УДК 621.7 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.10

О. В. КАНІВЕЦЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4364-8424

В. В. ДУДНИК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6553-2951

І. М. КАНІВЕЦЬ
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри будівництва та професійної освіти
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-1670-5553

Н. М. ОПАРА
кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-0128-8400

Ю. В. ШКЛЯР
аспірант кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0002-4695-1664

ОБҐРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ШЛЯХОМ ОБКАТКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

Висока ефективність технологій зміцнення методом поверхневої пластичної деформації у поєднанні з продуктивністю та економічною доцільністю робить їх привабливими для широкого ряду промислових галузей. На даний час сучасна пластична теорія ще не запропонувала повного розв'язання задачі взаємодії пружного інструмента з тілом, що піддається пружно-пластичній деформації, у випадку, коли обидві поверхні мають довільну кривизну. Метою даного дослідженнях є розробка математичної моделі, яка б дозволяла обґрунтовано визначати оптимальні режими поверхневої пластичної деформації циліндричних деталей при заданих показниках чистоти поверхні. Дослідження показали, що показники шорсткості, подачі та діаметри кульок інденторів взаємопов'язані між собою. Величина подачі суттєво впливає на стан обробленої поверхні. Із зростанням подачі збільшується інтервал між вершинами мікронерівностей, а кількість повторних натискань на одну й ту ж ділянку зменшується, що призводить до підвищення шорсткості та зменшення глибини і рівня наклепу. Зростання подачі у 15 разів збільшує шорсткість поверхні на два класи. У свою чергу, глибина наклепаного шару зменшилась у 2,5 раза, а ступінь наклепу в знизився на 11 %. Таким чином, аналіз результатів показав доцільність оптимальних значень подачі для сталі 45, що становить 0,05 мм/кульку. Під час обкатування сталевих поверхонь підвищення навантаження покращує характеристики наклепу. Із зростанням тиску шорсткість поверхні залишається на рівні Ra 0,2 мкм, при цьому глибина наклепу для сталі 45 збільшується із 0,9 до 1,8 мм, а ступінь наклепу в середньому підвищується на 11 %. Під час збільшення діаметрів кульок зміцнювального інструмента, за інших незмінних умов, спостерігається незначне зниження шорсткості поверхні, а також зменшення глибини та ступеня наклепу. Таким чином, із збільшенням діаметра кульок збільшується клас чистоти обробки поверхні, однак глибина та інтенсивність наклепаного шару знижується на незначну величину.

Ключові слова: *поверхневе зміцнення, ППД, обкатування, шорсткість, подача.*

O. V. KANIVETS
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4364-8424

V. V. DUDNYK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6553-2951

I. M. KANIVETS
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Civil Engineering
and Professional Education
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-1670-5553

N. M. OPARA
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-0128-8400

YU. V. SHKLYAR
Postgraduate Student at the Department of Mechanical
and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0002-4695-1664

SUBSTANTIATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF SURFACE HARDENING BY RUNNING-IN OF CYLINDRICAL SURFACES

The high efficiency of surface plastic deformation hardening technologies combined with their productivity and economic feasibility make them attractive for a wide range of industrial sectors. At present, modern plastic theory has not yet offered a complete solution to the problem of interaction between an elastic tool and a body subjected to elastic-plastic deformation in the case when both surfaces have arbitrary curvature. The aim of this study is to develop a mathematical model that would allow us to reasonably determine the optimal modes of surface plastic deformation of cylindrical parts at given surface finish indicators. The study showed that the roughness, feed rate, and diameters of indenter balls are interrelated. The feed rate significantly affects the condition of the machined surface. As the feed rate increases, the interval between the vertices of the micron irregularities increases, and the number of repeated presses on the same area decreases, resulting in an increase in roughness and a decrease in the depth and level of the scratch pattern. Increasing the feed rate by 15 times increases the surface roughness by two classes. In turn, the depth of the deposited layer decreased by 2.5 times, and the degree of adhesion decreased by 11 %. Thus, the analysis of the results showed the feasibility of the optimal feed rate for steel 45, which is 0.05 mm/ball. When running-in steel surfaces, an increase in load improves the peening characteristics. With increasing pressure, the surface roughness remains at Ra 0.2 μm, while the depth of the peening for steel 45 increases from 0.9 to 1.8 mm, and the degree of peening increases by 11 % on average. When ball diameters are increased, with all other conditions remaining constant, a slight decrease in surface roughness is observed, as well as a decrease in the depth and degree of peening by 48 % and 11 %, respectively. Thus, with an increase in the diameter of the balls, the surface finish class increases, but the depth and intensity of the riveted layer decreases by a small amount.

