

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КАЛІНІН ЮРІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 669.017:620.178.16:621.791

**ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ ШВИДКОЗНОШУВАНИХ ДЕТАЛЕЙ
ЗНОСОСТІЙКИМИ НАКЛАДКАМИ З ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ
НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ**

05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Запоріжжя - 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **БРИКОВ МИХАЙЛО МИКОЛАЙОВИЧ**, Національний університет «Запорізька політехніка», професор кафедри обладнання і технології зварювального виробництва.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **ДУБОВИЙ ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ**, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, завідувач кафедри матеріалознавства і технології металів.

кандидат технічних наук, доцент **МАРЧЕНКО СТАНІСЛАВ ВІКТОРОВИЧ**, Сумський державний університет, доцент кафедри прикладного матеріалознавства і ТКМ.

Захист відбудеться «13» жовтня 2020 року о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д17.052.01 у Національному університеті «Запорізька політехніка» за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Запорізька політехніка» за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, та на сайті університету у розділі «Наука» – «Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розіслано «11» вересня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



О. А. Мітяєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сучасний стан економіки України потребує ефективного вирішення завдань ремонту промислового обладнання і продовження його терміну експлуатації при мінімальних капіталовкладеннях. Знос деталей є однією з основних причин зупинок обладнання і призводить щонайменше до недоодержання товарної продукції за період ремонтних робіт, а також до додаткових витрат матеріальних ресурсів на придбання змінних частин.

Актуальність роботи.

На теперішній час у розпорядженні фахівців є широкий арсенал засобів підвищення зносостійкості деталей обладнання. Дослідженню зносостійкості матеріалів присвячено велику кількість робіт вітчизняних і зарубіжних дослідників, найбільш відомими серед яких є Е.Д. Браун (Э.Д. Браун), М.М. Бриков (Н.Н. Брыков), М.О. Буше (Н.А. Буше), І.О. Буяновський (И.А. Буяновский), В.Г. Єфременко (В.Г. Ефременко), Л.Г. Коршунов, О.В. Макаров (А.В. Макаров), Л.С. Малинов (Л.С. Малинов), М.К. Мишкін (Н.К. Мышкин), В.С. Попов, В.М. Счастливцев, М.М. Хрущов, А.В. Чичинадзе, R. Bayer, B. Bhushan, K. Hokkirigawa, K. Kato, E. Rabinowicz, G.V. Stachowiak, A.A. Torrance, J.H. Tylczak, K. Zum Gahr. Здебільшого йдеться про використання зносостійких сплавів раціонального складу для виготовлення швидкозношуваних деталей. Але є певні випадки, коли потрібен локальний захист від зношування, тому виготовляти всю деталь із зносостійкого матеріалу недоцільно.

Відомими є способи локального захисту поверхонь тертя швидкозношуваних деталей: наплавленням зносостійких матеріалів або напайкою пластин з твердих сплавів. Ці способи дозволяють значно знижувати знос, але мають досить суттєві обмеження у використанні, а саме: невеликий розмір зносостійких пластин, неможливість їх зварювання, дуже висока вартість матеріалу. У випадку наплавлення питання вартості матеріалів є менш актуальним, проте продовження терміну роботи плоских деталей, що зазнали наскрізного зносу, є неможливим. За умов наскрізного зносу доцільно було б використовувати ремонтні накладки зі зносостійкого матеріалу.

Таким чином, розроблення нового або вдосконалення наявного зносостійкого матеріалу для ремонтних накладок, вдосконалення режимів його обробки на високу зносостійкість та розроблення раціонального засобу з'єднання з деталлю, що ремонтується, є актуальним науково-практичним завданням матеріалознавства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертації є пов'язаною із тематикою науково-дослідних робіт, що виконувались на кафедрі обладнання і технології зварювального виробництва Національного університету «Запорізька політехніка»:

- ДБ 02712 № д.р. 0112U002021 «Дослідження закономірностей зв'язку між зносостійкістю високовуглецевих низьколегованих сталей і їх складом, структурою та іншими властивостями» (2012-2014 р.р.);

- ДБ 02715 № д.р. 0115U004671 «Забезпечення надійності та зносостійкості матеріалів і деталей машин та обладнання, що експлуатуються в екстремальних умовах» (2015-2018 р.р.).

Також тема роботи є пов'язаною із тематикою науково-дослідної роботи «Технологічний розвиток як складова інноваційного розвитку економіки України» № д.р. 0119U100396 (2019 р.), в якій автор прийняв участь як виконавець.

Мета і завдання роботи.

Метою роботи було дослідження структури і властивостей наявного матеріалу високої якості, а саме високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2, вдосконалення режимів її обробки і визначення засобу з'єднання з матеріалами, що підлягають захисту від інтенсивного механічного зношування.

Для досягнення мети роботи необхідно було вирішити такі завдання:

- дослідити поверхню зношування і тонку структуру підповерхневих шарів сталі 120Г3С2, загартовану на залишковий аустеніт та піддану абразивному зношуванню;

- дослідити структурні зміни сталі 120Г3С2 на початкових етапах ізотермічної витримки за температур проміжного розпаду аустеніту;

- визначити науково обґрунтований засіб з'єднання загартованої сталі 120Г3С2 без втрати зносостійкості матеріалу;

- підвищити термін експлуатації швидкозношуваної деталі промислового обладнання зносостійкими накладками з високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2 з метою практичної перевірки рішень перших трьох завдань роботи.

Об'єкт дослідження – процеси структуроутворення в поверхневому шарі і в об'ємі високовуглецевої низьколегованої сталі після різних режимів термічного і механічного впливу.

Предмет дослідження – вплив інтенсивного механічного зношування, ізотермічної витримки та прискореного охолодження під час зварювання на структуру і властивості сталі 120Г3С2.

Методи дослідження – лабораторні випробування на абразивне зношування (відтворення зміцненої поверхні для її подальших досліджень), оптична і сканувальна електронна мікроскопія (дослідження макро- і мікроструктури матеріалу, а також поверхні тертя), вимірювання макро- і мікротвердості матеріалу в об'ємі і на поверхні тертя, механічні випробування зварних зразків, натурні випробування відновлених деталей. Лабораторні випробування на абразивне зношування проводили на установці, що створено в НУ «Запорізька політехніка», і яка впродовж тривалого часу використовується для проведення науково-дослідних робіт.

Натурні випробування відтворювали оригінальні умови експлуатації відновленої деталі. Всі інші використані методи досліджень і відповідне обладнання є стандартизованими і атестованими. Таким чином, забезпечено достовірність отриманих результатів та висновків.

Наукова новизна.

1. Дістало подальший розвиток уявлення про мікроструктуру високовуглецевого нестабільного аустеніту, який зазнає деформаційного мартенситного перетворення в процесі абразивного зношування у безпосередній близькості від поверхні тертя. Вперше встановлено, що навіть після гранично можливого ступеня наклепу аустеніт здатен повністю перетворюватися на мартенсит.

2. Уточнено кінетику бейнітного перетворення високовуглецевого нестабільного аустеніту на початкових стадіях. Вперше встановлено, що в сталі із вмістом 1,2 %C, 2,6 %Mn і 1,5 %Si бейнітне перетворення при температурі 250 °C починається раніше, ніж через одну годину ізотермічної витримки.

3. Вперше встановлено, що під час зварювання високовуглецевих низьколегованих сталей необхідно забезпечувати не уповільнене, а прискорене охолодження. Показано, що охолодження зварюваних елементів зі сталі 120Г3С2 у воді під час зварювання забезпечує утворення аустенітного прошарку впритул до границі сплавлення, який запобігає появі тріщин в зоні термічного впливу.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечується коректним застосуванням сучасних методів досліджень; узгодженістю отриманих експериментальних результатів і наукових положень з загальноприйнятими матеріалознавчими уявленнями про структуру високовуглецевих низьколегованих сталей; дослідно-промисловою перевіркою результатів, що отримано у роботі.

Практична значущість отриманих результатів.

1. Встановлено, що зварювання з прискореним охолодженням дозволяє отримувати зварні з'єднання, які є міцнішими за основний матеріал ремонтних накладок із загартованої сталі 120Г3С2.

2. Сформульовано рекомендації щодо раціональної послідовності операцій з виготовлення ремонтних накладок зі сталі 120Г3С2, зварювання, а також післязварювальної обробки в залежності від умов експлуатації деталей.

3. За результатами роботи розроблено і впроваджено на ПрАТ «Запоріжтрансформатор» технологію ремонту зношених броней лінії дробометного очищення листового та профільного прокату з очікуваним річним економічним ефектом 151 173,34 грн.

