

*О. О. ВОЛКОВ, В. В. СУББОТИНА, М. А. ПОГРІБНИЙ, О. С. ТЕРЛЕЦЬКИЙ,  
А. В. ЮШКО, Г. А. ФЕДОРЕНКО*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ВПЛИВУ В ПРОЦЕСІ ДОДАТКОВОГО ФРИКЦІЙНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ СТАЛЕЙ**

Досліджено, як впливає деформаційна складова на структурний стан і властивості сталей у процесі додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення (ДФДЗ). Поєднання теплового та механічного впливів спричиняє суттєві структурні перетворення в приповерхневих шарах матеріалу. За допомогою дюрOMETРІЧНИХ досліджень та з використанням результатів металографічного аналізу, що отримані раніше, визначено особливості зв'язку між еволюцією мікроструктури та зміною властивостей в полі впливу деформації при ДФДЗ поверхні. Наведено результати досліджень зразків і проаналізовано вплив деформаційної складової на розподіл мікротвердості в перерізі зразків сталей з різним вмістом вуглецю.

**Ключові слова:** додаткове фрикційно-деформаційне зміцнення, поверхня, нагрівання, пружна та пластична деформація, наклеп, структура, «білий шар», мікротвердість.

*О. VOLKOV, V. SUBBOTINA, M. POHRIBNYI, O. TERLETSKYI, A. YUSHKO,  
H. FEDORENKO*

## **INVESTIGATION OF THE DEFORMATION EFFECT IN THE PROCESS OF ADDITIONAL FRICTION-DEFORMATION STRENGTHENING OF STEELS**

The influence of the deformation component on the structural state and properties of steels during the process of additional friction-deformation strengthening (AFDS) has been investigated. It is known that during FDS, the simultaneous action of thermal flows and mechanical loads creates a complex stress-strain state in the near-surface layers of the material. The combination of thermal and mechanical energy causes intensive structural transformations manifested in the formation of fine-grained or even nanostructured regions, the development of deformation texture, and changes in phase composition.

Special attention in the study is given to the role of elastic and plastic deformation in the strengthening mechanisms. Elastic deformation, although it does not leave permanent structural changes, determines the distribution of instantaneous stresses in the contact zone and influences the initiation of plastic shifts. Plastic deformation, which is dominant during AFDS, leads to the accumulation of dislocations, the formation of subgrains, and an increase in the defectiveness of the crystal lattice. These processes ensure a significant increase in microhardness and the development of a strengthened layer with improved mechanical characteristics.

Using durometric examinations, as well as previously obtained metallographic analysis data, the relationship between microstructural evolution and changes in material properties under the action of deformation has been established. The results of microhardness measurements are presented, and the influence of the deformation component on its distribution across the cross-section of steel specimens with different carbon contents is analyzed. It is shown that an increase in the proportion of plastic deformation promotes the formation of a deeper and more uniform strengthened layer, while the ratio of elastic to plastic deformation determines the hardness gradient and structural heterogeneity within the zone affected by AFDS.

**Keywords:** additional friction-deformation strengthening, surface, heating, elastic and plastic deformation, work hardening, structure, “white layer”, microhardness.

### **Вступ.**

В умовах постійного підвищення вимог до ресурсу та надійності машинобудівних деталей усе більшої актуальності набувають технології, здатні ефективно покращувати їхню зносостійкість. Це особливо важливо для елементів, що працюють у режимах інтенсивного тертя, високих механічних навантажень та коливань температури. Одним із таких сучасних методів є додаткове фрикційно-деформаційне зміцнення (ДФДЗ), суть якого полягає в одночасному впливі локального нагрівання та пластичної деформації, що виникає під час тертя. Поєднання цих факторів спричиняє глибоку перебудову структури приповерхневих шарів металу, що в свою чергу суттєво підвищує експлуатаційні властивості сталі – її твердість, втомну витривалість та опір зношуванню.