Key words: *surface hardening, SPD, rolling, roughness, feed.*

Постановка проблеми

Надійність і тривалість служби машинних компонентів значною мірою залежать від стану їх поверхневого шару, який відіграє ключову роль як носій конструктивних, технологічних і експлуатаційних концентраторів напружень. Саме ці зони впливу та їх характеристики, здебільшого, визначають імовірність втомного руйнування

під час функціонування обладнання. З найважливіших експлуатаційних показників поверхневого шару слід виділити ступінь шорсткості, твердість, а також величину залишкових напружень.

Необхідні показники якості поверхні, а також більшість ключових експлуатаційних характеристик деталей машин можуть бути досягнуті шляхом зміцнення за допомогою технологій поверхневої пластичної деформації (ППД), які дають змогу максимально реалізувати внутрішній потенціал матеріалу. Застосування ППД сприяє підвищенню твердості поверхневих шарів, формуванню в них стискальних залишкових напружень, а також покращенню мікрогеометричних властивостей поверхні. У результаті, залежно від призначення деталі та умов її експлуатації, значно зростає опір до втомного руйнування, зношування, корозійного впливу, покращується герметичність і здатність утримувати мастильні матеріали.

Під час проведення операцій ППД найчастіше виникають складнощі технологічної сфери, зокрема визначення оптимальних режимів обробки. Від коректного вибору цих параметрів залежить не лише ефективне використання потенціалу міцності матеріалу деталей, а і досягнення необхідних характеристик поверхні. Як правило, режими обробки підбираються емпіричним шляхом – на основі результатів досліджень зразків або, рідше, реальних деталей, що оброблялись у різних умовах. Такий підхід не завжди забезпечує бажаний результат. Саме тому в умовах сучасного виробництва, особливо на етапі проєктування технологічного процесу їх виготовлення, варто застосовувати методику визначення режимів зміцнювальної обкатки, яка не тільки гарантує формування у валах заданої системи залишкових стискальних напружень, а й дозволяє керувати цією системою відповідно до конкретних вимог експлуатації. Отже, розробка такої методики є цілком обґрунтованою та своєчасною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Висока ефективність технологій зміцнення методом ППД у поєднанні з продуктивністю та економічною доцільністю робить їх привабливими для широкого спектра промислових галузей – від точної приладобудівної техніки до важкого машинобудування, у тому числі і сільськогосподарського. Перелік машинобудівних компонентів, які піддаються обробці методом ППД, є надзвичайно широким, причому основна частка таких деталей припадає на виробництво автотракторної та авіаційної техніки, сільськогосподарських машин і важкого промислового обладнання.