Особистий внесок здобувача.

Усі викладені в дисертації результати дослідження структури і властивостей зразків отримано автором особисто. Усі нові наукові положення також сформульовано ним особисто із консультаціями з боку

наукового керівника. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

- огляд перспективних напрямів забезпечення якісного зварювання зносостійких сталей [1];
- дослідження макро- і мікроструктури зон термічного впливу після зварювання високовуглецевої низьколегованої сталі з прискореним охолодженням [2, 3, 7, 11];
- дослідження мікроструктури високовуглецевої низьколегованої сталі після ізотермічної обробки [6, 12];
- обґрунтування режиму післязварювальної обробки високовуглецевої низьколегованої сталі [9];
- дослідження поверхні тертя високовуглецевої низьколегованої сталі після абразивного зношування [4];
- дослідження механічних властивостей зварених зразків [5, 10];
- аналіз впливу прискореного охолодження під час зварювання на зносостійкість зони термічного впливу високовуглецевої низьколегованої сталі [8].

В усіх працях автор брав участь в обробці, аналізі, узагальненні результатів експериментів, роботі над публікаціями.

Апробація результатів роботи.

За результатами роботи зроблено доповіді на міжнародних науково-технічних конференціях «Актуальні проблеми сучасної науки» (Харків-Відень-Берлін-Астана, 30 січня 2019 р.), «Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2019)» (Суми, 16-19 квітня 2019 р.), «Актуальні наукові дослідження в сучасному світі» (Переяслав-Хмельницький, 26-27 червня 2019 р.), «Проблеми зварювання та споріднених технологій» (Миколаїв-Коблеве, 17-19 вересня 2019 р.), «Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати» (Харків, 26-27 вересня 2019 р.), «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (Запоріжжя, 08-10 жовтня 2019 р.)

Публікації.

За темою дисертації опубліковано 12 робіт, у тому числі 1 статтю у міжнародному науковому журналі, який входить до наукометричних баз **Scopus** та **Web of Science**, 5 статей у фахових наукових журналах України, 6 тез конференцій.

Обсяг роботи. Дисертація складається з анотацій, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг становить 150 сторінок, у тому числі 130 сторінок основного тексту, 3 таблиці, 62 рисунки, список використаних джерел із 136 найменувань на 15 сторінках та 2 додатки на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено обґрунтування актуальності теми, викладено мету, завдання роботи і застосовані методи досліджень, сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі виконано аналітичний огляд досліджень зносостійкості сталей та чавунів за різних умов інтенсивного механічного зношування та визначено мету та завдання роботи. Визначено, що на теперішній час досягнуто значних успіхів в галузі матеріалознавства зносостійких матеріалів завдяки роботам таких дослідників як Е.Д. Браун (Э.Д. Браун), М.М. Бриков (Н.Н. Брыков), М.О. Буше (Н.А. Буше), І.О. Буяновський (И.А. Буяновский), В.Г. Єфременко (В.Г. Ефременко), Л.Г. Коршунов, О.В. Макаров (А.В. Макаров), Л.С. Малінов (Л.С. Малинов), М.К. Мишкін (Н.К. Мышкин), В.С. Попов, В.М. Счастливцев, М.М. Хрущов, А.В. Чичинадзе, R. Bayer, B. Bhushan, K. Hokkirigawa, K. Kato, E. Rabinowicz, G.V. Stachowiak, A.A. Torrance, J.H. Tylczak, K. Zum Gahr та ін. Механізм руйнування поверхневих шарів сталей та чавунів має втомну природу. Будь-яка ділянка на поверхні руйнується виключно під дією циклічних навантажень. У випадку абразивного зношування матеріал навантажується абразивними частинками, які контактують з поверхнею у дискретних точках. Точкове контактування обумовлює великі контактні напруження, що діють на матеріал. В залежності від співвідношення контактних напружень і межі плинності матеріалу інтенсивність зношування поверхні тертя може відрізнятися на декілька порядків. Якщо контактні напруження перевищують межу плинності, відбувається пластична деформація матеріалу поверхні (дряпання) і матеріал руйнується в режимі малоциклової втоми. Якщо контактні навантаження є меншими за межу текучості, але вищими за межу витривалості матеріалу, руйнування відбувається за режимом багатоциклової втоми.

Нестабільний залишковий аустеніт з великим вмістом вуглецю (більше 1% мас.) здатний до деформаційного мартенситного перетворення. Тому в умовах малоциклового зношування поверхневий шар матеріалу перетворюється в мартенсит деформації, який є більш зносостійким, ніж мартенсит гартування. Якщо зношування відбувається в багатоцикловому режимі, контактні напруження є недостатніми для пластичної деформації, деформаційне мартенситне перетворення нестабільного аустеніту не відбувається і він є менш зносостійким, ніж мартенсит гартування. На теперішній час існує гіпотеза утворення коміркової субструктури матеріалу, який утворюється в результаті фазового перетворення нестабільного аустеніту під час абразивного зношування, але ця гіпотеза потребує додаткового експериментального підтвердження. Це завдання є актуальним для матеріалознавства, виключно науковим і першим в роботі.

Платою за велику зносостійкість нестабільного залишкового високовуглецевого аустеніту є його низький опір розповсюдженню тріщин.

Ізотермічна витримка аустеніту при 200...300 °С приводить до значного підвищення опірності розповсюдженню тріщин за рахунок стабілізації аустеніту і утворення голчастоподібного бейнітного фериту. Недоліком такої обробки є дуже великий час витримки. На сьогодні актуальними є дослідження перетворення аустеніту на початкових етапах ізотермічної витримки з метою визначення мінімально достатнього часу перетворення з точки зору експлуатаційної придатності матеріалу. Це завдання є науково-практичним завданням матеріалознавства.

Існує актуальне науково-практичне завдання зварюваності загартованих зносостійких високовуглецевих низьколегованих сталей. Необхідно визначити науково обґрунтований засіб їх зварювання без втрати зносостійкості матеріалу як в навколошовній зоні, так і поза її межами.

Кінцевим завданням роботи є підвищення терміну експлуатації швидкозношуваних деталей промислового обладнання зносостійкими накладками з високовуглецевої низьколегованої сталі з метою практичної перевірки рішень попередніх завдань роботи.

У другому розділі наведено методику виконання досліджень. Експериментальну частину роботи проведено з використанням сталі 120Г3С2 дослідно-промислового виготовлення. Сталь було виплавлено в вакуумній печі. Хімічний склад, % мас.: С - 1,21; Mn - 2,56; Si - 1,59; Cr – 0,25; Ni – 0,1; P – 0,01; S – 0,01. Сталь було поставлено у вигляді кованих смуг завтовшки 5 мм розмірами 60x300 мм.

Для досліджень структури поверхні тертя з полоси вирізували зразки розмірами 30x90 мм і гартували з нагріванням у печі опору в повітряній атмосфері і охолодженням у воді кімнатної температури. Для усунення знеуглецеваного шару загартовані зразки шліфували з однієї сторони на глибину 1,0...1,2 мм. Далі зразки зношували стовпом стиснутого карбїду кремнію на лабораторній установці. Тиск пуансону на стовп абразиву складав 5 МПа. Розмір зерен абразиву 0,8...1,0 мм.

Після зношування зі зразка за допомогою анодно-дротової різки вирізували менший зразок розміром приблизно 5 x 20 мм для дослідження мікроструктури матеріалу поверхні тертя і підповерхневих ділянок матеріалу. Мікроструктуру матеріалу і поверхню тертя досліджували за допомогою скануючих електронних мікроскопів JEOL JSM-7000F, SUPRA та TESCAN, а також оптичного мікроскопу OLYMPUS GX71.

