

ВПЛИВ ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ СТАЛІ 40Х

О.В. Колісниченко¹, В.М. Коржик¹, С. Senderowski², Д.В. Строгонов¹, О.В. Ганущак¹, О.С. Терещенко¹

¹ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: okolis@i.ua

²Warsaw University of Technology, Mechanics and Printing Institute, Narbutta 85, 02-524, Warszawa, Poland.

E-mail: cezary.senderowski@pw.edu.pl

У статті описано вплив імпульсно-плазмової обробки на фізико-механічні властивості сталі 40Х. Методами металографічного та рентгенофазового аналізу досліджено структурно-фазові зміни в поверхневих шарах. Циклічний вплив і високі швидкості нагріву й охолодження в поверхневих шарах призводять до зміни кінетики фазових перетворень, створення дефектів кристалічної решітки в результаті фазового наклепу, зменшення дисперсності структури, формування підвищеної щільності дислокацій тощо. З метою визначення ефективності впливу імпульсно-плазмової обробки на фізико-механічні властивості проведено триботехнічні випробування на зносостійкість в умовах рідинного тертя при різних навантаженнях і швидкостях ковзання. Отримано порівняльні дані щодо величини лінійного зносу та інтенсивності зношення зразків, що випробовувалися. Бібліогр. 13, рис. 9.

Ключові слова: імпульсно-плазмова обробка, конструкційна легована сталь, структурно-фазовий аналіз, твердість, мікроструктура, пара тертя, знос

Вступ. Однією з актуальних і досліджуваних проблем у галузі машинобудування є підвищення надійності та довговічності вузлів тертя. До деталей машин, що працюють у парах тертя в умовах інтенсивного зношення, циклічних навантажень і вібрацій, висуваються особливі вимоги до зносостійкості поверхні, що третється, при одночасно високій динамічній міцності всього виробу в цілому. Перспективним у цьому сенсі є створення нових і вдосконалення існуючих технологічних методів поверхневої обробки матеріалів і деталей машин. До них відносяться різні методи нанесення покриттів: від іонно-плазмових до газотермічних методів напилення; методи легування, хіміко-термічної обробки або імплантації поверхневих шарів зміцнювальними елементами; різні способи термомеханічної поверхневої обробки та ін. Мабуть, одним із найбільш вивчених напрямів у сфері зміцнення поверхневих шарів різних деталей машин і агрегатів вважається обробка матеріалів концентрованими джерелами енергії (КДЕ) [1–4]. У якості КДЕ переважно використовують електронно-променеві, лазерні джерела енергії або плазмові струмені.

У процесі впливу концентрованими джерелами енергії відбувається нагрів поверхні з наступним її охолодженням шляхом відведення тепла як у матеріал, так і в навколишнє середовище, внаслідок чого в поверхневому шарі відбуваються структурно-фазові перетворення. Природа джерела нагріву,

тепловий потік, час впливу на поверхню позначаються на властивостях термозміцненого шару (товщині, фізико-механічних характеристиках, фазовому складі та його дисперсності). Швидкісним способом нагріву завжди властива нестача часу для протікання та завершення рівноважних структурних перетворень. Завдяки зміні кінетики фазових перетворень, зменшенню розмірів зерна, створенню підвищеної щільності дислокацій в умовах високошвидкісної термічної обробки матеріалів можна отримувати необхідні комплекси механічних і фізичних властивостей поверхні матеріалів (високу твердість, опірність зносу, опірність корозії тощо). Нагрів з використанням КДЕ можна здійснювати як у безперервному, так і в імпульсному режимах [5]. Імпульсний режим нагріву КДЕ, порівняно зі звичайними способами термічної обробки, здійснюється за малий проміжок часу (приблизно $10^{-3} \dots 10^{-6}$ с). Унаслідок інтенсивного відведення тепла в метал і в навколишнє середовище час охолодження також на кілька порядків менший ($10^{-3} \dots 10^{-6}$ с), ніж при звичайному охолодженні в рідких гартувальних середовищах.

Крім того, використання КДЕ є досить ефективним для проведення термоциклічної обробки металів і деталей машин. Після такої обробки поверхневий шар має дрібнодисперсну структуру. Відомо, що за однакової твердості сталь, яка має дрібнокристалічну структуру, набагато краще протистоїть зносу, ніж сталь з крупнокристалічною

Колісниченко О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,

Senderowski С. – <https://orcid.org/0000-0002-0331-3702>, Строгонов Д.В. – <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>,

Ганущак О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4392-6682>, Терещенко О.С. – <http://orcid.org/0009-0003-4021-0758>

© О.В. Колісниченко, В.М. Коржик, С. Senderowski, Д.В. Строгонов, О.В. Ганущак, О.С. Терещенко, 2025

структурою, оскільки в останньої спротив крихкому руйнуванню менший [6]. У якості інструмента реалізації імпульсної термоциклічної обробки виробів водночас із лазерними та електронно-променевими пристроями ефективно використовуються плазмові генератори на основі потужних імпульсних електричних розрядів [7, 8]. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона було розроблено один із варіантів таких генераторів, який успішно використовується в якості дослідницького обладнання як у наукових лабораторіях [9, 10], так і в промислових умовах [11].