Пошуки оптимальних режимів поверхневої пластичної деформації активно продовжуються як в Україні, так і за кордоном. Паралельно вдосконалюються технології та інструментальне забезпечення, а також впроваджуються класичні і новітні методи обробки. Варто відзначити праці Ауліна В. В. [1], Сідашенка О. І. [2], Афтаназіва І. С. [3], Сердюка О. В. [4], Дуднікова А. А. [5] та ін. науковців. Відповідно до механічної концепції формування поверхневого шару, запропонованої Сошко В. О. [6] та Савуляком В. В. [7], процес ППД розглядається як пластичне переміщення металу, при якому структура поверхні формується відповідно до численних деформацій. Ця теорія базується на вивченні закономірностей хвильового характеру пластичних змін, нерівномірного та переривчастого накопичення деформацій і пошкоджень (у тому числі мікроструктурних), а також кінематичних особливостей взаємодії інструмента із заготовкою. Подібну методологію застосував Михалевич В. М. [8] при створенні математичної моделі залишкових напружень, які виникають у поверхневому шарі після ППД. Окремі положення даної теорії були успішно використані у роботі [9] для аналізу процесів обробки валів із використанням обкочуванням роликами. Наукову цінність мають дослідження Zhao J. [10], присвячені підвищенню ефективності технологічних систем ППД із вільно переміщуваними інденторами. Окрему увагу заслуговує робота [11] Лавріненко Н. М. та колективу авторів, у якій, на основі методу скінченних елементів за допомогою програмного середовища Ansys, розв'язуються задачі утворення залишкових напружень у циліндричних деталях із зонами концентрації напружень з урахуванням специфіки механічних властивостей поверхневого шару.

На даний час сучасна пластична теорія ще не запропонувала повного розв'язання задачі взаємодії пружного інструмента з тілом, що піддається пружно-пластичній деформації, у випадку, коли обидві поверхні мають довільну кривизну. Таке рішення мало б враховувати не лише зміцнення матеріалу за межами пружного стану, а й особливості перебігу процесу при значних обсягах пластичної деформації [12]. У зв'язку з цим, відсутній точний та обґрунтований аналіз опору матеріалів у зонах контактної пружно-пластичної взаємодії з урахуванням механічних характеристик і умов навантаження [13]. Не визначено як окремі компоненти інтенсивності такої деформації пов'язані між собою та не встановлено чіткої залежності між ними й залишковими напруженнями в осередку деформації. Існують розбіжності в уявленнях про механізми виникнення цих напружень, а також про наявність їх максимумів, які, як вважається, розміщені на певній глибині під поверхнею – хоча й самі дані про цю глибину є суперечливими.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка математичної моделі, яка б дозволяла обґрунтовано визначати оптимальні режими поверхневої пластичної деформації циліндричних деталей при заданих показниках чистоти поверхні.

Викладення основного матеріалу дослідження

У машинобудуванні широко застосовується метод обробки шляхом обкатування кульками, що дозволяє покращити стійкість деталей до втомного руйнування, зменшити зношування та підвищити твердість зовнішнього шару. Його використовують для обробки поверхонь циліндричної і плоскої форми, а також канавок, галтелей та фасонних ділянок. Важливо, що перед застосуванням прокатування ці ділянки проходять попередню обробку шляхом різання.

Одна із задач методу накатування полягає у роботі інденторів у виді кульок, що вирівнюють мікронерівності поверхні деталі циліндричної форми, які залишились після попередніх технологічних операцій обробки. У процесі впливу кульок на поверхню деталі, виступи частково видаляються або вдавлюються вглиб, заповнюючи собою заглибини рельєфу. Внаслідок цього відбувається помітне зниження висоти мікронерівностей, а отриманий мікрорельєф характеризується меншими переходами між виступами й впадинами, підвищеною рівномірністю, значним співвідношенням між кроком і висотою нерівностей, а також великими радіусами заокруглення. Така форма мікронерівностей сприяє збільшенню реальної площі контакту поверхні, що, у свою чергу, знижує питоме навантаження в зоні спряження деталей. Крім того, рельєф із плавними переходами і великими радіусами сприяє ефективному утриманню мастильного матеріалу в зоні контакту.

Величина пластичної деформації, яка безпосередньо впливає на ступінь зміцнення металу в процесі обкатки, залежить від наступних факторів:

– прикладеного тиску індентора до оброблюваної поверхні, тобто питоме навантаження;
– конструктивних особливостей індентора, включаючи його форму та геометричні параметри;
– хімічних та фізичних характеристик матеріалу деталі;
– початкового рівня шорсткості поверхні перед обробкою;
– величини подачі;
– швидкості здійснення процесу.