Особливе значення такі дослідження мають для сталей з різним вмістом вуглецю. Вуглець є ключовим елементом, який формує характер структурних змін під час термічних і деформаційних впливів, коли формується фазовий склад матеріалу, та впливає на швидкість дифузійних процесів. Крім того, його концентрація зумовлює схильність матеріалу до утворення карбідів і формування специфічних зон, зокрема так званого «білого шару». Через це зміцнення сталей з різним вмістом вуглецю відбувається по-різному, що підкреслює необхідність глибокого аналізу їхньої поведінки в умовах ДФДЗ з визначенням впливу саме деформаційної складової.

#### **Аналіз останніх досягнень і публікацій.**

Проблематика деформаційного зміцнення матеріалів є предметом досліджень вже багато років. Даний підхід у зміцненні багатьох матеріалів показав як ефективність так і існування певних обмежень, критеріями яких є, серед інших, попередній стан матеріалу. Тож саме попередній стан матеріалу, якому притаманні певні пластичність, твердість та низка характеристик і є визначальним у розумінні можливості реалізації того чи іншого механізму зміцнення. Нагадаємо, що основні механізми зміцнення металів і сплавів такі та проведемо огляд їх особливостей:

1. Підвищення густини дислокацій, що ініційоване робочим (деформаційним) зміцненням при пластичній деформації.

Наприклад, при холодно-пластичному деформуванні відбувається інтенсивне утворення та накопичення дислокацій у кристалічній ґратці. Зі зростанням густини дислокацій рух дислокацій у відповідь на подальше навантаження ускладнюється, що підвищує опір матеріалу до пластичної деформації. Це основа так званого наклепу (work hardening).

Генерація нових дислокацій під час деформації, зокрема через механізм Франка-Ріда (Frank-Read source), забезпечує інтенсивне накопичення дефектів (дислокацій) і, як наслідок, зміцнення металу.

2. Зміцнення за рахунок здрібнення зерен (grain-boundary / structural strengthening).

Зменшення розміру зерен підвищує кількість меж зерен - природних перешкод для руху дислокацій. Це приводить до зростання межі текучості та міцності. Сам ефект описується рівнянням Холла-Петча (Hall-Petch relationship), а саме, чим менший середній діаметр зерна, тим сильніша затримка руху дислокацій і, відповідно, більша міцність.

Цей механізм відіграє особливо важливу роль у методах інтенсивної пластичної деформації, які приводять до формування дрібнозернистої або навіть нанокристалічної структури.

3. Підтвердження дії множинних механізмів при великих деформаціях.

У сучасних дослідженнях встановлено, що при обробці сталі великими пластичними деформаціями (cold-to-warm / severe plastic deformation) одночасно працюють два головні механізми зміцнення: дислокаційне (substructural) та структурне (grain-boundary).

Така комбінація дає суттєве підвищення мікротвердості, міцності та зносостійкості матеріалів.

4. Роль фазових перетворень, твердо-розчинного та осадкового зміцнення (когезія з іншими механізмами).

Окрім «чистих» деформаційних методів, часто застосовують твердо-розчинне, осадкове або фазове зміцнення, де розчинені домішки або дрібні частинки, наприклад карбіди, створюють додаткові перешкоди для руху дислокацій.

У випадку поверхневого термодформаційного оброблення, наприклад, при комбінованій термомеханічній обробці або фрикційно-деформаційному зміцненні, зміни температури та дифузія під впливом тепла можуть викликати зміни фаз, утворення карбідів, мікро- та нановставок, що додатково підвищують твердість та зносостійкість.

Розглянемо детальніше особливості, обмеження та застосування деформаційного впливу на практиці:

1. При дуже інтенсивних пластичних деформаціях зерна можуть стати надто дрібними

(наноскопічний масштаб – коли лінійний масштаб становить 1–100 нанометрів) після чого класична закономірність Холла-Петча іноді порушується, а саме, при екстремально малому розмірі зерна зміцнення через межі зерен може зменшуватися внаслідок зміни механізму пластичної деформації, наприклад на ковзання меж зерен або дифузійні механізми.

2. При гарячій пластичній деформації або обробці при підвищених температурах можливий процес динамічної рекристалізації (dynamic recrystallization), коли деформовані зерна замінюються свіжими, мало-деформованими зернами. Це може суттєво зменшити ефект зміцнення, оскільки зменшується густина дефектів кристалічної будови та зникає деформаційний запас міцності.