Метою цієї роботи є дослідження впливу імпульсно-плазмової обробки (ІПО) на структурно-фазові зміни в поверхневих шарах і на їх зносостійкість в умовах тертя зі змащуванням.

Обладнання, матеріали та методики дослідження. В якості об'єкта дослідження було обрано сталь 40Х, хімічний склад якої такий, мас. %: С – 0,36...0,44; Si – 0,17...0,37; Mn – 0,50...0,80; Cr – 0,8...1,10, все інше – залізо. Сталь 40Х має підвищену міцність, твердість і стійкість до зносу. Вона широко застосовується в різних галузях промисловості та використовується для виробництва деталей і компонентів, які працюють в умовах високих навантажень, зокрема це вали, шестерні, осі, зубчасті колеса та ін. Завдяки своїм характеристикам міцності сталь 40Х також застосовується в автомобільній промисловості, машинобудуванні, суднобудуванні, енергетиці та інших галузях, де потрібен надійний і міцний матеріал.

Для дослідження структурно-фазового стану поверхневих шарів було виготовлено серію зразків зі сталі 40Х розміром 15×15×10 мм. Трибологічні експерименти проводили на втулках (рис. 1). У якості контртіла використовувався диск діаметром 90×10 мм зі сталі ШХ15.

Твердість сталі 40Х у вихідному (відпаленому) стані вимірювалася за методом Брінелля та складала 212...217 НВ. Перед ІПО зразки піддавалися стандартній термічній обробці. Для нагріву, гартуван-

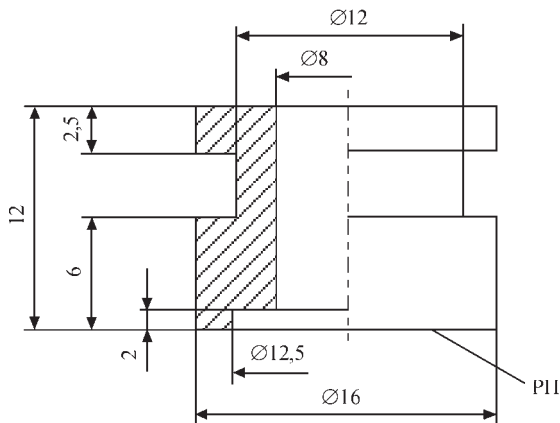


Рис. 1. Зразок для випробування: втулка (40Х); Р11 – робоча поверхня

ня та відпуску використовувалася електропіч. Температура нагріву під гартування складала 850 °С, що дозволило досягти максимальної твердості та міцності матеріалу. Після витримки в печі зразки охолоджувалися в гартувальній оліві. Потім проводився низькотемпературний відпуск при температурі 200 °С протягом 1 год.

Обробку зразків проводили з використанням імпульсно-плазмового генератора (рис. 2), особливістю якого є можливість комутації електричного струму через частково іонізований газ за фронтом детонаційної хвилі. Це дає можливість генерувати імпульсну плазму з частотою 1...4 Гц та енергією до 7 кДж. ІПО забезпечує швидкий нагрів (час нагріву $10^{-3} \dots 10^{-4}$ с) поверхневого шару з наступним його інтенсивним охолодженням шляхом відведення тепла в об'єм виробу. Висока швидкість (до 10^7 К/с) нагріву й охолодження поверхневих шарів сприяє формуванню дрібнодисперсної кристалічної структури та високої щільності дислокацій. Принцип дії та параметри пристрою описані в [12, 13]. Параметри імпульсно-плазмової обробки виробу були такі:

Напруга на конденсаторній батареї, кВ	3,2
Ємність конденсаторної батареї, мкФ.....	960
Індуктивність розрядного контуру, мкГн.....	30
Частота слідування імпульсів, Гц.....	2
Відстань до поверхні, що обробляється, мм	50
Умовний діаметр плями впливу плазми на поверхню, мм.....	10
Кількість імпульсів у плямі впливу.....	5
Матеріал електрода, що еродується	W

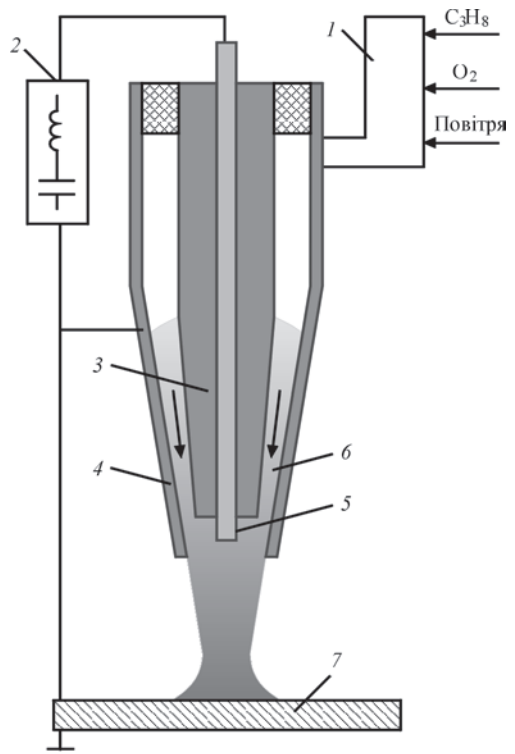


Рис. 2. Імпульсний плазмотрон: 1 – детонаційна камера; 2 – джерело живлення; 3, 4 – коаксіальні електроди; 5 – електрод, що еродує; 6 – плазма; 7 – виріб