Зусилля деформування P та контактний питомий тиск p під час проведення поверхневої пластичної обробки відображають інтенсивність силового впливу індентора на поверхню деталі. Величина зусилля, а також його напрям визначаються характером розподілу контактних нормальних напружень і мають вирішальне значення для зміни фізико-механічних властивостей оброблюваного шару.

Вибір зусилля обкатування визначається рядом чинників, серед яких фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу такі як границя текучості, твердість, допустимий рівень деформації, стан поверхні перед обробкою та її мікрогеометрія, а також форма і габарити як самої деталі, так і робочого інструмента. При цьому максимально допустиме зусилля обкатки деталей із якісних вуглецевих сталей становить:

$$P = p \cdot F, \tag{1}$$

де F – площа контакта кульки із циліндричною поверхнею деталі.

На площу F впливають діаметр кульки зміцнювального інструмента D, діаметр оброблювальної циліндричної поверхні D_d, залишкова пластична деформація Δh і місцева пружна деформація деталі ε [10]:

$$F = \frac{4}{3} D \sqrt{\frac{D_d}{(D_d \pm D)}} \cdot \left(\sqrt{(\Delta h + \varepsilon)\varepsilon} + \varepsilon + \frac{1}{4}\sqrt{\varepsilon \Delta h} \right). \tag{2}$$

Контактний питомий тиск p залежить від границі текучості σ_T, дотичних напружень τ, геометричних параметрів деталі та інструмента, їх частоти обертання [14]:

$$p = 2{,}85\sigma_T - \frac{\tau \cdot \varphi}{D_d}\left(D - D_d \frac{n}{n_d} \right). \tag{3}$$

Під час обкатування сталевих поверхонь підвищення навантаження покращує характеристики наклепу. Так, із зростанням тиску із 250 до 1250 Н/кулька шорсткість поверхні залишається на рівні Ra 0,2 мкм, при цьому глибина наклепу для сталі 45 збільшується із 0,9 до 1,8 мм, а ступінь наклепу в середньому підвищується на 11 %. Найбільш доцільним для сталевих поверхонь є тиск у межах 1000–1250 Н/кульку. Найвищі результати ступеня наклепу спостерігали при обкатуванні циліндричних поверхонь при навантаженні, що не перевищувало границю міцності сталі 45 більше ніж на 10–12 %. При подальшому збільшенні навантаження індентора на поверхню циліндричної деталі спостерігали перенаклеп та локальні зони руйнування.

Під час обкатування подачу встановлювали, орієнтуючись на необхідний початковий рівень шорсткості. При цьому врахували, що на якість поверхні після зміцнення впливають тип матеріалу оброблюваної деталі, діаметр індентора та кількість проходів, що особливо важливо при виконанні завершальних операцій.

Подачу зміцнювального інструмента визначали [15] з урахуванням частоти обертання шпинделя верстата n, кількості кульок у головці z, діаметра кульки D, діаметра кола, по якому рухаються кульки d, значення шорсткості поверхні Ra та подачі на одну кульку $s_к$:

$$s = n \cdot i \cdot z \cdot k \cdot \sqrt{D \cdot Ra}, \tag{4}$$

де i – передаточне відношення, $i = D/d$, k – коефіцієнт проковзування кульок під час обкатки, $k = 0{,}94\ldots0{,}96$.

Дослідження показало, що показники шорсткості, подачі та діаметри кульок інденторів взаємопов'язані між собою. Протягом одного оберту кульки навколо осі зміцнювальної головки заготовка деталі переміщується на

відстань подачі $s_к$. Величина подачі суттєво впливає на стан обробленої поверхні. Із зростанням подачі збільшується інтервал між вершинами мікронерівностей, а кількість повторних натискань на одну й ту ж ділянку зменшується, що призводить до підвищення шорсткості та зменшення глибини і рівня наклепу. Залежність ступеня наклепу *C*, шорсткості *Ra* та глибина наклепу *h* від подачі *s* зміцнювального інструмента наведено на рисунку 1.