Зазначені наукові концепції знаходять відображення і підтвердження результатами експериментальних досліджень, що висвітлені в сучасних літературних джерелах. Так, наприклад, у роботах, присвячених вивченню впливу теплово-деформаційних процесів на поверхневе деформаційне зміцнення сталі при термофрикційній обробці показано, як у процесі такої обробки (нагрівання + деформація) відбувається формування зміцненого шару. Змінюється мікроструктура, утворюються  $\epsilon$ -карбіди та наноструктурні зони, що значно підвищує твердість та зносостійкість сталі.

Аналіз джерел літератури, де описані дослідження щодо мікроструктури та механічних властивостей сталей і сплавів, підданих інтенсивним холодному та деформуванню з обмеженим нагріванням показує, що при обробці значними пластичними деформаціями утворюється висока густина дислокацій, субзерен, межі зерен/субзерна; одночасно діють дислокаційне та міжзеренне зміцнення, що дає істотне підвищення міцності та твердості.

Таким чином, вибір оптимального методу зміцнення (холодна деформація, термодформація, комбіновані технології, поверхневе оброблення) залежить від типу сталі, її хімічного складу, потрібних властивостей (твердість, втомна міцність, зносостійкість) та умов експлуатації. Наприклад, для поверхневого зміцнення з підвищеною зносостійкістю часто обирають методи, які поєднують деформацію з контрольованою температурою, щоб отримати дрібнозернисту структуру, високу густину дислокацій та, за потреби, зміни фазового складу.

Деформаційний вплив при ДФДЗ саме створює можливість для додаткового зміцнення сталей до рівня, вищого за той, досягти якого технічно майже не можливо з використанням стандартних загальновідомих технологічних процесів оброблення. Цікавим є і той факт, що можна здійснювати ДФДЗ, якщо в структурі сталі після гартування є певна кількість аустеніту залишкового, яка характеризується високою здатністю до наклепу, що створює додаткові можливості для високовуглецевих марок сталей. Окрім того ДФДЗ можна проводити і якщо структура аустеніту залишкового в сталі відсутня, проте наявна така структурна складова, як цементит (вторинний), яка характеризується підвищеним рівнем твердості. Додаткове фрикційно-деформаційне зміцнення сталей, яке досліджується характеризується тим, що кожна з цих сталей була зміцнена до рівня, перевищуючого максимально можливого, що досягається термічним шляхом.

#### **Мета та постановка задачі.**

Провести аналіз поведінки сталей з різним вмістом вуглецю в умовах ДФДЗ з визначенням впливу саме деформаційної складової.

#### **Основні положення та результати досліджень.**

Як відомо, способи отримання поверхневих «білих шарів» з високою твердістю є актуальним науково-промисловим питанням, яке досліджують вже впродовж тривалого часу [4–8]. Про важливість експлуатаційних характеристик отриманих зміцнених «білих шарів», таких як твердість і товщина, вже наголошувалося раніше [10]. Оскільки окремі вироби потребують високої якості поверхні, що може вимагати фінішного (чистового) шліфувального оброблення [9], доцільно аналізувати можливості деформаційного впливу для отримання необхідних, як глибини так і твердості таких зміцнених шарів, враховуючи припуски на механічне фінішне оброблення. Відповідно, при аналізі ДФДЗ сталей з різним вмістом вуглецю, доцільно досліджувати, разом з іншими факторами, саме можливості деформаційного

впливу та умови в яких він можливий. Це потрібно для розуміння стратегії отримання необхідних і глибини, і рівня зміцнення поверхневих шарів в зразках та потенційних виробках. Для розв'язання даного питання, в рамках мети дослідження, аналізували ряд вуглецевих сталей, які характеризуються простим хімічним та фазовим складом, а саме: сталі 20, 45, У7, У12, що були обрані за низкою показників, як матеріали для потенційних виробів, де можна ефективно застосовувати цей вид додаткового зміцнення. Зазначимо, що, під час проведеного в попередніх дослідженнях металографічного аналізу зразків після ДФДЗ, було виявлено формування типових «білих шарів» у всіх досліджених сталях. Вони характеризуються, як зони з високим рівнем мікротвердості та характерною структурою «деформованого мартенситу», яка має більш високий рівень дисперсності, порівняно зі структурою мартенситу, що отримана класичним термічним шляхом [10].

