

¹М. В. Кіндрачук, д-р техн. наук, проф.,

¹С. В. Федорчук, асист., асп.,

²Є. В. Корбут, канд. техн. наук, доц.

ВПЛИВ ВІДПУСКУ ТА ФРИКЦІЙНОГО НАГРІВУ НА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗМІЦНЕНОЇ ЛАЗЕРОМ СТАЛІ У10

¹Національний авіаційний університет

²Національний технічний університет «КПІ»

Досліджено структурні зміни при відпуску і фрикційному нагріві загартованої лазером сталі У10 та їх вплив на триботехнічні властивості.

Вступ. Термічна стабільність структур, що виникає при процесі лазерного оброблення сталей, має важливе наукове і практичне значення. Зміцнені лазерним обробленням деталей машин та інструменту можуть суттєво нагріватися під час наступних технологічних операцій шліфування, зварювання та інших, а також в умовах експлуатації за підвищених температур і в процесі тертя за рахунок фрикційного нагріву. Дотепер немає єдиної думки щодо теплостійкості сталей після лазерного оброблення. Є експериментальні дані, що свідчать про підвищену стійкість до знеміцнення при відпуску вуглецевих і низьколегованих сталей за лазерного впливу [1–3]. В інших працях [4] не виявлено помітних змін у поведінці при відпуску сталей, підданих лазерному і об'ємному гартуванню. Водночас установлено, що нагрів при відпуску до 200 °С значно знижує зносостійкість загартованої лазерним променем сталі У8.

У цій роботі досліджували вплив режимів відпуску, а також фрикційного нагріву на зносостійкість загартованої лазером вуглецевої заевтектної сталі У10 в умовах тертя ковзанням без мастила. Лазерне оброблення проводили СО₂-лазером за вихідною потужністю 1,0 кВт, діаметром променя 3–5 мм та швидкістю переміщення зразків 0,4–0,7 м/хв. У результаті одноразового проходження променя досягається глибина загартованої зони 0,7–1,0 мм. На поверхні зразків спостерігали окремі зміцнені смуги шириною 5–6 мм з оплавленням і без оплавлення поверхні (рис. 1, а).

Зразки, частина з яких була піддана лазерному, а інша – об'ємному гартуванню за температури 780 °С у підсоленій воді з охолодженням до 200–250 °С з наступним перенесенням у масло, відпустили за температур 50–700 °С (протягом 2 год) у масляній (50–200 °С) ванні з наступним охолодженням на повітрі.

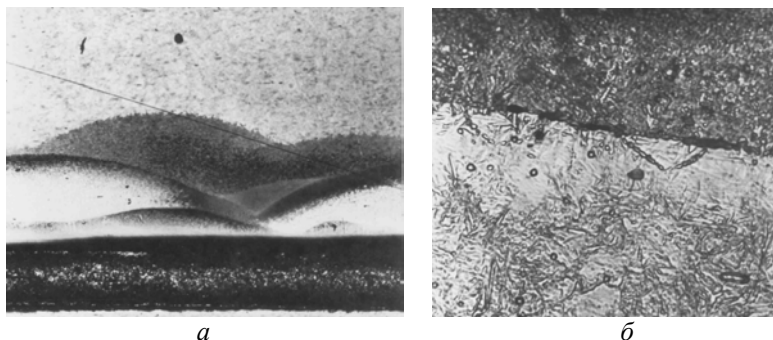


Рис. 1. Мікроструктури сталі У10 після лазерного оброблення:
a – загальний вигляд, $\times 40$; *б* – з наплавленням, $\times 250$

Мікроструктуру сталі вивчали металографічно, мікротвердість визначали на приладі М-400 фірми «Leco corporation» з автоматичним навантаженням. Триботехнічні випробування проводили на машині торцевого тертя за навантаження 1 МПа зі швидкістю ковзання 0,1–2,0 м/с. За контргіло був обраний жаростійкий нікелевий сплав ЖС6К.

Перед триботехнічними випробуваннями робочі поверхні зразків механічно шліфували. При цьому зі зміцнених лазером торцевих поверхонь зразків вилучали шар товщиною близько 0,15 мм, що містив оплавлену зону, і в надалі досліджували тільки шар металу, загартований з твердого стану.