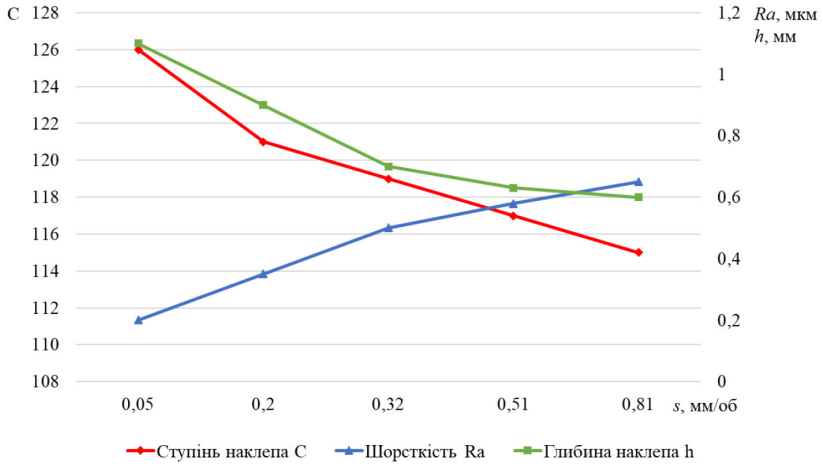

Рис. 1. Залежність ступеня наклепу *C*, шорсткості *Ra* та глибини наклепу *h* від подачі *s* зміцнювального інструмента для сталі 45

Із графіків (рис. 1) видно, що при зростанні подачі у 15 разів шорсткість поверхні збільшується на два класи. У свою чергу, глибина наклепаного шару зменшилась у 2,5 раза, а ступінь наклепу *C* знизився на 11 %. Таким чином, аналіз результатів показав доцільність оптимальних значень подачі для сталі 45, що становить 0,05 мм/кульку.

Вплив діаметра індентора *D* на ступінь наклепу *C*, шорсткість *Ra* та глибину наклепу *h* для сталі 45 показано на рисунку 2.

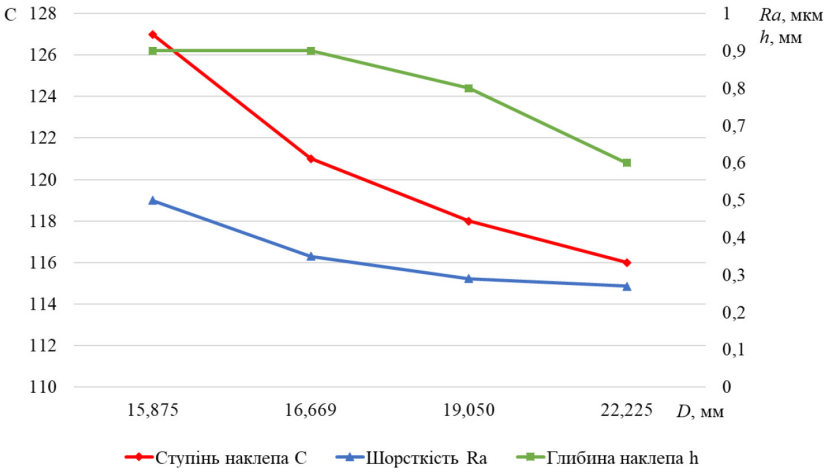

Рис. 2. Залежність ступеня наклепу *C*, шорсткості *Ra* та глибина наклепу *h* від діаметра індентора *D* для сталі 45

При збільшенні діаметрів кульок із 15,875 до 22,225 мм за інших незмінних умов, спостерігається незначне зниження шорсткості поверхні, а також зменшення глибини та ступеня наклепу на 48 % і 11 % відповідно. Таке явище можна пояснити наступним чином: при незмінних подачі та питомому тиску, збільшення діаметра кульки призводить до зростання кількості контактів із поверхнею на одиницю площі, що позитивно впливає на зниження шорсткості. Зменшення глибини та ступеня наклепу пов'язано з тим, що при менших діаметрах під час кочення кульки формується пружно-пластичний клин, який впливає на більшу глибину і з більшою інтенсивністю, ніж у випадку із більшими діаметрами.

