складає HB180-320, а для сталей, які містять надлишковий ферит, – HB 60-120. Поверхневим деформуванням можна підвищити твердість загартованих сталей на 10-15%, а незагартованих – на понад 100%.

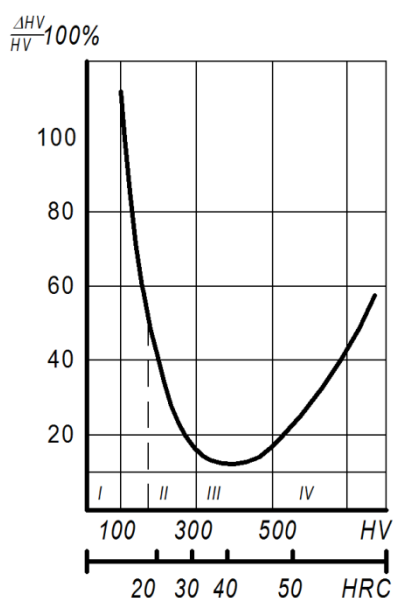
Суттєве підвищення твердості мартенситних структур відбувається за рахунок зміцнення пластичним деформуванням. При цьому відбувається часткове перетворення аустеніту в мартенсит і виділення високодисперсних карбідних частинок.

Наклеп збільшує твердість поверхневих шарів, що сприяє підвищенню зносостійкості зміцнених поверхонь деталей, зокрема пар тертя.

Численні дослідження та обґрунтований підхід до призначення методів і режимів поверхневого пластичного деформування дозволяє оптимізувати характеристики якості поверхні та поверхневого шару деталей і підвищити їх зносостійкість при всьому різноманітті і складності процесів зношування, істотно підвищити інші експлуатаційні властивості деталей, виготовлених з різних матеріалів.

Найбільш широко для зміцнення поверхонь деталей використовують накатування роликками і кульками, дорнування, ударне накатування, алмазне вигладжування, вібронакатування.

Зусилля поверхневого пластичного деформування, що забезпечують підвищення зносостійкості, мають більш вузький діапазон порівняно з діапазоном для підвищення опору втомі.



I – ферит і ферит+перліт; II – перліт;
III – сорбіт; IV – тростит і мартенсит

Рисунок 2 – Відносне збільшення твердості вуглецевих і легованих сталей при пластичному деформуванні в різних структурних станах при степені деформації $d/D=0,5$

Рекомендується з цією метою використовувати інструменти пружної дії, які, на відміну від жорстких, забезпечують одержання рівномірного зусилля деформування по всій довжині оброблюваної поверхні.

Застосування алмазного вигладжування відкрило нові можливості для підвищення зносостійкості матеріалів високої твердості. Цей метод забезпечує шорсткість поверхні $Ra=0,16...0,02$ мкм, підвищення твердості поверхневого шару на 30-40% і до 3 разів зносостійкості.

Зі збільшенням зусилля зміцнення збільшується величина і глибина поширення залишкових напружень стиску. Внаслідок цього границя витривалості по зламу збільшується.

Застосування поверхневого зміцнення забезпечує високу витривалість сталей з концентраторами напружень, границя витривалості яких без зміцнення є дуже низькою.

Головна причина підвищення втомної міцності конструкційних сталей в корозійних середовищах – створення залишкових напружень стиску в зміцнених поверхневих шарах деталі, які перешкоджають розкриттю втомних тріщин, що утворились, і проникненню в них корозійного середовища.

В поєднанні з іншими способами зміцнення поверхневе пластичне деформування:

- з хіміко-термічною обробкою - підвищує втомну та контактну міцність;

- з гальванічними покриттями - забезпечує корозійну стійкість та зносостійкість, не знижуючи при цьому циклічну стійкість;

- з ізотермічним гартуванням - створює сприятливе поєднання властивостей: в'язкості, пластичності та втомної міцності;

- з високотемпературною механічною обробкою - підвищує опір циклічним навантаженням та в'язкість руйнування;

- з одним із способів підвищення пружних властивостей (загартування на мартенсит, деформаційне старіння мартенситу, при здійсненні його методом гідроекструзії) - забезпечує сукупність високих значень статичної та втомної міцності.

Ці комбіновані способи створюють найбільші можливості підвищення конструкційної міцності високонавантажених деталей [13].

