

УДК 620.3: 621.923.1

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.65

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ТЕРМОФРИКЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ВИРОБІВ З КРУГЛИМ ПЕРЕРІЗОМ

Волков О. О., Субботіна В. В., Федоренко Г. А.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Ця робота аналізує процес розроблення технологічного комплексу для ефективного термофрикційного зміцнення (ТФЗ) виробів циліндричної форми. Як об'єкт дослідження вибрані зразки у вигляді циліндричного вала, які виготовлені зі сталі 65Г.

Ключові слова: термофрикційне зміцнення, круглий переріз, циліндрична форма, сталь 65Г, мікротвердість, зміцнений поверхневий шар.

Вступ

Існує методів методів впливу на структурний стан поверхні виробів різноманітної форми призначення. Підвищення актуальності застосування того чи іншого методу визначає їхню здатність забезпечувати високі показники зміцнення за умови зниження собівартості таких виробів. Технологія ТФЗ вже довела свою високу ефективність під час зміцнення поверхонь [1]. Крім того, здійснювалися проводилися дослідження щодо зміцнення поверхонь різноманітного профілю [2]. Однак найкращі результати були досягнуті під час зміцнення плоских поверхонь. Отже, актуальним є здійснення досліджень щодо розроблення технологічного комплексу, який би містив оптимальне співвідношення факторів оброблення для забезпечення необхідного рівня зміцнення в аналізованих об'єктах з круглим перерізом.

Аналіз публікацій

Питання поверхневого зміцнення із застосуванням тертя активно розглядається українськими та закордонними дослідниками [3–8] вже протягом багатьох років і не втрачає своєї актуальності. Доведено, що енергія тертя використовується з різноманітним ступенем інтенсивності та для вирішення технологічних питань. Визначено, що тертя є потужним засобом розігрівання поверхні та може використовуватися навіть для зварювання, зокрема феритної іржавої сталі [3], листів з міді [4] та інших матеріалів. Акцентовано увагу на тому, що у цьому випадку відбувається зміна механічних властивостей вздовж перерізів [5]. Це пояснюється високотемпературним розігріванням, яке досягається температурою плавлення та наступним охолодженням з певною швидкістю. Крім того, зміна механічних властивостей може бути викликана також деформацією окремих

структурних складових [6]. Зазначено, що для зміцнення поверхні також можна застосовувати інші альтернативні джерела, наприклад плазмове оброблення, що дозволяє змінювати структуру поверхневого шару виробів [7], однак цей метод є більш витратним. Часто поверхнєве оброблення із застосуванням тертя та інших джерел енергії призводить до утворення в сталях та інших сплавах так званих поверхневих білих шарів [8]. Однак досі не існує єдиної думки щодо пояснення їх утворення. Одночасно пояснення виникнення та особливостей саме зміцнення під час термофрикційно-деформаційних методах оброблення поверхні є актуальним питанням.

У розглянутих вище випадках на поверхні матеріалу, що оброблюється з'являється білий шар, який ще досі не вивчений в повному обсязі та потребує детального дослідження.

Інші дослідження демонструють ефективність наплавлення в комплексі зі зміцнювальним заточуванням. У цьому випадку аналізувався вплив деформації та зафіксовано збільшення зміцненого шару до 55 мкм і формування деформаційного безструктурного мартенситу з підвищенням мікротвердісті в 1,8–2 рази з наявністю залишкових напружень стискання в поверхневому шарі [9].

Групою дослідників під керівництвом О. В. Манько вивчалось утворення білого шару під час фрикційно-зміцнювального оброблення тонких пластин, які є основою форми для багатьох видів поліграфічного інструменту. Визначено [10], що сталь У8А, яка може використовуватися для цього інструменту, має високі показники зносостійкості. Здійснювалось варіювання режимів зміцнення, що дозволило отримати мікротвердість зміцненого шару 5–11 ГПа. У цій роботі зазначено, що структура білих шарів є

механічною сумішшю мартенситу та залишкового аустеніту та має високу в'язкість за достатньої твердості. Тип утворення таких структур недостатньо вивчений, незважаючи на велику кількість проведених досліджень.

У своїх дослідженнях щодо можливості виготовлення дереворізальних ножів з конструкційних сталей та зміцнення їх високошвидкісним тертям Ю. Р. Капраль зазначає, що концентрація вуглецю має становити не менше 0,4 %. На думку автора [11], найкращих показників фізико-механічних властивостей зміцненого шару можна досягти в разі використання важільної системи навантаження та шарнірного закріплення інструмента-диска з титанового сплаву під час високошвидкісного зміцнювання в технологічному середовищі повітря із застосуванням попутного напрямку обертання інструмента-диска щодо напрямку подавання ножа. Найбільше на якісні показники зміцненого шару впливають швидкість подавання ножа та сила притискання інструмента-диска до нього. У разі використання важільної системи навантаження та шарнірного закріплення інструмента-диска для сталі 45 отримано максимальне значення мікротвердості, що становить 14 ГПа, а для сталі 65Г – 14,6 ГПа за товщини шару більше ніж 1 000 мкм.

Цей матеріал застосовують також для виготовлення металевих дисків сталей, які леговані молібденом, вольфрамом і титаном. Однак у цьому випадку не визначено збільшення стійкості, тому використання таких дисків обмежено. У процесі оброблення металевими дисками на їхні поверхні утворюються нарости через процес схоплювання (адгезії). Якщо під час оброблення чи розрізання площин металів таке явище може сприяти процесу, оскільки нарости здійснюють функцію різальних зубів, то зміцнення доцільно проводити за відсутності схоплювання та наростоутворення, щоб зменшити складність щодо призначення припусків на оброблення. Крім того, поверхня після оброблення може мати високий рівень шорсткості.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є розроблення технологічного комплексу оброблення об'єктів з круглим перерізом, який містив би декілька оптимальних факторів, до яких належать:

1) попереднє термічне оброблення з метою отримання необхідного вихідного стану в об'єкті;

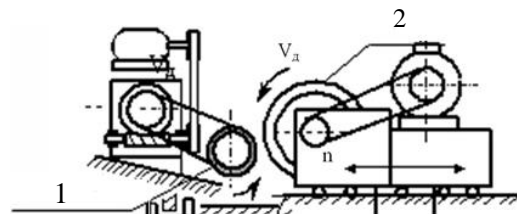
2) вибір режиму термофрикційного зміцнення, що містив би оптимальне співвідношення факторів цього оброблення для отримання необхідних показників глибини зміцнення та твердості поверхні в дослідженому об'єкті.

Для досягнення поставленої мети були здійснені металографічні та діюметричні дослідження зразків у вихідному стані та після оброблення, вивчені зміни структури та механічних властивостей, що виникають у сталі внаслідок оброблення.

Вплив умов ТФЗ циліндричних поверхонь на зміни структури та твердості сталі

Принципова кінематична схема ТФЗ визначається сукупністю рухів інструмента та заготовки, що забезпечує нагрівання зони оброблення з одночасним пластичним деформуванням.

Схеми ТФЗ зразків з круглим перерізом у вигляді вала наведена на рис. 1.



1 – зразок у вигляді вала; 2 – інструмент (диск)

Рис. 1. Схема ТФЗ циліндричних поверхонь

Нагрівання зони оброблення здійснюється внаслідок використання теплоти роботи тертя, що виникає між інструментом у вигляді металевого диска та заготовкою, що обробляється.

У цьому випадку здійснюється розігрівання матеріалу в контактній зоні до високопластичного стану та його деформування з утворенням дрібнозернистої структури.

Відмінною рисою оброблення циліндричних поверхонь є те, що заготовка, яка обробляється, отримує обертальний рух, тобто в процесі оброблення здійснюється одночасне обертання зміцнювального диска і заготовки в різних напрямках.

За цих умов швидкість обертання заготовки необхідно вибрати в поєднанні зі швидкістю поздовжньої подачі, щоб забезпечити необхідну суцільність зміцнення в процесі ТФЗ. Схема ТФЗ циліндричних поверхонь наведена на рис. 1.

Так, основними параметрами оброблення за ТФЗ циліндричних поверхонь є швидкість поздовжньої подачі столу ($V_{ct}(S)$, мм/с), глибина оброблення (t , мм) та частота обертання деталі (n , об/с) для деталей циліндричної форми. Отже, розрахункова лінійна швидкість циліндричного зразка залежить також від його діаметра. Вона варіювалася в інтервалі 75–100 мм/с. У цьому випадку глибина оброблення t дорівнює 0,5 мм, що відповідає достатньо жорсткому режиму ТФЗ. Швидкість обертання диска визначається конструкційними особливостями верстата, на якому здійснюють ТФЗ. Крім того, розглянуті умови ТФЗ зі змащуванням та без зони оброблення, які наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Умови ТФЗ циліндричних поверхонь

№ зразка	Вихідний стан зразка	Швидкість поздовжньої подачі столу, $V_{ct}(S)$, мм/с	Глибина оброблення t , мм	Частота обертання деталі n , об/с
1	Відпалювання зі змащуванням	4,6	0,5	1,5
2	Відпалювання без змащування			
3	Гартування + низькотемпературне відпускання зі змащуванням			
4	Гартування + низькотемпературне відпускання без змащування			

Швидкість подачі – швидкість переміщення заготовки S (мм/с) – обмежується фізико-механічними властивостями металу, що обробляється, товщиною видаленого шару, шириною оброблення і задається механізмом поздовжньої подачі столу із заготовкою плоско- та круглошліфувального верстата.

Глибина оброблення t , мм – це параметр, на величину якого зменшується розмір заготовки у напрямі, що є перпендикулярним поверхні, що обробляється.

Частота обертання деталі n , об/с – швидкість обертання заготовки навколо своєї осі в процесі оброблення циліндричних заготовок.

Під час ТФЗ циліндричних поверхонь $t = 0,5$ мм а $V_{d2} = 50$ м/с.

Колова швидкість диска V_d визначається характеристиками устаткування.

Оскільки в процесі ТФЗ плоских поверхонь досягнуто високих результатів [1], то була зроблена спроба використати цей метод зміцнення для об'єкта більш складної форми, наприклад циліндричної. Для дослідження ТФЗ циліндричних поверхонь була вибрана саме сталь 65Г, оскільки вона має найкращий результат зміцнення [12]. Крім того, важливим фактором є умови здійснення ТФЗ сталі для визначення доцільності змащування зони оброблення.

Зразки були виготовлені у формі циліндрів, довжиною 100 мм, а діаметр варіювався в діапазоні 36–50 мм. Вони досліджувалися після ТФЗ в двох різних вихідних станах: після відпалювання та після гартування з наступним низькотемпературним відпусканням.

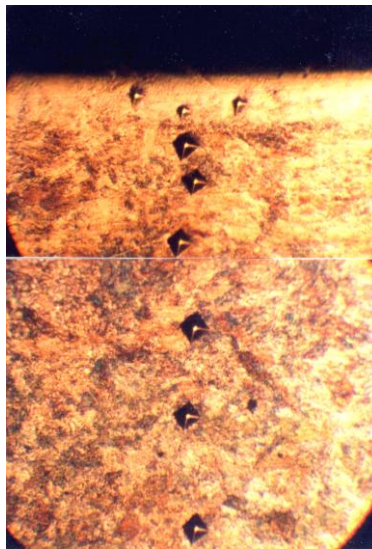
Необхідно зазначити, що ТФЗ здійснювали за двома технологічними варіантами: без змащування та зі змащуванням зони оброблення. Як змащувальну рідину використовували напівсинтетичну оливу марки Esso ultra 10w 40, оскільки вона призначена для роботи в умовах підвищених температур. ТФЗ здійснювалось за режимом, який наближений до оптимального щодо ТФЗ плоских поверхонь. Основними параметрами ТФЗ циліндричних поверхонь є такі: колова швидкість диска (V_d), м/с; поздовжня подача столу $V_{ct}(S)$, мм/с; діаметр деталі d , мм; глибина оброблення t , мм; частота обертання деталі n , об/с, які наближені до оптимальних під час ТФЗ плоских поверхонь (див. табл. 2).

Мікроструктура «білого поверхневого зміцненого шару» та інших шарів є ідентичною тій, що отримана в процесі зміцнення плоских поверхонь. Отже, мікроструктура майже в 3 рази твердіша за мікроструктуру сталі після класичного гартування. У попередньо відпалених зразках мікроструктура поверхневого шару, сформованого під час ТФЗ ідентична тій, що отримана в процесі зміцнення плоских поверхонь (рис. 2, а, б). Зона основного металу має переважно перлітну структуру через попереднє термічне оброблення, а її мікротвердість становить 4 000 МПа. Зона знеміцнення відсутня, оскільки вихідна структура рівноважна.

Аналіз отриманих результатів дозволяє стверджувати, що під впливом ТФЗ в структурі циліндричних зразків зі сталі 65Г спостерігаються суттєві зміни. Це визначено формуванням на поверхні зразків так званого

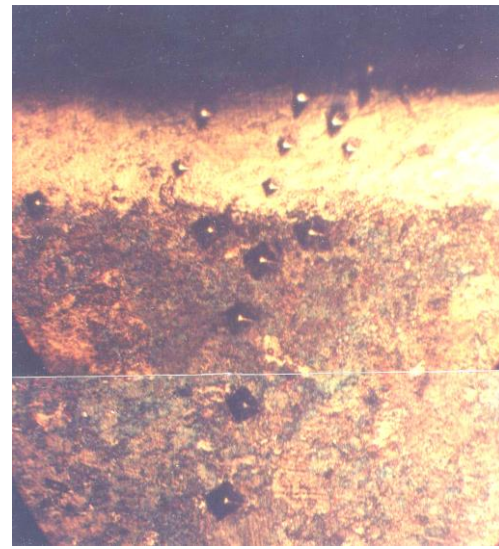
«білого поверхневого шару», який має надвисоку мікротвердість [13, 14]. Його власти-

вості залежать від вихідного стану матеріалу, умов і режимів здійснення ТФЗ.



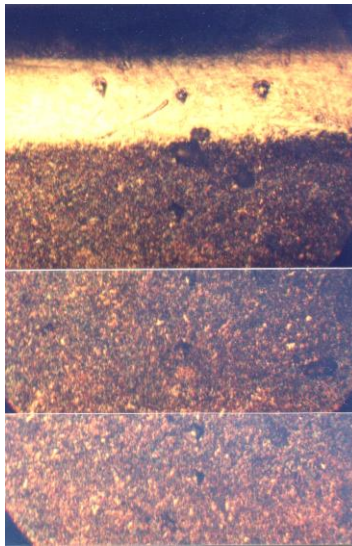
× 360 (× 0,5)

а



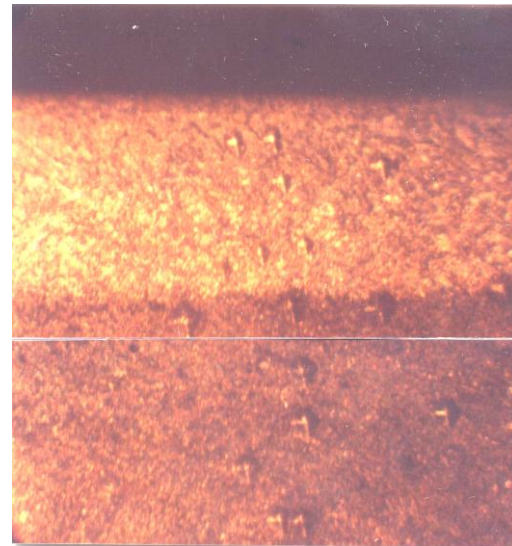
× 360 (× 0,5)

б



× 360 (× 0,5)

в



× 360 (× 0,5)

г

а – ТФЗ зі змащуванням після попереднього відпалювання; б – ТФЗ без змащування після попереднього відпалювання; в – ТФЗ зі змащуванням після попереднього гартування та низькотемпературного відпускання; г – ТФЗ без змащування після попереднього гартування та низькотемпературного відпускання

Рис. 2. Мікроструктура циліндричних зразків зі сталі 65Г після ТФЗ у різних вихідних станах

Як демонструють дослідження, на ефективність зміцнення впливають саме вихідний стан матеріалу та режим ТФЗ, а функція змащування зони оброблення в цьому випадку є незначною та майже не вплинула на ефективність процесу. Це можна пояснити тим, що в умовах високого контактного тиску та розігрівання під час ТФЗ змащувальна рідина швидко видаляється із зони контакту. Крім того, за цих умов у змащуванні немає

потреби, оскільки воно може знижувати швидкість розігрівання поверхні, ускладнюючи процес її деформування, зокрема деформування в умовах підвищених температур може здійснювати основну функцію під час отримання надвисокої твердості поверхні, оскільки таке розігрівання необхідне для процесу деформування твердих структур під час ТФЗ.

Таблиця 2 – Вплив умов ТФЗ на властивості циліндричних зразків зі сталі 65Г

№	Вихідний стан зразка	Параметри ТФЗ				Глибина шару зі зміненою структурою й твердістю l , мкм		Мікротвердість шару зі зміненою структурою H_{100} , МПа		Мікротвердість серцевини, МПа
		$V_{ст}(S)$ мм/с	$V_{кр}$ м/с	t , м	$\rho_{дет}$, об/с	Зміц.	Знем.	Зміц.	Знем.	
1	Відпалювання зі змащуванням	4,6	50	0,5	1,5	60	–	15 200	–	4 000
2	Відпалювання без змащування					100	–	17 800	–	4 000
3	Гартування + низькотемпературне відпускання зі змащуванням					100	40	17 800	6 200	8 000
4	Гартування + низькотемпературне відпускання без змащування					160	40	18 200	6 300	8 000

Таким чином, завдання ефективного ТФЗ циліндричних поверхонь вирішене, запропонована технологія може бути рекомендована для використання в промисловості.

Результати досліджень мікроструктури та мікротвердості поперечного перерізу зразків після ТФЗ наведено на рис. 2 та в табл. 3. Отже, можна дійти висновку, що максимальна мікротвердість зміцненого шару $H_{100} \sim 18\ 200$ МПа та максимальна глибина зміцнення $l \sim 160$ мкм досягнуті в комбінації ТФЗ без змащування після попереднього гартування та низькотемпературного відпускання (рис. 2, г).

Висновки

1. Розроблені технологічні схеми та режими зміцнення плоских і циліндричних поверхонь. Здійснено вибір та адаптування експериментального устаткування до ТФЗ. Виготовлено інструмент – зміцнювальний диск зі сталі Ст3. У цьому випадку ТФЗ здійснювалось за двома принциповими схемами: для зміцнення плоских та циліндричних поверхонь відповідно. Оброблення здійснювали на модернізованому плоско- та круглошліфувальному обладнанні. Головними параметрами є швидкість подачі S , мм/с, яка змінювалась від 30 до 100 мм/с, та глибина оброблення t , яка змінювалась від 0,2 до 0,7 мм, а також частота обертання деталі (для циліндричного зразка) n , об/с.

2. Наведено відомості про матеріали, що були використані в роботі, та методологію досліджень, яка містить здійснення експериментів з досліджень впливу ТФО, що зміцнює (ТФЗ), на особливості формування структури та властивостей сталей. Експерименти зі зміцнення через ТФО проводилися на плоских та циліндричних зразках та деталях зі сталей марок сталь 20, 45, 50, У7, У12, У8А, 65Г, Х12М, 15Х11МФ у двох попередніх станах: після відпалювання, та після гартування і відпускання. Такий вибір вуглецевих марок пояснюється необхідністю охопити основний діапазон, щодо вмісту вуглецю, який ефективно використовується в промисловості (від 0,2 до 1,2 % С).

3. Аналіз структур здійснювався з використанням методів металографічної, оптичної, електронної та растрової електронної мікроскопії. Також визначалась мікротвердість поверхневих шарів та її зміни вздовж перерізу зразків після ТФЗ за спеціальною методикою з використанням мікротвердоміра ПМТ-3.

4. Доведена можливість ТФЗ плоских та більш складних циліндричних поверхонь з використанням удосконаленого способу ТФЗ поверхні. Визначені найбільш ефективні режими зміцнення.

Література

1. 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.
2. Волков О. О. Підвищення експлуатаційної стійкості деталей та інструменту методом термофрикційного зміцнення: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.01. Харків, 2020. 25 с.
3. Lakshminarayanan A. K., Balasubramanian V. Understanding the parameters controlling friction stir welding of AISI 409M ferritic stainless steel. Metals and materials international. 2011. Vol. 17. № 6. P. 969–981.
4. 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. 2013. Vol. 213. Iss. 2. P. 129–135.
5. Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds / Rajamanickam N., Balusamy V., Magudeeswaran G., Natarajan K. Materials & Design. 2009. Vol. 30. Iss. 7. P. 2726–2731.
6. Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel / Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H. Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. Iss. 4–5. 25. P. 2158–2163.
7. Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS w / Sidhom H., Ghanem F., Amadou T., Gonzalez G. The international journal of advanced manufacturing technology. 2013. Vol. 65. Iss. 1–4. P. 141–153.
8. 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. 2008. Vol. 28. Iss. 1. P. 46–50.
9. Управление напряженным состоянием поверхностного слоя – путь к упрочнению / Скобло Т. С., Коломиец В. В., Ридный В. Ф., Ридный Р. В. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». Харків, 2010. Вип. 101. С. 3–7.
10. Манько О. В., Стецько Ю. Б., Білявський М. Л. Утворення білого шару при фрикційно-зміцнювальній обробці тонких пластин. Процеси механічної обробки в машинобудуванні. 2005. Вип 1. С. 146–157.

11. Капраль Ю. Р. Ефективність використання дереворізальних ножів, виготовлених з конструкційних сталей та зміцнених високошвидкісним тертям: дис. кандидата технічних наук: 05.05.04 / Державний вищий навчальний заклад Національний лісотехнічний університет України. Львів, 2016. 162 с.
12. Упрочнение методом термофрикционной обработки материалов / Сизий Ю. А., Погребной Н. А., Гусаренко Ю. Г., Волков О. А. Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». 2004. Вип. 26. С. 150–156.
13. Сизий Ю. А., Погребной Н. А., Волков О. А. Упрочнение цилиндрических деталей из стали 65Г методом ТФО. Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць НТУ «ХПІ». Вип. 1(10). Харків: НТУ «ХПІ». 2005. С. 142–146.
14. Сизий Ю. А., Погребной Н. А., Волков О. А. Упрочнение цилиндрических деталей из стали 65Г методом ТФО. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» MicroCAD-2005: матеріали XIII Міжнар. наук.-прак. конф., 19–20 травня 2005 р. Харків: НТУ «ХПІ», 2005. С. 30.
7. Effect of electro discharge machining (EDM) on the AISI316L SS w / Sidhom H., Ghanem F., Amadou T., Gonzalez G. The international journal of advanced manufacturing technology. 2013. Vol. 65. Iss. 1–4. P. 141–153.
8. 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. 2008. Vol. 28. Iss. 1. P. 46–50.
9. Управління напруженим станом поверхнього шару – шлях до загартовування [Control of the stress state of the surface layer – the way to hardening] / Skoblo T. S., Kolomic V. V., Ridnyj V. F., Ridnyj R.V. (2010). Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». Харків, Вип. 101. С. 3–7.
10. Man'ko O. V., Stec'ko YU. B., Bilyavskij M. L. (2005). Utvorenniya bilogo шару pri frikciynozmichnyuyuchij obrabci tonkih plastin [Formation of a white layer during friction-strengthening treatment of thin plates]. Procesi mekhanichnoi obrabki v mashinobuduvanni. Vip 1. S. 146–157.
11. Kapral' YU.R. (2016). Efektivnist' vikoristannya derevorizal'nih nozhiv, виготовлених з конструкційних сталей та зміцнених високошвидкісним тертям [Efficiency of using wood cutting knives made of structural steels and reinforced with high-speed friction]: disertaciya kandidata tekhnichnih nauk: [special'nist'] 05.05.04 / Derzhavnij vishchij navchal'nij zaklad Nacional'nij lisotekhnichnij universitet Ukraini. L'viv, 162 s.

References

1. Volkov O. A. (2016). Study of heat deformation influence in surface strain hardening of steel by thermofriction processing. Eastern-European journal of enterprise technologies. Vol. 2. № 5 (80). P. 38–44.
2. Volkov O. O. (2020). Pidvishchennya ekspluatacijnoi stikosti detalej ta instrumentu metodom termofrikciynogo zmichennya [Improving the operational durability of parts and tools by the method of thermofriction hardening]: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk: 05.02.01. Harkiv, 25 s.
3. Lakshminarayanan A. K., Balasubramanian V. Understanding the parameters controlling friction stir welding of AISI 409M ferritic stainless steel. Metals and materials international. 2011. Vol. 17. № 6. P. 969–981.
4. 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. 2013. Vol. 213. Iss. 2. P. 129–135.
5. Effect of process parameters on thermal history and mechanical properties of friction stir welds / Rajamanickam N., Balusamy V., Magudeeswaran G., Natarajan K. Materials & Design. 2009. Vol. 30. Iss. 7. P. 2726–2731.
6. Hot deformation behavior of austenite in HSLA-100 microalloyed steel / Momeni A., Arabi H., Rezaei A., Badri H. Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. Iss. 4–5. 25. P. 2158–2163.
12. Uprochnenie metodom termofrikcionnoj obrabotki materialov [Hardening by the method of thermal friction processing of materials] / Sizyj YU. A., Pogrebnoj N. A., Gucalenko YU. G., Volkov O. A. (2004). Visnik Harkivs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu sil'skogo gospodarstva «Tekhnichnij servis APK, tekhnika ta tehnologii u sil'skogospodars'komu mashinobuduvanni». Harkiv. Vip. 26. C. 150–156.
13. Sizyj YU.A., Pogrebnoj N.A., Volkov O.A. (2005). Uprochnenie cilindricheskikh detalej iz stali 65G metodom TFO [Hardening of cylindrical parts made of 65G steel by the TFH method]. Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni : Zb. nauk. prac' NTU «HPI». Vip. 1(10). Harkiv : NTU «HPI», S. 142–146.
14. Sizyj YU. A., Pogrebnoj N. A., Volkov O. A. (2005). Uprochnenie cilindricheskikh detalej iz stali 65G metodom TFO [Hardening of cylindrical parts made of 65G steel by the TFH method]. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» MicroCAD-2005: матеріали IIII міжнар. наук.-прак. конф., 19–20 травня 2005 р. Харків: Харків: НТУ «ХПІ». С. 30.

Волков Олег Олексійович, к.т.н., доцент кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, e-mail: volkovoleg1978@gmail.com.

Субботіна Валерія Валеріївна, д.т.н., доцент, завідувач кафедрою матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Федоренко Ганна Анатоліївна, інж. I кат, кафедри матеріалознавства, тел.: (057) 707-64-35, e-mail: ann161169@gmail.com.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна.

Development of a technological complex for thermofriction hardening of products with a circular cross section

Annotation. Problem. There are many methods of influencing the structural state of the surface of products of different shapes and different purposes. At the same time, the increase in the relevance of the application of a particular method is closely related to its ability to provide high hardening rates while reducing the cost of such products. The TFH technology has already shown its high efficiency in strengthening surfaces [1]. In addition, studies were conducted on the hardening of surfaces of different profiles [2]. However, the best results are achieved when hardening flat surfaces. In this regard, it is entirely appropriate to conduct research that is related to the development of a technological complex that would include the optimal ratio of processing factors to ensure the necessary level of hardening in the studied objects that have a circular cross-section. **Goal.** The purpose of this work is to develop a technological complex for processing objects with a circular cross-section. To achieve this goal, metallographic and

durometric studies of samples in the initial state and after processing were carried out. At the same time, the changes in the structure and mechanical properties that occur in steel due to processing were studied. **Method.** The method of thermal friction hardening includes a combined effect of heat and deformation on the treated surface. The peculiarity of this method is the deformation under short-term heating conditions. This makes it possible to further strengthen pre-hardened materials. **Results.** Under the influence of TFC, significant changes are observed in the structure of cylindrical samples made of 65G steel. This is expressed by the formation of a so-called "white surface layer" in the surface of these samples, which has an ultra-high microhardness [13, 14]. The properties of this layer depend on the initial state of the material, the conditions and modes of conducting TFH.

Keywords: thermal friction hardening, round cross-section, cylindrical shape, 65G steel, microhardness, hardened surface layer.

Volkov Oleg, Ph. D., Associate Professor of Materials Science Department, tel.: (057) 707-64-35,

e-mail: volkovoleg1978@gmail.com.

Subbotina Valeria, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Materials Science, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com.

Fedorenko Anna Anatolyevna, eng. I category, tel.: (057) 707-64-35, e-mail: ann161169@gmail.com, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kyrpychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.