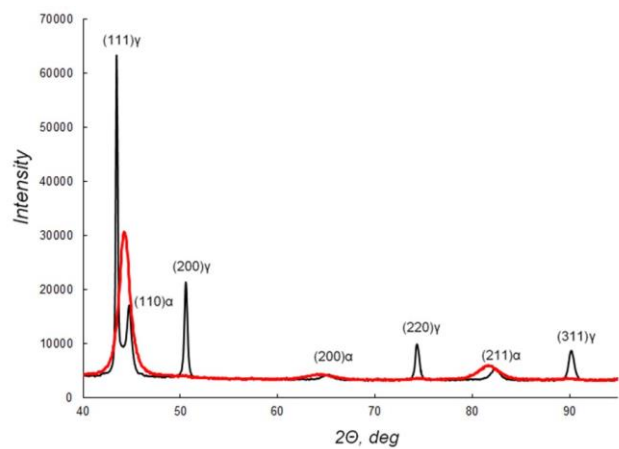
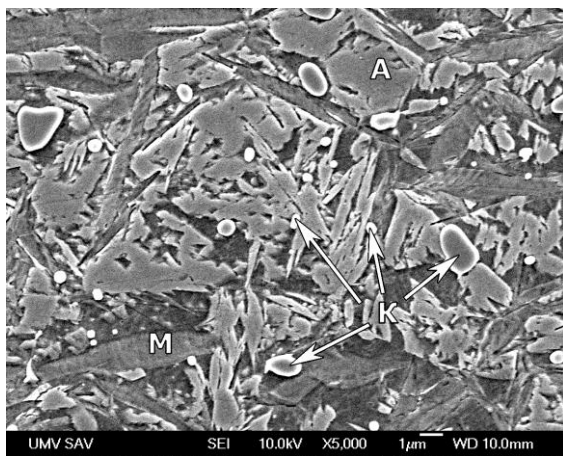
Твердість і мікротвердість зразків визначали за допомогою твердоміру Вікерсу Wilson® Hardness з комп'ютерним керуванням. Твердомір дозволяє змінювати навантаження на індентор в межах 25 – 2000 г.

Рентгеноструктурний фазовий аналіз виконано за допомогою дифрактометра Bruker D8 Discover в CuK α випромінюванні.

Дослідження структури зварних з'єднань проводили на зразках, які було вирізано із експериментальних зварних зразків після випробування на розтяг. Різку, підготовку і дослідження зразків проводили за методиками, аналогічними до викладених вище для зразків після абразивного зношування.

Статистичну обробку результатів вимірювань виконували за допомогою комп'ютерних програмних засобів, в яких реалізовано загальнозживані методи математичної статистики. Під час розрахунку довірчих інтервалів вимірюваних величин рівні значущості склали 0,05 і 0,1.

Третій розділ присвячено дослідженню приповерхневої зони сталі 120Г3С2 після абразивного зношування. Зразки гартували від температури 900 °С. Після гартування в структурі (рис. 1) містяться нерозчинені карбіди, залишковий аустеніт, мартенсит. Дифрактограма (рис. 2 чорна лінія) відповідає вказаній структурі. Відносна інтенсивність піку (110) α у порівнянні із (111) γ дозволяє оцінити кількість мартенситу на рівні 30%. Це свідчить, що залишковий аустеніт є дуже нестабільним і чутливим до фазових перетворень під дією абразивних частинок.



А – аустеніт; М – мартенсит;
К – карбіди.

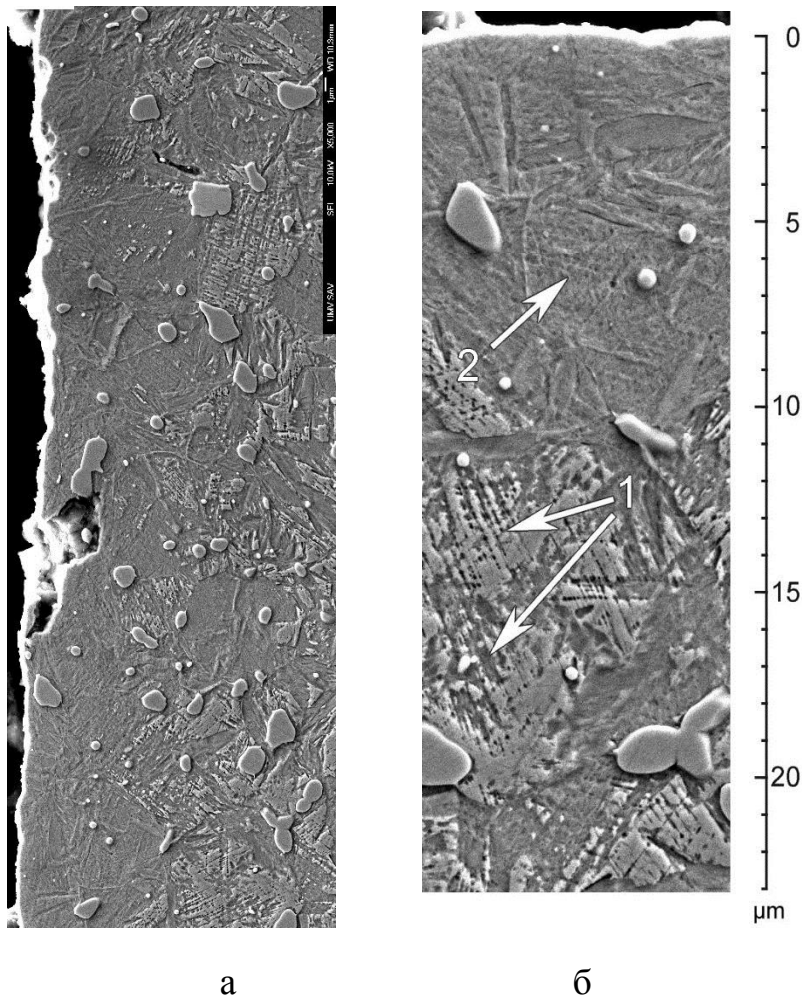
Рисунок 1 – Мікроструктура сталі 120Г3С2 після гартування від 900 °С.

Рисунок 2 – Дифрактограми сталі 120Г3С2 після гартування (чорна лінія) і подальшого абразивного зношування (червона лінія)

Нестабільність аустеніту призводить до фазового перетворення на поверхні тертя під час абразивного зношування (рис. 3). Це підтверджується співставленням дифрактограм матеріалу у вихідному стані і матеріалу зношеної поверхні (див. рис. 2). На дифрактограмі для зношеної поверхні (червона лінія) γ -піки відсутні, отже суцільним шаром глибиною до 10 μm (див. рис. 3) має бути мартенсит деформації. Зважаючи на уширення α -піків мартенситу деформації, що утворився на поверхні тертя, є більш здеформованим, ніж мартенсит гартування. Також спостерігається зсув максимумів α -піків до менших значень кутів, що свідчить про збільшення відстані між атомними площинами.

Утворенню суцільного поверхневого шару мартенситу деформації передують значна пластична деформація аустеніту, сліди якої присутні на певній глибині під шаром мартенситу як перехрещені смуги ковзання (див. 1 на рис. 3, б), які у місцях перетину декоровано підвищеним травленням

мікрошліфу. В цьому місці можна спостерігати появу більш темних ділянок матеріалу серед перехрещених смуг ковзання. Це є мартенситом деформації, що починає виникати у гранично деформованому аустеніті. Ближче до поверхні мартенситне перетворення повністю завершується, при цьому нагартований стан аустеніту успадковується мартенситом. По це свідчить специфічна фактура мартенситу деформації 2 (див. рис. 3, б), яка є подібною до перехрещених смуг ковзання 1.



а – панорама; б – фрагмент панорами (збільшене зображення): 1 - місця сильної пластичної деформації аустеніту і початку мартенситного перетворення; 2 – мартенсит деформації, що успадкував деформовану субструктуру аустеніту.

Рисунок 3 – Мікроструктура підповерхневої зони загартованої сталі 120Г3С2 після абразивного зношування, х5000.

В роботах попередніх дослідників висунуто і обґрунтовано гіпотезу коміркової субструктури поверхні тертя нестабільного аустеніту, який зазнає фазового перетворення в процесі абразивного зношування. Основна ідея – наклеп аустеніту до гранично можливого стану з подальшим блокуванням

мартенситом деформації наклепаних мікрооб'ємів аустеніту. Модель коміркової субструктури пояснювала велику мікротвердість поверхні тертя (до 12,5 ГПа), яку, у свою чергу, можна було використати для розрахунку щільності дислокацій в аустеніті у комірках – до 10^{14} см⁻². Результати, які отримано в нашій роботі, дозволяють підвередити гіпотезу коміркової субструктури поверхневого шару і, навіть, доповнити її. Коміркову субструктуру можна спостерігати на ділянках 1 і 2 (див. рис. 3, б). Новим є те, що, вочевидь, коміркова субструктура на ділянці 2 є повністю мартенситною. Повне перетворення аустеніту може бути пов'язаним з високим тиском абразиву на поверхню тертя.

