

## ЕНЕРГОСИЛОВІ ОСОБЛИВОСТІ ФРИКЦІЙНОГО ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ (ФТМО) СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ ТА ВПЛИВ НА СТАН ЇХ ПОВЕРХНЕВОЇ СТРУКТУРИ

Волков О. О., Краєвська Ж. В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

*Анотація.* Науково-практичний напрям зміцнення поверхні за допомогою тертя є актуальним. Таке зміцнення може бути досягнуто за допомогою різних методів, залежно від конкретних вимог і умов використання. Існують деякі підходи до зміцнення поверхні з використанням тертя, зокрема із застосуванням методу ФТМО. У статті розглянуто вплив енергосилових особливостей фрикційного термомеханічного оброблення сталевих виробів (ФТМО) на стан їх поверхневої структури.

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

### Вступ

Розвиток наукового напрямку «Технологія матеріалів та матеріалознавство» впродовж декількох десятиріч дав змогу створити різноманітні методи оброблення металів і сплавів. Серед них важливе місце посідає фрикційне термомеханічне оброблення з використанням тертя (ФТМО), що є різновидом методів локального оброблення (ТФР, ТФО) та зміцнення (ТФЗ, ДТФЗ), які містять фрикційно-деформаційну компоненту. Відповідно, йдеться не про звичайну класичну ТМО, а про інноваційно альтернативний метод зміцнення, оскільки ця технологія передбачає нагрівання унаслідок тертя – джерела енергії, а також низку інших особливостей. Зазначений метод дає змогу досягти високих значень твердості, міцності та зносостійкості матеріалів за нетривалий час і зі значно меншими витратами, порівняно з іншими методами оброблення. Проте, залежно від характеру оброблення може відбуватися різноманітне структуроутворення, внаслідок чого формуються різні властивості.

### Аналіз публікацій

У процесі дослідження виявлено різницю в структуроутворенні [1, 2]. Результати спостережень показали, що в поверхні дослідних зразків і виробів наявне значне деформування матеріалу, що призводить до більш інтенсивного формування дрібнодисперсної мікроструктури, яка містить зерна ультрадрібних і навіть нанорозмірів, що супроводжується достатньо високими показниками твердості та міцності. Досягнуті результати таких дослі-

джень дають змогу налаштовувати технологічні параметри оброблення з більшою точністю, що може поліпшити властивості виробів та забезпечити ефективніше їх використання в різних галузях промисловості.

Науково-практичний напрям зміцнення поверхні нині є актуальним, оскільки таке зміцнення може бути досягнуто за допомогою багатьох різних методів залежно від конкретних вимог та умов застосування. Існує чимало технологічних методів формування поверхневого зміцнення в металах і 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 із високоміцних і таких, що важко деформуються. Деформований шар під час фрикційного зміцнення утворюється безпосередньо на поверхні деталі та релаксується на певній глибині. Це розрізняє високошвидкісне тертя від обкочення або ударного зміцнювального оброблення, які ініціюють зони максимального контактного напруження на деякій глибині від поверхні, що може спричинити утворення підповерхневих тріщин. Очевидно, що використання ТФО як методу зміцнення є актуальним питанням з широкою географією. Так, у наукових студіях [4–9] показано, що енергія тертя використовується з різним ступенем інтенсивності та для розв'язання низки технологічних питань. Автори зазначених робіт наголошують, що тертя є потужним засобом розігрівання поверхні та може застосовуватися навіть для зварювання феритної нержавкої сталі [4], мідних

листів [5] та інших матеріалів. Зазначено, що водночас змінюються механічні властивості вздовж перерізу [6], що пояснюється високо-температурним розігріванням, аж до температури плавлення, і подальшим охолодженням з певною швидкістю. Крім того, зміна механічних властивостей може бути викликана й деформацією певних структурних складників [7]. Визначено, що для зміцнення поверхні застосовуються також інші альтернативні джерела, наприклад плазмове оброблення, що дає змогу змінювати структуру поверхневого шару виробів, які обробляються [8], однак цей метод є більш витратним. Часто поверхнєве оброблення із застосуванням тертя та інших джерел енергії спричиняє утворення в сталях та інших сплавах так званих поверхневих «білих» шарів [9]. Значний внесок у розвиток питань фрикційного оброблення матеріалів здійснив проф. Кірик М. [10, 11]. Група дослідників під керівництвом О. Манько вивчала утворення «білого» шару внаслідок фрикційно-зміцнювального оброблення тонких пластин, які є основою форми для багатьох видів поліграфічного інструменту.