Середню температуру в поверхневих шарах зразка вимірювали за допомогою хромельалюмелевої термопари і фіксували на стрічці самописця протягом усього досліджу. Оскільки під час експерименту деформувалися поверхневі шари на значну глибину, спай термопари діаметром 0,25–0,35 мм закріплювали на відстані 0,4 мм точковим зварюванням. Температурні точки, зображені на графіку, є середніми значеннями декількох вимірювань і відповідають температурам установлених процесів тертя.

У разі оброблення з оплавленням поверхневий шар в сталі У10 характеризується дуже слабким травленням (рис.1, б). Структура складається з дрібногочастого мартенситу і залишкового аустеніту. При цьому вміст залишкового аустеніту досягає 30%. Мікротвердість в оплавленому шарі становить 8–9 ГПа. Структура сталі на межі оплавленої зони і зони гартування з твердого стану являє собою дисперсний мартенсит з невеликою кількістю залишкового аустеніту й цементиту. За лазерного оброблення без оплавлення утворюється менша кількість залишкового аустеніту, тому мікротвердість у загартованому шарі дещо вища і становить 9,5–10,7 ГПа.

У процесі швидкісного охолодження розплаву та оброблення з оплавленням можуть виникати значні термічні напруження, що призведуть до утворення гарячих тріщин у твердорідкому стані та в діапазоні температур, близьких до солідусу. Це підтверджує актуальність дослідження відпуску загартованих лазером виробів для підвищення їх тріщиностійкості, втомної міцності та інших характеристик [5–6].

Залежності зносостійкості та твердості загартованої сталі від температури відпуску показано на рис. 2. Триботехнічні випробування проводили за малої швидкості ковзання (0,1 м/с), щоб виключити вплив фрикційного нагріву на субструктурні процеси, що розвиваються в умовах тертя. Установлено, що максимальною твердістю та зносостійкістю характеризується невідпущена сталь. При цьому значення цих характеристик для випадків лазерного і об'ємного гартування майже однакові. Відпуск за температури 50 °С не призводить до помітної зміни твердості та зносостійкості загартованої сталі У10. Подальше підвищення температури відпуску зумовлює значне зниження її зносостійкості. Найбільш інтенсивне, майже лінійне за характером падіння зносостійкості спостерігається в інтервалі температур відпуску 100–275 °С. Водночас зниження твердості сталі в цьому інтервалі температур відпуску незначне (рис. 2). В інтервалі температур 275–700 °С спостерігається досить суттєве падіння твердості загартованої сталі у разі незначного зниження зносостійкості.

Відповідно до результатів оцінювання отриманих експериментальних даних першопричиною різкого зростання спрацювання загартованої і низьковідпущеної сталі є процеси динамічного старіння (від-

пускання під навантаженням). У процесі динамічного старіння в загартованих сталях відбувається розпад пересиченого твердого розчину (мартенситу) в полі напружень, створеному зовнішнім навантаженням [7]. Підтвердженням цього можуть слугувати дослідження відпуску і впливу тертя на мікротвердість, інтегральну ширину лінії (110) α в мартенситі сталі У10, підданій лазерному об'ємному гартуванню. Установлено (рис. 3), що відпуск за температур понад 50–100 °С призводить до зменшення вмісту вуглецю в мартенситі, що і є основною причиною зниження твердості та ширини лінії за температур відпуску 100–275 °С. Подальше зниження вказаних характеристик за температур відпуску 300–700 °С пов'язано головним чином зі зміною морфології карбідної фази. При цьому характер зміни твердості і ширини лінії мартенситу при відпуску сталі У10, загартованої лазером у сталі з об'ємним гартуванням з печі однаковий.

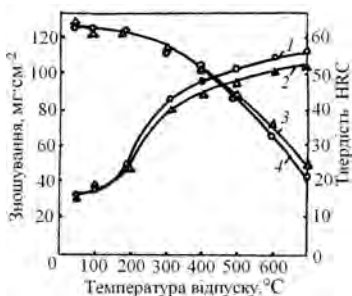


рис. 2. Вплив температури відпуску на зносостійкість і твердість сталі У10, загартованої лазером (2, 3) і з пічного нагріву (1, 4); 1, 2 – приведені спрацювання за 10^3 м; 3, 4 – твердість