Для хімічного травлення мікрошліфів, що досліджувалися, використовували 4 % розчин азотної кислоти (HNO_3), візуальний аналіз мікрошліфів проводили на оптичному мікроскопі Versamet-2. Мікроструктуру поверхневих шарів досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа Quanta 200 3D. Мікротвердість визначали відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007 на мікротвердомірі DM8-B фірми AFFRI методом тесту Віккерса при навантаженні на індентор 50 г. Структурні дослідження проводили методом рентгеноструктурного аналізу (зйомка в FeK α -випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-3М).

Визначення триботехнічних характеристик деталей проводилося на машинах торцевого та реверсивного тертя. Змащування зразків на машинах тертя здійснювалася оливою типу I-50A і водно-масляною емульсією РЖ-3, які подавалися безперервно в зону тертя.

Робочий вузол машини торцевого тертя показано на рис. 3, а. Рухомий зразок – диск 1 встановлено на столі 2, який обертається відносно вертикальної осі від приводу машини. Три нерухомі зразки – втулки 3 закріплені в державці й опираються торцями на рухомий диск 1. До державки підведено шланг 4 від насоса, по якому змазка поступала в зону тертя. Подача змазки відбувалася із бака ємністю 20 л насосом продуктивністю 3 л/хв. Із зони тертя змазка самопливом поверталася в бак. Навантаження на державку зі зразками передається від важеля 5 із вантажами через вилку 6. Між вилкою та державкою встановлено кульку 7, що забезпечує самовстановлення державки зі зразками відносно диска. При повороті державки від сил тертя шпон-

ка державки впирається в проріз вилки і повертає її. На верхньому кінці вилки жорстко закріплено стрижень 8, який впирається в тензодатчик 9. Для вимірювання сили тертя сигнал з тензодатчика поступав і оброблявся ваговим контролером.

Робочий вузол машини реверсивного тертя показано на рис. 3, б. Рухомий зразок – диск 1 закріплений на каретці 2, встановленій на чотирьох роликах 3. Каретка через кільце 4 зв'язана з повзунком, який приводиться у рух кривошипно-шатунним механізмом. Привод машини забезпечує різну швидкість руху каретки з числом подвійних ходів 95...320 на хвилину з довжиною ходу 20...70 мм. Нерухомий зразок – втулка 5 закріплена в отворі державки, яка через пружне кільце 6 шарнірно закріплена на осі 7. Навантаження зразків здійснюються важелем 8 зі змінними вантажами на його вільному кінці. Зусилля від важеля передається через шток 9 на державку з нерухомим зразком. По шлангу 10 від спеціальної крапельниці в державку подається змазка у кількості 3 краплі на хвилину. Сила тертя визначалася за допомогою тензодатчика, наклеєного на пружне кільце 6 і підключеного до вагового контролера.

Знос нерухомих зразків – втулок визначався за зміною їхньої маси за допомогою аналітичних ваг типу ВЛР-200. Перед зважуванням зразки піддавалися двократному промиванню в очищеному бензині, а потім в ацетоні. Після цього зразки просушувалися в термостаті при температурі 60 °C протягом 1 год. Похибка визначення маси зразків за такою методикою складала не більш ніж 0,0002 г при масі однієї втулки близько 7 г.

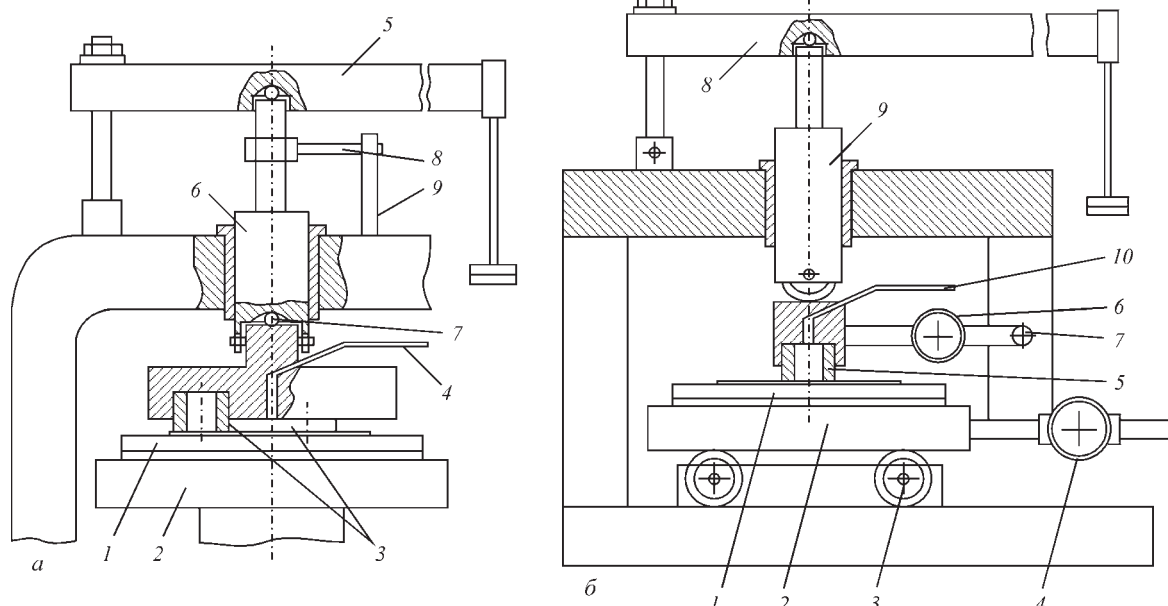


Рис. 3. Схеми основних вузлів машин тертя: а – робочий вузол машини торцевого тертя; б – робочий вузол машини реверсивного тертя