Кількість проходів має суттєвий вплив на твердість поверхневого шару та шорсткість, і, зазвичай, визначається експериментальним шляхом. Найчастіше він варіюється від одного до трьох, залежно від обраних значень інших параметрів режиму обкатування. Надмірне збільшення кількості проходів призводить до зростання

ступеня деформації, однак водночас може негативно позначитись на якості обробленої поверхні. У той же час твердість поверхневого шару та глибина впливу деформації зростають. У даному дослідженні для запобігання погіршення стану оброблювальної поверхні, виконали два додаткові проходи з меншою подачею та зниженим тиском на ролик. Такий підхід сприяв покращенню шорсткості обкатаної поверхні.

Якісні сталі менш схильні до перенаклепу, тому збільшення кількості проходів не має суттєвого впливу на показники чистоти поверхні. Для сталі 45 при одному проході забезпечується шорсткість Ra 0,35 мкм, а при п'яти проходах – Ra 0,3 мкм, тобто показник збільшується на один клас. У випадку високоміцних сталей збільшення кількості проходів є доцільним, оскільки це помітно покращує міцнісні характеристики обробленої поверхні.

Швидкість обкатування залежить від частоти обертання зміцнювального сепаратора відносно деталі та її геометричних розмірів і визначається [15]:

$$\upsilon = \frac{\pi \cdot D_d \cdot n}{1000}. \quad (5)$$

Вибір швидкості обкатування безпосередньо впливає на шорсткість поверхні та глибину зміцнення. Із підвищенням швидкості обкатування рівень шорсткості поверхні збільшується. Це пов'язано з тим, що при нижчих швидкостях мікронерівності згладжуються ефективніше. Пластична деформація у таких умовах переважає над пружною, оскільки кулька довше впливає на кожну ділянку поверхні. У міру зростання швидкості контактний час скорочується, і пружна складова деформації стає домінуючою. Зростання пластичної деформації відстає від темпів збільшення швидкості навантаження.

Тож для підвищення продуктивності допустимо проводити обкатку на вищих швидкостях, якщо метою є досягнення високої якості обробки поверхні. Однак, якщо завдання полягає в отриманні більшої глибини та ступеня наклепу, необхідно використовувати нижчі швидкості.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

1. Показники шорсткості, подачі та діаметри кульок інденторів взаємопов'язані між собою.
2. Збільшення подачі зміцнювального інструмента у 15 разів підвищує шорсткість поверхні на два класи. При цьому глибина наклепаного шару зменшується у 2,5 раза, а ступінь наклепу *C* знижується на 11 %. Оптимальне значення подачі для сталі 45 становить 0,05 мм/кульку.
3. Під час обкатування сталевих поверхонь підвищення навантаження покращує характеристики наклепу: глибина наклепу для сталі 45 збільшується із 0,9 до 1,8 мм, а ступінь наклепу в середньому підвищується на 11 %.
4. Під час збільшення діаметрів кульок зміцнювального інструмента, за інших незмінних умов, спостерігається незначне зниження шорсткості поверхні, а також зменшення глибини та ступеня наклепу.

