

УДК 539.3

В.В.Широков, Я.О.Шахбазов

Українська академія друкарства

### ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНЖЕНЕРІЇ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ГІДРОРОЗПОДІЛЬНИКІВ

*Розглянуті можливості оптимізації режимів нанесення порошковим методом дифузійних зносо- і корозійнотривких покриттів на основі бору з хромом на сталеві золотники і взірці-свідки та дослідити їх властивості*

Ключові слова: покриття, надтверді матеріали, комбінована обробка, зносостійкість.

У сучасному машинобудуванні, приладобудуванні та практично у всіх галузях виробництва застосовуються гідрофіковані машини та механізми.

Робочі поверхні відповідальних деталей елементів гідросистем потребують захисту. Згідно з проведеними дослідженнями, суттєвого успіху можна добитися формуванням багатофункціональних зносо- та корозійнотривких борохромових покриттів. Цей напрямок включає два шляхи – формування дифузійних захисних покриттів порошковим методом та методом одночасного дифузійного насичення поверхневих шарів матеріалів бором та хромом з розплаву літію.

Впровадження недорогих методів нанесення якісних дифузійних багатофункціональних покриттів, інгредієнти яких входять до ресурсної бази країни і які можна отримати на широкій номенклатурі сталей та сплавів, які використовуються у вузлах тертя машин і механізмів дозволяє очікувати суттєвого економічного ефекту.

Необхідно приймати до уваги високі вимоги до шорсткості поверхні та забезпечення сумісності не лише із змащувачими середовищами, але і з деталями ущільнень та зовнішнім середовищем. Допустимі зазори між робочими поверхнями золотник-корпус до 0,02мм,  $R_a = 0,10 \dots 0,63$  мкм і  $R_z = 0,5 \dots 3,2$  мкм. Тому, перед нанесенням покриттів необхідно доведення робочих поверхонь до заданої шорсткості методами механічної обробки. Враховуючи високі вимоги до шорсткості робочих поверхонь при їх механічній обробці слід застосовувати технологічний метод різання інструментами з надтвердих матеріалів з попереднім пластичним деформуванням. Полікристалічні надтверді матеріали мають значну перевагу порівняно з твердим сплавом, перевершують його за твердістю та термостійкістю, що і визначає високу зносостійкість на високих швидкостях різання при безударному навантаженні.

Потенціал наукових досягнень [1-5] в області технологічного забезпечення якості обробки плоских поверхонь залізвуглецевих сплавів торцевим фрезеруванням інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, свідчить про пошук шляхів підвищення ефективності обробки за рахунок сполучення в одній операції різання та поверхневого пластичного деформування. В оглядових роботах ставиться задача: пошук, вдосконалення та розробка способів підвищення якості робочих поверхонь деталей в умовах високошвидкісного різання.

Метою даної роботи було оптимізувати умови нанесення порошковим методом дифузійних зносо- і корозійнотривких покриттів на основі бору з хромом на сталеві золотники і взірці-свідки, дослідити їх властивості та узагальнити результати з урахуванням первинних робіт [6-10].

Спосіб комбінованої обробки інструментами, оснащеними надтвердими матеріалами, полягає у тому, що початкове формування поверхневого шару оброблюваної поверхні здійснюють шляхом поверхневого пластичного деформування за допомогою деформуючих елементів, а кінцеве зрізання частини зміцненого шару здійснюють різальними елементами. Такий підхід дозволяє забезпечити високу якість обробленої поверхні за рахунок значного зменшення остаточних напружень і її шорсткості. Таким чином, запропонований спосіб дає можливість в першу чергу зміцнити оброблювану поверхню та сформувати раціональні фізико-механічні властивості поверхневого шару оброблюваної деталі, тобто на попередньому етапі нанесення покриттів створюються умови забезпечення інженерії робочих поверхонь деталей.

Найпростіша робоча секція гідравлічного розподільника складається з корпуса, золотника, двох пружин, кришки та гідравлічної рідини І-20. На сьогоднішній день для виготовлення корпусів гідравлічних систем широко використовуються чавуни, а для виготовлення золотників - сталі 20Х, 40Х з хромовими покриттями товщиною до 25 мкм. Електролітичне хромування використо-

вують для підвищення зносо- і корозійної тривкості цієї трибопари, зокрема, щоб запобігти утворенню та потраплянню в робочу рідину (І-20) продуктів корозії з робочих поверхонь золотника.

Метод гальванічного хромування попри ряд переваг (дешевизну, простоту тощо) має свої недоліки. До недоліків можна віднести: нерівномірність покриття на виробках складної конфігурації, слабку адгезію та екологічну шкідливість виробництва при їх нанесенні. Крім цього, постійне підвищення вимог до навантаження (від 250 до 400 атм) та розширення меж застосування вимагає зменшення переливів гідравлічної рідини через поверхні стику золотник – корпус (зменшення посадочних зазорів).

Таким чином виникає дві задачі: перша – заміна методу хромування; друга – отримання нового покриття на сталях різного класу, зокрема малолегованих типу 20Х, 40Х які б відповідали всім переліченим вимогам.