Результати дослідження та їх обговорення. У сталі 40X перлітного класу в результаті гартування утворюється мартенсит і залишковий аустенит (5...8 об. %). Твердість сталі після загартування складала 58 HRC. При проведенні низькотемпературного відпуску (200 °C) відбуваються процеси утворення відпущеного мартенситу внаслідок перетворення залишкового аустеніту, а також зменшення ступеня тетрагональності мартенситу при виділенні надлишкового вуглецю із α -твердого розчину. Це призводить до незначного зменшення твердості до 52 HRC.

Характерну рентгенограму поверхні зразків після загартування й низькотемпературного відпуску наведено на рис. 4, а. Фазовий склад сталі 40X – це переважно відпущений мартенсит і незначна кількість залишкового аустеніту. IPO зразків призводить до значних змін структурно-фазового складу в поверхневих шарах (рис. 4, б).

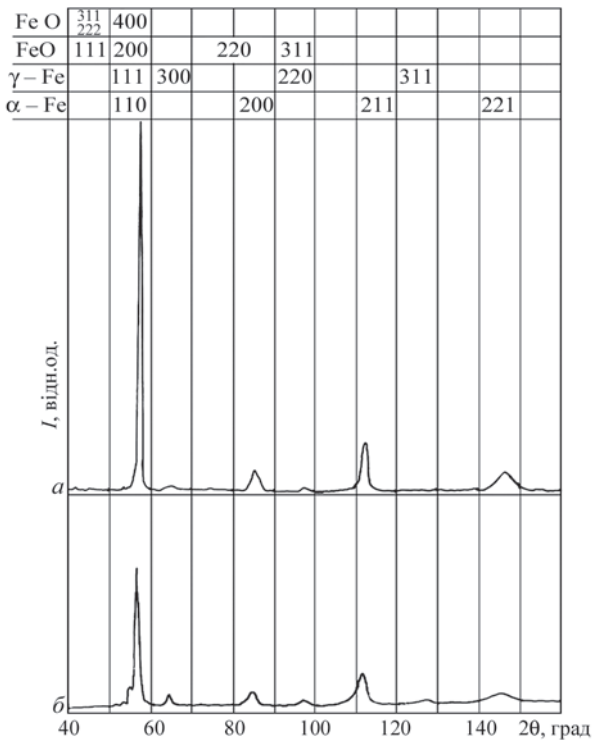


Рис. 4. Рентгенограма сталі 40X: а – після термообробки (гартування + відпуску); б – після імпульсно-плазмової обробки

Структурні зміни, що спостерігаються, узгоджуються із загальними уявленнями про поверхневе загартування з використанням КДЕ. Так, після IPO рентгенографічно спостерігається розширення лінії α -Fe і збільшення інтенсивності ліній γ -Fe. Основний внесок у розширення ліній роблять дефекти кристалічної решітки в результаті фазового наклепу при швидкісному гартуванні й неоднорідність по вуглецю, що обумовлена високою швидкістю нагріву та відсутністю витримки при високій температурі. Розширення ліній α -фази з цієї причини обумовлено неоднорідною тетрагональністю мартенситу. Також слід зазначити, що, незважаючи на збільшення вмісту аустеніту (до 15 об. %) після IPO, твердість поверхневих шарів, як буде показано далі, зростає завдяки фазовому наклепу внаслідок оборотних $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворень при багатократному імпульсному впливі. На рентгенограмі також присутні лінії оксидів, незначне утворення яких на поверхні пов'язано з особливістю імпульсно-плазмової обробки. По-перше, кисень використовується як компонент горючої, а, відповідно, і плазموутворюючої суміші. По-друге, обробка проводиться на повітрі.

При вивченні поперечних мікрошліфів зразків після IPO виявлено формування шарової структури, що складається зі смуги, яка слабо травиться, завтовшки до 35 мкм (рис. 5) дрібнодисперсного з нечітко (оптично) вираженою структурою мартенситу, з інтегральною мікротвердістю $HV_{50} = 8800 \dots 10200$ МПа (рис. 6). Мікротвердість цього шару в 1,7 рази вища, ніж в основному металі.

Під зміцненим шаром утворюється ділянка завтовшки до 25 мкм з тростомартенситною структурою та зі зниженням інтегральної мікротвердості до $HV_{50} \approx 4500$ МПа. У такому разі процес високошвидкісного нагріву й наступного охолодження можна розглядати як своєрідний відпуск. Далі твердість підвищується до твердості відпущеного мартенситу основного металу – $HV_{50} = 5400 \dots 5700$ МПа.