Оскільки на поверхні тертя структура складається повністю з мартенситу деформації, є підстави очікувати достатньо велику мікротвердість. На рис. 4 наведено результат вимірювання мікротвердості зношеної поверхні. Профіль відносної частоти значень мікротвердості має

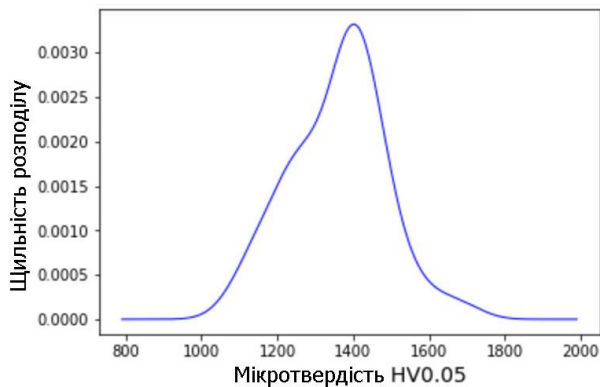


Рисунок – 4 Результат вимірювання мікро-твердості поверхні тертя після абразивного зношування.

максимум біля 1400 HV 0.05. Це значно перевищує мікротвердість високовуглецевого мартенситу гартування (зазвичай 900...1000 HV).

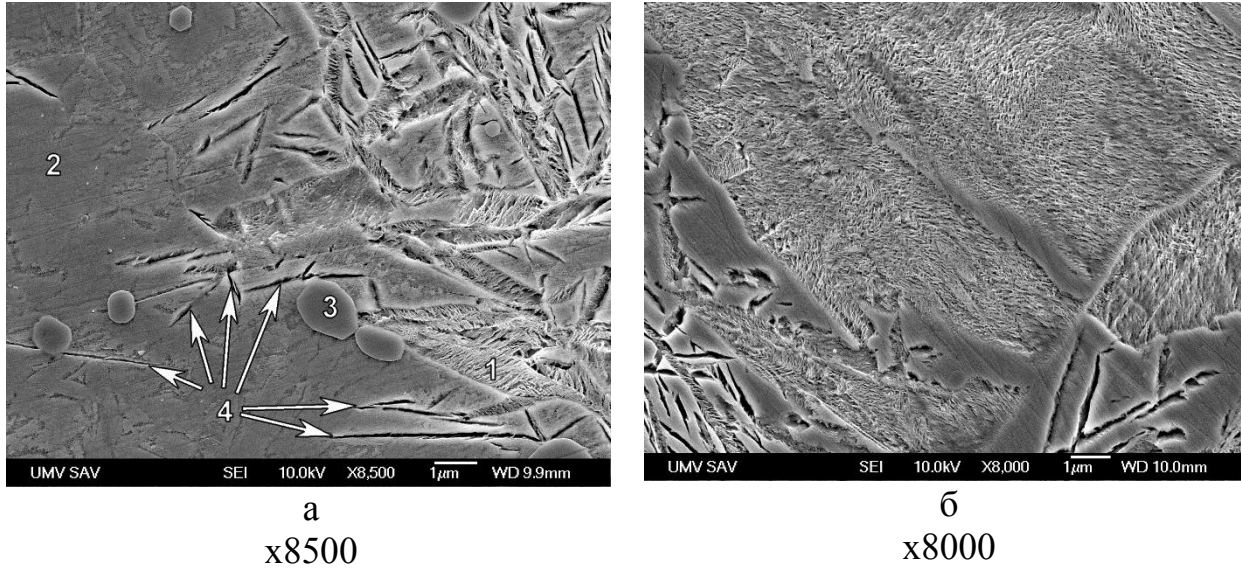
Отже, при абразивному зношуванні високовуглецевої низьколегованої сталі, яку загартовано на залишковий аустеніт, можливо утворення суцільного шару мартенситу деформації. Коміркова субструктура такого мартенситу додатково ускладнює руйнування зміцненої поверхні абразивними

зернами.

Для дослідження впливу ізотермічної витримки на структуру сталі 120Г3С2 загартовані від 900 °С у воді зразки витримували при температурі 250 °С протягом 1, 2, 3, 6 и 12 годин. Після витримки досліджували мікроструктуру зразків (рис. 5), а також проводили вимірювання твердості (рис. 6).

Встановлено, що бейнітне перетворення починається менше, ніж через годину після початку ізотермічної витримки загартованої від 900 °С сталі, оскільки вже через 1 годину витримки в структурі спостерігаються множинні виділення бейнітного фериту голчастої морфології, які розташовано біля відпущеного мартенситу (див. рис. 5, а). Поряд з бейнітним феритом голчастої морфології під час ізотермічної витримки формуються ділянки значно більш дисперсного бейніту з міжпластинчастою відстанню менше 100 нм (див. рис. 5, б). Твердість сталі під час ізотермічної витримки

змінюється по кривій з мінімумом, який відповідає витримці 1 година. В цей час процеси відпуску мартенситу вже завершено, а бейнітне перетворення, що почалося, входить до стадії прискореного розвитку.



а – 1 година; б – 12 годин (б); 1 – відпущений мартенсит, 2 – аустеніт, 3 – карбід, 4 – бійнітний ферит.

Рисунок 5 – Мікроструктура сталі 120Г3С2 після гартування від 900 °С і подальшої ізотермічної витримки при 250 °С впродовж різного часу.

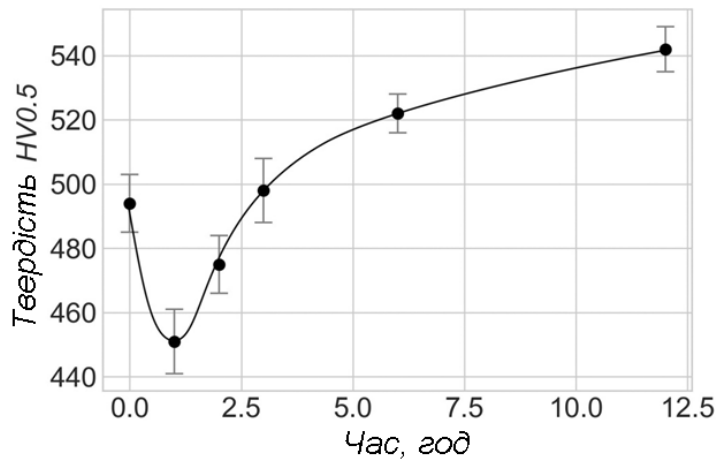


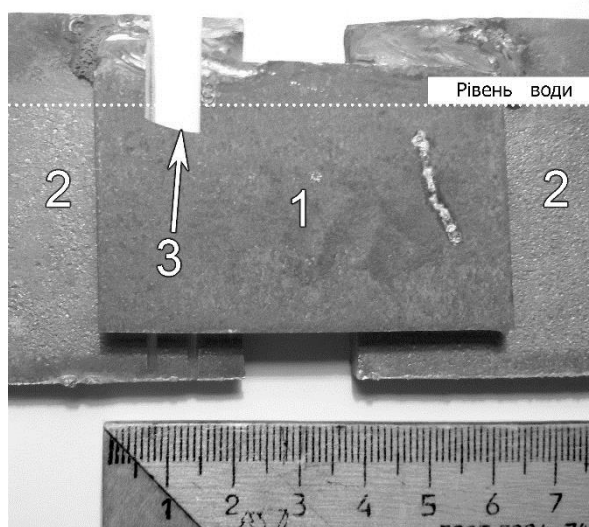
Рисунок 6 – Зміна твердості сталі 120Г3С2 після гартування від 900 °С та ізотермічної витримки при 250 °С у досліджених інтервалах часу.

У четвертому розділі розроблено засіб з'єднання загартованої сталі 120Г3С2 з низьколегованою конструкційною сталлю (дослідження проведено з використанням сталі 09Г2С). Обраним засобом з'єднання є зварювання з прискореним охолодженням зварюваних елементів у воді. Під час

зварювання зварювані елементи – загартована пластина зі сталі 120Г3С2 та пластина зі сталі 09Г2С – стискаються в струбціні і занурюються у воду таким чином, що на повітрі знаходяться тільки зварювані крайки. Необхідність застосування прискореного охолодження у воді під час зварювання сталі 120Г3С2 в роботі ретельно обґрунтовано.

Зварюваний елемент зі сталі 120Г3С2 попередньо загартовано від 800 °С, без відпуску. Твердість загартованого зразка 800...850 НV0.5.

На рис. 7 показано загартований елемент сталі 120Г3С2 (1) після зварювання двома кутовими швами із елементами сталі 09Г2С (2). Зварювання проводили на змінному струмі електродами RIK99 (99% Ni, 1% С) діаметром 3 мм на режимі: $I_{св} = 190$ А; $U_{св} = 25$ В. Зварювані елементи були затиснуті струбциною і занурені в воду до рівня пунктирної лінії. Місце вирізки зразка для дослідження структури зони термічного впливу (ЗТВ) (3) показано стрілкою.