У роботі [12] показано, що сталь У8А, яка може використовуватися для цього інструменту, має високі показники зносостійкості. Автори цього дослідження проводили варіювання режимів зміцнення, що дало змогу досягти мікротвердості зміцненого шару 5–11 ГПа.

У праці [12] також зазначено, що структура «білих» шарів є механічною сумішшю мартенситу та залишкового аустеніту і має високу в'язкість за умови достатньої твердості. Автори також наголошують, що природа утворення таких структур недостатньо зрозуміла, незважаючи на значну кількість проведених досліджень. Тож у більшості описаних випадків на поверхні матеріалу, що обробляється, з'являється саме «білий» шар, який ще досі не вивчений у повному обсязі та потребує детального дослідження. Окрім того, досі не існує одностайної думки щодо природи та особливостей саме зміцнення в процесі застосування термофрикційно-деформаційних методів оброблення поверхні. Проте дослідження, описані в дисертації О. Волкова [1] та в роботах [13–21], дали змогу пояснити чимало аспектів щодо структуроутворення з формуванням поверхневого «білого» шару й властивостей в лінійці сталей різного призначення та з різним хімічним складом.

### Мета та постановка завдання

Метою цієї роботи є дослідження взаємозв'язку між енергосиловими параметрами ФТМО сталі та станом поверхневої структури дослідних зразків сталевих виробів, з огляду на зміцнювальний результат, а також визначення впливу енергосилових параметрів ФТМО сталі на результативність оброблення.

Для досягнення поставленої мети необхідно було виконати такі завдання: виготовити зразки із сталі; провести попереднє зміцнювальне термічне оброблення зразків; зміцнити робочу поверхню зразків за допомогою ФТМО; виміряти складники сили різання, що виникає в процесі ФТМО за допомогою динамометра; проаналізувати мікроструктуру та мікротвердість кожного зразка; порівняти мікроструктуру, мікротвердість і глибину зміцнення дослідних зразків; сформулювати висновки щодо зв'язку між результативністю зміцнення зразків унаслідок оброблення та енергосиловими параметрами ФТМО.

Передбачено дослідження розбіжностей у структуроутворенні за участі енергосилового впливу, що виникає в процесі оброблення матеріалів. Це є важливим, оскільки може виявити різницю в механічних властивостях матеріалу залежно від способу оброблення.

### Матеріали та методи дослідження

У роботі досліджено зразки із сталі 65Г, що належить до класу пружинних сплавів та є середньовуглецевою, низьколегованою, з високими механічними властивостями. Насамперед марка сталі має високі межі пружності та міцності, а також підвищену релаксаційну стійкість за умови достатньої в'язкості та пластичності [22]. Для вивчення впливу факторів оброблення в процесі зміцнення сталей за допомогою ФТМО зразки виготовили у вигляді пластин у попередньому стані після гартування ( $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) і низькотемпературного відпускання ( $t = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). ФТМО проводили на модернізованому плоско-шліфувальному верстаті за розробленою методикою локального оброблення в режимі ФТМО.

Зміцнювальний диск виготовлений із сталі Ст3. Він застосовувався на глибину оброблення, з огляду на переріз зміцнювальних зразків та умови оптимальності оброблення відповідно до попередніх досліджень [1].

Силу оброблення, що виникала внаслідок цього технологічного процесу, визначали за допомогою динамометра УДМ-600, який застосовують для вимірювання сил і крутних моментів. Конструкція динамометра дає

зможу зчитувати рівень сил навантаження під час оброблення. Конструкція цього динамометра спроектована так, що кожна опора складається з тонкостінної втулки і двох ніжок. Ніжки утворюють два пружні шарніри. Така конструкція опори забезпечує більшу жорсткість у напрямку осі та малу жорсткість в напрямку, перпендикулярному осі. Так, співвідношення величин жорсткості дорівнює 100:1. Завдяки цьому опори в динамометрі сприймають навантаження лише в одному напрямку вздовж осі опори.