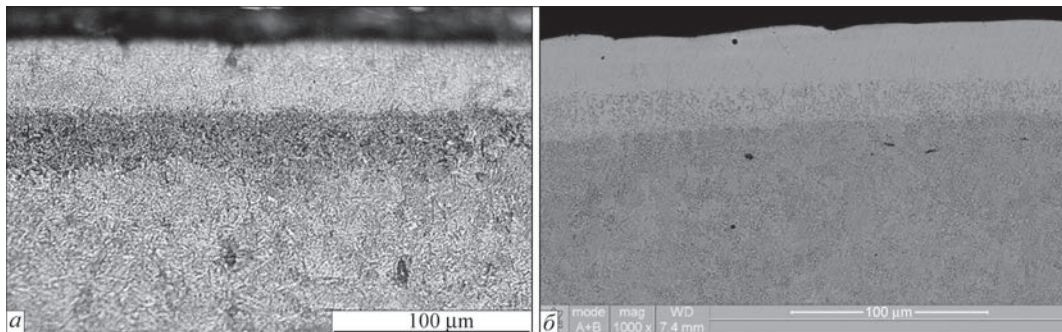


Рис. 5. Мікроструктура приповерхневого шару сталі 40X після імпульсно-плазмової обробки: а – зображення на оптичному мікроскопі; б – зображення на растровому електронному мікроскопі

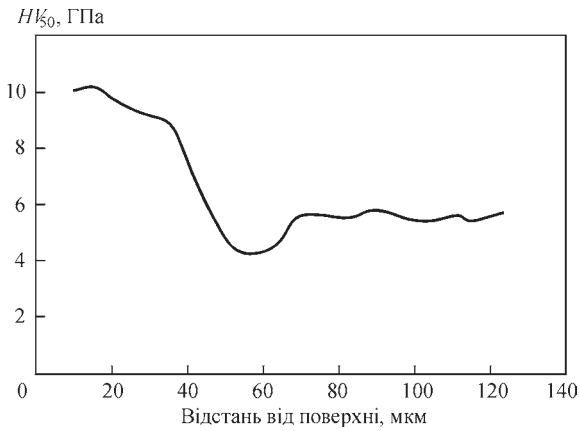


Рис. 6. Зміна інтегральної мікротвердості у поверхневих шарах сталі 40X після IPO

Випробування зразків без і з IPO проводили на машині торцевого тертя зі швидкостями ковзання 2; 3,5 і 5 м/с і при навантаженні 0,5; 0,9 і 1,3 МПа. На кожному режимі тривалість випробувань визначалася величинами зносів зразків і складала не менше 30 год.

Результати випробувань зразків при подаванні в зону тертя індустріальної оливи I-50A та вод-

но-масляної емульсії РЖ-3 наведені на графіках динаміки зносу (рис. 7).

Як і очікувалося, використання індустріальної оливи порівняно з водно-масляною емульсією значно знижує процес зносу. Мінімальна інтенсивність зносу спостерігається на зразках після IPO на всіх режимах випробувань при використанні оливи I-50A.

При змащуванні як оливою I-50A, так і водно-масляною емульсією РЖ-3 за незмінної швидкості ковзання знос зразків зростає при збільшенні навантаження. В умовах рідинного тертя збільшення швидкості ковзання сприяє зменшенню зносу навіть за вищих навантажень (рис. 7).

Випробування зразків на реверсивній машині тертя проводилися при крапельному змащуванні зразків емульсією. Режими випробувань: середня швидкість ковзання складала 0,15; 0,3 і 0,45 м/с; навантаження – 0,5; 0,9 і 1,3 МПа. Результати випробувань наведені на графіках динаміки зносу (рис. 8). Вплив швидкості ковзання та навантажен-