1 – 120Г3С2; 2 – 09Г2С; 3 – місце відбору зразка для дослідження структури ЗТВ.

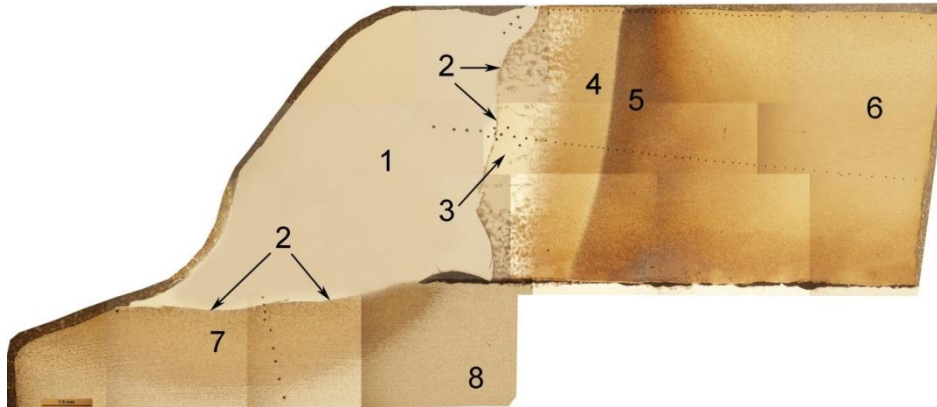
Рисунок 7 – Зварне з'єднання загартованої сталі 120Г3С2 і сталі 09Г2С.

На рис. 8 показано панораму зварного з'єднання сталі 120Г3С2 і 09Г2С. Метал шва 1 відокремлений від незміненої структури сталі 120Г3С2 6 границею сплавлення 2, зонами гартування на аустеніт 3 і мартенсит 4, а також зоною відпуску вихідної загартованої структури 5.

Рис. 9. ілюструє зміну твердості від шва до основного металу через границю сплавлення і ЗТВ. Залежність 2 на рис. 9 відповідає вимірюванню твердості в середній частині елемента зі сталі 120Г3С2 (див. рис. 8, ланцюжок відбитків в середній частині 120Г3С2).

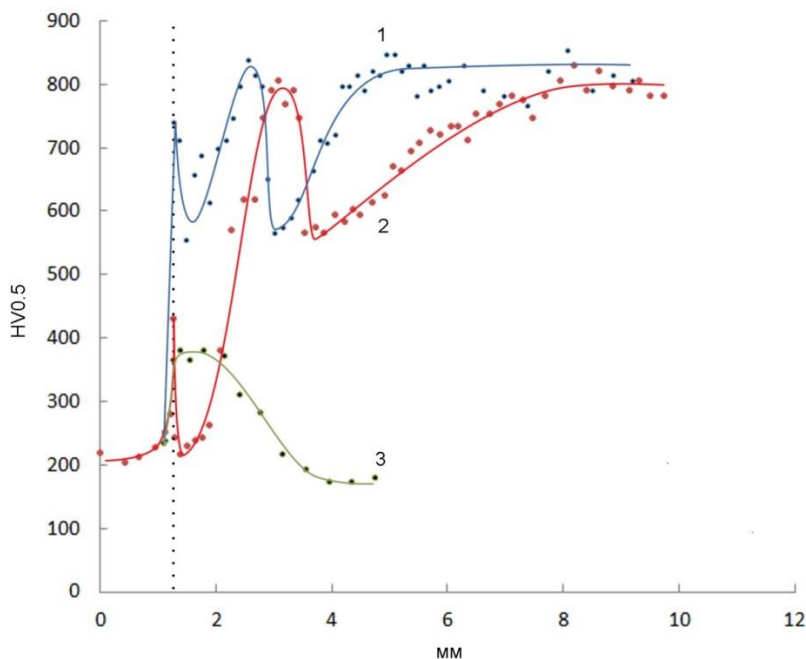
Ширина аустенітної (200...300 НV0.5) і мартенситної (700...800 НV0.5) зон однакова і становить близько 0,7 мм (рис. 9, залежність 2). Ці зони розділені областю аустеніто-мартенсито-карбідної структури змінної твердості, яка відповідає гартуванню з двофазної області з різним перегрівом

вище A_{C1} . За зоною мартенситу твердість різко знижується до 550 HV0.5, що відповідає високому відпуску вихідного загартованого матеріалу. Зі збільшенням відстані від шва твердість монотонно зростає, і на відстані близько 7 мм досягає рівня вихідного матеріалу.



1 – метал шва; 2 – границя сплавлення; 3-6 – 120Г3С2: 3 – зона повторного гартування на аустеніт; 4 – зона повторного гартування на мартенсит; 5 – зона відпуску; 6 – зона немодифікованої структури загартованої сталі; 7 – зона термічного впливу в сталі 09Г2С; 8 – зона немодифікованої структури сталі 09Г2С.

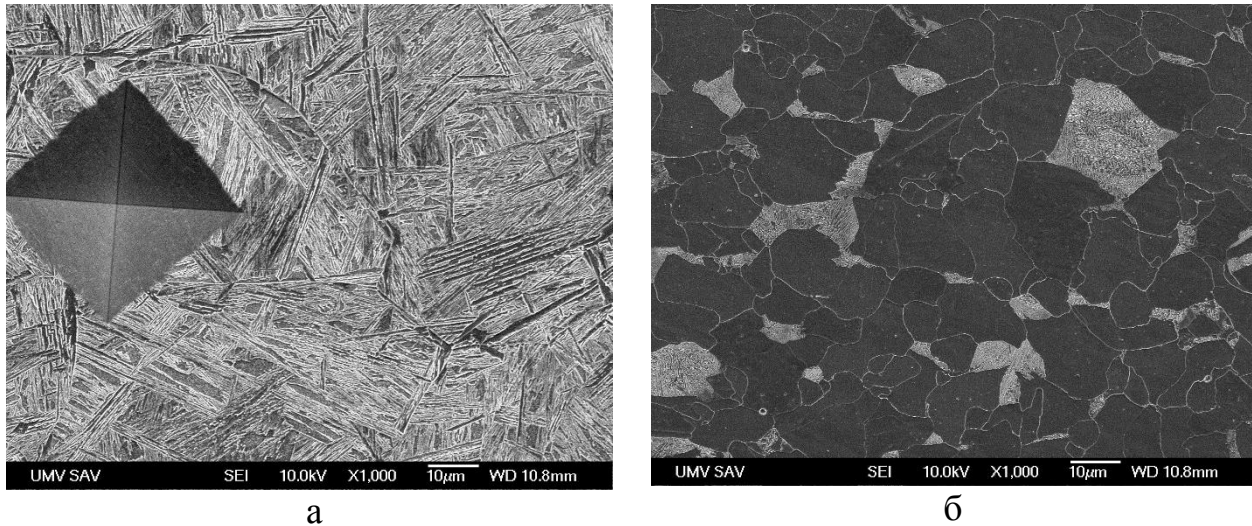
Рисунок 8 – Панорама зварного з'єднання сталі 120Г3С2 та 09Г2С, x50.



1 – верхній край 120Г3С2; 2 – середня частина 120Г3С2; 3 - 09Г2С.

Рисунок 9 – Твердість ЗТВ.

Структура сталі 09Г2С в зоні термічного впливу має характерну голчасту будову (рис. 10, а). Відповідно до залежності 3 на рис. 9 глибина ЗТВ з боку сталі 09Г2С становить приблизно 3 мм.



а – ЗТВ (7 на рис. 8); б – вихідний матеріал (8 на рис. 8)
Рисунок 10 – Мікроструктура сталі 09Г2С, x1000.

Необхідно відзначити відсутність мікротріщин на границі сплавлення і в структурі ЗТВ як з боку сталі 09Г2С, так і сталі 120Г3С2. У зв'язку з цим високою є ймовірність отримання якісних зварних з'єднань реальних деталей із загартованої сталі 120Г3С2 і сталі 09Г2С при зварюванні з охолодженням у воді.

У п'ятому розділі проведено дослідження експлуатаційних властивостей зварних з'єднань високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2, які виконано з прискореним охолодженням. Якість з'єднань оцінювали при випробуваннях на розтяг комбінованих технологічних проб (рис. 11). Загартовану пластину (1) зі сталі 120Г3С2 товщиною 5 мм приварено чотирма кутковими швами (стрілки) до двох пластин (2) зі сталі 09Г2С. Зварювання виконували по черзі з кожного боку, занурюючи затиснуті в струбцину пластини в воду до рівня, визначеного пунктиром.