Перевагами способу зміцнення поверхневого пластичного деформування також є:

- відсутність анізотропії властивостей;

- можливість застосування цього виду зміцнення для деталей будь-яких розмірів та конструкції;

- технологічність, можливість механізації та автоматизації процесу;

- стійкість ефекту зміцнення при нагріванні та циклічних перевантаженнях.

Наведена класифікація способів чистової обробки тиском з вказанням інструмента, способів чистової обробки тиском, які визначають можливості та області раціонального застосування кожного з них.

Дані, зведені в таблиці 4 [11], є вихідними і повинні допомагати технологу у виборі варіанта технологічного процесу чистової обробки тиском.

Подальші дослідження та досвід промислових підприємств дозволяють виявити можливості прогресивних технологій і значно збільшити перелік деталей машин, які можна обробити способами поверхневого пластичного деформування. Важливим також є широке впровадження у виробництво вже розроблених способів обробки поверхонь пластичним деформуванням з метою покращення експлуатаційних властивостей та якості деталей, зниження собівартості продукції, підвищення економічної ефективності впровадження прогресивних технологій і нової техніки [14].

Практичні рекомендації щодо застосування зміцнюючої обробки поверхневим пластичним деформуванням та методика проектування технологічних процесів зміцнення деталей з врахуванням виробничих можливостей наведені в [9].

Висновок

За результатами проведених досліджень запропоновано практичні рекомендації по застосуванню методів зміцнюючої обробки поверхневим пластичним деформуванням та методика проектування технологічного процесу з врахуванням виробничих можливостей.

Наукова новизна результатів досліджень полягає у встановленні закономірностей впливу зміцнюючої обробки на експлуатаційні властивості деталей машин при розмаїтті процесів експлуатації.

Практична цінність отриманих результатів. У встановленні закономірностей, які дають змогу призначати методи зміцнюючої обробки поверхневим пластичним деформуванням, розробляти та удосконалювати технологічні процеси виготовлення деталей машин із заданими показниками експлуатаційних властивостей.

Література

1. Минаков А.П. Технология финишной упрочняющей пневмовибродинамической обработки нежестких деталей: монография. Могилев: БРУ, 2016. 294 с.

2. Джемелінський В. В., Лесик Д. А. Комбіноване лазерно-ультразвукове поверхнєве зміцнення деталей і можливості його використання при виробництві та ремонті обладнання. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. ПолтНТУ, 2014. № 3 (42). С. 61-68.

3. Юдовинський В.Б., Кюрчев С.В., Пеньов О.В., Мирненко Ю.П.. Підвищення зносостійкості циліндричної поверхні алмазним вигладжуванням. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 156. С. 494-497.

4. Одосій З. М., Шиманський В. Я., Пітулей Л. Д. Перспективні методи зміцнення деталей машин нафтової та газової промисловості. *Машини, обладнання і матеріали для напроцужування вітчизняного видобутку диверсифікації постачання нафти і газу*: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції. Івано-Франківськ, 2016. С. 291-293.

5. Сарафін В. Особливості вибору методів і засобів зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням. *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання*: збірник тез X Всеукр. студ. наук.-техн. конф., 25-26 квітня 2017 року. Т. : ТНТУ, 2017. Том 1. С. 153–154. (Секція: Машинобудування).

6. Данильченко Л. М., Радик Д. Л. Дослідження методів зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням. *Матеріали XX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя*, 17-18 травня 2017 року. Т. : ТНТУ, 2017. С. 21. (Машинобудування).

7. Одосій З.М., Шиманський В.Я., Прокопечко Н.М. Вплив поверхневого пластичного деформування на втомну міцність деталей машин. *Машини, обладнання і матеріали для напроцужування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE-2018*: матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції. Івано-Франківськ, 2018. С. 296-297.

8. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформованием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

9. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

10. Отделочные операции в машиностроении: справочник / [П.А. Руденко, М.Н. Шуба, В.А. Огнivec и др.]: под общ. ред. проф. П.А. Руденко. К.: Техника, 1985. 136 с.

11. Шнайдер Ю. Г. Инструмент для чистой обработки металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1970. 248 с.

12. Чепа П.А. Эксплуатационные свойства упроченных деталей. Минск: Наука и техника, 1988. 193 с.

13. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин -2е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1978. 184 с.