Властивості досліджених сталей після ДФДЗ представлені в таблиці 1.

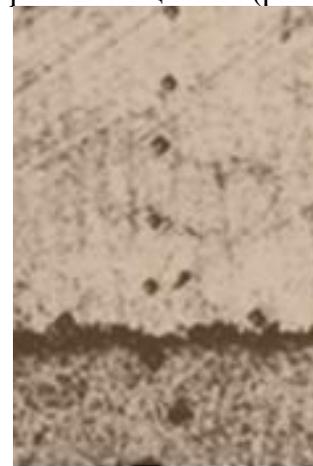
Таблиця 1 – Вплив ДФДЗ на властивості вуглецевих сталей

Марка сталей	Фактори та умови оброблення	Глибина зміцнення, мкм	Мікротвердість зміцненого шару, кгс/мм <sup>2</sup>	Мікротвердість основної частини зразка, кгс/мм <sup>2</sup>
Жорсткий режим ДФДЗ S = 30 мм/с, t = 0,7 мм				
Матеріал дослідних зразків	20	Попереднє гартування + низькотемпературне відпускання + ДФДЗ	200	350
	45		370	500
	У7		550	750
	У12		450	680

Розглянемо детальніше морфологію структури перерізу на прикладі зразків із сталей 45 (ліворуч) та У7 (праворуч), де спостерігається найбільший рівень зміцнення (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1 – Структура вуглецевих сталей марок 45 та У7 після ДФДЗ в попередньо загартованому стані: а – сталь 45; б – сталь У7 (× 200 (× 0,5))

Мікроструктури зразків розташовані поряд, щоб було помітніше схожість у морфології їх структур, а саме, зміцнений «білий шар», який формується від поверхні поєднано з основною частиною зразків через в'язко-пружний прошарок, який набув рекристалізаційного зміцнення внаслідок теплового впливу на підповерхневий підшар, за рахунок передачі тепла теплопровідністю матеріалів від поверхні вглиб зразків в процесі ДФДЗ. Навіть візуально, на фото мікроструктур, помітно здрібнення зерна в сформованому «білому шарі», проте дані фото мікроструктур, спрямовані на демонстрацію контрасту між зміцненою і додатково зміцненою

частинами зразків мають невелику глибину різкості. Тому, для детального розуміння зміни форми і розміру зерен сталей під час формування «білого шару» на рис. 2 представлено 2 фото мікроструктури сталі саме (ліворуч) перед додатковим зміцненням з використанням тертя (ДФДЗ) та (праворуч) після додаткового зміцнення з використанням тертя (ДФДЗ).



а)

б)

Рис. 2 – Форма зерна в перерізі сталі:  
а – перед ДФДЗ; б – після ДФДЗ ( $\times 850 (\times 2)$ )

Візуальне порівняння представлених на рис. 2 структур сталі дозволяє зробити висновок про зменшення розміру зерна в результаті ДФДЗ, що супроводжується збільшенням кількості (довжини) меж зерен, які можуть блокувати рух дислокацій. А прояви зміни структури, що відбуваються під час деформування поверхні, безпосередньо визначають характер зміцнення та механічні властивості матеріалу.

Нагадаємо, що при деформуванні, яке відповідає холодному, залежно від температури, для кожного конкретного матеріалу, відсутні процеси рекристалізації, тому всі структурні зміни мають накопичувальний характер. При цьому, основними структурними проявами можуть бути: різке збільшення щільності дислокацій, що утворюють клубки, сітки та стінки, витягування та сплюснення зерен у паралельному або перпендикулярному напрямку, відносно напрямку деформування залежно від схеми деформаційного процесу, формування субзеренної структури з великими внутрішніми напруженнями, поява та розвиток кристалографічної текстури, що зумовлює анізотропію властивостей, накопичення залишкових напружень у матеріалі. Слід також пам'ятати, що при гарячому деформуванні одночасно з деформацією відбуваються рекристалізаційні структурні зміни, що сприяє самовідновленню структури. Внаслідок цього відбувається часткове зниження щільності дислокацій за рахунок їх перегруповання та анігіляції і утворення нових рівноважних зерен. Тобто, в результаті гарячого деформування додаткове зміцнення матеріалу майже відсутнє.

Тож проведемо аналіз можливих механізмів зміцнення за участі деформаційного впливу під дією деформування поверхні в процесі ДФДЗ та зведемо їх в таблицю 2.

#### **Аналіз результатів досліджень.**

Аналіз результатів дослідження впливу деформаційної складової на структурний стан і властивості сталей марок 20, 45, У7 і У12 під дією додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення показав, що отриманий додатково зміцнений поверхневий шар може складатися з мартенситу, який зазнав інтенсивної деформації, що й забезпечує підвищений рівень мікротвердості. Встановлено, що однією з ключових умов формування такого зміцнення є оптимальний вміст вуглецю, який був визначений, за результатами попередніх досліджень, як 0,65–0,8 %. Одночасно з цим, ще однією важливою умовою є саме температура нагрівання в процесі ДФДЗ. Необхідно, щоб така температура була нижчою за критичну, проте достатньою для набуття матеріалом стану, коли він здатен до наклепу без пошкоджень структури та супутніх процесів, які можуть призводити до руйнування матеріалу. За таких умов деформаційний вплив ДФДЗ набуває найбільшої ефективності, оскільки мартенситне перетворення під час попередньо проведеного гартування відбулося найбільш повно. А от вже коли вміст вуглецю перевищує 0,8 % у сталі формується більша кількість залишкового

аустеніту, який знижує рівень твердості, хоча й може частково зміцнюватися внаслідок подальшого деформування в процесі ДФДЗ. Саме тому в сталі У12 спостерігається менша глибина зміцнення та нижча мікротвердість поверхневого «білого шару» після ДФДЗ ніж в сталі У7 (див. табл. 1), для якої деформаційний вплив на наявну мартенситну структуру є значно ефективнішим.

Таблиця 2 – Основні механізми зміцнення матеріалів за участі деформаційного впливу та їх характеристика

Механізм зміцнення	Фізична суть механізму	Переваги та ефект	Обмеження та особливості	Приклади застосування	Підтвердження в літературі
1. Дислокаційне зміцнення - наклеп (work hardening)	Інтенсивне накопичення дислокацій у кристалічній ґратці під час пластичної деформації. Взаємодія між дислокаціями ускладнює подальший їх рух.	Зростання межі текучості, міцності, мікротвердості. Добре працює при холодній деформації.	Перенаклеп може спричинити крихкість. Знижується ефект при високих температурах через рекристалізацію.	Холодне прокатування, волочіння, фрикційно-деформаційне зміцнення (ФДЗ, ДФДЗ).	Класичні роботи з дислокаційної теорії (Hirth & Lothe), роботи з SPD-методів.
2. Зміцнення за рахунок здрібнення зерен (Hall-Petch)	Зменшення розміру зерна збільшує кількість меж зерен, які блокують рух дислокацій.	Дуже ефективно підвищення твердості та міцності; створення надміцних дрібнозернистих структур.	Ефект Холла-Петча може призвести до нанорозмірів зерен (<10–20 нм).	Метод інтенсивної пластичної деформації (ЕСАР, НРТ), поверхневе фрикційне зміцнення.	Hall-Petch (1951–1953), сучасні SPD-дослідження (Valiev, Zhilyaev).
3. Субзеренне дислокаційне зміцнення	Формування субзерен і їх меж як результат значної пластичної деформації.	Підвищення міцності за рахунок внутрішньої фрагментації структури.	Високі деформації можуть викликати динамічну рекристалізацію.	ФДЗ, ДФДЗ, високоенергетичне фрикційне зміцнення.	Сучасні огляди із субструктурної еволюції при SPD (Valiev, Langdon).
4. Комплексне зміцнення при фрикційно-деформаційних методах (ДФДЗ, FSP.)	Поєднання теплової дії, пластичної деформації, часткової рекристалізації, субзерен, утворення «білого шару» та підвищеної густини дислокацій.	Формування градієнтної структури, значне підвищення мікротвердості, зносостійкості та втомної міцності.	Необхідність контролю теплових режимів; можливе перегрівання.	Фрикційно-деформаційне зміцнення, процеси FSP/FSPW, поверхневий наклеп.	Рецензовані статті з FSP, FSD (Materials, Wear, Surface Engineering).

**Висновки.**

Тож вибір оптимального методу зміцнення (холодна деформація, термодформаційне зміцнення, поверхневе механічне оброблення, комбіновані технології оброблення) залежить від типу сталі, її хімічного складу, потрібних властивостей (твердості, втомної міцності, зносостійкості) та умов експлуатації. Так для поверхневого зміцнення з підвищеною зносостійкістю часто обирають методи, які поєднують деформацію з контрольованим температурним впливом, щоб отримати дрібнозернисту структуру, високу густину дислокацій та, за потреби, зміни фазового складу.

Таким чином можна підвести підсумок, що створивши необхідні умови для зміцнення поверхні у виробках із сталей, навіть коли вони вже зміцнені термічним шляхом, до максимально можливого в такий спосіб рівня, можна досягти їх ефективного додаткового зміцнення за рахунок деформаційного впливу в певному температурному діапазоні.

**Список літератури:**

1. Дяченко С.С., Дощечкіна І.В., Мовлян А.О., Плешаков Е.І. / Матеріалознавство. Підручник / Харків: ХНАДУ, 2007. – 440 с.
2. Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. Materials science and engineering: an introduction. John wiley & sons, 2020.
3. Должанський А. М., Максакова О. С., Черноіваненко К. О. та ін. Технічне регулювання та контроль на підприємстві : підручник ; за ред. А. М. Должанського. Дніпро : Свідлер А.Л., 2023. Т. 2 : Технології та дефекти продукції металургії. 632 с.
4. Volkov O.A. Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2016. Vol. 2. № 5 (80). P. 38–44.
5. Голубець В.М., Кірик М.Д., Капраль Ю.Р., Рудь А.Є. Фізико-механічні характеристики зміцненого високошвидкісним тертям наноструктурного шару на сталі 45. Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : зб. наук.-техн. пр. Львів : РВВ НЛТУ України, 2012. Вип. 22.13. С. 114–117.
6. Рудь А.Є. Особливості зміцнення високошвидкісним тертям з попутною подачею заготовки. Науковий вісник НЛТУ України. 2009. Вип. 19.3. С. 120–125.
7. Манько О.В. Стецько Ю.Б., Білявський М.Л. Утворення білого шару при фрикційно-зміцнюючій обробці тонких пластин. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. 2005. Вип 1. С. 146–157.
8. Гурей Т.А. Дослідження точності зміцнених поверхонь деталей машин після їх фрикційної обробки. Прогресивні технології і системи машинобудування. Міжнародний збірник наукових праць. Донецьк, 2009. Вип. 38. С. 61–65.
9. Погрібний М.А., Сизий Ю.А., Волков О.О. Дослідження структури сталі після ТФО і чистового шліфування. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». Харків, 2007. Вип. 61. С. 255–260.
10. Краєвська Ж.В., Волков О.О., Субботіна В.В., Погрібний М.А. Дослідження структурних перетворень, що відбуваються в сталях в процесі додаткового фрикційно-деформаційного зміцнення. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Автомобіле- та тракторобудування = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series : Automobile and Tractor Construction : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків : НТУ "ХПІ", 2025. № 1. С. 20–27.

**References (transliterated):**

1. Diachenko S.S., Doshchekina I.V., Movlian A.O., Pleshakov E.I. / Materialoznavstvo. Pidruchnyk / Kharkiv: KhNADU, 2007. – 440 s.
2. Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. Materials science and engineering: an introduction. John wiley & sons, 2020.
3. Dolzhanskyi A. M., Maksakova O. S., Chornoivanenko K. O. ta in. Tekhnichne rehulivannia ta kontrol na pidpriemstvi : pidruchnyk ; za red. A. M. Dolzhanskoho. Dnipro : Svidler A.L., 2023. T. 2 : Tekhnolohii ta defekty produktsii metalurhii. 632 s.
4. Volkov O.A. Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing. Eastern-European journal of enterprise technologies. 2016. Vol. 2. № 5 (80). P. 38–44.
5. Holubets V.M., Kiryk M.D., Kapral Yu.R., Rud A.Ie. Fyzyko-mekhanichni kharakterystyky zmitsnenoho vysokoshvydkisnym tertiam nanostrukturnoho sharu na stali 45. Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho universytetu Ukrainy : zb. nauk.-tekhn. pr. Lviv : RVV NLTU Ukrainy, 2012. Vyp. 22.13. S. 114–117.

6. Rud A.Ie. Osoblyvosti zmitsnennia vysokoshvydkisnym tertiam z poputnoiu podacheiu zahotovky. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy. 2009. Vyp. 19.3. S. 120–125.
7. Manko O.V. Stetsko Yu.B., Biliavskiy M.L. Utvorennia biloho sharu pry fryktsiino-zmitsniuiuchii obrobtsti tonkykh plastyn. Protseyi mekhanichnoi obroby v mashynobuduvanni. 2005. Vyp 1. S. 146–157.
8. Hurei T.A. Doslidzhennia tochnosti zmitsnennykh poverkhon detalei mashyn pislia yikh fryktsiinoi obroby. Prohresyvni tekhnolohii i systemy mashynobudu vannia. Mizhnarodnyi zbirnyk naukovykh prats. Donetsk, 2009. Vyp. 38. C. 61–65.
9. Pohribnyi M.A., Syzyi Yu.A., Volkov O.O. Doslidzhennia struktury stali pislia TFO i chystovoho shlifuvannia. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva «Tekhnichniy servis APK, tekhnika ta tekhnolohii u silskohospodarskomu mashynobuduvanni». Kharkiv, 2007. Vyp. 61. S. 255–260.
10. Kraievska Zh.V., Volkov O.O., Subbotina V V., Pohribnyi M.A. Doslidzhennia strukturykh peretvoren, shcho vidbuvaiutsia v staliakh v protseyi dodatkovoho fryktsiino-deformatsiinoho zmitsnennia. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya : Avtomobile- ta traktorobuduvannia = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series : Automobile and Tractor Construction : zb. nauk. pr. / Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t". Kharkiv : NTU "KhPI", 2025. № 1. S. 20–27.

*Надійшла (received) 05.11.2025 р*

*Відомості про авторів /About the Authors*

**Волков Олег Олексійович (Volkov Oleh)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри матеріалознавства; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8797-0322>; e-mail: [volkovoleg1978@gmail.com](mailto:volkovoleg1978@gmail.com).

**Субботіна Валерія Валеріївна (Subbotina Valeriia)** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри матеріалознавства; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3882-0368>, e-mail: [subbotina.valeri@gmail.com](mailto:subbotina.valeri@gmail.com).

**Погрібний Микола Андрійович (Pohribnyi Mykola)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри матеріалознавства; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1689-3830>; e-mail: [pohrebnoy1950@gmail.com](mailto:pohrebnoy1950@gmail.com).

**Терлецький Олександр Семенович (Terletskiy Oleksandr)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри матеріалознавства; Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0617-180X>; e-mail: [terletskg@gmail.com](mailto:terletskg@gmail.com)

**Юшко Анастасія Вадимівна (Yushko Anastasiia)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр кафедри матеріалознавства; Харків, Україна; e-mail: [nastya314015@gmail.com](mailto:nastya314015@gmail.com).

**Федоренко Ганна Анатоліївна (Fedorenko Hanna)**, – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер I категорії кафедри матеріалознавства; Харків, Україна; e-mail: [ann161169@gmail.com](mailto:ann161169@gmail.com).