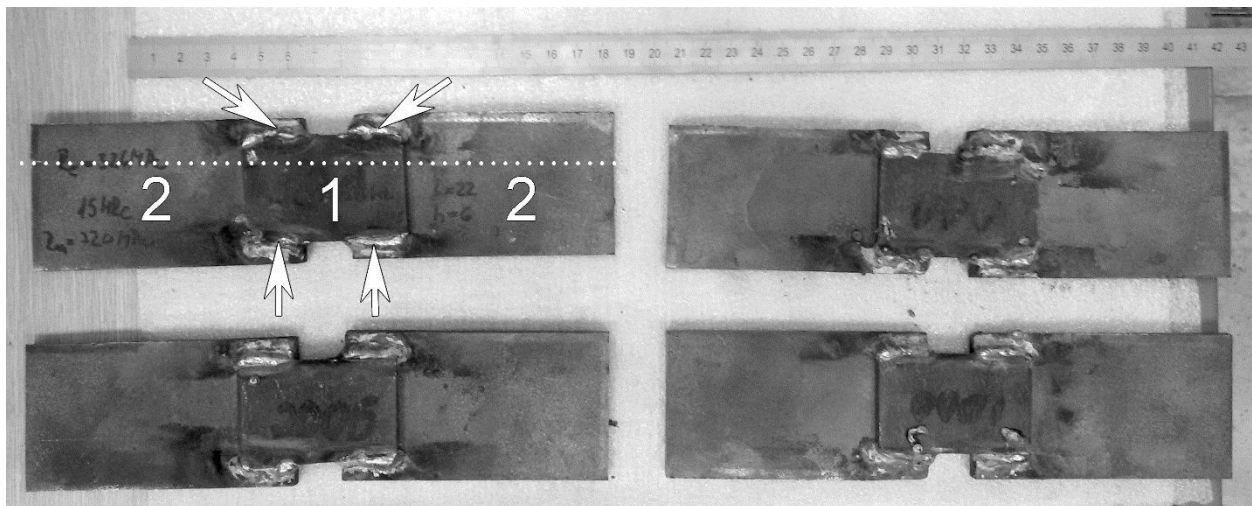


Рисунок 11 – Зварені технологічні проби.

Термічна обробка пластин зі сталі 120Г3С2: гартування від 1000 °С (2 шт), гартування від 900 °С (2 шт). Оскільки пластини знеуглецевано на глибину близько 1 мм, після гартування структура матеріалу по глибині 1,0...1,5 мм змінюється від мартенситної на самій поверхні до аустенітної (гартування від 1000 °С) або аустеніто-мартенситної (гартування від 900 °С). Далі структура по глибині не змінюється.

В результаті випробувань руйнування всіх проб відбулося по пластинам зі сталі 120Г3С2 (рис. 12). Максимальне навантаження до руйнування для кожної проби наведено в табл. 1.

Звертають увагу відносно низькі значення руйнівних навантажень для всіх проб (див. табл. 1). Площа поперечного перерізу пластин зі сталі 120Г3С2 становить приблизно 200...220 мм². Отже, при максимальному руйнівному навантаженні 18690 Н (зразок №4, стрілка на рис. 12) номінальне напруження в перетині в момент руйнування склало близько 90 МПа. Для решти зразків ця величина виявляється ще менше. Таке значення межі міцності, на перший погляд, виявляється незвичайно низьким навіть для загартованих невідпущених високоуглецевих сталей. Однак в даному випадку має значення дуже велика неоднорідність структури по перетину зразка.

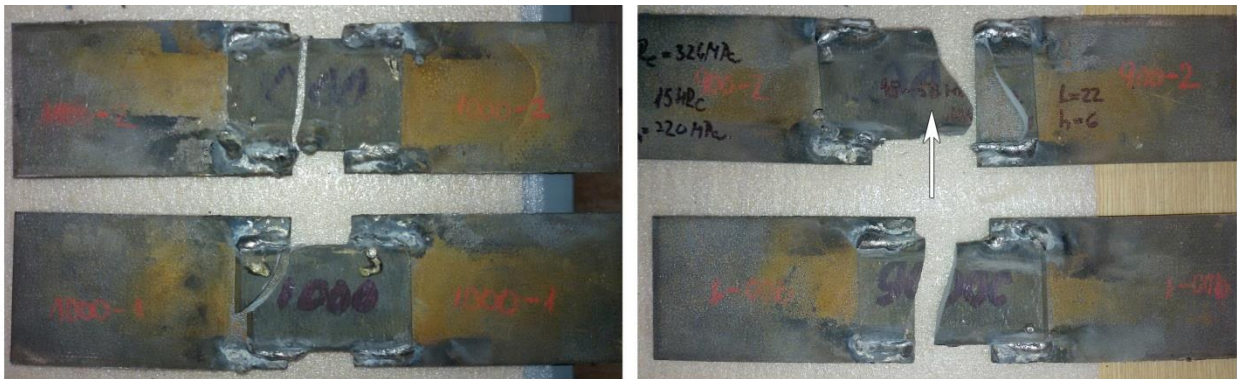


Рисунок 12 – Зруйновані технологічні проби.

Таблиця 1 – Результати випробувань технологічних проб на розтяг.

№	Маркування	Сила в момент руйнування, кН
1	1000-1	12,369
2	1000-2	16,825
3	900-1	9,488
4	900-2	18,690

У зв'язку із знеуглецюванням структура сталі 120Г3С2 на самій поверхні після гартування практично повністю мартенситна. Цей шар має практично нульову пластичність в порівнянні з більш глибоко розташованими шарами зі значною кількістю аустеніту. Тому при

навантаженні, ймовірно, відбувається деяка пластична деформація внутрішніх шарів зразка за винятком поверхневого, який руйнується крихко. Після руйнування тонкого поверхневого шару в зразку з'являється тріщина, на фронті якої виникає концентрація напружень і локальна область пластичної деформації. Якби в глибині зразка знаходився стабільний аустеніт, то тріщина могла бути зупиненою. Однак в даному випадку аустеніт нестабільний, на фронті тріщини постійно утворюється крихкий мартенсит, і вона поширюється по перетину майже без опору.

У зв'язку з тим, що жоден зі зварних швів не було зруйновано під час випробувань, результати яких наведено вище, залишається без відповіді питання про міцність саме зварних з'єднань високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2, які отримано зварюванням з прискореним охолодженням у воді. Отже проведено серію випробувань зварних зразків, форма яких відповідає ДСТУ ISO 4136:2014.

Одна зі зварюваних половинок зразка була зі сталі 09Г2С, інша - зі сталі 120Г3С2. Перед зварюванням половинки зразків затискали у струбціні і занурювали у воду стороною сталі 120Г3С2 (рис. 13), причому зварювані стики залишалися на повітрі. Відстань від стиків до рівня води складала 10...20 мм.



Рисунок 13 – Стандартизовані зразки, які зібрано під зварювання. Мідну підкладку 1 під час зварювання видалено.

В результаті випробувань встановлено, що руйнування всіх зварних зразків відбулося по ЗТВ зі сторони сталі 120Г3С2. В результаті статистичної обробки результатів випробувань визначено значення межі міцності зварного з'єднання сталі 120Г3С2 зі сталлю 09Г2С2 після зварювання з прискореним охолодженням у воді: 209 ± 27 МПа (рівень значущості 0,1). Ця величина є принаймні вдвічі вищою, ніж міцність основного матеріалу термообробленої зносостійкої накладки зі сталі 120Г3С2.

Натурні випробування ремонтних зносостійких накладок із загартованої сталі 120Г3С2 проведено на відновлених бронях лінії дробометного очищення листового та профільного прокату 0134.00.000 ТОВ «Техвагонмаш», яка експлуатується на ПАТ «Запоріжтрансформатор».

Броні є сталевими пластинами габаритами 500 x 200 мм товщиною в робочому перерізі 20...30 мм. На підприємстві використовують як покупні броні із високовуглецевої аустенітної сталі 110Г13, так і броні зі маломагнітної аустенітної сталі 45Г17Ю3, яку використовують для певних деталей трансформаторів. Броні експлуатуються до появи наскрізних отворів. Зовнішній вигляд зношених броней зі сталі 45Г17Ю3 наведено на рис. 14.