14. Горохов В. А. Обработка деталей пластическим деформированием. Киев: Техника, 1978. 192 с.

References

1. Minakov, AP (ed.) 2016, Tekhnologiya finishnoy uprochnyayushchey pnevmovibrodinamicheskoy obrabotki nezhestkikh detaley [Technology of finishing hardening pneumatically-dynamic processing of non-rigid parts]. BRU, Mogilev, 294 p. (in Russian) <https://www.twirpx.com/file/2537983/>

2. Jemelinsky, VV & Lesik, DA 2014, [Combining Laser-Ultrasonic Surface Hardening Of Details And Possibilities Of Its Use In The Manufacture And Repair Of Equipment]. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*, no. 3 (42), pp. 61-68. (in Ukrainian). http://znp.nupp.edu.ua/files/archive/ua/2014/42_3/7.PDF

3. Yudovynskyy, V, Kurtchev, S, Penov, U & Mirnenko, YuP 2015, Pidvyshchennia znosostiikosti tsylindrychnoi poverkhni almaznym vyhladzhuvanniam [Increase of wear resistance of cylindrical surface by diamond smoothing], *Bulletin of Kharkov National Technical University of Agriculture named after Petr Vasilenko*, Issue 156, pp. 494-497. (in Ukrainian). <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/3207>
4. Odosii, ZM, Shymansky, VYa & Pituley, LD 2016, Perspektivni metody zmitsnennia detalei mashyn naftovoi ta hazovoi promyslovosti [Perspective methods of strengthening the parts of the machines of the oil and gas industry], Materials of the International scientific and technical conference "Machines, equipment and materials for increasing domestic production of diversification of oil and gas supply", Ivano-Frankivsk, pp. 291-293. (in Ukrainian).
5. Sarafin, V 2017, Osoblyvosti vyboru metodiv i zasobiv zmitsnennia detalei poverkhnevym plastychnym deformuvanniam [Features of choice of methods and facilities of strengthening of details by surface plastic deformation]: Abstracts X Ukrainian student scientific-technical conference "Natural and Human Sciences. Current Issues" (Ternopil, 25-26 April 2017), vol. 1, pp. 153-154 (in Ukrainian) <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/21538?locale=sv>
6. Danylchenko, L & Radyk, D 2017, Doslidzhennia metodiv zmitsnennia detalei poverkhnevym plastychnym deformuvanniam [Research of methods of strengthening of details by surface plastic deformation]. Materials of XX Conference TNTU I. Pul'uj (Ternopil, 17-18 May 2017), pp. 21 (in Ukrainian). <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/22200>
7. Odosiy, ZM, Shimansky, VYa & Prokopenchko NM 2018, Vplyv poverkhnevoho plastychnoho deformuvannia na vtomnu mitsnist detalei mashyn [Influence of surface plastic deformation on the fatigue strength of machine parts]: proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Machines, Equipment and Materials for Increasing the National Oil and Gas Production PGE-2018", Ivano-Frankivsk, pp. 296-297. (in Ukrainian).
8. Odintsov, LG 1987, Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformuvanniam [Strengthening and finishing of details by surface plastic deformation], Mashinostroenie, Moscow, 328 p. (in Russian)
9. Papshev, DD 1978, Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnosnym plasticheskim deformirovaniem [Finishing-hardening treatment by surface plastic deformation], Mashinostroenie, Moscow, 152 p. (in Russian)
10. Rudenko, PA, Shuba, MN & Ognivets VA 1985, Otdelochnye operatsii v mashinostroenii [Finishing operations in mechanical engineering], Tekhnika, Kiev, 136 p. (in Russian)
11. Schneider, YG 1970, Instrument dlya chistovoy obrabotki metallov davlenim [Instrument for the treatment of metals by pressure], Mashinostroenie, Leningrad, 248 p. (in Russian)
12. Chepa, PA 1988, Ekspluatatsionnye svoystva uprochnennykh detaley [Performance properties of reinforced parts], Nauka i tekhnika, Minsk, 193 p. (in Russian)
13. Balter, MA 1978, Uprochnenie detaley mashin [Strengthening of machine parts], Mashinostroenie, Moscow, 184 p. (in Russian)
14. Gorokhov, VA 1978, Obrabotka detaley plasticheskim deformirovaniem [Processing of parts by plastic deformation], Tekhnika, Kiev, 192 p. (in Russian)