Площі перерізів втулки та ніжок опори рівновеликі та обрані так, щоб матеріал опори працював у ділянці пружних деформацій. Усі опори виконані з термічно обробленої сталі 60С2А. Опори встановлені в напрямних втулках. Кожна з опор динамометра має попередній натяг, величину якого регулюють поворотом відповідних гайок. Завдяки натягу опор усуваються всі зазори та контактні деформації в стиках деталей динамометра. На опори, осі яких розташовані горизонтально, наклеєно по два датчики: перші з'єднані в схеми вимірювання сил  $P_y$ ,  $P_x$ , другі датчики – в схему вимірювання  $M_{кр}$ . Дроти від кожного датчика виведені крізь отвори в корпусі динамометра та 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, у процесі навантаження вертикальною силою  $P_z$  деформуються вертикальні опори. Дротові датчики, наклеєні на вертикальні опори, з'єднані таким чином, що показники динамометра не залежать від точки застосування сили різання. Робота динамометра під час вимірювання  $P_y$  і  $P_x$  аналогічна його роботі в процесі вимірювання  $P_z$ . Під дією крутного моменту деформуються всі горизонтальні опори. Другі дротяні датчики, наклеєні на ці опори, з'єднані таким чином, що сигнал вимірювальної схеми пропорційний крутному моменту  $M_{кр}$ .

#### Виклад основного матеріалу

Дослідження зразків показало, що під дією ФТМО у процесі оброблення за обраним режимом, як наближеного до оптимального, з огляду на інформацію, отриману внаслідок ТФО [2], з'являється поверхневий шар зі зміненіми структурою та властивостями. Він містить дві різні ділянки: 1 – ділянка зі зміцненням; 2 – ділянка із знеміцненням.

Перша – розташована біля поверхні та має мікротвердість зміцненого шару HV0.1 майже 13000 МПа і глибину зміцнення 1 приблизно 300 мкм, які можна спостерігати на рис. 1.

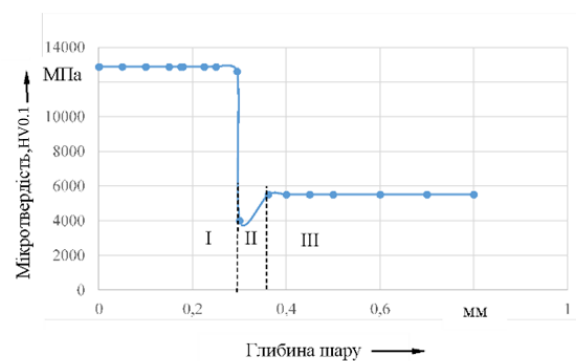


Рис. 1. Зміна мікротвердості вздовж перерізу зразка після ФТМО поверхні (сталі 65Г)

Ділянка із знеміцненням, розташована безпосередньо під ділянкою із зміцненням, є вузькою смужкою та визначається зниженою мікротвердістю до рівня приблизно 3800 МПа, що можна побачити на графіку одного з дослідних зразків (рис. 1). У зразку 1 цей підшар має товщину близько 70 мкм, як і в інших зразках, оброблених ідентично.

Нижче розташована основна частина зразка, що не зазнала впливу ФТМО. Мікротвердість її дорівнює приблизно 5800 МПа. Металографічний аналіз дослідних зразків показав, що після гартування та низькотемпературного відпускання сформовано мікроструктуру «мартенсит відпускання». Утворений в попередньо загартованих зразках унаслідок їх ФТМО поверхневий шар має деформовану мартенситну мікроструктуру, що визначається також і більш високим ступенем дисперсності, порівняно з мартенситною мікроструктурою, отриманою після попереднього термічного оброблення (рис. 2). Поверхневий зміцнений шар, який містить зерна ультрадрібних і навіть нанорозмірів, що підтверджено, зокрема, і в попередніх дослідженнях [1, 2], має достатньо високі показники мікротвердості.

Отже, унаслідок порівняння 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 в процесі експлуатації потенційних виробів.

