

Корисна модель належить до галузі електрофізичної та електрохімічної обробки, зокрема до електроіскрового легування (ЕІЛ), (те ж саме, що і електроерозійне легування (ЕЕЛ)), і може бути застосована для підвищення довговічності сальникового ущільнення вала насоса, як однієї з критичних деталей цього виду обладнання.

Сальникове ущільнення є найбільш простим за конструкцією та в обслуговуванні серед ущільнень валів насосів.

Серед основних причин виходу з ладу сальникових ущільнень є експлуатація сальника при зношеній захисній втулці, що призводить до інтенсивного зношення набивки і зрештою всього виробу [Підконтрольна експлуатація обладнання насосних станцій: навчальний посібник / В.О. Панченко, В.Ф. Герман, О.В. Івченко та ін.; за загальною редакцією В.О. Панченка. - Суми: Сумський державний університет, 2020. - 270 с.].

Захисна втулка вала має виготовлятися з матеріалу, який повинен піддаватися ретельній доводці, щоб вона добре працювала у дотику з набивкою. Матеріали для захисних втулок сальникових ущільнень насосів, які найчастіше використовують в умовах підвищеної корозійної активності середовища або при роботі насоса з абразивними частинками, є нержавіючі сталі, що забезпечують високу міцність, зносостійкість і корозійну стійкість деталей [Sapozhnykov, Y., & Zahorulko, A. (2024). Computational studies of stuffing box packing seal wear mechanism using the Archard model. Problems of Tribology, 29(2/112), 6-15. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-112-2-6-15>].

Для запобігання корозійних ушкоджень захисні втулки валів насосів виготовляють з високолегованої хромистої сталі з високими ковзними властивостями [Малюшенко В.В., Михайлов А.К. Основное насосное оборудование тепловых электростанций. М., "Энергия", 1969. - С. 61-66].

Відомий спосіб електроіскрового легування (ЕІЛ), що все ширше застосовується у промисловості для підвищення зносостійкості і твердості поверхонь деталей машин, в тому числі й таких, які працюють в умовах високих температур і агресивних середовищ, з метою підвищення їх жаро- і корозійної стійкості, а також для відновлення зношених поверхонь деталей машин, наприклад, при ремонті тощо.

ЕІЛ поверхні - це процес перенесення матеріалу на оброблювану поверхню іскровим електричним розрядом. Метод має ряд специфічних особливостей:

- матеріал анода (легувальний матеріал) може утворювати на поверхні катода (легованої поверхні) шар покриття, надзвичайно міцно зчеплений з поверхнею. У цьому випадку не тільки відсутня межа розділу між нанесеним матеріалом і металом основи, але навіть відбувається дифузія елементів анода в катод;

- легування можна здійснювати у строго зазначених місцях (радіусом від часток міліметра і більше), не захищаючи при цьому решту поверхні деталі;

- технологія електроерозійного легування металевих поверхонь дуже проста, а необхідна апаратура компактна і транспортабельна [Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей.- М.: Машиностроение, 1976. - С. 3, 4, 13, 19].

Незважаючи на те, що метод ЕІЛ позитивно впливає на зносостійкість поверхневого шару, його недоліки нерідко обмежують впровадження даного методу для широкого кола деталей машин. До таких недоліків належать збільшення шорсткості поверхні виробів після ЕІЛ, нерівномірність поверхневого зміцнення, негативний вплив ерозійного розряду на втомні властивості виробів та ін. Крім цього, зі збільшенням енергії розряду ЕІЛ, як правило, знижується суцільність формованого покриття (через наявність наскрізних пір) [Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. - М.: Машиностроение, 1976. - С. 15-17].

Відомий спосіб цементації сталевих деталей шляхом електроіскрового легування (ЦЕІЛ) графітовим електроодом-анодом вказаних деталей - катодів, в якому як матеріал катода використовують низьковуглецеві леговані сталі аустенітного класу, причому легування здійснюють з продуктивністю 1,0-5,0 хв/см² і з формуванням поверхневих шарів товщиною від 4-5 до 320-350 мкм [Патент UA 82948 C2, МПК B23C 8/00, опубл. 26.05.2008, бюл. № 10/2008].

При ЦЕІЛ сталевих деталей товщина зміцненого шару залежить від енергії розряду і часу легування (трудомісткості процесу). Зі збільшенням енергії розряду і часу легування товщина зміцненого шару збільшується. Однак при цьому зростає і шорсткість поверхні. Так, при ЕІЛ вуглецем середньовуглецевої легованої сталі 40Х (Ra=0,5 мкм) з продуктивністю 0,2 см²/хв при енергії розряду 6,8 Дж товщина шару підвищеної твердості становить понад 1,15 мм. Шорсткість поверхні при цьому відповідає Ra=11,7-14,0 мкм.

Відомий спосіб нанесення на поверхні деталей полімерних матеріалів (ПМ) [А.А. Ищенко. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами. - Мариуполь: ПГТУ, 2007. - С. 9].

Недоліком технології з нанесенням ПМ можна вважати невисоку твердість покриття і необхідність створення на поверхні деталі спеціального рельєфу (шорсткості) для кращого зчеплення нанесеного матеріалу з основою.

Найближчим аналогом до заявленого способу є спосіб відновлення зношених поверхонь металевих деталей, що включає покриття зношеної поверхні деталі методом електроерозійного легування електродом-інструментом, нанесення на отриману поверхню металополімерного матеріалу (МПМ) з подальшою його полімеризацією і здійснення фінішної обробки нанесеного шару металополімерного матеріалу, при якому покриття електроерозійним легуванням наносять на режимах з енергією розряду 0,036-6,8 Дж, чим забезпечують задану шорсткість поверхні покриття, що становить від 1 до 200 мкм і більше [Патент UA 104664 C2, МПК B23H 5/00, B23H 9/00, C23C 28/00, опубл. 25.02.2014, бюл. № 4, 2014].

Дане технічне рішення характеризується перевагами інтегрованої технології ЕІЛ+ПМ, які полягають у тому, що:

- суцільність поверхні збільшується до 100 %;
- величина шорсткості поверхні набагато нижча від ЕІЛ;
- твердість суттєво підвищується порівняно з ПМ;
- відбувається проникнення ПМ у западини та мікронерівності оброблюваної деталі, що виключає ймовірність утворення осередків корозії у западинах, не заповнених ПМ;
- зносостійкість, надійність та довговічність виготовлених або відновлених деталей вища, ніж при використанні окремо взятих технологій ЕІЛ чи ПМ.

Завдяки інтегрованій технології ЕІЛ+ПМ можливі різні варіанти структури поверхневого шару:

- неповне покриття ПМ шорсткості після ЦЕІЛ (фіг. 2);
- повне покриття ПМ шорсткості після ЦЕІЛ (фіг. 3);
- поверхня після механічної обробки, коли залишаються окремі ділянки з матеріалу, сформованого після ЦЕІЛ, і ділянки з ПМ (фіг. 4).

При збільшенні глибини обробки, площа ділянок поверхні з ПМ зменшується, а отримана методом ЦЕІЛ відповідно зростає.

Незважаючи на зазначені вище переваги, спосіб має недоліки:

- низька твердість поверхневого шару;
- спосіб неможливо використовувати для обробки захисних втулок сальникових ущільнень валів насосів, які працюють у негативному абразивному та гідроабразивному оточуючому середовищі;
- спосіб неможливо використовувати для обробки захисних втулок сальникових ущільнень валів насосів, які працюють при радіоактивному опромінюванні тощо.

У даному випадку при ЦЕІЛ формується поверхневий шар і, як правило, на "жорстких" режимах, тобто, при високих показниках енергії розряду, коли робочий струм (I_p) досягає значень більше 10 А. У роботі [Электроискровое легирование металлических поверхностей / Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М. - Кишинев: Штинца, 1985. - С. 43] відзначається, що зі збільшенням I_p (>10 А) на поверхні катода можливе формування відносно товстих шарів (0,15-0,2 мм і більше - так зване "грубе" ЕІЛ), але якісні характеристики таких шарів (суцільність, рівномірність, щільність і т.п.) різко знижуються. Відповідно до цього технічного рішення ЦЕІЛ проводять, варіюючи енергію розряду від 0,036 до 6,8 Дж. При цьому шорсткість поверхні збільшується від $Ra=0,7$ мкм і при енергії розряду, $W_p=6,8$ Дж може досягати $Ra=11,7-14,0$ мкм [Патент UA 82948 C2, МПК B23C 8/00, опубл. 25.03.2008, бюл. № 10], а суцільність шару, як правило, знижується від 100 до 50-60 %.

Погіршення суцільності покриття тягне за собою ряд недоліків:

- зменшення площі опорної поверхні;
- зниження міцності покриття;
- зниження герметичності у пресових з'єднаннях;
- збільшення кількості концентраторів напруги;
- зниження корозійної стійкості та ін.

При цьому відомо, що усунути означені вище недоліки комбінованого покриття можна шляхом армування ПМ металевими включеннями з отриманням МПМ. [Tarelnyk V., Konoplianchenko I., Gaponova O., Tarelnyk N., Martsynkovskyy V., Sarzhanov B., Sarzhanov O., Antoszewski B. Effect of Laser Processing on the Qualitative Parameters of Protective Abrasion-Resistant Coatings. Powder Metall Met Ceram. - 2020. - Vol 58. - P. 703-713. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00127-8>].

Крім цього, відомо, що механічну обробку покриття, сформованого методом ЕІЛ з наступним нанесенням МПМ, можна виконувати шліфуванням на шліфувальних верстатах, але при цьому можливе вкrapлення в поверхневий шар абразивних часток. Тому краще використовувати таку обробку металорізальним інструментом. Враховуючи, що композиційне покриття ЦЕІЛ+МПМ складається з м'якого ПМ і твердих включень шорсткості, сформованої після ЦЕІЛ поверхні, то різці з твердосплавними ріжучими пластинами, які погано працюють на удар, не бажано використовувати, а краще застосовувати різці з матеріалу Р6М5, на ріжучу кромку яких методом ЕІЛ нанесене зносостійке покриття [UA158217 U, МПК: B23H 9/00; B23P 15/00., опубл. 08.01.2025, бюл. № 2/2025]

В основу заявленої корисної моделі поставлено задачу удосконалення способу обробки сталеної втулки сальникового ущільнення вала насоса, який працює, як в звичайних умовах, так і в умовах підвищеної корозійної активності середовища або в умовах радіаційного випромінювання, або при

роботі насоса в середовищі з абразивними частинками та які забезпечують високу міцність, зносостійкість і корозійну стійкість обладнання.

Поставлену задачу вирішують тим, що у способі обробки сталльної втулки сальникового ущільнення вала насоса, що включає формування на поверхні втулки зносостійкого поверхневого шару методом електроіскрового легування електроодом-інструментом на режимах з енергією розряду 0,036-6,8 Дж, нанесення на отриману поверхню металоолімерного матеріалу з подальшою його полімеризацією, механічну фінішну обробку нанесеного металоолімерного матеріалу для забезпечення заданої шорсткості поверхні покриття, згідно з корисною моделлю, як електрод-інструмент при електроіскровому легуванні використовують графіт, а як металоолімерний матеріал застосовують армований полімерний матеріал, при цьому після полімеризації поверхневий шар сформованого покриття проточують на глибину, яку визначають, застосовуючи коефіцієнт К, що дорівнює шорсткості Rz поверхневого шару, сформованого при електроіскровому легуванні графітом як електродом-інструментом.

Згідно з корисною моделлю, у способі при армуванні полімерного матеріалу металом застосовують порошок нікелю з концентрацією в полімерному матеріалі ~60 % за умови, що втулка сальникового ущільнення насоса працює в умовах оточуючого середовища без абразивних включень.

Згідно з корисною моделлю, у способі при армуванні полімерного матеріалу карбідом металу застосовують вольфрамовий порошок ВК6 з концентрацією в полімерному матеріалі ~60 % за умови, що втулка сальникового ущільнення насоса працює в умовах оточуючого середовища без абразивних включень.

Згідно з корисною моделлю, у способі при армуванні полімерного матеріалу нітридом металу застосовують порошок нітриду цирконію з концентрацією в полімерному матеріалі ~80 % за умови, що втулка сальникового ущільнення насоса працює в оточуючому середовищі з радіаційним випромінюванням.

Згідно з корисною моделлю, у способі після полімеризації поверхневий шар сформованого покриття проточують різцем зі зміцненого матеріалу Р6М5, на глибину, яка дорівнює величині шорсткості Rz поверхневого шару, сформованого при електроіскровому легуванні графітом як електродом-інструментом, причому різець з матеріалу Р6М5 зміцнюють нанесенням на його ріжучу кромку зносостійкого покриття методом електроіскрового легування.

У способі, після полімеризації поверхневий шар сформованого покриття проточують різцем зі зміцненого матеріалу Р6М5 на глибину, яка менше величини шорсткості Rz поверхневого шару, сформованого при електроіскровому легуванні графітом як електродом-інструментом, причому різець з матеріалу Р6М5 зміцнюють нанесенням на його ріжучу кромку зносостійкого покриття методом електроіскрового легування.

У способі, після полімеризації поверхневий шар сформованого покриття проточують різцем зі зміцненого матеріалу Р6М5 на глибину, яка більше величини шорсткості Rz поверхневого шару, сформованого при електроіскровому легуванні графітом як електродом-інструментом, причому різець з матеріалу Р6М5 зміцнюють нанесенням на його ріжучу кромку зносостійкого покриття методом електроіскрового легування.

Удосконалення способу полягає у застосуванні ознак, які сформульовані у відмітній частині незалежного пункту формули заявленої корисної моделі і які необхідні та достатні для досягнення технічного ефекту, на досягнення якого спрямовано дане технічне рішення, а саме:

те, що як електрод-інструмент (ЕІ) при електроіскровому легуванні використовують графіт, дає змогу сформувати на поверхні втулки зносостійкий поверхневий шар з шорсткістю поверхні, необхідної для подальшого нанесення ПМ

те, що як МПМ застосовують полімерний матеріал (ПМ), армований або металом, або карбідом металу, або нітридом металу, дає змогу підвищити твердість і зносостійкість ПМ;

те, що після полімеризації поверхневий шар сформованого покриття проточують на глибину, яку визначають, застосовуючи коефіцієнт К, що дорівнює шорсткості Rz поверхневого шару, сформованого при електроіскровому легуванні графітом як ЕІ дає змогу управляти кількістю площі поверхневого шару, армованого ПМ і площі частково проточеної шорсткості поверхневого шару;

те, що після полімеризації поверхневий шар сформованого покриття проточують різцем зі зміцненого методом ЕІЛ матеріалу Р6М5, забезпечує підвищення технологічності фінішної обробки і якість поверхні.

Далі корисна модель описана з посиланнями на креслення і фотографії:

на фіг. 1 показано сальникове ущільнення, де: 1 - корпус сальника; 2 - кільця набивки; 3 - захисна втулка вала сальникового ущільнення;

на фіг. 2 показано схему профілю поверхневого шару обробленої деталі при неповному покритті ПМ шорсткості після ЦЕІЛ, де: 4 - матеріал основи; 5 - дифузійний шар; 6 - матеріал шорсткості сформованої після ЦЕІЛ; 7 - покриття ПМ; 8 - виступ шорсткості, сформованої після ЦЕІЛ.

на фіг. 3 показано схему профілю поверхневого шару обробленої деталі при повному покритті ПМ шорсткості після ЦЕІЛ, де: 4 - матеріал основи; 5 - дифузійний шар; 6 - матеріал шорсткості

сформованої після ЦЕІЛ; 7 - покриття ПМ;

на фіг. 4 показано поверхню з ділянками матеріалу, що сформовано після ЦЕІЛ і ПМ після механічної обробки, де: 4 - матеріал основи; 5 - дифузійний шар; 6 - матеріал шорсткості сформованої після ЦЕІЛ; 7 - покриття ПМ; 8 - виступ шорсткості, сформованої після ЦЕІЛ;

на фіг. 5 показано фото процесу зміцнення поверхні в автоматизованому режимі;

на фіг. 6 показано фото процесу застосування БУФО після ЦЕІЛ;

на фіг. 7 показано фото круглого зразка у вигляді котушки;

на фіг. 8 показано фото круглого зразка у вигляді циліндра;

на фіг. 9 показано фото процесу виготовлення шліфів для металографічних і дюрOMETричних досліджень: диск з вирізаними сегментами зі сталі 40X;

на фіг. 10 показано фото процесу виготовлення шліфів для металографічних і дюрOMETричних досліджень: диски з вирізаними сегментами зі сталі 12X18H10T;

на фіг. 11 показано фото процесу виготовлення шліфів для металографічних і дюрOMETричних досліджень: готові шліфи;

на фіг. 12 показано графіки розподілу мікротвердості поверхневого шару на підкладках зі сталей: 1-30X13, 2-40X, та 3-12X18H10T при ЦЕІЛ з $W_p=6,8$ Дж і $Q=0,2$ см²/хв;

на фіг. 13 показано фото структури сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ + (МПМ + порошок твердого сплаву ВК6);

на фіг. 14 показано графіки розподілу мікротвердості, сформованого покриття в міру поглиблення від поверхні.

Приклади здійснення заявленої корисної моделі.

Зразки зі сталі 40X, 30X13 і 12X18H10T обробляли методом ЕІЛ з використанням електрода-інструмента (ЕІ) з графіту, тобто піддавали цементації методом електроіскрового легування (ЦЕІЛ). При цьому використовували установку моделі: "Елітрон - 52А" і енергію розряду в діапазоні W_p = от 0,6-6,8 Дж.

Зміцнення проводили на токарно-гвинторізному верстаті мод. 16K20. Вібратор кріпили в різцетримачі (фіг. 5). Підведення електрода здійснювали механізмами верстата. Вибір режимів зміцнення (частота обертання шпинделя, подання) проводили виходячи із заданої продуктивності процесу.

Для досліджень використовували спеціальні круглі зразки, виготовлені зі сталей 40X, 30X13 і 12X18H10T у вигляді котушки, що складається з двох дисків, діаметром 50 мм і шириною 10 мм, сполучених між собою проставкою діаметром 15 мм, що має дві технологічні ділянки такого самого діаметра, а також у вигляді циліндра діаметром 50 і завдовжки 100 мм (фіг. 7, 8).

Поверхні дисків і циліндра перед ЦЕІЛ шліфували до $Ra=0,5$ мкм. Зразки закріплювали в патроні токарного верстата і здійснювали ЦЕІЛ.

На поверхню зразків зі сталі 40X, 30X13 і 12X18H10T, після ЦЕІЛ з $W_p=6,8$ Дж і продуктивністю, $Q=0,2$ см²/хв наносили МПМ, який був армований:

- порошком нікелю марки ПНЕ (ГОСТ 972297) з концентрацією в полімерному матеріалі ~60 %;
- вольфрамовим порошком марки ВК6 (ТУ 48-4205-112-2017) з концентрацією в полімерному матеріалі ~60 %;
- порошком нітриду цирконію (специфікація цирконію (специфікація CAS 25658-42-8) з концентрацією в полімерному матеріалі ~80 %.

Після нанесення МПМ проводили часткове видалення, сформованого поверхневого шару, різцем з матеріалу Р6М5, зміцненого методом ЕІЛ, шляхом нанесення на його ріжучу кромку зносостійкого покриття. Зразок з нанесеним МПМ проточували різцем на глибину, яка дорівнювала шорсткості $Rz=60$ мкм, тобто на 0,06 мм.

В цьому випадку площа ділянок, що складаються з матеріалу, сформованого при ЦЕІЛ приблизно дорівнює площі ділянок, що складаються з полімерного матеріалу.

Оброблення БУФО здійснювали на базі токарно-гвинторізного верстата 16K20 (фіг. 6) із застосуванням магнітострикційного перетворювача ПМС-39 та ультразвукового генератора УЗУ-030, технічна характеристика якого наведена в таблиці 1.

Технічна характеристика ультразвукового генератора УЗУ-030

Таблиця 1

Найменування параметра	Вихідне значення
Живлення від мережі змінного струму з номінальною напругою, В	220±10 %
Споживана потужність, Вт	300
Форма вихідного сигналу	Прямокутна
Потужність вихідна, Вт	500
Частота робоча, кГц	18,6

Таблиця 1

Найменування параметра	Вихідне значення
Амплітуда коливань УЗ хвилеводу, мкм	10
Габаритні розміри, мм	400×450×280
Маса, кг	25,4

Для проведення металографічних і дюрOMETричних досліджень із круглих зразків вирізали окремі сегменти (фіг. 9, 10), і виготовляли шліфи (фіг. 11).

Шліфи досліджували на оптичному мікроскопі "Неофот-2", де проводилася оцінка якості шару, його суцільності, товщини та будови зон підшару - дифузійної зони та зони термічного впливу. Одночасно проводився дюрOMETричний аналіз на розподіл твердості в поверхневому шарі та по глибині шліфу від поверхні. Вимірювання мікротвердості проводилося на мікротвердомірі ПМТ-3 вдавлюванням алмазної піраміди під навантаженням 0,05 Н (згідно з ГОСТ 9450-76).

Поверхневу пластичну деформацію поверхневого шару після ЦЕІЛ, нанесення МПМ і зрізання різцем на глибину 0,06 мм проводили шляхом безабразивної ультразвукової фінішної обробки (БУФО).

Контроль шорсткості зміцненої поверхні здійснювався за параметром Ra на профілометри-профілографі мод. 201 заводу "Калібр" шляхом зняття та обробки профілограм.

В таблиці 2 представлені значення загальної глибини зміцненого шару, твердості та шорсткості поверхневих шарів зразків сталі 40X, 30X13 і 12X18H10T після ЦЕІЛ з енергією розряду, $W_p = 0,6; 1,41; 2,83; 3,4$ і $6,8$ Дж і продуктивністю, $Q = 0,2$ см²/хв.

Параметри якості поверхневих шарів зразків сталі 40X, 30X13, 12X18H10T після ЦЕІЛ

Таблиця 2

Енергія розряду, W _p , Дж	Продуктивність, Q см ² /хв	Загальна глибина зміцненого шару, h _ш , мкм	Твердість, HV	Шорсткість Ra, мкм	
				а	R
Сталь 40X					
0,6	0,2	50	987	0,9	4,1
1,41		377	993	2,5	11,3
2,83		658	997	6,2	27,2
3,4		722	1001	9,2	39,6
6,8		910	1050	14.1	63,2
Сталь 30X 13					
0,6	0,2	48	993	1.0	4,3
1,41		358	1000	1,7	11,8
2,83		623	1005	6,7	28,6
3,4		684	1020	8,8	41,3
6,8		860	1100	14.2	65,4
Сталь 12X18H10T					
0,6	0,2	48	960	1.0	5,3
1,41		134	974	1,7	13,5
2,83		200	1013	6,6	29,8
3,4		210	1100	8,7	43,7
6.8		250	1101	14,5	68,8

Як видно з таблиці 2, параметри якості зміцненого шару зразків для кожного матеріалу сталі різні та змінюються залежно від енергетичних параметрів обробки (енергії розряду).

ДюрOMETричний аналіз проведених досліджень показав, що незалежно від матеріалу сталі та енергії розряду твердість зміцненого шару в міру поглиблення плавно знижується та переходить у мікротвердість підкладки. В таблицях 3 і 4 та фіг. 12 показаний розподіл мікротвердості поверхневого шару на підкладках зі сталей 40X, 30X13 та 12X18H10T при ЦЕІЛ з $W_p = 6,8$ Дж і $Q = 0,2$ см²/хв.

Розподіл твердості по глибині шару при ЦЕІЛ сталі 40X і 30X13

Таблиця 3

Глибина шару, $h_{ш}$, мкм											
100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200

Таблиця 3

Твердість, HV											
Сталь 40X											
1020	900	600	500	430	370	350	330	320	310	325	320
30X13											
1090	950	800	720	650	600	630	575	550	560	560	550

Розподіл твердості по глибині шару при ЦЕІЛ сталі 12X18H10T

Таблиця 4

Глибина шару, $h_{\text{ш}}$, мкм											
25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300
Твердість, HV											
1100	1075	950	700	500	350	250	220	200	190	180	185

На фіг. 13 зображена структура зразка сталі 12X18H10T після ЦЕІЛ з подальшим нанесенням композиційного матеріалу, що складається з ПМ і порошку твердого сплаву ВК6 а також розподіл мікротвердості, сформованого покриття в міру поглиблення з поверхні (фіг. 14).

Аналіз мікроструктури (фіг. 13) показав, що при подальшому нанесенні композиційного матеріалу, що складається з МПМ і порошку твердого сплаву ВК6, поверхневий шар складається з 4-х зон. На поверхні розташована зона темного кольору товщиною до 120 мкм, мікротвердість якої знаходиться в межах 820-1120 HV. На кордоні з другою зоною мікротвердість становить 650-700 HV. Нижче, у міру поглиблення, розташована зона світлого кольору, товщиною до 90 мкм, мікротвердість якої становить близько 450 HV. Ще нижче мікротвердість плавно знижується, і на глибині ~ 260 мкм відповідає мікротвердості основи.

Зразки зі сталей 40X, 30X13 та 12X18H10T після ЦЕІЛ з $W_p = 0,6; 3,4; 6,8$ Дж і $Q = 0,2$ см²/хв, нанесення МПМ, який був армований: порошком нікелю марки ПНЕ (ГОСТ 972297) з концентрацією в полімерному матеріалі ~60 %; вольфрамовим порошком марки ВК6 (ТУ 48-4205-112-2017) з концентрацією в полімерному матеріалі ~60 %; порошком нітриду цирконію (специфікація CAS 25658-42-8) з концентрацією в полімерному матеріалі ~80 % і проточування різцем на глибину 0,06 мм, піддавали оброблюванню БУФО на базі токарно-гвинторізного верстата 16K20 із застосуванням магнітострикційного перетворювача ПМС-39 та ультразвукового генератора УЗУ-030. Результати після обробки БУФО представлені в таблицях 5-7.

Параметри якості поверхневих шарів зразків сталі 40X, 30X13 і 12X18H10T після ЦЕІЛ, нанесення МПМ армованого порошком нікелю і проточування на глибину 0,06 мм з наступною БУФО

Таблиця 5

Енергія розряду, W _p , Дж	Продуктивність, Q см ² /хв	Загальна глибина зміцненого шару, h _ш , мкм	Твердість, HV	Шорсткість Ra, мкм
Сталь 40X				
0,6	0,2	45	983	0,2
2,83		653	995	0,3
6,8		901	1010	0,5
Сталь 30X13				
0,6	0,2	44	987	0,2
2,83		616	1010	0,4
6,8		850	1130	0,6
Сталь 12X18H10T				
0,6	0,2	43	990	0,2
2,83		193	1015	0,3
6,8		244	1120	0,5

Параметри якості поверхневих шарів зразків сталі 40X, 30X13 і 12X18H10T після ЦЕІЛ, нанесення МПМ армованого порошком марки ВК6 і проточування на глибину 0,06 мм з наступною БУФО

Таблиця 6

Енергія розряду, W _p , Дж	Продуктивність, Q см ² /хв	Загальна глибина зміцненого шару, h _ш , мкм	Твердість, HV	Шорсткість, мкм
Сталь 40X				
0,6	0,2	46	995	0,2
2,83		655	1010	0,3
6,8		903	1060	0,5
Сталь 30X13				
0,6	0,2	45	1005	0,2
2,83		618	1055	0,4
6,8		851	1110	0,6
Сталь 12X18H10T				
0,6	0,2	44	990	0,2
2,83		194	1020	0,3
6,8		245	1130	0,5

Параметри якості поверхневих шарів зразків сталі 40X, 30X13 і 12X18H10T після ЦЕІЛ, нанесення МПМ армованого порошком нітриду цирконію і проточування на глибину 0,06 мм з наступною БУФО

Таблиця 7

Енергія розряду, W _p , Дж	Продуктивність, Q см ² /хв	Загальна глибина зміцненого шару, h _ш , мкм	Твердість, HV	Шорсткість Ra, мкм
Сталь 40X				
0,6	0,2	47	997	0,2
2,83		657	1018	0,3
6,8		906	1080	0,5
Сталь 30X13				
0,6	0,2	46	1015	0,2
2,83		619	1075	0,4
6,8		852	1121	0,6
Сталь 12X18H10T				
0,6	0,2	45	995	0,2
2,83		195	1025	0,3
6,8		247	1133	0,5

В результаті аналізу таблиць 5-7 встановлено, що товщина зміцненого шару сталі 40X, 30X13 і 12X18H10T після ЦЕІЛ, нанесення МПМ армованого порошком нікелю, вольфрамовим порошком марки ВК6 і порошком нітриду цирконію і проточування різцем на глибину 0,06 мм, з наступною БУФО порівняно з поверхневим шаром цих сталей незначно зменшилась. Наприклад, для сталі 12X18H10T, після ЦЕІЛ з $W_p=6,8$ Дж і $Q=0,2$ $\text{см}^2/\text{хв}$ зменшилась з 250 мкм до 244, 245 і 247 мкм, відповідно після нанесення МПМ, армованого порошком нікелю, вольфрамовим порошком марки ВК6 і порошком нітриду цирконію, а твердість, навпаки, незначно збільшилась з 1101 HV до 1120, 1130 і 1133 HV. Шорсткість поверхні зменшилась з 14,5 до 0,5 мкм.

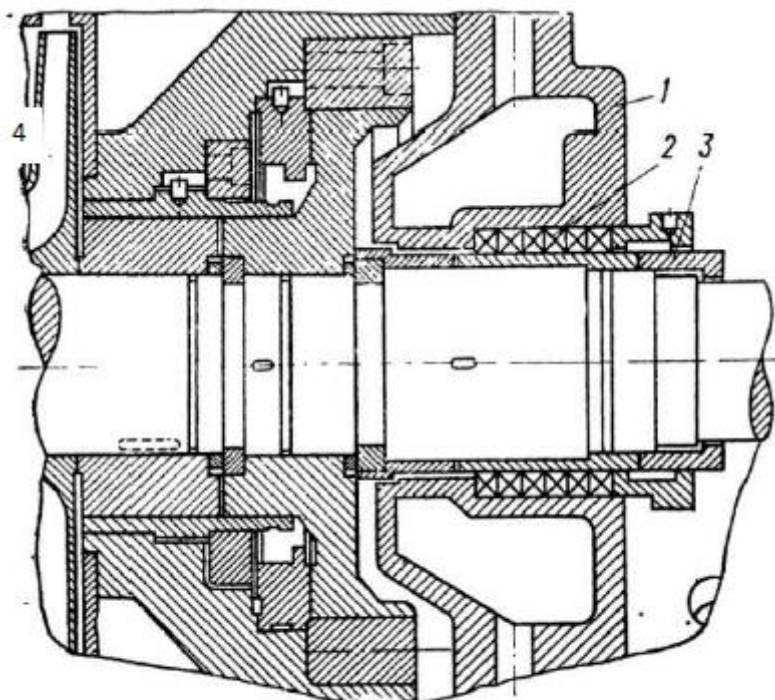


Fig. 1

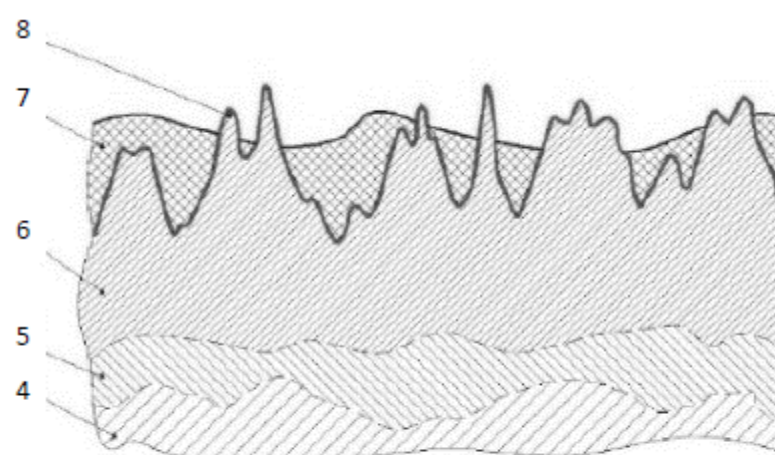


Fig. 2

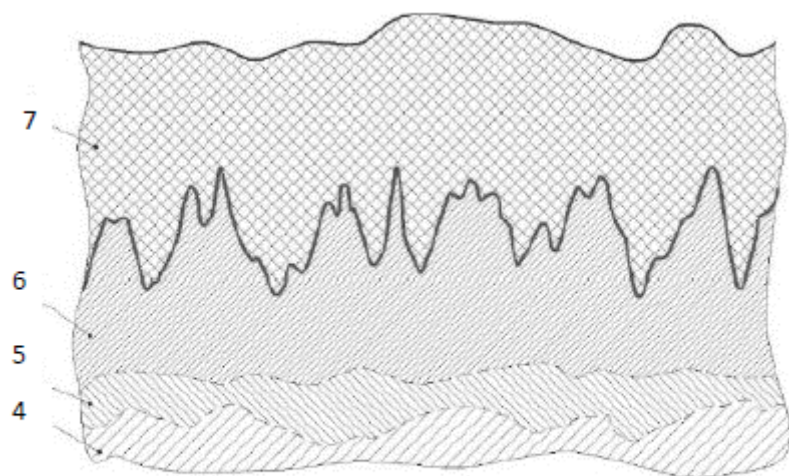


Fig. 3

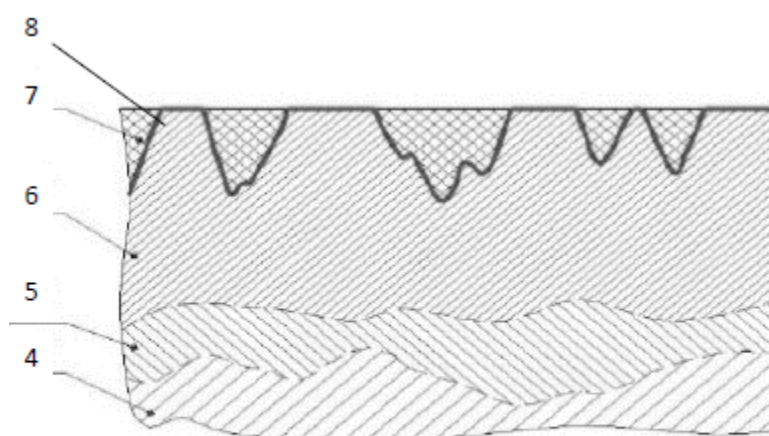


Fig. 4



Fig. 5



Fig. 6

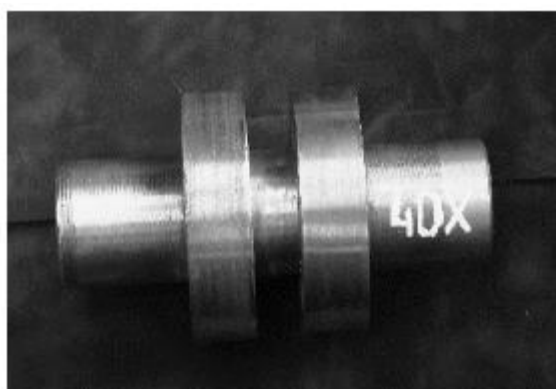


Fig. 7

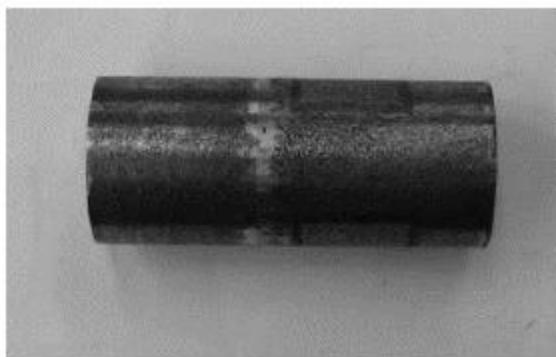


Fig. 8



Fig. 9

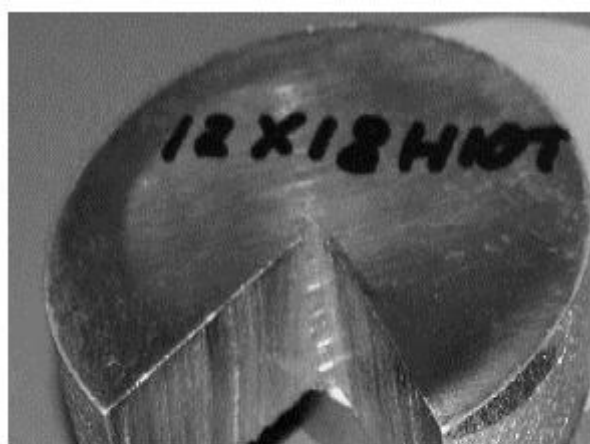


Fig. 10

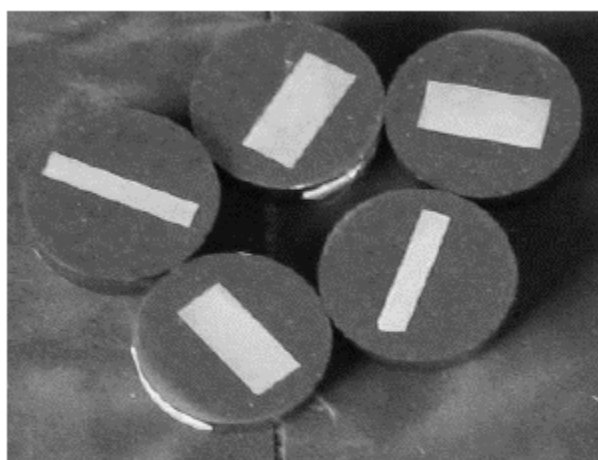
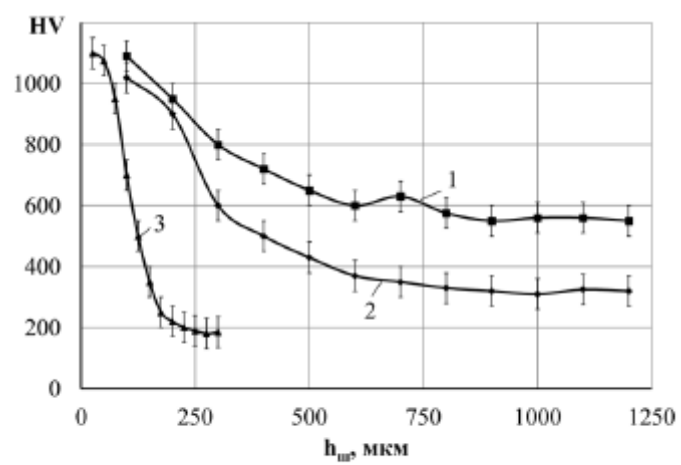
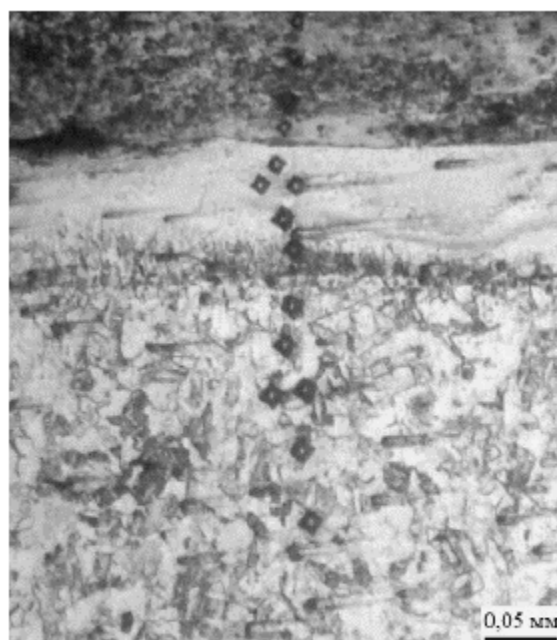


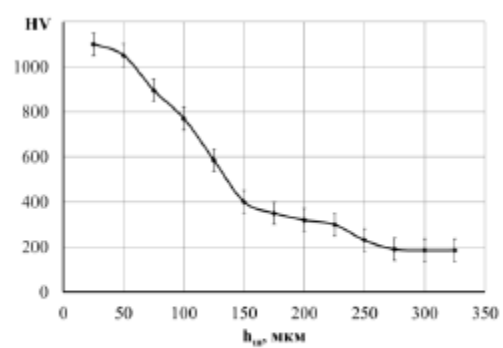
Fig. 11



Фиг. 12



Фиг. 13



Фиг. 14