Список використаної літератури

1. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами: монографія. *Кропивницький: Лисенко В. Ф.* 2017, 278 с.
2. Сідашенко О. І., Скобло Т. С., Войтов В. А. Практикум з ремонту машин. *Харків: ХНТУСГ*. 2007, 415 с.
3. Афтаназів І. С., Гавриш А. П., Китичок П. О. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : Навчальний посібник. *Житомир: ЖІТІ*, 2001.
4. Сердюк О. В., Сивак І. О., Карватко М. А. Напружено-деформований стан в осередку деформації при вдавлюванні тороїдального ролика. *Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за галузями знань «Технічні науки»)*. 2013, Вип. 40. с. 251–256.
5. Дудніков А. А., Дудник В. В., Бурлака О. А., Канівець О. В. Зміна характеристик матеріалу деталей при вібраційному зміцненні. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020, № 4 (99). С. 21-28. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-4-3.
6. Сошко В. О., Діневич Г. Ю., Сімінченко І. П., Малигін О. В., Крючковський В. В. Використання багатофакторних статистичних моделей для дослідження процесів, що спостерігаються при механічній обробці металів: навч.-метод. посіб. *Херсон*: *Олді-плюс*, 2010. 94 с.
7. Савуляк В. В. Пластичне деформування тонколистового матеріалу в умовах звичних локалізацій деформацій та напружень : монографія. Вінниця: *УНІВЕРСУМ-Вінниця*. 2008, 150 с.
8. Михалевич В. М., Добранюк Ю. В. Модель пластичного деформування матеріалу на вільній поверхні циліндричних зразків під час вісесиметричного осадження. Частина 2. Визначення накопиченої деформації та інтенсивності логарифмічних деформацій на основі різних апроксимацій. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2010, № 3. С. 99–102.
9. Субботіна В. В., Білозеров В. В., Субботін О. В. та інші Управління величиною і розподілом залишкових макронапружень, що подаються обкочуванням роликами. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2024, № 107(2024). С. 78–81. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.78
10. Zhao J., Zhou W., Tang J., Jiang T., Liu H. Analytical and experimental study on the surface generation mechanism in shot peening. Archives of Civil and Mechanical Engineering.2022, 22 (3). DOI: 10.1007/s43452-022-00431-7

11. Лавріненко Н. М., Сукманов В. О., Авраменко А. О., Українець А. І., Афенченко Д. С., Шульга А. В. Кінцево-елементне моделювання в інженерних розрахунках : Підручник. Донецьк : *ДонНУЕТ, Норд-Прес*. 2008, 668 с.

12. Khomenko A. V. Severe plastic deformation: Methods and mathematical models of nanomaterials formation. 2020, 24(2), art. no. 2001, pp. 1–20. DOI: 10.30970/jps.24.2001

13. Дудніков А. А., Дудник В. В., Біловод О. І., Канівець О. В., Бурлака О. А. Підвищення ресурсу зерно-посівних машин. *Інженерія природокористування*. 2021, № 4(18), С. 68–72. DOI: https://doi.org/10.37700/enm.2020.4(18).68–72

14. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. *Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. І. Пулюя*. 2011, 322 с.

15. Krishnan K. M. Principles of materials characterization and metrology. *Oxford: Oxford University Press*, 2021. 868 p.

References

1. Aulin, V. V. (2017). Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti i nadiinosti robochykh orhaniv gruntoobrobnykh mashyn z rizalnymy elementamy: monohrafiia [Tribophysical bases for increasing the wear resistance and reliability of tillage machines with cutting elements: a monograph]. *Kropyvnytskyi: Lysenko V. F.* [in Ukrainian].

2. Sidashenko, O. I., Skoblo, T. S., & Voitov, V. A. (2007). Praktykum z remontu mashyn [Machine repair workshop]. *Kharkiv : KhNTUSH*. [in Ukrainian].

3. Aftanaziv, I. S., Havrysh, A. P., & Kytychok, P. O. (2001). Pidvyshchennia nadiinosti detalei mashyn poverkhnevym plastychnym deformuvanniam : Navchalnyi posibnyk [Improving the reliability of machine parts by surface plastic deformation : A tutorial]. *Zhytomyr : ZhITI*. [in Ukrainian].

4. Serdiuk, O. V., Syvak, I. O., & Karvatko, M. A. (2013). Napruzheno-deformovanyi stan v oseredku deformatsii pry vdavliuvanni toroidalnoho rolyka [Stress-strain state in a deformation cell during toroidal roller indentation]. *Naukovi notatky: mizhvuzivskyi zbirnyk (za haluziamy znan "Tekhnichni nauky")*. Vyp. 40. pp. 251–256. [in Ukrainian].