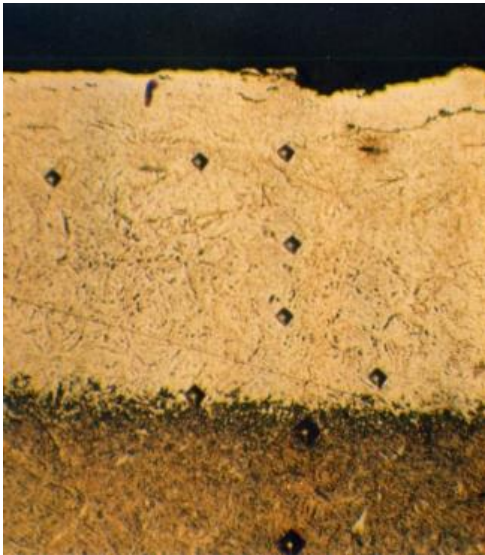


Рис. 2. Мікроструктура попередньо загартованого зразка після ФТМО поверхні (сталь 65Г, х250)

Розрахунки з побудовою графіків, де взяті до уваги сили різання, оцінені за допомогою динамометра, дають змогу зрозуміти способи керування процесами термофрикційного та інших методів оброблення за подібною технологічною схемою, де використовується фрикційний і механічний складники. Наприклад, можна змінювати товщину диска або режим оброблення, але все це має бути зроблено, зважаючи на можливості верстата, що застосовується в обробленні.

Тому, відповідно до формули розрахунку критичного навантаження  $P_{кр}$  із умов стійкості в процесі термофрикційного розрізання, які багато років досліджував в НТУ «ХП» проф. Сизий Ю. зі своїми учнями [1], вважаємо, що цю залежність можна застосувати й для термофрикційного оброблення поверхні (ТФО), що 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 бере до уваги неплоскість диска, торцеве биття, а, відповідно, і його початкове прогинання та ексцентричність додатків навантаження, то необхідно очікувати  $P_{кр}$  значно менше, ніж розраховане за (1). Отже, потрібна експериментальна

перевірка стійкості дисків в умовах реальної експлуатації.

Диски, завтовшки менші ніж 0,5 мм, нетехнологічні у виготовленні, тому їх товщина для реального застосування має бути обмежена розміром не меншим ніж 0,5 мм.

Бажання зменшити товщину диска пояснюється очікуванням зменшення сили різання, а, відповідно, і витрат енергії на операцію оброблення. Водночас відомо, що в процесі розрізання тонким диском, тобто коли джерело тепла вузьке та дорівнює товщині диска, температура в зоні контакту диска із оброблювальною заготовкою є значно меншою, ніж у разі широкого джерела тепла за інших рівних умов. Пояснюється це тим, що тепло від вузького джерела більш інтенсивно поширюється в різні боки від нього, ніж від широкого джерела тепла.

Запропоновано порівняти розрахункові теоретичні значення температури на поверхні контакту диска із заготовкою для товщини диска  $h = 0,5$  мм за однакової інтенсивності теплового потоку  $q$ . Для цього можна скористатися розв'язанням задачі опису температурного поля від плоского рухомого джерела тепла по поверхні напівпростору [23].

Проведене теоретичне дослідження дає змогу зробити висновок, що в широкому джерелі тепла розігрівання матеріалу оброблюваної заготовки більш високе й цей матеріал легше вилучається диском, що обертається. Тому в процесі очікування збільшення сили різання зі збільшенням товщини диска необхідно брати до уваги, що розігрівання металу товстішим диском збільшується, а сила різання щодо оберту диска зменшується внаслідок вилучення великого об'єму металу безпосередньо із зони оброблення. Отже, очевидно, існує оптимальне значення товщини диска.

Для визначення оптимального значення товщини диска  $h$  проведені експерименти з дисками завтовшки 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 незмінною (яка забезпечена характеристиками верстата певного типу).

Із графіків (рис. 3, а, б) видно, що мінімальне значення сили  $P_z$  і коефіцієнт тертя  $K$  відповідають диску завтовшки 1 мм. Диски, товщина яких 1 мм і 1,4 мм, значно сильніше розігрівають оброблювальну поверхню, порівняно з диском завтовшки 0,5 мм, на що опосередковано вказують величини коефіцієнтів

тертя. Для дисків, товщина яких 1 мм і 1,4 мм, коефіцієнти тертя значно менші, ніж для диска завтовшки 0,5 мм. Ці результати підтверджують виконаний вище теоретичний аналіз впливу ширини джерела тепла на температуру поверхні контакту оброблювальної заготовки.

З використанням статистичних показників можна припустити, що оптимальне значення товщини диска відповідає 1 мм. Отже, товщина диска 1 мм є оптимальною для умов, коли диск такої товщини не втрачає стійкості

та, відповідно, здатний 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 огляду на вищезазначені рекомендації.

На рис. 3 у вигляді графічних залежностей зображений вплив енергосилових параметрів ФТМО сталі на результативність оброблення.