Для відновлення броней використовували пластини зі сталі 120Г3С2 аналогічні до тих, що використовували для визначення механічних властивостей зварних зразків. Пластини загартовано від 1000 °С для гарантованого забезпечення максимальної пластичності серцевини. Одну з пластин піддано ізотермічній обробці при 250 °С впродовж 7 годин. Пластини приварено до зношених броней таким чином, щоб наскрізні отвори було повністю перекрито. Зварювання виконували з прискореним охолодженням у воді не суцільним швом, а прихватками довжиною 20...30 мм. Зовнішній вигляд відремонтованих броней наведено на рис. 15.



Рисунок 14 – Зношені броні зі сталі 45Г17Ю3.



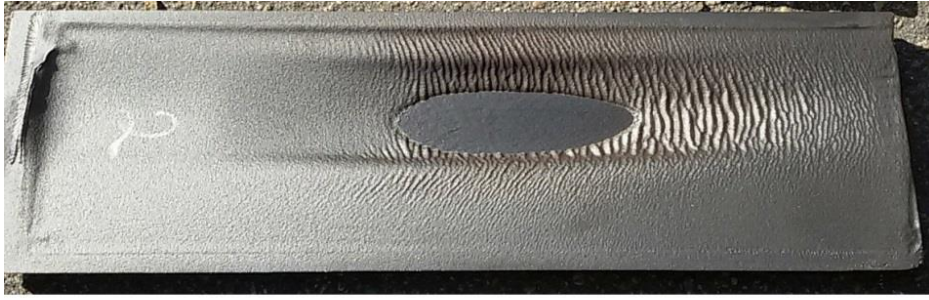
а – гартування + ізотермічна витримка; б – гартування.
Рисунок 5 – Відремонтовані броні.

Відновлені броні експлуатувалися на дробометі з початку жовтня 2019 р. Проведено два контрольні огляди броней, які відбулися 20.10.2019 і 01.11.2019. Під час огляду не виявлено руйнування зварних з'єднань, а також візуально не виявлено будь-якого зносу робочих поверхонь пластин. В той же час оригінальний матеріал броней зазнав дуже значного зносу. Під час другого контрольного огляду встановлено, що отвір однієї з броней розширився настільки, що став більше, ніж габарити захисної пластини (рис. 16). Таким чином, випробування цієї броні було закінчено. Інша броня станом на початок листопада 2019 продовжила працювати, оскільки отвір від зносу ще не вийшов за межі захисної пластини.

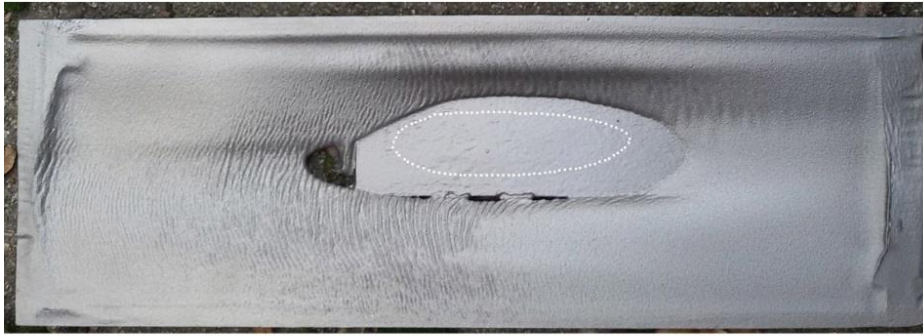
Можна бачити, що зварні шви залишилися майже неушкодженими попри пряму дію струменю дробу після того, як основну броню було зношено до контуру ремонтної пластини (рис. 17).

Таким чином, в результаті натурних випробувань підтверджено достатню якість зварних з'єднань загартованої сталі 120Г3С2 після зварювання з прискореним охолодженням у воді. Зносостійкість сталі в умовах впливу сталевого загартованого дробу виявилася досить високою. За час випробувань пошкодження робочої поверхні пластин не спостерігалось.

За результатами експлуатаційних випробувань технологію відновлення броней дробомету зносостійкими накладками із загартованої високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2 прийнято до впровадження на ПАТ «Запоріжтрансформатор». Очікуваний річний економічний ефект складає 151 173,34 грн., про що в дисертації наведено відповідний акт.



а



б

а – 20.10.2019; б – 01.11.2019.

Рисунок 16 – Бронь, яку відновлено пластиною з ізотермічною обробкою.



Рисунок 17 – Бронь, яку відновлено пластиною з ізотермічною обробкою станом на 01.11.2019. Вигляд зі сторони зварних з'єднань.

ВИСНОВКИ

Механічне, зокрема абразивне, зношування є найбільш інтенсивним процесом руйнування поверхонь тертя промислового обладнання. Нині досягнуто значних успіхів зі створення матеріалів високої зносостійкості для умов механічного зношування. Але загальним невирішеним питанням є труднощі з'єднання зносостійких матеріалів у вузлах і деталях конструкцій. Розв'язування цього питання є актуальним науково-практичним завданням. Також актуальними науковими завданнями є дослідження мікроструктури поверхні тертя сталей зі структурою нестабільного аустеніту після абразивного зношування і мікроструктури нестабільного аустеніту на початкових стадіях бейнітного перетворення. Дисертацію спрямовано саме на розв'язання зазначених завдань, які мають істотне значення для матеріалознавства. Узагальнення результатів досліджень дозволяє висунути такі висновки.

1. Під час абразивного зношування сталі 120Г3С2, загартованої від 900 °С, на поверхні тертя формується суцільний шар мартенситу. Глибина шару повністю мартенситної структури складає 7...10 μm. Мікротвердість поверхні тертя досягає 1400 HV0.05. Такий рівень зміцнення залишкового аустеніту зафіксовано вперше. Зафіксовано значне уширення α-піків, що свідчить про успадкування мартенситом дефектів кристалеві гратки аустеніту, які з'явилися в ньому в процесі пластичної деформації абразивними частинками.

2. Бейнітне перетворення починається менше, ніж через 1 годину після початку ізотермічної витримки загартованої від 900 °С сталі 120Г3С2. Поряд з бейнітом голчастої морфології під час ізотермічної витримки формуються ділянки значно більш дисперсного бейніту з міжпластинчастою відстанню менше 100 нм. Твердість сталі під час ізотермічної витримки змінюється по кривій з мінімумом, який відповідає витримці 1 година. В цей час процеси відпуску мартенситу вже завершено, а бейнітне перетворення, що почалося, входить до стадії прискореного розвитку.

3. Швидке охолодження зварного з'єднання є доцільним для отримання в ЗТВ повністю аустенітної структури, яка є ідентичною початковій структурі загартованої сталі. Швидке охолодження потрібно, щоб уникнути або мінімізувати виділення карбідів з аустеніту, що запобігає утворенню мартенситу в ЗТВ. Після ручного дугового зварювання загартованої на мартенсит сталі 120Г3С2 з прискореним охолодженням у воді структура ЗТВ є набором прошарків змінної твердості від аустеніту до мартенситу.

4. Зварювання загартованої сталі 120Г3С2 з охолодженням у воді не призводить до виникнення дефектів зварного з'єднання. Ділянки низької зносостійкості в ЗТВ практично відсутні. Зварювання з прискореним охолодженням у воді загартованої високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2 дозволяє отримувати зварні з'єднання, які є міцнішими за основний матеріал.

5. Знеуглецьована сталь 120Г3С2 після гартування від температур в діапазоні 900...1000 °С руйнується в декілька етапів. Спочатку відбувається крихке руйнування тонкого поверхневого шару з мартенситною структурою. Тріщина працює як концентратор напружень, наступний долом перетину відбувається в основному крихко з незначною пластичною деформацією матеріалу серцевини зразка.

6. Експлуатаційні випробування броней дробомету, які відновлено зносостійкими накладками із загартованої сталі 120Г3С2, показали високу якість зварних з'єднань, що отримано зварюванням з прискореним охолодженням. Зносостійкість ремонтних накладок виявилася вищою, ніж сталей 45Г17Ю3 та 110Г13Л. Економічний ефект роботи складає 151173,34 грн/рік.