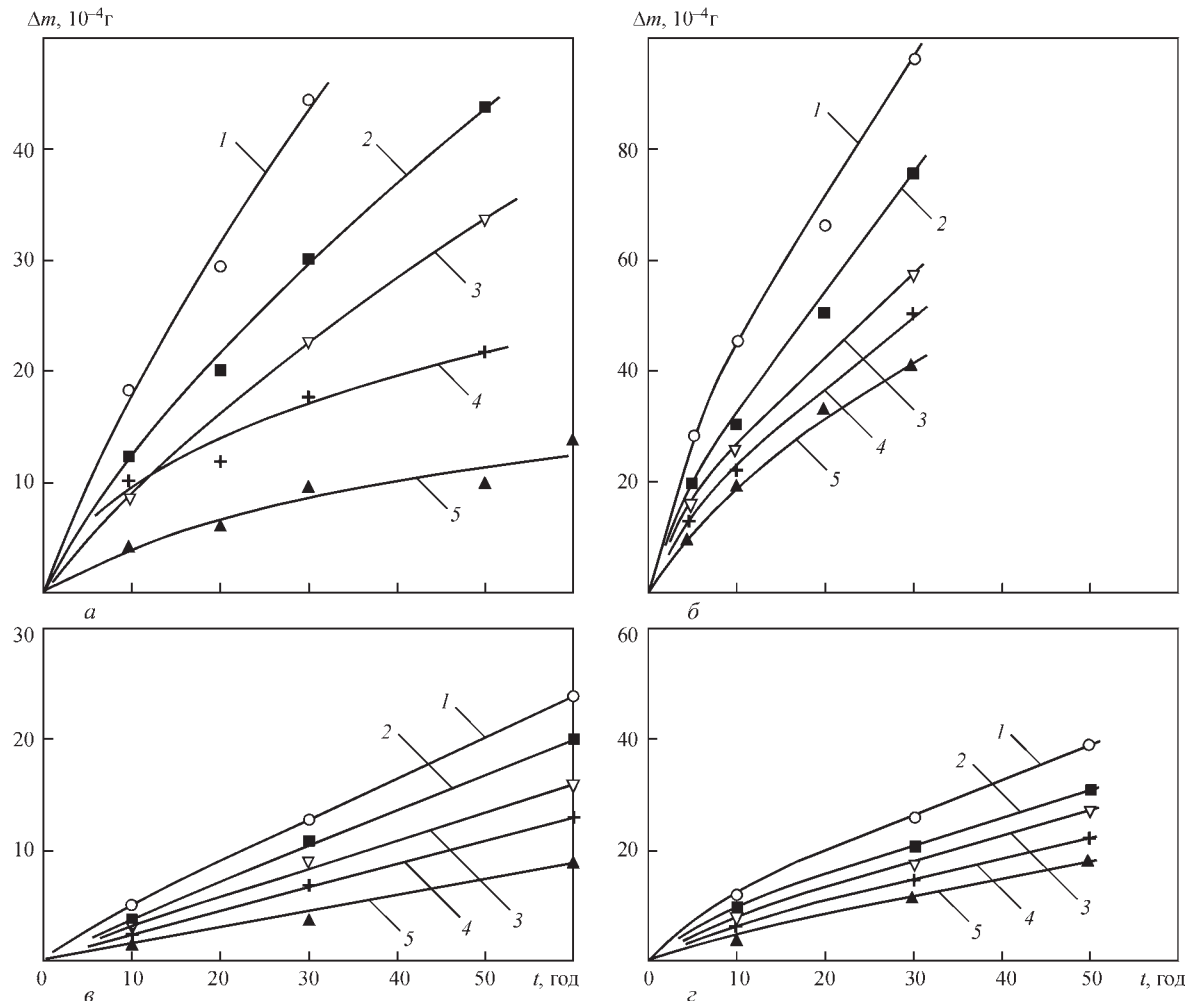


Рис. 7. Динаміка зносу втулок на торцевій машині тертя при змащуванні: а, в – оливою I-50A; б, г – емульсією РЖ-3; а, б – динаміка зносу втулок без IPO; в, г – динаміка зносу втулок після IPO; 1 – швидкість ковзання 2,0 м/с, навантаження 1,3 МПа; 2 – швидкість ковзання 2,0 м/с, навантаження 0,9 МПа; 3 – швидкість ковзання 3,5 м/с, навантаження 0,9 МПа; 4 – швидкість ковзання 2,0 м/с, навантаження 0,5 МПа; 5 – швидкість ковзання 5,0 м/с, навантаження 0,9 МПа

ня на інтенсивність зносу аналогічний тому, як і на машині торцевого тертя. Інтенсивність зносу збільшується при зростанні навантаження та зменшується при зростанні швидкості ковзання.

У більшості інженерних розрахунків коефіцієнт тертя приймають як постійний. Однак у реальних умовах, особливо за високих навантажень, він може змінюватися через зміну площі контакту, фазові перетворення, знос та інші чинники. В умовах рідинного тертя залежно від навантаження змінюється товщина плівки, що також може впливати на коефіцієнт тертя. Як показали дослідження на машині торцевого, так і на машині реверсивного тертя, коефіцієнт рідинного тертя в процесі випробувань змінювався мало. При терті деталей без ІПО на машині торцевого тертя залежно від часу приробки та режиму коефіцієнт знаходився в інтервалі 0,07...0,12 і 0,1...0,13 при змащуванні І-50А і РЖ-3 відповідно. Обробка деталей імпульсною плазмою призводить до зниження коефіцієнта тертя в середньому на 0,015. На машині реверсивного тертя в умовах крапельної подачі емульсії та на наведених вище режимах випробувань коефіцієнт тертя для незміцненої та зміцненої пари складає 0,12...0,16 і 0,1...0,14 відповідно.

Після тривалих випробувань зразків на машині реверсивного тертя на швидкості 2 м/с і при навантаженні 1,3 МПа були проведені випробування притертих зразків на задирку (рис. 9). При проведенні експерименту ступінчасто збільшувалося навантаження на пару тертя на 1 МПа. На кожному етапі навантаження пара тертя працювала