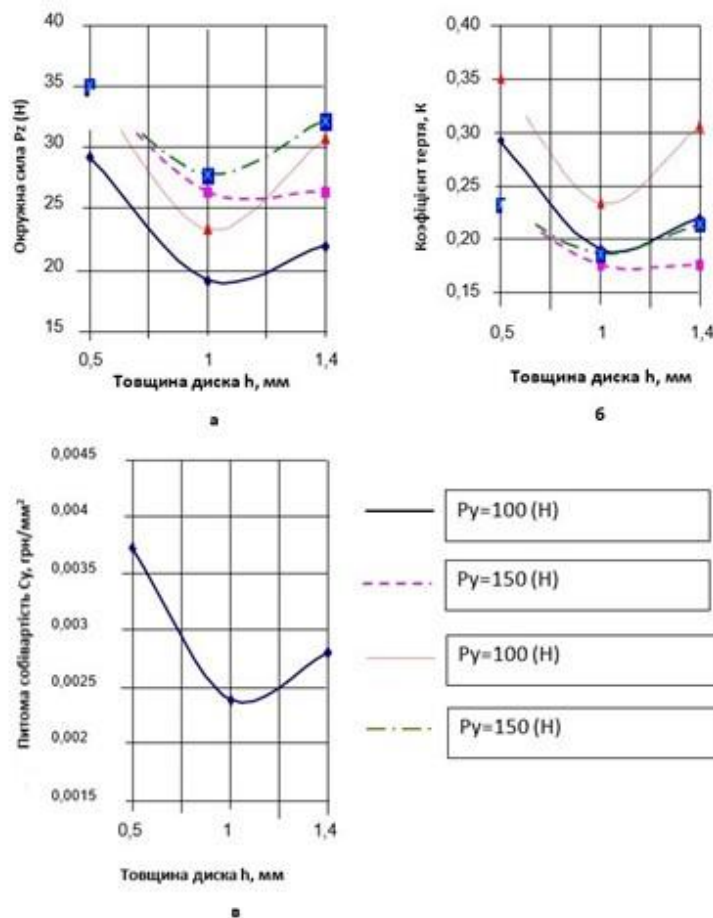


Рис. 3. Вплив енергосилових параметрів ФТМО сталі на результативність оброблення

### Висновки

Отже, у межах дослідження було проведено попереднє термічне та додаткове зміцнення зразків із сталі 65Г за допомогою ФТМО, що сприяло збільшенню мікротвердості сталі в зоні оброблення більше ніж удвічі. Крім того, мікротвердість, що була збільшена термічним способом, досягала рівня приблизно 5800 МПа, а після ФТМО мікротвердість зростає до 13000 МПа.

Такий рівень мікротвердості поверхні на м'якому підшарі у виробів із сталі 65Г відкриває широкі можливості для їх застосування,

особливо під час роботи в умовах тертя, що може супроводжуватися ударним навантаженням. Наприклад, це може бути впроваджено в роботі різальних інструментів для оброблення матеріалів і в інших виробів, що потребують високого рівня зносостійкості.

Запропоновано мікроструктуру сталі після зміцнення та показано, що поверхневий «білий» шар, сформований унаслідок ФТМО, розташований на всій довжині оброблення та є суцільним, що характеризує однорідність і рівномірність зміцнення поверхні зразків.



Окрім того, визначено розподіл навантаження в процесі ФТМО за допомогою динамометра та розраховано окружну силу різання, що дало змогу встановити залежності, які демонструють результативність оброблення, зважаючи на товщину диска. З огляду на досягнуті результати, сформульовано рекомендації щодо оптимальної товщини зміцнювального диска, що дає змогу отримувати оптимальну якість зміцнення.

### 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.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. 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. Levtarov 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., Kraievska 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. Бузило В.І., Сердюк В.П., Яворський А.В., Гайдай О.А. 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.
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. Holubets V.M., Kiryk M.D., Kapral Yu.R., Rud A.Ye., Fyzyko-mekhanichni kharakterystyky zmitsnenoho vysokshvydkisnym tertiam nanostrukturnoho sharu na stali 45, *Naukovyi visnyk Natsionalnoho lisotekhnichnoho univerty-tetu Ukrainy: zb. nauk.-tekhn. pr. Lviv: RVV NLTU Ukrainy*. 22 (13) (2012) 114–117. [in Ukrainian].
11. Kiryk M., Holubets V., Kapral Yu., Rud A., Vstanovlennia rezhymiv zmitsnennia vysokshvydkisnym tertiam nozhiv z konstruktsiinykh staley dlia rizannia derevyny, *Mashynoznavstvo*. 3–4 (2013) 28–31. [in Ukrainian].
12. Manko O.V., Stetsko Yu.B., Biliavskiy M.L., Utvorennia biloho sharu pry fryktsiino-zmitsniuiuchii obrobtii tonkykh plastyn, *Protseyi mekhanichnoi obrobyky v mashynobuduvanni*. 1 (2005) 146–157. [in Ukrainian].
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.