5. Dudnikov, A. A., Dudnyk, V. V., Burlaka, O. A., & Kanivets, O. V. (2020). Zmina kharakterystyk materialu detalei pry vibratsiinomu zmitsnenni [Changes in the material characteristics of parts during vibration hardening]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 4(99). pp. 21–28. DOI: 10.37128/2306-8744-2020-4-3. [in Ukrainian].

6. Soshko, V. O., Dinevych, H. Yu., Siminchenko, I. P., Malyhin, O. V., & Kriuchkovskyi, V. V. (2010). Vykorystannia bahatofaktornykh statystychnykh modelei dlia doslidzhennia protsesiv, shcho sposterihaiutsia pry mekhanichnii obrobtsi metaliv [The use of multivariate statistical models to study the processes observed in metal machining]. *Kherson : Oldi-plius*. [in Ukrainian].

7. Savuliak, V. V. (2008). Plastychne deformuvannia tonkolystovoho materialu v umovakh zvychnykh lokalizatsii deformatsii ta napruzhen : monohrafiia [Plastic deformation of thin sheet material under conditions of usual localization of deformations and stresses: monograph]. *Vinnytsia* : *UNIVERSUM-Vinnytsia*. [in Ukrainian].

8. Mykhalevych, V. M., & Dobraniuk, Yu. V. (2010). Model plastychnoho deformuvannia materialu na vilnii poverkhni tsylindrychnykh zrazkiv pid chas visesymetrychnoho osadzhennia. Chastyna 2. Vyznachennia nakopychenoi deformatsii ta intensyvnosti loharyfmichnykh deformatsii na osnovi riznykh aproksymatsii [Model of plastic deformation of material on the free surface of cylindrical samples during axisymmetric deposition. Part 2. Determination of the accumulated strain and intensity of logarithmic deformations based on various approximations]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*. № 3. pp. 99–102. [in Ukrainian].

9. Cubbotina, V. V., Bilozerov, V. V., Cubbotin, O. V. & et all (2024). Upravlinnia velychynoiu i rozpodilom zalyshkovykh makronapruzhen, shcho podaiutsia obkochuvanniam rolykamy [Controlling the magnitude and distribution of residual macro-stresses applied by rolling]. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. № 107 (2024). pp. 78–81. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.78 [in Ukrainian].

10. Zhao, J., Zhou, W., Tang, J., Jiang, T., & Liu, H. (2022). Analytical and experimental study on the surface generation mechanism in shot peening. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 22 (3). DOI: 10.1007/s43452-022-00431-7

11. Lavrinenko, N. M., Sukmanov, V. O., Avramenko, A. O., Ukrainets, A. I., Afenchenko, D. S., & Shulha, A. V. (2008). Kintsevo-elementne modeliuvannia v inzhenernykh rozrakhunkakh : Pidruchnyk [Finite element modeling in engineering calculations : A textbook]. *Donetsk : DonNUET, Nord-Pres*. [in Ukrainian].

12. Khomenko, A. V. (2020). Severe plastic deformation: Methods and mathematical models of nanomaterials formation. 24 (2), art. no. 2001, pp. 1–20. DOI: 10.30970/jps.24.2001

13. Dudnikov, A. A., Dudnyk, V. V., Bilovod, O. I., Kanivets, O. V., & Burlaka, O. A. (2021). Pidvyshchennia resursu zernoposivnykh mashyn [Increasing the service life of grain sowing machines]. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*. № 4(18), pp. 68–72. DOI: https://doi.org/10.37700/enm.2020.4(18).68–72. [in Ukrainian].

14. Zakalov, O. V., & Zakalov, I. O. (2011). Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: Navchalnyi posibnyk [Fundamentals of friction and wear in machines: A tutorial]. *Ternopil: Vyd-vo TNTU im. I. Puliuia*. [in Ukrainian].

15. Krishnan, K. M. (2021). Principles of materials characterization and metrology. *Oxford : Oxford University Pres*.