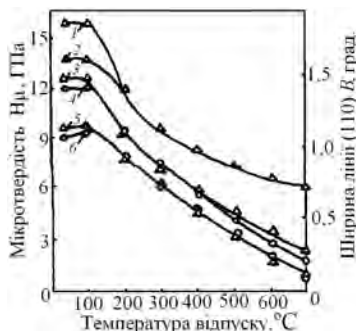


Рис. 3. Вплив температури відпуску на інтегральну ширину B лінії (110) α -фази (1, 2) та мікротвердість (3, 4, 5, 6) сталі У10: 1, 5, 6 – значення величин до випробувань на зношування; 2, 3, 4 – після випробувань на зношування; Δ – лазерне гартування; \circ – гартування з пічного нагріву

Розглянемо вплив тертя на зміну розглянутих характеристик (рис. 3). Виявлено, що в процесі зношування відбувається інтенсивне зміцнення сталі. Причому максимальне підвищення мікротвердості (на 2500–2700 МПа) спостерігається на поверхнях тертя невідпу-

щеної сталі. Відпуск за температур 100–275 °С призводить до зниження здатності мартенситу до деформаційного зміцнення зі збільшенням температури відпуску до 700 °С знижується до рівня 950–1200 МПа. Таким чином, зіставляючи отримані дані (див. рис. 2, 3), можна стверджувати, що найбільш суттєве падіння зносостійкості загартованої сталі У10, яке спостерігається за температур відпуску 100–275 °С, зумовлюється зменшенням вмісту вуглецю в мартенситі, що спричиняє зниження здатності мартенситу до деформаційного зміцнення у процесі зношування. Водночас плавне зниження зносостійкості за більш високих температур відпуску пов'язано з розпадом мартенситу на феритокарбідну суміш та зі зміною дисперсності карбідних частинок, що викликає зменшення вихідної твердості сталі і майже не впливає на здатність її до деформаційного зміцнення у процесі зношування.

Під час дослідження впливу фрикційного нагріву на зносостійкість сталі У10 встановлено (рис.4), що з збільшенням швидкості ковзання середня об'ємна температура в поверхневому шарі зростає. Причому підвищення температури в поверхневому шарі зразка чинить значний вплив на опір сталі зношуванню. За швидкостей ковзання 0,5–1,0 м/с відбувається інтенсивне фрикційне окислення поверхні тертя зразків з утворенням оксидів Fe_2O_3 , Fe_3O_4 (рис.5). За цих умов тертя зміцнена лазером сталь не має переваг щодо зносостійкості перед низьковідпущеною об'ємно загартованою сталлю, оскільки величина спрацювання значною мірою визначається властивостями утворювальних оксидів. Водночас, як було показано раніше (див. рис. 2), за малих швидкостей (0,1 м/с), коли фрикційний нагрів зразків незначний, інтенсивність зношування загартованої лазером сталі набагато нижча, ніж сталі, підданої об'ємному гартуванню і відпуску за температури 200 °С.

Подальше підвищення швидкості ковзання до 1,5–2,0 м/с призводить до збільшення інтенсивності зношування низьковідпущеної сталі внаслідок розвитку процесів теплового захоплення. В даному інтервалі швидкостей зміцнена лазером сталь, як і невідпущена об'ємно загартована сталь, характеризується високою зносостійкістю.

Отримані результати дають змогу відзначити такі особливості впливу відпуску та фрикційного нагріву на триботехнічні властивості сталі У10. У разі малих швидкостей ковзання невідпущена сталь більш зносостійка, ніж низьковідпущена, що мабуть зумовлено більшою твердістю і здатністю до деформаційного зміцнення

високовуглецевого мартенситу. Підвищена зносостійкість невідпущеної сталі в умовах значного фрикційного нагріву мабуть також пов'язана з деформаційним динамічним старінням мартенситу в процесі тертя. Характер впливу відпуску за температур 50–700 °С на триботехнічні властивості сталі У10, загартованої як з лазерного, так із пічного нагріву майже однаковий. Проте найбільш різке падіння зносостійкості спостерігається в інтервалі температур 100–275°С, що пов'язано зі зниженням вихідної твердості та здатності мартенситу до зміцнення в умовах тертя.

