УДК 621.793

ВПЛИВ НАКОЧУВАННЯ НА ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ ХРОМОВАНОЇ СТАЛІ ЗІ ЗОВНІШНЬОЮ КОМПОЗИЦІЙНОЮ ЗОНОЮ

О. В. Манько, Я. М. Кавин

Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

Розглянуто результати експериментів процесу накочування середньовуглецевої сталі, зміцненої за схемою «хімічне покриття + дифузійне хромування», фізична поверхня якої являє собою дифузійний шар із зовнішньою композитною зоною, котра складається зі стовпчастої колонії карбідів хрому, розміщеної у пластичній матриці твердого розчину хрому в α -залізі.

Викладено передумови поверхневого пластичного деформування (ППД) (накочування) дифузійного шару із зовнішньою композитною зоною, досліджено вплив різних режимів процесу ППД на шорсткість поверхні.

Показано, що накочування сприятливо впливає на показники шорсткості фізичної поверхні зразків, що дозволяє понизити їх до прийнятного технологічного рівня, а також згладити рельєф поверхні і таким чином зменшити рівень концентраторів напруг, котрі можуть призвести до пришвидшеного руйнування поверхні, передчасного зносу зразка, а отже, до зменшення ресурсу зміцненої пари тертя.

Ключові слова: накочування, хіміко-термічна обробка, трибоз'єднання, шорсткість, дифузійний шар, діаметральний зазор, концентратори напруг.

Постановка проблеми. Одним із основних критеріїв працездатності деталі машини є її ресурс, тобто період роботи, при якому зберігаються основні параметри деталі, а саме — розміри, конфігурація та структура матеріалу, зокрема матеріалу поверхні тертя. Останнє є важливим, оскільки велике значення має саме міцність невеликого за товщиною поверхневого шару на деталі [1], який, власне, працює в умовах тертя і повинен забезпечувати достатній ресурс роботи трибоз'єднання.

Міцність, а також зносостійкість як складові працездатності такого зносостійкого шару досягаються шляхом застосовування різноманітних зміцнювальних технологій, як традиційних (ТО, ХТО, ППД), так і сучасних. Одним із напрямів є також комбінування відомих способів для покращення службових характеристик зміцнювальних покриттів або створення покриттів із гетерогенною структурою, яка дає можливість в умовах тертя забезпечувати реалізацію правила Шарпі.

Часто створення зміцнених шарів методом хіміко-термічної обробки супроводжується значним зростанням шорсткості їх поверхні, що змушує вводити додаткові викінчувальні операції механічної обробки (наприклад, шліфування після цементації) з метою пониження шорсткості поверхні до необхідних службових показників.

На вибір викінчувальної операції будуть впливати такі фактори, як природа і структура зміцненого покриття, які вимагатимуть окремого технологічного рішення (з ряду можливих) для забезпечення такого показника як зносостійкість покриття. Отже необхідним є дослідження режимів викінчувальної обробки і вплив останніх на параметри шорсткості, а також перевірка доцільності прийнятої операції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Як було сказано вище, збільшення ресурсу пар тертя є комплексною проблемою, яка вирішується різними шляхами: конструктивними, експлуатаційними і, зокрема, технологічними. Не дивлячись на відмічену низкою дослідників перспективність комбінованих методів зміцнення (наприклад, схеми ХТО + ППД) [2; 3; 4; 5], досі відсутні достатньо систематизовані дані про цей напрям у зміцнювальних технологіях. До того ж використання ППД після ХТО вважається доцільним лише як калібрувальні методи для згладжування рельєфу та коригування геометрії поверхонь, зважаючи на природу дифузійних шарів, котрі найчастіше являють собою покриви з хімічних сполук або їхні механічні суміші. Проведені роботи обмежені вузьким діапазоном використовуваних матеріалів, методів ХТО та ППД, мають розрізнений характер і не дають повної уяви про можливість пластичного деформування дифузійно насиченої сталі з метою її додаткового зміцнення.

Інші дослідники [6] також здійснювали спроби ППД дифузійно хромованої сталі (сталь 20 і 45) зі зовнішньою карбідною зоною. Сформовані на цих сталях зовнішні карбідні зони не дозволяють застосовувати ППД з великими зусиллями розкочування через їх велику крихкість. У цьому випадку наслідком (і метою) розкочування було лише покращення шорсткості поверхні, калібрування отвору та незначне зміцнення карбідної зони (наприклад, для сталі 45 мікротвердість зовнішньої зони зросла з 18 до 20 ГПа).

Проведений аналіз різноманітних комплексних зміцнювальних технологій показав, що для підвищення працездатності матеріалу пар тертя перспективним є створення композиційних покривів на базі отриманих дисперсних фаз, яким притаманна велика різниця у фізико-механічних властивостях, з подальшим поверхнево пластичним деформуванням з метою як пониження шорсткості поверхні, так і покращення фізико-механічних характеристик самого дифузійного шару загалом.

Мета статті — дослідження впливу процесу ППД покриття із зовнішньою композитною зоною на показники шорсткості її фізичної поверхні. Процес розкочування отворів здійснювався жорстким розкатником, сконструйованим для отворів діаметром 20 мм, діаметр якого регулюється у межах декількох десятків міліметра. Для обробки зовнішніх циліндричних поверхонь використовувався трироликотий пристрій охоплюючого типу. Фотографії здійснювались на металографічному мікроскопі МИМ-8М та растровому електронному мікроскопі РЕМ-200. Середнє арифметичне відхилення профілю R_a вимірювалось профілографом-профілометром моделі 201 заводу «Калібр».

Накочуванню піддавали зразки зі сталей 30 і 45, на яких методом комплексної зміцнювальної обробки «хімічне покриття + хромування» було сформоване

покриття із зовнішньою композитною зоною 1, яка складається із пластичної фази твердого розчину хрому в α -залізі та твердої фази карбідів хрому (рис. 1) [7]. Основні структурні складові зон 1 і 2 — стовпчасті зерна карбідів $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ та $(\text{Cr, Fe})_{27}\text{C}_3$ і матриця твердого розчину хрому, нікелю та кобальту в α -залізі. Інтегральна мікротвердість композитної зони становить ~ 11 ГПа для сталі 30 і 12 ГПа для сталі 45.

Рис. 1. Мікроструктура дифузійного шару, отриманого на сталі 45 методом комбінованої обробки, 600 $\times$

Рис. 2. Фізична поверхня дифузійного шару, яка зазнала горбкування під час дифузійного насичення через активні процеси структуроутворення, 2400 $\times$

Виклад основного матеріалу дослідження. *Передумови накопчування отриманого покриття.* Слід зауважити, що отриманий дифузійний шар є шаруватою системою чітко розділених зон, де зовнішня зона має композитну структуру. Кожній із зон притаманні свої показники мікротвердості та пластичності.

Поверхнєве пластичне деформування як остання технологічна операція було вибране на таких підставах:

1. ППД на відміну від обробки різанням забезпечує нижчі показники шорсткості ($\sim R_a 0,64$ мкм), що задовольняє умови експлуатації трибоз'єднання. Крім того, під час поверхнєвої пластичної деформації обробка ведеться без знімання стружки, що є важливим фактором для збереження ефективної товщини зміцненого покриття.

2. Після дифузійного хромування шорсткість поверхні зросла до $R_a \approx 5$ мкм як наслідок формування карбідного покриття на горбкуватій поверхні (рис. 2) [7, с. 63]. Така висока шорсткість у період приробки вузла тертя буде причиною активного абразивного зношування поверхонь пари тертя і потягне за собою збільшення діаметрального зазору в ній. Крім того, відомо [8], що найчастіше поверхнєве руйнування при терті твердих тіл починається у місцях локальної концентрації напруг, пов'язаної з деформаційними або/і температурними неоднорідностями. В нашому випадку такими потенційними концентраторами можуть виступати вершини горбочків. Таким чином, на умови тертя у період приробки накладаються два фактори. По-перше, власна шорсткість зовнішньої карбідної колонії, що сформувалась на

горбкуватій поверхні. По-друге, вершини горбочків, що виступають у ролі концентраторів. Збільшення діаметральних зазорів у з'єднаннях призводить до погіршення кінематичної точності виконавчих механізмів, що є неприпустимим для поліграфічного обладнання. Однією з цілей накочування є створення сприятливого напружено-деформаційного стану в зонах дискретного контакту, коли контактне навантаження розподіляється рівномірніше, що призводить до зменшення місцевих пікових напруг. Останнє досягається шляхом зменшення абсолютних значень показників R_z та R_a .

3. При наявності знеуглецьованих зон існує можливість поверхневих контактних руйнувань, що зумовлює пониження поверхневої контактної міцності в середньому на 20 % [9]. Отже, незважаючи на велику сумарну товщину двох зовнішніх зон дифузійного шару (80–110 мкм), існує потенційна небезпека продавлювання/«просідання» цих зон при високих питомих тисках та температурах, особливо в умовах роботи трибоз'єднання у режимі реверсивного тертя через відносну пластичність знеуглецьованої зони 4, яка, по суті, являє собою низьковуглецевий ферит. Це теж може призвести до зростання діаметрального зазору. Тому іншою метою накочування було також і зміцнення знеуглецьованої зони через її текстурування.

Загальна здатність до поверхневої пластичної деформації отриманого дифузійного шару зумовлюється наявністю зовнішньої композитної зони з її пластичною матрицею, а також внутрішніми зонами, що теж є пластичними, особливо знеуглецьованої зони 4.

Із попередніх досліджень [10] відомо, що навколо карбідних стовпчастих зерен у матриці (твердий розчин хрому в α -залізі) утворилась висока концентрація таких дифузантів, як нікель та кобальт. Особливу роль у підвищеній пластичності матриці тут, на наш погляд, відіграє нікель. Завдяки йому матриця робиться в'язкою [9; 11; 12]. Оскільки найвища густина нікелю є на границі розподілу «зерно – твердий розчин», то логічно припустити, що навколо зерен утворюються «подушки» пластичнішого щодо загального об'єму твердого розчину. Тому під час ППД деформаційні напруги релаксуватимуться в цих «подушках», не завдаючи шкоди зернам карбідів [13]. Крім того, власне самі зерна під дією нормальної та тангенційної складових зусиль, прикладених до них контактуючими виступами контртіла (в умовах тертя), зможуть здійснювати мікрозміщення в «подушках» одне відносно одного, уникаючи при цьому критичного ступеня деформації з подальшою їх фрагментацією.

Шорсткість поверхні. Встановлено, що вже в початковий період накочування (при мінімальному натязі або зусиллі) спостерігається різке зменшення середнього арифметичного профілю R_a і при натягах 0,10–0,20 мм або при зусиллях 700–900 Н він сягає свого мінімуму: в 3–5 разів зменшується для хромованої сталі 45 та в 9–15 разів для хромованої сталі 30 щодо початкового значення (рис. 3).

Із подальшим посиленням режиму ППД починається спочатку поступове, а потім різке зростання шорсткості поверхні. Мінімальне значення R_a для сталі 30 дорівнює 0,25–0,30 мкм, для сталі 45: 0,70–0,90 мкм. Досягнення менших значень R_a неможливе внаслідок особливостей структури композитної зони — її стовпчастості.

Рис. 3. Фізична поверхня зразка після розкочування, 600^x

Рис. 5. Мікротріщини в покритті внаслідок зовнішнього натягу ($i \geq 0,25$ мм), 90^x

Перевищення натягу більше ніж 0,20 мм для хромованої сталі 45 та більше ніж 0,25 мм для хромованої сталі 30 призводить до різкого зростання значень R_a , що, на нашу думку, пов'язане з фрагментацією верхівок стовпчастих карбідних зерен. При обкочуванні експерименти були припинені на стадії різкого зростання шорсткості поверхні, а також із початком викришування поверхні (при $P = 1118$ Н).

Слід звернути увагу на особливості зміни параметрів шорсткості на сталях 30 та 45 під час їх деформування. Ця різниця зумовлюється двома факторами: по-перше, співвідношенням фаз у композитній зоні цих сталей, по-друге, схемою деформування.

Як видно з графіків зміни шорсткості (рис. 4), мінімальні значення R_a властиві сталі 30, що закономірно, оскільки карбідна складова в її композитній зоні є біднішою. Загалом композитна зона на сталі 30 є пластичнішою, ніж на зразках із сталі 45, тому під час ППД зерна вминаються в матрицю, що є причиною меншої шорсткості. Однак саме відсутність достатньо потужної карбідної колонії сприяє швидкому вичерпанню запасу в'язкості та перенагартуванню, що веде до викришування поверхні і більш інтенсивного зростання шорсткості порівняно зі зразками зі сталі 45. В останньому випадку саме наявність потужної стовпчастої структури та зовнішньої колонії карбідів є причиною вищої шорсткості на фізичній поверхні при оптимальних режимах розкочування.

Рис. 4. Зміна шорсткості поверхні зразка: а) після розкочування; б) після обкочування

Із другого боку, помітний вплив на зміну шорсткості із зростанням силових параметрів ППД має схема наковчування. При розкочуванні результатом ППД буде збільшення поперечного діаметра отвору, що тягне за собою зростання периметра, а значить, і появу розтягуючих тангенційних напруг у поверхневому шарі і, як результат, утворення мікро- і макротріщин при критичних натягах (рис. 5). Окрім того, результатом критичних зусиль буде перенагартування поверхневого шару та викришування поверхні під час ППД.

При обкочуванні буде відбуватися процес звуження зовнішнього діаметра, зменшення периметру, отже, у композитній зоні появляться додаткові стискуючі напруги, котрі ускладнюватимуть появу мікротріщин і загалом сприятливо позначаться на ресурсі покриття.

Оскільки різниця у шорсткості поверхні після ППД в діапазоні натягів 0,10–0,20 мм є відносно невеликою, то профілографа, знята з поверхні зразка після розкочування з натягом 0,15 мм, є характерною і для інших зразків, які були розкочені з натягами цього діапазону. Наведена профілографа ілюструє вплив ППД на шорсткість фізичної поверхні тертя (рис. 6). Таким чином була розв'язана проблема надмірної шорсткості робочої поверхні зразків після хромування.

Рис. 6. Профілограми поверхонь: а) після обробки «хімічне покриття + хромування»; б) після обробки «хімічне покриття + хромування + ППД»

Висновки. 1. Висвітлено передумови наковчування хромованої сталі із зовнішньою композитною зоною, яка складається зі стовпчастих карбідів хрому у пластичній матриці твердого розчину хрому в α -залізі.

2. У результаті застосування ППД була підвищена потенційна зносостійкість отриманого дифузійного шару за рахунок зниження вихідної шорсткості поверхні тертя з R_a 5 мкм до $R_a \leq 0,70$ мкм та мінімізації фактора концентрації напруг, однією складовою якого є горбкуватість фізичної поверхні після комплексної зміцнювальної обробки.

3. Діапазон натягів 0,15–0,20 мм при розкочуванні або відповідних зусиль при обкочуванні дає можливість застосовувати ППД на виробництві без дотримання жорстких технологічних режимів накочування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сорокин Г. М. Аспекты металловедения в проблеме долговечности машин. Металловедение и термическая обработка металлов. 1990. № 2. С. 57–60.
2. Балтер М. А. Упрочнение деталей машин. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Машиностроение, 1978. 184 с.
3. Папшев Д. Д. Состояние и перспективы развития обработки поверхностным пластическим деформированием. Кузнечно-штамповое производство. 1985. № 8. С. 32–33.
4. Дроздов Ю. Н., Усов С. В. Использование комбинированных технологических методов для повышения износостойкости деталей машин. Вестник машиностроения. 1985. № 10. С. 9–11.
5. Одинцов Л. Г. Комплексные и комбинированные способы упрочнения как одно из направлений развития методов ППД. Новые технологические процессы и оборудование для поверхностной пластической обработки материалов: всесоюзная научно-техническая конференция: тез. докл. (21–23 окт. 1986 г.). Брянск, С. 50.
6. Стецьків О. П., Арабський Р. С. Раскатывание хромированных поверхностей. Вестник машиностроения. 1987. № 11. С. 67–71.
7. Манько О. В., Паламар О. О., Стецько А. Є. Прояв ефекту пристосовуваності при трибологічному дослідженні покриття, отриманого методом комплексної зміцнюючої обробки. Наукові записки [Української академії друкарства]. 2018. № 1 (56). С. 61–70.
8. Крагельский И. В. Трение и износ. Москва, 1968. 480 с.
9. Тескер Е. И. Критерий оценки работоспособности цементированных (нитроцементированных) зубчатых колес, подверженных контактному разрушению. Вестник машиностроения. 1986. № 6. С. 12–14.
10. Манько О. В. Розробка комбінованої зміцнюючої обробки для підвищення зносостійкості середньовуглецевих сталей: дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата технічних наук. Хмельницький, 1997. С. 197.
11. Позняк Л. А., Скрынченко Ю. М., Тишаев С. И. Штампованные стали. Москва: Металлургия, 1980. С. 129–135.
12. Уошборн Дж. Деформационное упрочнение. Механизмы упрочнения твердых тел. Москва: Металлургия, 1965. С. 57–71.
13. Полупан Б. И. Качество обработанной поверхности при врезном шлифовании с применением правящих роликов. Вестник машиностроения. 1991. № 3. С. 21–24.

REFERENCES

1. Sorokin, G. M. (1990). Aspekty metallovedeniia v probleme dolgovechnosti mashin: Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov, 2, 57–60 (in Russian).
2. Balter, M. A. (1978). Uprochnenie detalei mashin. Moskva, Mashinostroenie (in Russian).
3. Papshev, D. D. (1985). Sostoianie i perspektivy razvitiia obrabotki poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: Kuznechno-shtampovoe proizvodstvo, 8, 32–33 (in Russian).
4. Drozdov, Iu. N., & Usov, S. V. (1985). Ispolzovanie kombinirovannykh tekhnologicheskikh metodov dlia povysheniia iznosostoikosti detalei mashin: Vestnik mashinostroeniia, 10, 9–11 (in Russian).
5. Odintsov, L. G. Kompleksnye i kombinirovannye sposoby uprochneniia kak odno iz napravlenii razvitiia metodov PPD. Novye tekhnologicheskie protsessy i oborudovanie dlia poverkhnostnoi plasticheskoi obrabotki materialov: vsesoiuznaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia: tez. dokl. (21–23 okt. 1986 g.). Briansk, 50 (in Russian).
6. Stetkiv, O. P., & Arabskii, R. S. (1987). Raskatyvanie khromirovannykh poverkhnostei: Vestnik mashinostroeniia, 11, 67–71 (in Russian).
7. Manko, O. V., Palamar, O. O., & Stetsko, A. Ye. (2018). Proiav efektu prystosovuvanosti pry trybo lohichnomu doslidzhenni pokryttia, otrymanoho metodom kompleksnoi zmitsniuiuchoi obrobky: Naukovi zapysky [Ukrainskoi akademii drukarstva], 1 (56), 61–70 (in Ukrainian).
8. Kragelskii, I. V. (1968). Trenie i iznos. Moskva (in Russian).
9. Tesker, E. I. (1986). Kriterii otcenki rabotosposobnosti tsementirovannykh (nitrotsementirovannykh) zubchastykh koles, podverzhennykh kontaktym razrusheniim: Vestnik mashinostroeniia, 6, 12–14 (in Russian).
10. Manko O. V. (1997). Rozrobka kombinovanoi zmitsniuiuchoi obrobky dlia pidvyshchennia znosostiikosti serednovuhletsevykh stalei: dysertatsiia na zdobuttia vchenoho stupeniu kandydatskoi tekhnichnykh nauk. Khmelnytskyi, 197 (in Ukrainian).
11. Pozniak, L. A., Skrynchenko, Iu. M., & Tishaev, S. I. (1980). Shtampovannye staly. Moskva: Metallurgiiia, 129–135 (in Russian).
12. Uoshborn, Dzh. (1965). Deformatcionoe uprochnenie. Mekhanizmy uprochneniia tverdykh tel. Moskva: Metallurgiiia, 57–71 (in Russian).
13. Polupan, B. I. (1991). Kachestvo obrabotanoi poverkhnosti pri vreznom shlifovanii s primeneniem praviashchikh rolikov: Vestnik mashinostroeniia, 3, 21–24 (in Russian).

doi: 10.32403/1998-6912-2018-2-57-17-25

THE INFLUENCE OF THE SURFACE PLASTIC DEFORMATION (ROLLING FINISHING) ON THE ROUGHNESS OF THE CHROME STEEL SURFACE, WHICH HAS AN EXTERNAL COMPOSITE ZONE

O. V. Manko, Ya. M. Kavyn

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79000, Ukraine
oleksymanko@gmail.com*

In the article, the results of experiments of the process of rolling finishing of medium carbon steel, strengthened by the scheme “chemical coating + diffusion chromium”, have been considered. The physical surface of the steel is a diffusion layer with an outer composite zone consisting of a columnar chromium carbide colony placed in a plastic matrix of a solid chromium solution in α -iron.

The purpose of this work is to study the influence of the surface plastic deformation (SPD) of the coating with the outer composite zone on the roughness parameters of its physical surface.

The preconditions of the surface plastic deformation (PPD) of the diffusion layer have been considered. This diffusion layer represents a system of clearly separated deep zones, each of which has its own characteristics of microhardness and plasticity. It has been shown that surface plastic deformation, in contrast to the cutting process in these conditions, provides higher roughness ($\sim Ra\ 0.64\ \mu m$), which satisfies the conditions for the operation of tribo compounds. In the process of PPD a favorable stress-strain state is created in the zones of discrete contact of the friction pair. The contact load is evenly distributed, which reduces local peak voltages. In addition, the decarburized zone 4 is strengthened through its texturing.

The general ability to surface plastic deformation of the diffusion layer is determined by the presence of an external composite zone with its plastic matrix, as well as internal zones, which are also plastic, especially the degraded zone 4.

It has been established that the average arithmetic profile Ra reaches its minimum at tensiles of 0.10–0.20 mm, or at efforts of 700–900 N: it is reduced by 3–5 times for chrome steel 45 and 9–15 times for chrome steel 30 in relation to the to the initial value of $Ra\ 5$ microns.

The range of tensions of 0,15–0,20 mm during rolling allows the use of SPD in production without adherence to rigid technological processing regimes.

Keywords: *rolling, chemical and thermal treatment, tribological compound, roughness, diffusion layer, diametrical gap, stress concentrators.*

Стаття надійшла до редакції 18.06.2018.

Received 18.06.2018.