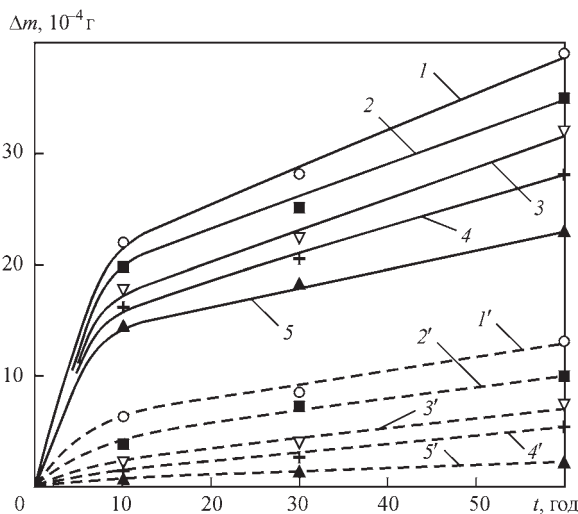


Рис. 8. Динаміка зносу деталей на реверсивній машині тертя при змащуванні емульсією РЖ-3: а – динаміка зносу втулок; — деталі без ІПО; - - - деталі після ІПО; 1, 1' – швидкість ковзання 0,15 м/с, навантаження 0,9 МПа; 2, 2' – швидкість ковзання 0,30 м/с, навантаження 0,9 МПа; 3, 3' – швидкість ковзання 0,45 м/с, навантаження 1,3 МПа; 4, 4' – швидкість ковзання 0,45 м/с, навантаження 0,9 МПа; 5, 5' – швидкість ковзання 0,45 м/с, навантаження 0,5 МПа

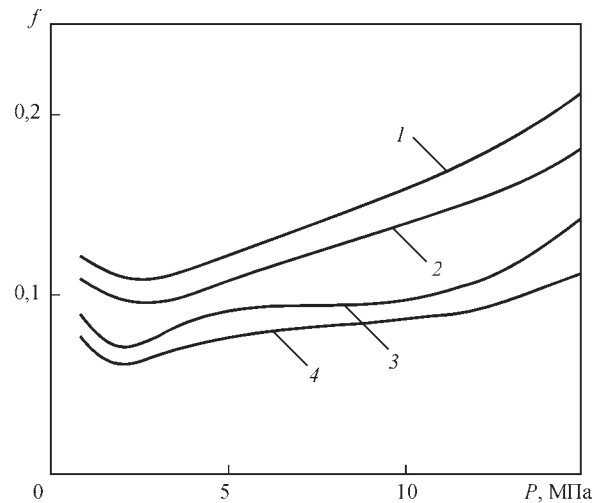


Рис. 9. Залежність коефіцієнта тертя від навантаження при ступінчастому навантаженні зразків на машині реверсивного тертя. Швидкість ковзання 2 м/с. 1 – зразки без ІПО, тертя з емульсією; 2 – зразки після ІПО, тертя з емульсією; 3 – зразки без ІПО, тертя з оливою; 4 – зразки після ІПО, тертя з оливою

10 хв, потім фіксувалася сила тертя та навантаження збільшувалося. Було досягнуто максимального навантаження 15 МПа, збільшувати навантаження далі не дозволили конструктивні особливості машини. У результаті задирки досягти не вдалося.

Висновки

1. З використанням методу рентгеноструктурного фазового аналізу показано, що після поверхневої імпульсно-плазмової обробки зразків зі сталі 40Х формується зміцнений поверхневий шар, що складається з дрібнодисперсного мартенситу, залишкового аустеніту (14,8 об. %), а також незначної кількості оксидів. Збільшення залишкового аустеніту в умовах високих швидкостей охолодження (до 10^7 К/с) пов'язано з пригніченням високотемпературного розпаду аустеніту в процесі високошвидкісного мартенситного перетворення.

2. Багатократний тепловий вплив імпульсною плазмою дозволяє здійснювати процес термоциклічної обробки поверхні, що сприяє підсиленню фазового наклепу в результаті оборотних $\alpha \leftrightarrow \gamma$ перетворень, збільшенню щільності дислокацій, дробленню структури. У результаті формується поверхневий шар завтовшки 35 мкм, який має підвищену мікротвердість – $HV_{50} = 8800 \dots 10200 \text{ МПа}$, що в 1,7 рази вище, ніж мікротвердість в основному металі.

3. Аналіз наведених експериментів показує, що триботехнічні властивості зразків в умовах рідинного тертя суттєво покращуються внаслідок їх зміцнення імпульсно-плазмовим методом. Так, зміцнення забезпечує зниження швидкості зношування зразків у 1,2...3,7 рази при змащуванні оливою і в 1,4...4,3 рази при змащуванні емульсією

під час випробувань на машині торцевого тертя, а на машині реверсивного тертя при змащуванні емульсією – в 1,8...3 рази. У всіх випадках зміцнення забезпечує зниження коефіцієнта рідинного тертя на 0,01...0,02.