### References

1. Volkov O.O., Pidvyshchennia ekspluatatsiinoi stiiikosti detalei ta instrumentu metodom termofryktsiinoho zmitsnennia: dys. na zdo-butia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: za spets. 05.02.01 Materialoznavstvo, 13 Mekhanichna inzheneriia: zakhyshchena 06.10.2020 / O.O. Volkov; nauk. kerivnyk M.A. Pohribnyi; Nats. tekhn. un-t "Kharkiv. politekhn. in-t"; Kharkiv. nats. tekhn. un-t sil. hosp-va im. P. Vasylenka. – Kharkiv: [b. v.], 2020. – 209 s. [in Ukrainian].
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. Holubets V.M., Tekhnolohichni metody povkhnnevoho zmitsnennia metalichnykh konstruk-tsiinykh materialiv, *Navch. posibnyk*. Lviv: VTF "Drukservis", 2000. 178 s. [in Ukrainian].
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.

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. Buzylko V.I., Serdiuk V.P., Yavorskyi A.V., Haidai O.A., Materialoznavstvo: navch. posib. M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. tekhn. un-t "Dniprovskaya politekhnika". Dnipro: NTU "DP", 2021, 243 s. [in Ukrainian].
23. Syzyi Yu.A., Pohrebnoi N.A., Volkov O.A., Temperaturnoe pole na vkhode u vykhode s poverkhnosty uprochniaemoi trenyem, Visnyk Kharkivskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva "Pidvyshchennia nadiinosti vidnovliuiemykh detalei mashyn". Kharkiv, 2003. Vyp. 18. S. 84–93. [in Ukrainian].

**Волков Олег Олександрович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри матеріалознавства,  
тел.: (057) 707-64-35,  
e-mail: volkovoleg1978@gmail.com,  
**Краєвська Жанна Владиславівна**, аспірант кафедри матеріалознавства,  
тел.: (057) 707-64-35,  
e-mail: 3294280@gmail.com.

### Energy features of friction thermomechanical handling (FTMH) of steel products and the effect on the state of their surface structure

**Abstract. Problem.** The article deals with the influence of energy and power characteristics of frictional thermomechanical handling of steel products (FTMH) on the state of their surface. **Goal.** The goal of this work is to study the relationship between the energy and power parameters of steel FTMP and the strengthening result. **Methodology.** To achieve this goal, the following tasks were solved: fabrication of samples from 65G steel, preliminary hardening heat treatment of samples, hardening of the working surface of samples using FTMO, measurement of the components of the cutting force arising from FTMO using a dynamometer, analysis of the microstructure and microhardness of each sample, comparison of the microstructure, microhardness, and depth of hardening of the experimental samples, conclusions regarding the relationship between the effectiveness of hardening of samples during processing and the energy and power parameters of FTMH. **Results.** Changes in the structures and properties of samples made of steel, which is used for products requiring a hard and wear-resistant surface under the influence of processing to form surfaces with altered properties, are shown. **Originality.** Measurements of the machining process at FTMH using a dynamometer were carried out and the circumferential (circular) cutting (machining) force was calculated, which made it possible to construct graphical dependencies that allow characterizing the surface hardening taking into account the thickness of the disk. It is shown that the microhardness of the surface of the prototypes was increased to 1300 kg/mm<sup>2</sup>, which is equivalent to 13000 MPa. **Practical value.** Recommendations on the optimal thickness of the hardening disk have been made, taking into account the results obtained. The research results can be used in production and research

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

**Volkov Oleh**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Materials Science,  
tel.: (057) 707-64-35,  
e-mail: volkovoleg1978@gmail.com,  
**Kraievskaya Zhanna**, postgraduate student of the Department of Materials Science,  
tel.: (057) 707-64-35, e-mail: 3294280@gmail.com.