7. Результати досліджень можуть бути застосованими для розв'язання низки наукових проблем, наприклад створення наукових засад локального захисту швидкозношуваних поверхонь великої площини, та ін. Продовження досліджень за тематикою дисертації можливо у напрямку більш глибокого вивчення мікро- і наноструктури мартенситу, який утворюється з нестабільного аустеніту на поверхні тертя під час абразивного зношування. Також потребує спрямованих досліджень наноструктура, яка утворюється в аустеніті поряд з бейнітом під час ізотермічної витримки.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Калинин Ю.А., Брыков М.Н. Обеспечение качественной сварки износостойких сталей (обзор направлений). *Вісник ДДМА*. 2016. №2. С.138-141. **(Фахове видання)**

2. Kalinin Yurii, Brykov Michail, Petryshynets Ivan, et al. Structure of high-carbon steel after welding with rapid cooling . *Acta Metallurgica Slovaca*. 2019. Vol 25, No 2. P.114-122. **(Scopus, Web of Science)**

3. Калинин Ю. А., Шумилов А. А., Петришинец И. , и др. Структура околосварочной зоны закалённой высокоуглеродистой стали после сварки с ускоренным охлаждением. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2019. № 1. С. 31-36. **(Фахове видання)**

4. Hesse O., Kalinin Yu., Petryshynets I., et al. Investigation on friction surface of high-carbon low-alloyed steel after abrasive wear. *Problems of Tribology*. 2019. Vol 24. No 3. P.22-28. **(Фахове видання)**

5. Калинин Ю.А., Брыков М.Н., Петришинец И., и др. Оценка качества соединений высокоуглеродистой низколегированной стали после сварки с ускоренным охлаждением. *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 67. С.58-63. **(Фахове видання)**

6. Калинин Ю. А., Петришинец И., Ефременко В. Г. и др. Влияние изотермической обработки на микроструктуру закалённой на аустенит высокоуглеродистой низколегированной стали. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Т. 1. вип. 88. С.58-66. (Фахове видання)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Калинин Ю. А., Ефременко В. Г., Брыков М. Н., и др. Структура зон сплавления и термического влияния высокоуглеродистой низколегированной стали при ручной дуговой сварке с ускоренным теплоотводом. *Актуальные проблемы современной науки: сборник тезисов научных трудов XXXVIII Международной научно-практической конференции (Харьков–Вена–Берлин–Астана, «30» января 2019 года)*. Международный научный центр развития науки и технологий, 2019. С.77-81.

8. Калінін Ю.А., Осіпов М.Ю., Андрущенко М.І., и др. Зносостійкість зони термічного впливу після зварювання з прискореним охолодженням високовуглецевої низколегированної сталі. *Сучасні технології у промисловому виробництві (СТПВ-2019)*, VI Всеукр. наук.-технічн. конф., Суми, 16-19 квітня 2019 р. С.74.

9. Калинин Ю. А., Брыков М. Н., Ефременко В. Г. Обработка сварных соединений высокоуглеродистых сталей. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019. Вып. 6(50), Ч. 6. С.22-24. (По материалам конференции «Актуальные научные исследования в современном мире», Переяслав-Хмельницкий, 26-27 июня 2019 г.)

10. Калинин Ю.А., Брыков М.Н., Петришинец И. и др. Особенности разрушения высокоуглеродистой низколегированной стали с гетерогенной структурой. *Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів: Збірка матеріалів*. Запоріжжя: НУ «ЗП», 2019. С.150-152.

11. Калинин Ю.А., Брыков М.М. Зварювання з прискореним охолодженням сталі 120Г3С2. Структура зон термічного впливу. *Проблеми зварювання та споріднених технологій*. Матеріали Всеукр. конф. з міжнар. участю, що присвяч. 60-річчю каф. зварюв. вир-ва НУК, 17-19 верес. 2019 р. Нац. ун-т кораблебудування ім. адмірала Макарова та ін. Миколаїв ; Коблеве : Торубара В. В., 2019. С.25.

12. Калинин Ю. А., Петришинец И., Ефременко В. Г. и др. Влияние изотермической обработки на микроструктуру закалённой на аустенит высокоуглеродистой низколегированной стали. *Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 26-27 вересня 2019 р. ХНАДУ. Харків : ПП «Видавничий будинок «Перлина», 2019. С.213-219.

АНОТАЦІЯ

Калінін Ю.А. «Підвищення ресурсу швидкозношуваних деталей зносостійкими накладками з високовуглецевої низьколегованої сталі». Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Національний університет «Запорізька політехніка» МОН України, м. Запоріжжя, 2020.

В роботі вирішено актуальне завдання вдосконалення наявного матеріалу високої якості, а саме високовуглецевої низьколегованої сталі 120Г3С2. Досліджено структуру і властивості приповерхневих шарів загартованої на залишковий аустеніт сталі після інтенсивного механічного зношування. Розроблено також засіб з'єднання ремонтних накладок з термічно обробленої сталі 120Г3С2 з деталями з інших сталей, які потребують захисту від інтенсивного механічного зношування.

Показано, що для отримання якісного зварного з'єднання високовуглецевої низьколегованої сталі необхідно забезпечити прискорене охолодження зони термічного впливу (ЗТВ) під час зварювання. Це забезпечує утворення прошарку аустеніту, якій знижує вірогідність утворення тріщин і значно підвищує якість зварних з'єднань.

Ключові слова: високовуглецева низьколегована сталь, структуроутворення, аустеніт, мартенсит, бейніт, фазове перетворення, зварювання з прискореним охолодженням, механічне зношування, поверхня тертя.

АННОТАЦИЯ

Калинин Ю.А. «Увеличение ресурса быстроизнашиваемых деталей износостойкими накладками из высокоуглеродистой низколегированной стали». Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Национальный университет «Запорожская политехника» МОН Украины, г. Запорожье, 2020.

Механическое, в том числе абразивное, изнашивание является наиболее интенсивным процессом разрушения поверхностей трения промышленного оборудования. Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи получения качественных сварных соединений износостойкого материала – закалённой высокоуглеродистой низколегированной стали 120Г3С2. Также проведены исследования микроструктуры поверхности трения данной стали со структурой нестабильного аустенита после абразивного изнашивания и микроструктуры нестабильного аустенита на начальных стадиях бейнитного превращения при температуре 250 °С.

В процессе абразивного изнашивания стали 120Г3С2, закалённой от 900 °С, на поверхности трения формируется сплошной слой мартенсита. Глубина слоя составляет 7...10 мкм. Микротвёрдость поверхности трения достигает 1400 HV0.05.

Бейнитное превращение начинается меньше, чем через 1 час после начала изотермической выдержки закалённой от 900 °С стали 120Г3С2. Наряду с бейнитом игольчатой морфологии во время изотермической выдержки формируются участки значительно более дисперсного бейнита с межпластинчатым расстоянием менее 100 нм. Твёрдость стали во время изотермической выдержки изменяется по кривой с минимумом, соответствующим выдержке 1 час.

Целесообразно быстрое охлаждение сварного соединения для получения в зоне термического влияния полностью аустенитной структуры, идентичной начальной структуре закалённой стали. Также быстрое охлаждение необходимо для исключения или минимизации выделения карбидов из аустенита, что предотвращает образование мартенсита в ЗТВ. После ручной дуговой сварки закалённой стали 120Г3С2 с ускоренным охлаждением в воде структура ЗТВ является набором слоёв переменной твёрдости от аустенита до мартенсита. Сварка с ускоренным охлаждением в воде стали 120Г3С2 позволяет получать сварные соединения с прочностью большей, чем у основного материала.

Ключевые слова: высокоуглеродистая низколегированная сталь, формирование структуры, аустенит, мартенсит, бейнит, фазовое превращение, сварка с ускоренным охлаждением, механическое изнашивание, поверхность трения.

SUMMARY

Kalinin Yu.A. “Increasing the lifetime of parts under severe wear by wear resistant pads made of high-carbon low alloy steel”. Qualifying scientific work under rights of a manuscript.

The dissertation is intended for the Candidate of Technical Sciences degree by specialty 05.02.01 - Materials science. – “Zaporizhzhia Polytechnic” National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Zaporizhzhia, 2020.

The task of improving the available material of high quality, namely, high carbon low-alloy steel 120Mn3Si2, is solved in this work. The structure and properties of the surface layers of retained austenite in steel after severe mechanical wear were investigated. A mean for connecting repair linings of heat-treated steel 120Mn3Si2 with parts from other steels that require protection from severe mechanical wear is also developed.

It is shown that for obtaining a high quality welded joint of high carbon low alloy steel, it is necessary to provide rapid cooling of the heat affected zone (HAZ)

during welding. This provides the formation of austenite layer, which reduces the likelihood of cracks and significantly improves the quality of welded joints.

Keywords: high-carbon low-alloy steel, structure formation, austenite, martensite, bainite, phase transformation, welding with rapid cooling, mechanical wear, friction surface.