

УДК 620.18:620.20: 621.793:622.24.05

І.Б.Прунько¹, Ю.І.Богатчук², М.М.Студент³¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу²Богородчанське виробниче управління підземного зберігання газу³Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України

СТРУКТУРА І ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ СТАЛІ 40Х ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ОБРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРОДАМИ ЗІ СПЛАВІВ Т15К6 ТА ВК8

Методом електроіскрового нарощування електродами з твердосплавних пластин Т15К6 та ВК8 обробляли робочі поверхні штоків нафтопромислових насосів зі сталі 40Х. Електричний розряд між оброблюваною деталлю і електродом сприяє осадженню елементів легування та відновленню поверхні. При цьому утворюється високоміцний поверхневий шар завтовшки 10...20 мкм, який в основному містить карбід. Дослідження структури поверхневого шару деталей за високої роздільної здатності дозволило судити про морфологію поверхонь після оброблення. Майже після всіх режимів оброблення на поверхнях виявили мікротріщини, які сприяють релаксації залишкових напружень нарощених шарів. Проте попри їх наявність роботоздатність виробів після оброблення поверхні вища ніж без оброблення.

Ключові слова: напруження, сталь, сплави, електрод, оброблення.

Гідравлічні поршневі нафтопромислові помпи призначені для перепомпування та нагнітання в свердловини цементнопіщаних і глинистих розчинів, різних рідин та сумішей кислот, які використовуються для оброблення привибійних зон свердловин, гідравлічних розривів пластів тощо. В залежності від типу помпи і умов експлуатації на штоки pomp одночасно діють наступні чинники: створювані тиском перепомпуваного середовища циклічні навантаження від 0 до 40 МПа частотою понад 3 Гц; перепомпувана рідина за температури 80 °С, до складу якої можуть входити нафта, кислоти, солі, різні хімічні реагенти та до 10 % за об'ємом твердих абразивних частинок породи та спеціально введеної суміші різних за формою і розмірами (від декількох мікрометрів до декількох міліметрів) часток; температура довкілля, яка може коливатися від +30 °С до -30 °С [1].

Шток поршня помпи звикло виготовляють зі сталі 40Х (ГОСТ 4543) і розраховують за стійкістю до знакозмінних циклічних навантажень. Поблизу місця розташування поршня його гартують струмами високої частоти на глибину 1,5...2 мм на твердість HRC>50 (для помпових агрегатів НБ-125). В помпувальних установках типу УНЦ1, які призначені для транспортування і подавання в свердловини сумішей кислот, поверхні штоків під ущільненням наплавляють корозійностійким сплавом НХ16С3Р4. Такий покрив підвищує зносостійкість, знижує знос спряжених деталей, є стійким до механічних і теплових (до 850 °С) впливів.

Експертиза пошкоджених штоків виявила нерівномірність їх зносу в місці тертя "шток-ущільнювальна манжета". Абразив, який потрапляє в ущільнення, підвищує коефіцієнт тертя та пришвидшує зношування штока. Гідроабразивне зношування особливо інтенсивне за високої швидкості помпування рідини, яка впродовж короткого часу вимиває глибокі канали на поверхні штоків. Внаслідок зношування шток в місці ущільнення може мати діжку- або сідлоподібну чи конусну форму, а його переріз може стати овальним. Діаметральний знос 78 % проаналізованих штоків становив 1...2 мм, а решти - досягав 3 мм. Середньо-статистично знос штоків бурових pomp на Старунському нафтовому родовищі на глибину 1 мм відбувається вже після 146 годин роботи насоса. Отже основними причинами виходу з ладу штоків є їх корозійно-механічне і гідроабразивне зношування.

Відомо [1], що абразивне зношування починається, коли співвідношення мікротвердості абразиву H_a у глинистому розчині та металу H_m перевищує поріг абразивного різання ($H_a/H_m > 0,7$). Найінтенсивніше зношування відбувається, коли $H_a/H_m = 1...1,2$, а за подальшого його зростання – уповільнюється. Звідси зрозуміло, наскільки важливо регулювати мікротвердість металу штока помпи в залежності від складу перепомпуваного середовища для забезпечення роботоздатності устаткування та подовження міжремонтного ресурсу.

Для зміцнення поверхневих шарів деталей використовують цементацію з наступним гартуванням струмами високої частоти на глибину від 1,5 до 2,0 мм [2], хромування [3], пластичне

© І.Б.Прунько, Ю.І.Богатчук, М.М.Студент

деформування гідродробоструменевим обробленням [4], покриття робочої поверхні штока емаллями з наступним шліфуванням [5], плазмове напилення порошками [6]. Однак ці способи поверхневого зміцнення складні, малопродуктивні, під час експлуатації відшаровуються, викришуються тощо. Все це стримує їх практичне використання. Разом з тим, запропоноване раніше [7] електроіскрове нарощування і легування поверхонь тертя штоків, дозволило досягти їх кращої роботоздатності під час експлуатації деталей.

Мета роботи – дослідивши структуру та рівень залишкових напружень в поверхневих шарах штоків нафтопромислових насосів зі сталі 40X, оброблених методом електроіскрового нарощування електродами з твердосплавних пластин Т15К6 та ВК8, розкрити природу підвищення їх вищої роботоздатності в експлуатаційних умовах.

Методики зміцнення та проведених досліджень

Зміцнення поверхні деталі відбувається внаслідок її легування під дією електроіскрового розряду [8]. Іскровий розряд виникає за напруги між двома електродами 10...200 В та постійного струму 0,2...150 А. При цьому за досягнення енергії, еквівалентної роботі виходу електрона, з поверхні катода (оброблювана деталь) вилітають електрони. На шляху до анода вони пришвидшуються в міжелектродному просторі та іонізують повітря. При цьому кількість іонів і електронів зростає і циклічно виникає іскровий розряд. Бомбардуючи анод, електрони вибивають з нього іони, які осідають на катоді. Таким чином, поверхня анода руйнується (електрична ерозія), а на поверхні оброблюваної деталі (катода) формується покриття. Для безперервного горіння іскрового розряду електроди зближали на віддаль, необхідну для збудження іскри, використавши для цього високочастотний вібратор. Зміцнений шар при цьому може комплексно легуватися іонами матеріалу анода, азотом та киснем. Для відновлення поверхні штоків використали промислове устаткування "Елітрон -24А" для електроіскрового легування [9]. Детальніше устаткування для поверхневого легування та принципи вибору тривалості оброблювання описано раніше [7].

За електроди для електроіскрового нарощування і зміцнення штоку насоса, виготовленого зі сталі 40X, використали твердосплавні пластинки Т15К6 (79 % WC, 15 % TiC та 6 % Co) та ВК8 (82 % WC та 8 % Co). Поверхню штока нарощували в 4 проходи з використанням розряду різної потужності. Параметри режимів нарощування наведені в таблиці 1.

Для визначення внутрішніх напружень у покритті використали схему, при якій поверхневий шар наноситься на вільнонезащемлену пластину і рівноважна форма якої встановлюється під час нанесення цього шару. Залишкові напруження вираховуються за формулою [10]:

$$\sigma_{max} = [E \cdot h_1 \cdot (h_1 - h_2)] / 6 \cdot \rho_k \cdot h_2 ,$$

$$\rho_k = L^2 / 8 \cdot \delta_{max} ,$$

де σ_{max} - максимальні внутрішні напруження у поверхневому шарі; E - модуль пружності матеріалу пластини; L - довжина пластини; h_1 - товщина пластини; h_2 - товщина нарощеного шару; ρ_k - радіус кривизни пластини; δ_{max} - максимальний прогин пластини.

Таблиця 1.

Параметри режимів і матеріали для нарощування поверхні штока насоса та мікротвердість обробленого шару

Режим	Матеріал електроду	Ємність блоку накопичення, мкФ	Амплітуда імпульсів напруги, В	Частота вібрації інструменту, Гц	Енергія одиничного імпульсу, Дж	Мікротвердість HV ГПа
T1	Т15К6	60±8	75±15	390±70	0,22	10,2
T2		150±15	75±16	250±50	0,42	21,4
T3		300±30	71±15	125±25	0,75	10,5
B1	ВК8	60±8	75±15	390±70	0,22	11,5
B2		150±15	75±16	250±50	0,42	11,6
B3		300±30	71±15	125±25	0,75	13,5

Після нанесення поверхневого шару зі зміцнених штоків вирізали заготовки і виготовляли з них шліфи згідно [11]. Для травлення структури використали 3%-ний спиртовий розчин HNO₃.

Металографічні дослідження провели на електронному мікроскопі EVO-40 XVP (Carl Zeiss) з системою мікроаналізу EVO-4XVP.

Результати досліджень та їх аналіз

Завдяки особливості формування зображення в електронному мікроскопі під час досліджень структури поверхневого шару сталі 40X після електроіскрового нарощування і зміцнення була змога судити не лише про структуру цього шару у поперечному перерізі, але і про топографію рельєфу обробленої поверхні. Поверхня зміцненого шару за використання твёрдосплавних пластинок Т15К6 нагадує місячний рельєф, глибина і діаметр кратерів на якому залежить від режиму оброблення. Рельєф з найменшими перепадами по глибині кратерів зафіксовано після режиму Т1, а з найбільшими – після Т3. На дні чорних виразок, які найхарактерніші для режиму Т3, часто спостерігали досить великі включення оксидів. Крім того на зовнішній поверхні деталей після всіх режимів оброблення спостерігали мікротріщини, які поширювалися на всю товщину обробленого шару (рис. 1). Характерно, що практично всі вони орієнтовані під кутом $\sim 45^\circ$ стосовно оброблюваної поверхні, що може бути наслідком зсувових процесів. Їх могли спричинити залишкові напруження в зміцненому шарі, які релаксують шляхом утворення мікротріщин.

Найкращий результат за мікротвердістю обробленого шару зафіксовано після використання режиму Т2 (21,4 ГПа) [7]. Після використання саме цього режиму отримали найтовщий (до 15 мкм) зміцнений шар (рис. 1 б).

Аналіз елементного складу поверхневих шарів, зміцнених твёрдосплавними пластинками Т15К6, свідчить, що найвищий інтегральний (в межах виділених на рис. 1 площ) вміст вольфраму та кобальту є після застосування режиму Т3, середній – Т2 і найнижчий – Т1. Вміст титану практично однаковий після режимів Т2 і Т3, але вдвічі нижчий після Т1. Отже після використання режиму Т1 в поверхневому шарі виявлено практично вдвічі менше W та Ti ніж після режимів Т2 і Т3. Разом з тим саме ці елементи утворюють карбіди чим забезпечують твердість поверхневого шару. Карбідотвірні елементи (W, Ti) розташовані по зростаючій за мірою спорідненості до вуглецю і стійкості карбідів.

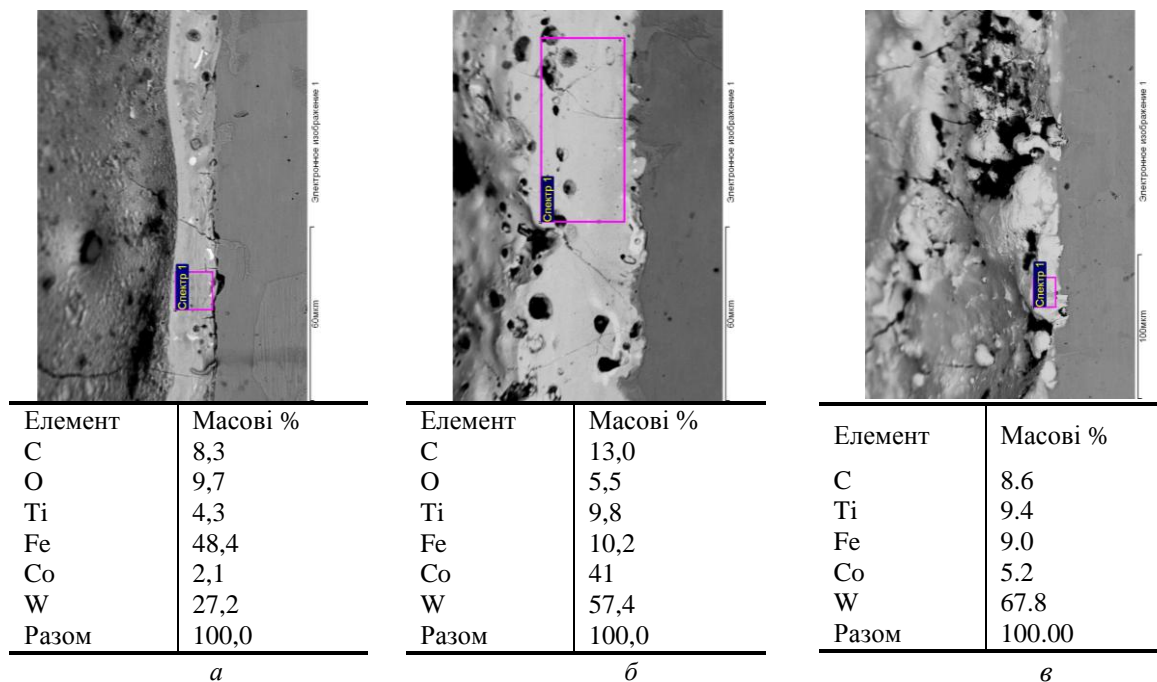


Рис. 1. Характерна структура та склад (за результатами мікроаналізу) поверхневого шару сталі 40X після електроіскрового нарощування і зміцнення з використанням твёрдосплавних пластинок Т15К6 за режиму Т1 (а), Т2 (б) та Т3 (в)

Сильні карбидотвірні елементи Ti та W утворюють самостійні карбіди TiC, WC, W₂C. Кобальт, як і в твёрдосплаві, виконує роль зв'язки для карбідів як високоміцних наповнювачів. Це підтверджує також його достатньо рівномірний розподіл по товщині зміцненого шару (рис. 2б). Піки на розподілі Fe відповідають мінімумам на розподілах Ti і W (рис. 2а), що свідчить про

нерівномірність їх розподілу. Високий вміст Fe в поверхневому шарі після оброблення за режимом T1 пояснює його найнижчу мікротвердість (табл. 1). Крім того мікротвердість поверхні після режиму T3 з максимальним вмістом W, Ti та Co не є найвищою. Можливо це є наслідок недостатньої кількості вуглецю у обробленому шарі після застосування режиму T3. Адже після режиму T2, коли досягнули максимальної мікротвердості поверхневого шару, вміст вуглецю є відчутно вищим.

За високої роздільної здатності в структурі поверхневого шару після режиму T2 спостерігали евтектику TiC-WC з карбідами завбільшки 0,05...0,1 мкм (рис. 3). Саме вони забезпечили найвищу мікротвердість поверхневого шару після оброблення за режимом T2, оскільки такої евтектики не спостерігали в структурі поверхневих шарів, оброблених за режимами T1 і T3.

Візуально мікроструктура поверхневого шару сталі 40X після електроіскрового нарощування і зміцнення з використанням твердого сплаву BK8 практично не відрізняється від отриманої за використання сплаву T15K6. Разом з тим за мікротвердістю поверхневого шару вони відрізняються, причому досить суттєво (табл. 1).

Максимальну мікротвердість після електроіскрового оброблення сплавом BK8 зафіксували за використання режиму B3 (13,5 ГПа). Мікроструктура цього шару подібна до отриманої з використанням сплаву T15K6 за режиму T2, який також має максимальну мікротвердість 21,4 ГПа. В обох випадках у площинах косих шліфів виявлено значну кількість різних за величиною округлих чорних ямок на дні яких проглядаються частки (рис. 1б і 4в), що можуть бути оксидами. Величина і кількість цих структурних елементів залежить від використаного режиму оброблення. Найменшу їх кількість зафіксовано після використання режиму B1, а найбільші за розмірами – B2. За використання режиму B3 спостерігали високу густину дрібних оксидів, що узгоджується з високим інтегральним вмістом кисню в поверхневому шарі.

Аналіз елементного складу поверхневих шарів, зміцнених твердосплавними пластинками BK8 свідчить, що вміст в них вольфраму (інтегральний в межах виділених на рис. 4 площ) практично не залежить від режиму оброблення. Кобальт взагалі не ідентифікували після використання режиму B1, де найвищий вміст заліза, що і зумовило найнижчу мікротвердість. Враховуючи те, що вміст вуглецю в поверхневому шарі після оброблення за режимом B3 вищий ніж після оброблення за режимом B1, то вищу мікротвердість його поверхневого шару можна зв'язати з більшим вмістом карбідів вольфраму.

Результати визначення максимальних залишкових напружень у нарощених поверхневих шарах наведено у табл. 2. Їх аналіз свідчить про те, що за використання електроду T15K6 в поверхневому шарі утворюються залишкові напруження розтягу незалежно від режиму оброблення. Величина напружень визначається не лише параметрами металургійних процесів під час нарощування шару (температура нагрівання, швидкість остигання та величина зменшення об'єму металу під час кристалізації), а ще і схильністю нарощеного шару до релаксації напружень шляхом утворення мережі мікротріщин. Зокрема, за максимальних напружень розтягу (за використання режиму T1) зафіксували мінімальне, а за мінімальних (за режиму T2) - максимальне розтріскування. Оптимальне співвідношення мікротвердості та залишкових напружень отримано за використання режиму T2 з середніми значеннями енергії одиничного імпульсу та частоти вібрації інструменту (табл. 1).

У випадку використання як електроду сплаву BK8 напруження розтягу у нарощеному шарі виявили лише за використання режимів B1 і B2, а за використання режиму B3 виникають напруження стиску (табл. 2). Оскільки тріщини у нарощеному шарі в останньому випадку практично відсутні, то релаксація залишкових напружень розтягу могла відбуватися шляхом деформування матриці в проміжках між порами заповненими оксидами, кількість яких у цьому випадку є найбільшою. Оскільки коефіцієнт термічного розширення оксидів менший ніж матриці, то вони можуть зменшувати усадку матриці під час кристалізації нарощеного шару. Крім того, за використання режиму B3 формування нарощеного шару відбувається з мінімальною взаємодією (перемішуванням) розплаву нарощеного сплаву зі сталлю 40X (підложка), оскільки частота вібрації інструменту у цьому випадку мінімальна (табл. 1).

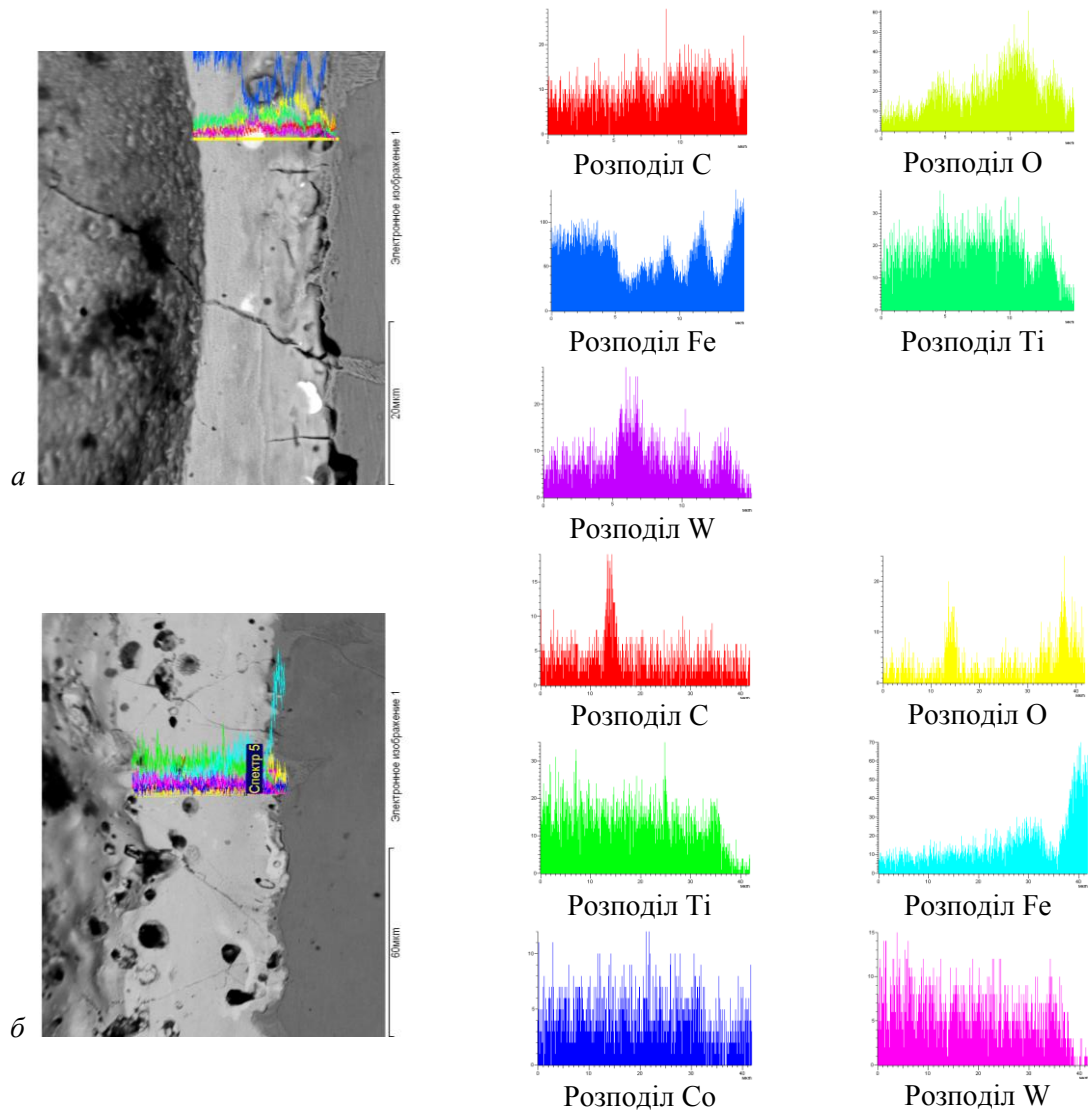


Рис. 2. Розподіл елементів по товщині поверхневого шару сталі 40X після електроіскрового нарощування і зміцнення з використанням твердосплавних пластинок T15K6 за режиму T1 (а), T2 (б).

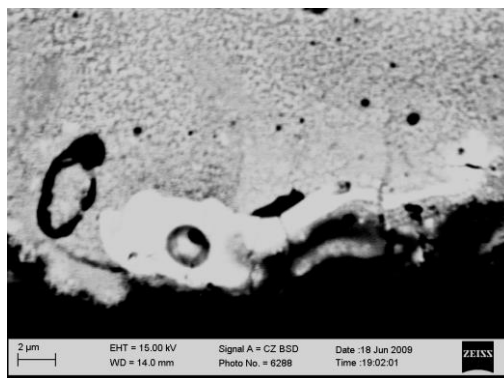
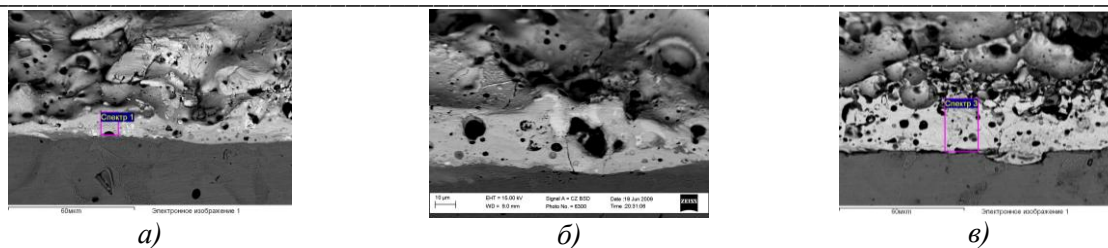


Рис. 3. Мікроструктура поверхневого шару сталі 40X після електроіскрового нарощування і зміцнення з використанням твердосплавних пластинок T15K6 за T2



Елемент	Масові %
C	11,1
O	2,3
Fe	31,1
W	55,5
Разом	100,0

Елемент	Масові %
C	16,8
O	6,6
Fe	17,9
Co	4,2
W	54,5
Разом	100,0

Рис. 4. Характерна структура та склад (за результатами мікроаналізу) поверхневого шару сталі 40X після електроіскрового нарощування і зміцнення з використанням твердосплавних пластинок ВК8 за режиму В1 (а), В2 (б) та В3 (в)

Таблиця 2.

Максимальні залишкові напруження у нарощених електроіскровим обробленням шарах

Режим	Матеріал електроду	Середня товщина нарощеного шару, мкм	Прогин балки, мкм	Залишкові напруження, МПа
T1	T15K6	10	150	1340
T2		15	120	710
T3		15	150	900
B1	BK8	10	105	900
B2		20	195	900
B3		20	-20	-90

Це зумовлює максимальний вміст у нарощеному шарі карбідів WC і, як наслідок, забезпечує максимальну (з отриманих для електроду сплаву BK8) мікротвердість.

Висновки. На основі проведених досліджень структури нарощених шарів, отриманих за використання різних режимів електроіскрового оброблення, виявлено, що за використання електродів T15K6 та BK8 максимальна товщина шарів становила 15 та 20 мкм, їх мікротвердість 21,4 та 13,5 ГПа, одержали їх за енергії одиничного імпульсу 0,42 та 0,75 Дж та частоти вібрації інструменту 250 ± 50 та 125 ± 25 Гц відповідно. За використання електродів T15K6 (режими T1, T2, T3) та BK6 (режими B1, B2) формуються залишкові напруження розтягу що спричиняє розтріскування нарощеного шару. Максимальна взаємодія нарощеного шару зі сталлю, а значить і мінімальний вміст карбиду вольфраму реалізується за використання режимів B1 та T1, а мінімальна взаємодія і максимальний його вміст – T2 та B3.

1. Мкртычан Я.С. Повышение эффективности эксплуатации буровых насосных установок. – М.: Недра, 1984. – 207 с.
2. ГОСТ 6031. Насосы буровые. Основные параметры.
3. Караев М.А. Гидравлика буровых насосов. – М.: Недра, 1983 – 208 с.
4. Нефтепромысловое оборудование: Справочник / Под. ред. Е.И. Бухаленко. – М.: Недра, 1990. – 559 с.
5. Литвинов В.М. Повышение надежности нефтепромысловых насосов. – М.: Недра, 1978. – 191 с.
6. Прунько І.Б., Богатчук Ю.І., Марков А.Д. Відновлення зношених поверхонь штоків нафтопромислових насосів електроіскровим нарощуванням і зміцненням // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під аг.ред. В.В. Панасюка. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2009. - С. 5697-574.
7. Николіч А.С. Поршневые буровые насосы. – М.: Недра, 1973. – 224 с.
8. Коган Я.Д. Технологические методы повышения надежности и долговечности деталей машин. – М.: МАДИ, 1988. – 52 с.
9. Напряжение и деформации в элементах микросхем / В.С. Сергеев, О.А. Кузнецов, Н.П. Захаров, В.А. Летягин – М.: Радиосвязь, 1987. – 88 с.