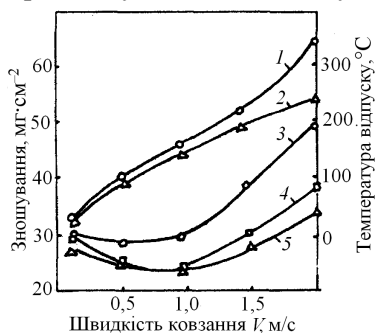


Рис. 4. Вплив швидкості ковзання на зведене спрацювання (3, 4, 5) та температуру в поверхневому шарі (1, 2) сталі У10: Δ – лазерне гартування; \circ – гартування з пічного нагріву + відпуск 200°С; \square – гартування з пічного нагріву

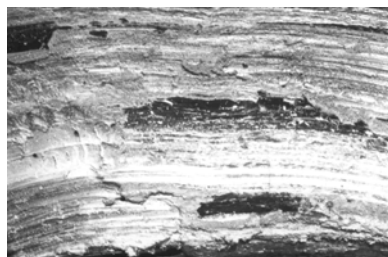


Рис. 5. Поверхня тертя з фрикційним окисненням поверхні

Висновки

Таким чином, отримані результати підтверджують, що пошкодження поверхонь контактної взаємодії в умовах тертя без мастила тісно пов'язані з реологічними властивостями поверхневого шару [8; 9]. За певних температурно-швидкісних умов тертя стан зносостійкості сталі визначатиметься механізмом та кінетикою перебігу процесів релаксації. Якщо сталь унаслідок відпуску, або фрикційного нагріву в процесі тертя отримує стабільну структуру, яка не спроможна перебудуватися та ефективно розсіювати енергію, що підводиться, провідними процесами стають зародження тріщин та схоплювання – ушкоджувальні релаксаційні процеси. Якщо структура сталі (загартована сталь з метастабільною структурою)

за певних умов динамічного навантаження здатна зміцнюватись, тоді пружна енергія деформації розсіюється на сприятливі релаксаційні процеси, що забезпечує високу стійкість проти спрацювання. Отже, є підстави вважати що керувальним режимом низького відпуску і температурними режимами тертя можна в широких межах змінювати триботехнічні характеристики загартованої сталі.

Список літератури

1. *Полухин В.П.* //Поверхность./ В.П.Полухин, М.Л.Бернштейн, А.Н.Веремеевич –1987.–№12. –С. 119–123.
2. *Коваленко В.С.* Упрочнение и легирование деталей машин лучем лазера./ В.С.Коваленко, Л.Ф.Головко, В.С.Черненко –К.: Техніка, 1990.–192 с.
3. *Воронов И.Н.* //Изв. вузов. Чер. металлургия/ И.Н.Воронов, В.С. Великих, В.П. Гончаренко –1981. –№12. –С. 56–58.
4. *Коршунов Л.Г.*// Трение и износ./ Л.Г.Коршунов, А.В.Макаров, А.Л.Осинцева–1988.–Т9.–С.52–59.
5. *Макаров А.В.*// Трение и износ. / А.В.Макаров, Л.Г.Коршунов, А.Л.Осинцева –1991.–Т12.–С.870–878.
6. *Кристал М.А.*. Структура и свойства сплавов, обрабо-таннмх излучением лазера./ М.А.Кристал, А.А.Жуков, А.Н. Кокора –М.: Металлургия, 1973.–192с.
7. *Пастухов Ж.П.* Динамическое старение сплавов./ *Ж.П.Пастухов, А.Г.Рахматд, Ю.А.Каплун* –М.: Металлургия, 1972.–320 с.
8. *Шевеля В.В., Приходчук Г.В., Шевеля И.В. та ін.* //Проблеми тертя та зношування.: зб. наук. праць. –К: КМУЦА, 1998. –С.3–11.
9. *Кіндрачук М.В.* Формування зносостійких евтектичних покриттів концентрованими джерелами енергії./ М.В.Кіндрачук, О.І.Дудка, Ю.Г. Сухенко та ін. –К: ІЗМН, 1997. –119с.

Кіндрачук М. В., Федорчук С. В., Корбут Е. В. **Влияние отпуска и фрикционного нагрева на триботехнічні свойства закаленной лазером стали У10**// Проблемы тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 54. – С.106–112.
Исследованы структурные изменения при отпуске и фрикционном нагреве закаленной лазером стали У10 и их влияние на триботехнические свойства.

Рис.5, список лит.: 9 наим.

The effect of tempering and frictional heating on tribotechnical properties of steel U10 strengthen by laser.

Structural changes upon tempering and frictional heating of steel U10 strengthen by laser and their influence on tribotechnical properties are investigated.