Список літератури/References

- Dinesh Babu, P., Balasubramanian, K.R., Buvanashakaran, G. (2011) Laser surface hardening: a review. *International J. of Surface Science and Engineering*, 5(2-3), 131–151. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2011.041398>
- Kwok, C.T., Man, H.C., Cheng, F.T., Lo, K.H. (2016) Developments in laser-based surface engineering processes: with particular reference to protection against cavitation erosion. *Surface and Coatings Technology*, 291, 189–204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.019>
- Zou, J.X., Zhang, K.M., Hao, S.Z. et al. (2010) Mechanisms of hardening, wear and corrosion improvement of 316 L stainless steel by low energy high current pulsed electron beam surface treatment. *Thin solid films*, 519(4), 1404–1415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.09.022>
- Лашченко Г.И. (2003) *Плазменное упрочнение и напыление*. Киев, Экотехнологія.
Lashchenko, G.I. (2003) *Plasma hardening and spraying*. Kyiv, Ekotehnologiya [in Russian].
- Maharjan, N., Zhou, W., Zhou, Y. et al. (2019) Comparative study of laser surface hardening of 50CrMo4 steel using continuous-wave laser and pulsed lasers with ms, ns, ps and fs pulse duration. *Surface and Coatings Technology*, 366, 311–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.036>
- Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. (1989) *Термоциклическая обработка металлов и деталей*. Ленинград, Машиностроение.
Fedyukin, V.K., Smagorinsky, M.E. (1989) *Thermocyclic processing of metals and parts*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
- Минько Л.Я. (1970) *Получение и исследование импульсных плазменных потоков*. Минск, Наука и техника.
Minko, L.Ya. (1970) *Generation and study of pulsed plasma flows*. Minsk, Nauka i Tekhnika [in Russian].
- Chabak, Y.G., Fedun, V.I., Pastukhova, T.V. et al. (2017) Modification of steel surface by pulsed plasma heating. *Probl. At. Sci. Technol.*, 110, 97–102. https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2017_4/article_2017_4_97.pdf
- Yu, J., Zhang, L., Liu, K. et al. (2017) Effect of pulse detonation-plasma technology treatment on T8 steel microstructures. *J. of Materials Engineering and Performance*, 26, 6198–6206. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-017-3067-y>
- Özbek, Y.Y. (2020) Surface properties of AISI 4140 steel modified by pulse plasma technique. *J. of Materials Research and Technology*, 9(2), 2176–2185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.048>
- Тюрин Ю.Н., Колісниченко О.В., Циганков Н.Г. (2001) Импульсно-плазменное упрочнение инструмента. *Автоматическая сварка*, 1, 38–44.
Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V., Tsygankov, N.G. (2001) Pulse-plasma hardening of tools. *The Paton Welding J.*, 1, 38–44.
- Korzhyk, V., Tyurin, Y., Kolisnichenko, O. (2021) *Theory and practice of plasma-detonation technology of surface hardening metal products*. Kharkiv, PC Technology Center. DOI: <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-46-6>
- Tyurin, Y.N., Kolisnichenko, O.V. (2009) Plasma-detonation technology for modification of the surface layer of metal parts. *Open Surface Science J.*, 1, 13–19. DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/1876531900901010013>

INFLUENCE OF PULSE PLASMA TREATMENT ON WEAR RESISTANCE OF 40KH STEEL SURFACE LAYERS

O.V. Kolisnichenko¹, V.M. Korzhyk¹, C. Senderowski², D.V. Strogonov¹, O.V. Hanushchak¹, O.S. Tereshchenko¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: okolis@i.ua

²Warsaw University of Technology, Mechanics and Printing Institute, Narbutta 85, 02-524, Warszawa, Poland. E-mail: cezary.senderowski@pw.edu.pl

The paper studies the effect of pulse plasma treatment on the physical and mechanical properties of 40Kh steel. The structural and phase changes were studied in the surface layers using metallographic and X-ray phase analysis. Cyclic action and high heating and cooling rates in the surface layers lead to a change in the kinetics of phase transformations, the creation of inhomogeneous distortions of the crystal lattice as a result of phase strain hardening, a decrease in the dispersion of the structure, the creation of an increased dislocation density, etc. Tribological tests for wear resistance were carried out under liquid friction conditions at various loads and sliding speeds. Comparative data on the extent of linear wear and wear intensity of the test samples were obtained. 13 Ref., 9 Fig.

Keywords: pulse plasma treatment, structural alloy steel, structural phase analysis, hardness, microstructure, friction pair, wear

Отримано 18.04.2025

Отримано у переглянутому вигляді 19.06.2025

Прийнято 30.07.2025

Конференція «Зварювання та споріднені технології для відновлення України»

м. Київ, 27 листопада 2025 р.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Тематика конференції:

- дугові процеси зварювання та наплавлення ■ променеві та плазмові технології зварювання, наплавлення і нанесення покриттів
- гібридні процеси зварювання ■ 3D адитивні технології отримання металевих виробів ■ спеціальна електрометалургія ■ матеріалознавство в зварюванні та споріднених технологіях ■ неруйнівний контроль та технічна діагностика.

Для участі в роботі конференції необхідно надіслати заявку в Оргкомітет (участь безкоштовна). До початку конференції буде видано збірку тез/доповідей тільки в електронному форматі. Об'єм публікацій необмежений. Тривалість доповідей до 20 хвилин (15 хвилин доповідь, 5 хвилин обговорення). Розмір плакату для участі в роботі сесії стендових доповідей: А0 або А1. Сесія стендових доповідей буде проводитись паралельно з пленарними доповідями.

Контрольні дати.

Подання заявок та тез/доповідей до 04.11.2025. Подання заявок без доповіді до 24.11.2025. Розсилка програми до 20.11.2025.

Вартість публікації.

Одна сторінка в збірці тез/доповідей – 150 грн. Надання індексу DOI для тези/доповіді – 150 грн. Надання сертифіката учасника – 150 грн.

Контакти

тел./факс: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua