

## ВПЛИВ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФРИКЦІЙНОЇ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ НА СТАН ЇХ ПОВЕРХНЕВОЇ СТРУКТУРИ<sup>8</sup>

Краєвська Ж. В. аспірант

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

*Анотація.* У роботі розглянуто вплив енергосилових особливостей фрикційного термомеханічного оброблення (ФТМО) сталевих виробів на стан їх поверхневої структури. Метою даної роботи є дослідження взаємозв'язку між енергосиловими параметрами ФТМО сталі та зміцнювальним результатом.

*Ключові слова:* фрикційне термомеханічне оброблення (ФТМО), сталеві вироби зміцнення, тертя, деформування, енерго-силові параметри, структуроутворення, мікротвердість.

## INFLUENCE OF ENERGY AND FORCE FEATURES OF FRICTION THERMOMECHANICAL TREATMENT OF STEEL PRODUCTS ON THE STATE OF THEIR SURFACE STRUCTURE

Kraievskaya Zh. Post.st.

<sup>2</sup>National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

*Annotation.* The paper considers the influence of energy and power features of frictional thermomechanical handling (FTMH) of steel products on the state of their surface structure. The aim of this work is to study the relationship between the energy and force parameters of FTMH of steel and the hardening result. frictional thermomechanical handling (FTMH), steel products, hardening, friction, deformation, energy and power parameters, structure formation, microhardness.

*Keywords:* frictional thermomechanical handling (FTMH), steel products hardening, friction, deformation, energy and power parameters, structure formation, microhardness.

### Вступ

Впродовж декількох десятиріч створено різноманітні методи оброблення металів і сплавів. Серед них достатньо іноваційною є фрикційна термомеханічна обробка з використанням тертя (ФТМО), яка запропонована, як різновид з методів локального оброблення (ТФР, ТФО) та зміцнення (ТФЗ, ДТФЗ), які містять фрикційно-деформаційну компоненту. Відповідно, мова йде не про звичайну класичну ТМО, а про іноваційно альтернативний метод зміцнення, оскільки дана технологія передбачає нагрівання за рахунок тертя та низку інших відмінностей. Тобто тертя є джерелом енергії. Цей метод дозволяє досягти високих значень твердості, міцності та зносостійкості матеріалів за короткий час і зі значно меншими витратами порівняно з іншими методами обробки. Проте, залежно від характеру обробки, може відбуватись різноманітне структуроутворення і, як результат, формуватись різноманітні властивості.

---

<sup>8</sup> Робота виконана під керівництвом доцента Волкова О.О.

## Аналіз публікацій

Багато досліджень в результаті яких виявлена різниця у структуроутворенні [1, 2], демонструє, що в поверхні дослідних зразків та виробів спостерігається значне деформування матеріалу, що приводить до більш інтенсивного формування дрібнодисперсної мікроструктури, зокрема зерен ультрадрібних і, навіть, нанорозмірів, що супроводжується достатньо високими твердістю та міцністю. Отримані результати таких досліджень дозволяють більш точно налаштовувати технологічні параметри оброблення, що може допомогти поліпшити властивості виробів та забезпечити більш ефективне їх використання в різних галузях промисловості.

Науково-практичний напрямок зміцнення поверхні є актуальним сьогодні, оскільки таке зміцнення може бути досягнуто за допомогою багатьох різних методів, залежно від конкретних вимог та умов застосування. Існує багато технологічних методів формування поверхневого зміцнення в металах та сплавах. Так, механо-імпульсне оброблення високошвидкісним тертям [3], на відміну від інших методів інтенсивного деформування, дає змогу створювати дрібнодисперсні структури на поверхні деталі, виготовленої не тільки з м'яких сталевих матеріалів, а також з високоміцних та тих, що важко деформуються. Деформований шар під час фрикційного зміцнення утворюється безпосередньо на поверхні матеріалу деталі та релаксується на певній глибині. Це відрізняє високошвидкісне тертя від обкочення або ударного зміцнювального оброблення, які ініціюють зони максимального контактного напруження на деякій глибині від поверхні, що може призводити до утворення підповерхневих тріщин. Очевидно, що використання ТФО в якості саме методу зміцнення є актуальним питанням з широкою географією. Так, в наукових роботах [4–9] показано, що енергія тертя використовується з різним ступенем інтенсивності та для вирішення різних технологічних питань. Акцентовано увагу, що тертя є потужним засобом розігрівання поверхні та може використовуватися навіть для зварювання феритної нержавкої сталі [4], мідних листів [5] та інших матеріалів. Наголошено, що при цьому відбувається зміна механічних властивостей по перерізу [6], що пояснюється високотемпературним розігріванням аж до температури плавлення й наступним охолодженням з певною швидкістю. Крім того, зміна механічних властивостей може бути викликана і деформацією певних структурних складових [7]. Відзначено, що для зміцнення поверхні застосовуються також інші альтернативні джерела, наприклад, плазмове оброблення, що дозволяє змінювати структуру поверхневого шару виробів, що оброблюються [8], однак цей метод є більш витратним. Часто поверхнєве оброблення із застосуванням тертя та інших джерел енергії приводить до утворення в сталях та інших сплавах так званих поверхневих «білих» шарів [9]. Значний вклад в розвиток питань фрикційного оброблення матеріалів зробив проф. М.Д. Кірик [10,11]. Групою дослідників під керівництвом О. В. Манько вивчалось утворення білого шару при фрикційно-зміцнювальному обробленні тонких пластин, які є основою форми для багатьох видів поліграфічного інструменту. Показано [12], що сталь У8А, яка може використовуватися для даного інструменту має високі показники зносостійкості. Проводилось варіювання режимів зміцнення, що дозволило отримати мікротвердість зміцненого шару 5 – 11 ГПа. В цій роботі відмічено, що структура білих шарів являє собою механічну суміш мартенситу та залишкового аустеніту і має високу в'язкість при достатній твердості. Також підкреслено, що природа утворення таких структур недостатньо зрозуміла, незважаючи на велику кількість проведених досліджень. Тож у більшості описаних вище випадків на поверхні матеріалу, що оброблюється з'являється саме «білий» шар, який ще досі не вивчений в повному обсязі та потребує детального дослідження. Окрім того досі не існує однакової думки щодо природи та особливостей саме зміцнення при термофрикційно-деформаційних методах оброблення поверхні. Проте, дослідження, які відображені в дисертаційній роботі О. О. Волкова [1] та в роботах [13-21] дозволили знайти пояснення багатьом аспектам щодо структуроутворення з

формуванням поверхневого «білого» шару та властивостей в лінійці сталей різного призначення та з різним хімічним складом.

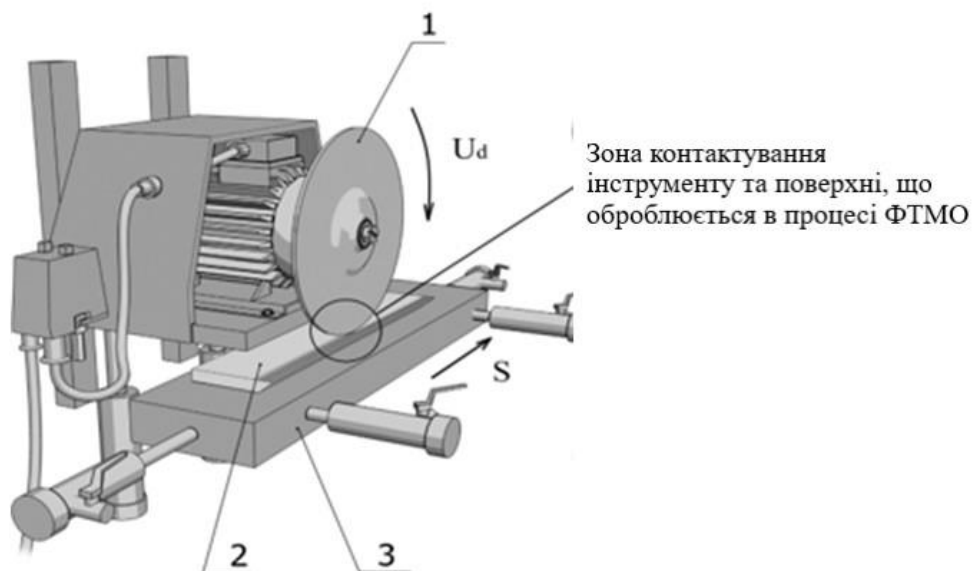
### Мета роботи і завдання

Метою даної роботи є дослідження взаємозв'язку між енергосиловими параметрами термофрикційного оброблення сталі та зміцнювальним результатом. Для досягнення поставленої мети вирішували такі завдання: виготовлення зразки із сталі 65Г, проведення попереднього зміцнювального термічного оброблення зразків, проведення зміцнення робочої поверхні зразків за допомогою ФТМО. проведення вимірювання складових сили різання, що виникає при ФТМО за допомогою динамометра, проведення аналізу мікроструктури та мікротвердості кожного зразка. проведення порівняння мікроструктури, мікротвердості та глибини зміцнення дослідних зразків, висновки, щодо зв'язку між результативністю зміцнення зразків при обробленні та енерго-силовими параметрами ФТМО.

### Матеріал і методи дослідження

#### Дослідження впливу ФТМО на структуру сталі 65Г

У даній роботі були досліджені зразки із сталі 65Г, яка відноситься до класу пружинних сталей та є середньовуглецевою, низьколегованою сталлю з високими механічними властивостями. В першу чергу, дана марка сталі має високі межі пружності і міцності, а також підвищену релаксаційною стійкістю при достатній в'язкості і пластичності. [22]. Зразки, з метою дослідження впливу факторів оброблення при зміцненні сталей шляхом ФТМО, виготовили у вигляді пластин у попередньому стані після гартування ( $t = 800^{\circ}\text{C}$ ) і низькотемпературного відпускання ( $t = 180^{\circ}\text{C}$ ). ФТМО проводили на модернізованому плоско-шліфувальному верстаті за розробленою методикою локального оброблення в режимі ФТМО за схемою оброблення, яка представлена на рисунку 1.



1 – зміцнювальний диск; 2 – зразок; 3 – магнітна плита верстата;

Рисунок 1 - Схема локального оброблення в режимі ФТМО

Зміцнювальний диск виготовлений із сталі Ст3. Він застосовувався на глибину оброблення 0,7 мм. Такий вибір глибини оброблення здійснено з урахуванням перерізу зразків, що зміцнюються та умовами оптимальності оброблення згідно з попередніми дослідженнями [1].

### Результати дослідження

Дослідження зразків показало, що під дією ФТМО з'являється поверхневий шар зі зміненими структурою і властивостями. Він складається з двох різних ділянок: 1 – ділянка зі зміцненням - розташована біля поверхні та має мікротвердість зміцненого шару ( $H_{100}$ ) майже  $1300 \text{ кгс/мм}^2$ , що відповідає приблизно  $13000 \text{ МПа}$ , і глибину зміцнення (1) близько  $300 \text{ мкм}$ , 2 – ділянка зі знеміцненням.

Ділянка зі знеміцненням, яка знаходиться безпосередньо під ділянкою зі зміцненням, є вузькою смужкою та характеризується зниженою мікротвердістю до рівня  $380 \text{ кгс/мм}^2$ , що відповідає приблизно  $3800 \text{ МПа}$  та має товщину приблизно  $70 \text{ мкм}$ .

Нижче знаходиться основна частина зразка, яка не зазнала впливу ФТМО. Мікротвердість її дорівнює близько  $580 \text{ кгс/мм}^2$ , що відповідає приблизно  $5800 \text{ МПа}$ .

Металографічний аналіз дослідних зразків показав, що після гартування та низькотемпературного відпускання сформовано мікроструктуру «мартенсит відпускання». Сформований в попередньо загартованих зразках при їх ФТМО шар має деформовану мартенситну мікроструктуру, яка характеризується і більш високим ступенем дисперсності, порівняно з мартенситною мікроструктурою, яка отримана при попередньому термічному обробленні.

Таким чином, при порівнянні змін у мікроструктурі та мікротвердості зразків, які зміцнили по поверхні з використанням ФТМО цілком очевидні мікроструктурні зміни у вигляді появи поверхневого «білого» зміцненого шару надвисокої твердості, який поєднано з основною частиною зразка тонким знеміцненим підшаром. І кожна структурна частина перерізу зразка здатна виконувати свої функції при експлуатації потенційних виробів.

Сила оброблення яка виникала в процесі даного оброблення вимірювалася за допомогою динамометра УДМ-600, який застосовують для вимірювання сил і крутних моментів. Конструкція динамометра дозволяє зчитувати рівень сил навантаження при обробці. Конструкцію даного динамометра спроектовано так, що кожна опора складається з тонкостінної втулки і двох ніжок. Ніжки утворюють два пружні шарніри. Така конструкція опори забезпечує більшу жорсткість у напрямку вісі і малу жорсткість в напрямку, перпендикулярному вісі. Так співвідношення величин жорсткості дорівнює  $100:1$ . Завдяки цьому опори в динамометрі сприймають навантаження лише в одному напрямку вздовж вісі опори.

Площі перерізів втулки та ніжок опори рівновеликі та вибрані так, щоб матеріал опори працював у галузі пружних деформацій. Усі опори виконані із термічно обробленої сталі 60С2А. Опори встановлені в напрямних втулках 6. Кожна з опор динамометра має попередній натяг величину якого регулюють поворотом відповідних гайок. Завдяки натягу опор усуваються всі зазори та контактні деформації у стиках деталей динамометра. На опори, вісі яких розташовані горизонтально, наклеєно по два датчики: перші датчики з'єднані в схеми вимірювання сил  $P_y$ ,  $P_x$ , другі датчики в схему вимірювання  $M_{кр}$ . Дроти від кожного датчика виведені через отвори в корпусі динамометра і приєднані до клем на панелі, де датчики з'єднують у вимірювальні схеми. Динамометр УДМ-600 працює в такий спосіб. Під дією сили різання деформуються переважно опори, як найменш жорсткі деталі динамометра, наприклад, при навантаженні вертикальною силою  $P_z$  деформуються вертикальні опори. Дротові датчики, наклеєні на вертикальні опори, з'єднані таким чином, що показання динамометра не залежать

від точки застосування сили різання. Робота динамометра при вимірі  $P_y$  і  $P_x$ , аналогічна його роботі при вимірі  $P_z$ . Під дією крутного моменту деформуються всі горизонтальні опори. Другі дротяні датчики, наклеєні на ці опори, з'єднані таким чином, що сигнал виміральної схеми пропорційний крутному моменту  $M_{кр}$ .

Розрахунки з побудуванням графіків де враховані сили різання які оцінено за допомогою динамометра дозволяють зрозуміти шляхи керування процесами термофрикційного та інших методів оброблення за подібною технологічною схемою, де використовується фрикційна та механічна складові. Наприклад можна змінювати товщину диску або змінювати режим оброблення, але все це повинно бути зроблено з урахуванням можливостей верстата, який застосовується в обробленні.

Тому, згідно з формулою розрахунку критичної навантаження  $P_{кр}$  із умов стійкості при термофрикційному розрізанні, яке багато років досліджував в НТУ «ХПІ» проф. Сизий Ю.А. зі своїми учнями, вважаємо, що цю залежність можна застосувати і для термофрикційного оброблення поверхні (ТФО), яке можна розглядати, як різновид термофрикційного розрізання, а також для ФТМО:

$$P_{кр} = 0.245 \cdot E \cdot h^3 \cdot \sqrt{\frac{D-L}{L^3}} \cdot K_3, \quad (1)$$

де:  $h$  – товщина диска;  $E$  – модуль пружності матеріалу диска;  $K_3$  – коефіцієнт запасу.

Оскільки формула (1) не враховує неплоскість диска, торцеве бійння, а відповідно і його початковий прогиб і ексцентричність додатків навантаження, то слід очікувати  $R_{кр}$  значно менше, ніж розрахункове за (1). Таким чином, потрібна експериментальна перевірка стійкості реально експлуатованих дисків.

Диски товщиною менше 0,5 мм нетехнологічні у виготовленні, тому товщина реально застосовуваних дисків повинна бути обмежена розміром не менше 0,5 мм.

Бажання зменшити товщину диска пояснюється очікуванням зменшення сили різання, а, відповідно, і витрат енергії на операцію оброблення. У той же час відомо, що при розрізанні тонким диском, тобто, коли джерело тепла вузьке та дорівнює товщині диска, температура в зоні контакту диска із заготовкою, що зазнає оброблення значно менша, ніж при широкому джерелі тепла при інших рівних умовах. Пояснюється це тим, що тепло від вузького джерела більш інтенсивно поширюється в бічні сторони від нього, ніж від широкого джерела тепла.

Запропоновано порівняти розрахункові теоретичні значення температури на поверхні контактного диска із заготовкою для товщини диска  $h=0,5$  мм при однаковій інтенсивності теплового потоку  $q$ . Для цього можна скористатися рішенням задачі опису температурного поля від плоского рухомого джерела тепла по поверхні напівпростору [23]:

Проведене теоретичне дослідження дозволяє зробити висновок, що в широкому джерелі тепла розігрів матеріалу заготовки, що оброблюється більш високий і він легше видаляється диском, що обертається. Тому при очікуванні збільшення сили різання зі збільшенням товщини диска, слід враховувати, що розігрівання металу більш товстим диском вище, а сила різання щодо оберту диска зменшується, за рахунок видалення великого об'єму металу безпосередньо із зони оброблення. Таким чином, очевидно, існує оптимальне значення товщини диска.

Для визначення оптимального значення товщини диска  $h$ , були проведені експерименти з дисками товщиною 0,5 мм, 1 мм, 1,4 мм. Врізна подача шліфувальної бабки з фрикційним диском замість шліфувального круга здійснювалася з постійним зусиллям  $P_y$ . Швидкість різання  $V$  приймалася незмінної (яка забезпечена характеристиками верстата

даного типу). Реєструвався, із записом на самопишучому пристрої мод. Н327-5, ток навантаження  $V$  у двигуні приводу обертання диска, що дозволяє вирахувати окружну силу різання:

$$P_z = \frac{U \cdot I_n \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi}{V}, \quad (2)$$

де  $U$  – напруга (380 В);  $\cos \Phi = 0,89$ ;  $V$  – швидкість різання, м/с.

По записам току навантаження двигуна на самописці відрахувався час оброблення  $t$ , сек. В якості параметра оптимізації використовувалася питома собівартість оброблення  $C_{уд}$ , яка представляє собою суму витрат на зарплатню та електроенергію, віднесені до площі оброблення:

$$C_{уд} = \frac{P_z \cdot V \cdot t \cdot C_E + C_3 \cdot t \cdot 1000}{9000 \cdot \pi \cdot (D^2 - d^2)}, \quad (3)$$

де:  $P_z$  Н,  $V$  м/с,  $t$  сек,  $C_E$  – вартість однієї кіловатт години електроенергії,  $C_3$  – годинна тарифна ставка.

Із графіків рис. а, б видно, мінімальне значення сили  $P_z$  і коефіцієнт тертя  $K$  відповідають диску товщиною 1 мм. Диски товщиною 1 мм і 1.4 мм значно сильніше розігрівають поверхню, що оброблюється, порівняно з диском товщиною 0.5мм, на що опосередковано вказують величини коефіцієнтів тертя. Вони для дисків товщиною 1 мм і 1,4 мм значно менші, ніж для диска товщиною 0,5 мм. Ці результати підтверджують виконаний вище теоретичний аналіз впливу ширини джерела тепла на температуру поверхні контакту заготовки, що оброблюється.

З використанням статистичних даних можна припустити, що оптимальне значення товщини диска відповідає мінімуму питомої собівартості  $C_y$ , що дорівнює, згідно з графіком, 1 міліметру. Таким чином, товщина диска в 1мм є оптимальною для умов, коли диск такої товщини не втрачає стійкості та, відповідно, здатен до ефективного оброблення поверхонь. Проте, для окремих технологічних режимів зміцнення поверхонь, де потрібно збільшити саме деформаційний вплив в умовах обмеженого розігрівання, можливе застосування металевих дисків більшої товщини з урахуванням вищезазначених рекомендацій.

На рисунку 2 у вигляді графічних залежностей представлений вплив енергосилових параметрів ФТМО сталі на результативність оброблення.

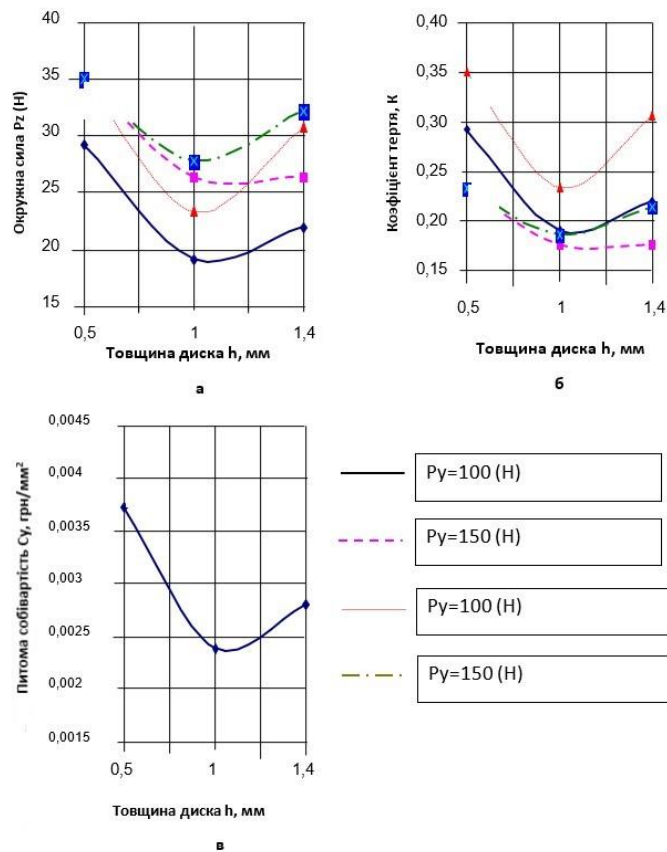


Рисунок 2 – Вплив енергосилових параметрів ФТМО сталі на результативність оброблення

## Висновки

В процесі роботи отримані результати досліджень, а саме мікроструктуру сталі після зміцнення шляхом ФТМО та рекомендовані значення товщини диска який дозволяє отримувати оптимальну якість зміцнення. Так, при проведенні даної дослідницької роботи було здійснено попереднє термічне зміцнення та додаткове зміцнення зразків із сталі 65Г за допомогою ФТМО, що дозволило збільшити мікротвердість сталі в зоні оброблення в понад 2 рази. При цьому мікротвердість було збільшено термічним шляхом до рівня близько 580 кгс/мм<sup>2</sup> що еквівалентно 5800 МПа, а після ФТМО мікротвердість зростає до 1300 кгс/мм<sup>2</sup>, що відповідає 13000 МПа. Також показано, що зміцнений «білий» шар, що сформовано при ФТМО, розташований по всій їх довжині оброблення та є суцільним, що характеризує однорідність та рівномірність зміцнення поверхні зразків.

Окрім того проведено визначення розподілу навантаження при ФТМО за допомогою динамометра та розраховано окружну силу різання, що дозволило встановити залежності, які показують характеристики зміцнення з урахуванням товщини диску. Враховуючи ці дані зроблені рекомендації щодо оптимальної товщини зміцнювального диску.

## Література

1. Волков О. О. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : за спец. 05.02.01 Матеріалознавство, 13 Механічна інженерія : захищена 06.10.2020 / О. О. Волков ;

наук. керівник М. А. Погрібний ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т»; Харків. нац. техн. ун-т сіл. госп-ва ім. П. Василенка. – Харків : [б. в.], 2020. – 209 с.

2. Volkov O.A., Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing, *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 25 (80) (2016) 38–44.

3. Голубець В.М., Технологічні методи поверхневого зміцнення металічних конструкційних матеріалів, Навч. посібник. Львів : ВТФ "Друксервіс", 2000.178 с.

4. Lakshminarayanan A.K., Balasubramanian V., Understanding the parameters controlling friction stir welding of AISI 409M ferritic stainless steel, *Metals and materials international*. 17(6) (2011) 969–981.

5. Galvao I., Leal R.M. Loureiro A., Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds thin copper sheets, *Journal of materials processing technology*. 213(2) (2013) 129–135.

6. Rajamanickam N., Balusamy V., Magudeeswaran G., Natarajan K., Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds, *Materials & Design*. 30(7) (2009) 2726–2731.

7. Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H., Abbasi S.M., Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel, *Materials Science and Engineering: A*. 528 (4–5) (2011) 2158–2163.

8. Sidhom H., Ghanem F., Amadou T., Gonzalez G., Braham C., Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS white layer microstructure and corrosion resistance, *The international journal of advanced manufacturing technology*. 65 (1–4) (2013) 141–153.

9. Sipos K., Lopez M., Trucco M., Surface martensite white layer produced by adhesive sliding wear friction in AISI 1065 steel, *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales*. 28 (1) (2008) 46–50.

10. Голубець В.М., Кірик М.Д., Капраль Ю.Р., Рудь А.С., 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. 22 (13) (2012) 114–117.

11. Кірик М., Голубець В., Капраль Ю., Рудь А., Встановлення режимів зміцнення високошвидкісним тертям ножів з конструкційних сталей для різання деревини, *Машинознавство*. 3–4 (2013) 28–31.

12. Манько О.В. Стецько Ю.Б., Білявський М.Л., Утворення білого шару при фрикційно-зміцнюючій обробці тонких пластин, *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 1 (2005) 146–157.

13. Volkov O. Knyazev S., Vasilchenko A., Doronin E., Alternative strengthening of jewelry tools using chemical-thermal and local surface treatments , *Materials science forum*. 1038 (2021) 68–76.

14. Levterov A., Nechitaylo J., Plugina T., Volkov O., Application of thermo-frictional and chemical-thermal methods treatments for surface strengthening of materials, *Materials science forum*. 1038 (2021) P. 93–99.

15. Sevidova E., Gutsalenko Y., Iancu C., Subbotina V., Volkov O., Dielectric protection of aluminum alloys of diamond wheel frameworks by plasma-electrolytic coatings with forming in galvanostatic mode, *Source: Fiability & Durability Fiabilitate si Durabilitate* . 28 (2) (2021) 16-21.

16. Volkov O., Pogrebnoy N., Subbotina V., Rucki M., Shelkovoy A., Nakonechny M., Zubkova N., Gutsalenko Y., Investigation of the transformation of the structure and properties of heredity of thermofrictional hardening of steel under conditions of elevated temperatures, 30 th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, METAL 2021, Conference proceedings, Brno, Czech Republic, EU. (May 26 - 28, 2021) 846-851.

17. Volkov O., Knyazev S., Subbotina V., Iancu C., Gutsalenko Yu., Shelkovyi O., Strelchuk R., Construction of surface layers with special properties in the hardening of steels, IManEE 2021 – Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference. (2022) 1235
18. Strelchuk R., Shelkovyi O., Gutsalenko Y., Iancu C., Subbotina V., Knyazev S., Volkov O., Research of the dependence of geometric parameters of holes on electroerosive grinding modes with a changing polarity of electrodes, IManEE 2021 – Innovative Manufacturing Engineering & Energy International Conference. (2022) 1235
19. Volkov O., Kraevska Z., Vasilchenko A., Hannichenko T., Additional strengthening of “screper” jewelry tool using friction, Solid state phenomena. 334 (2022) 100–106.
20. Volkov O., Subbotina V., Subbotin O., Vasilchenko A., Shyogoleva M., Methods of structural engineering of surface in solving the problems of multifactorial increase of the level of operational characteristics of materials, Solid state phenomena. 350 (2023) 3–12.
21. Volkov O., Subbotina V., Kraievskaya Z., Vasilchenko A., Selection and application of the optimal surface engineering method to restore the properties of rolling equipment elements that have been reduced due to violations of surface grinding technology, Solid state phenomena. 350 (2023) 13–19.
22. В.І. Бузило, В.П. Сердюк, А.В. Яворський, О.А. Гайдай, Матеріалознавство : навч. посіб. М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021, 243 с .
23. Сизый Ю.А., Погребной Н.А., Волков О.А., Температурное поле на входе и выходе с поверхности упрочняемой трением, Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства «Підвищення надійності відновлюємих деталей машин». Харків, 2003. Вип. 18. С. 84–93.