Об'єкти досліджень – широко застосовні матеріали гідравлічних трибопар – сталі 45, 3, 20Х, 40Х, чавун ВЧ 40 – 10, СЧ 30. Нанесення на поверхні відповідних деталей оптимізованих за хімічним і фазовим складом борохромових покриттів дозволяє значно підвищити їх зносотривкість та забезпечити високу корозійну стійкість.

Дифузійне борохромування здійснювали у порошкових сумішах складу: 92% -  $V_4C$ , 4% - Ст, 4 - бура. Насичення здійснювали в напівгерметичних контейнерах із сталі 12ХН10Т після нагрівання в електропечі опору до температур  $900^{\circ}C$  -  $1050^{\circ}C$  та витримки протягом 5 год. (рис.1). В результаті дифузійного насичення у порошкових сумішах сталей 45, Ст.3, 20Х, 40Х та чавунів ВЧ 40 – 10, СЧ 30 отримано якісні борохромові покриття товщиною 50-70 мкм, мікротвердість яких сягає 5 і 12 ГПа відповідно.

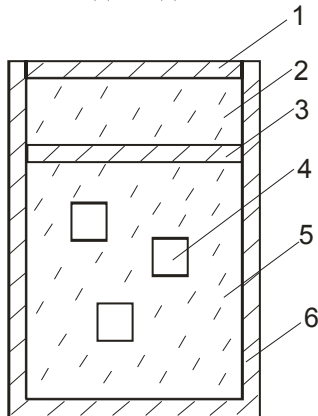


Рис. 1. Схема контейнера для нанесення покриттів:

- 1) кришка контейнера;
- 2) порошок деревного вугілля;
- 3) прокладка, яка відділяє робочу суміш від вугілля;
- 4) досліджувані зразки ( вироби );
- 5) робоча суміш;
- 6) контейнер.

Щодо якості отриманих покриттів, слід відмітити, що після дифузійного насичення за температур  $900^{\circ}C$  -  $950^{\circ}C$  утворюється покриття з великою кількістю різноорієнтованих дефектів (рис.2, а). За температур  $950^{\circ}C$  -  $1000^{\circ}C$  утворюється відносно однорідне покриття з невеликою кількістю паралельно розташованих тріщин (рис.2,б). При температурах насичення  $1000^{\circ}C$  -  $1050^{\circ}C$  утворюється якісне, рівномірне покриття без видимих дефектів.

Елементний аналіз отриманого покриття виявив його неоднорідність по перерізу. Внутрішні шари його містять високу концентрацію бору, який входить до складу  $Fe_2B$ , що має характерну голчасту структуру. У зовнішніх шарах присутня значна кількість (40-50 %) хрому (рис.2,в). Це можна пояснити високою дифузійною рухливістю атомів бору у сталі порівняно з хромом, що зумовлене значною відмінністю між атомними радіусами цих елементів. Тому на перших етапах високотемпературного нагріву дифузійний шар формується в основному з боридів. При цьому концентрація бору в порошковій суміші зменшується, тому на завершальних етапах (після 4 год ізотермічної витримки) у формуванні покриття основну роль відіграє хром. Висока концентрація хрому на поверхні сприяє підвищенню корозійної тривкості покриттів в агресивних середовищах.

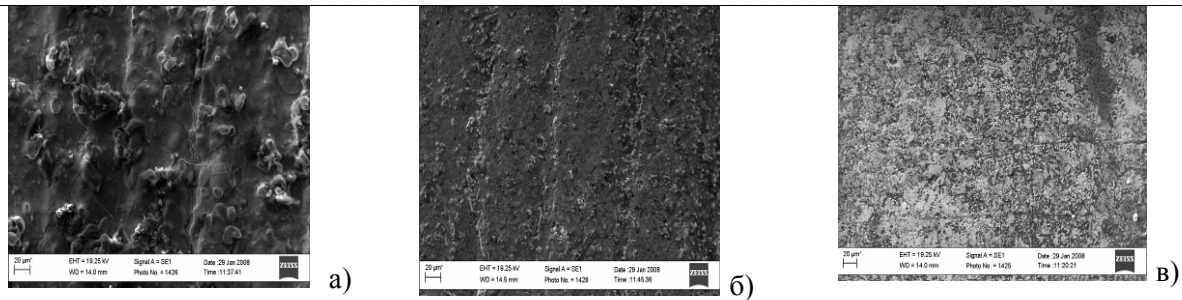


Рис. 2. Типова мікроструктура поверхні борохромового покриття на сталі 45 з порошкових сумішей за температур:  
а) 900<sup>0</sup>С - 950<sup>0</sup>С; б) 950<sup>0</sup>С - 1000<sup>0</sup>С; в) 1000<sup>0</sup>С - 1050<sup>0</sup>С.

Випробування на зносотривкість проводили за умов граничного змащування гідравлічною оливою I-20 і контактного тиску 2,5 і 5 МПа. Покриття, отримані на досліджуваних матеріалах за температури 900-1000<sup>0</sup>С, нестійкі і руйнуються на перших етапах притирання за абразивним механізмом. Про це свідчить вихідна дефектна структура покриття і характерні розміри продуктів зношування. Покриття, отримані за температури 1000-1050<sup>0</sup>С, відзначаються високою зносотривкістю (рис.3). Час їх притирання не перевищує 10 хв. На цьому етапі в мастилі фіксуються в основному продукти зношування контртіла, розміри яких характеризують нормальний процес механохімічного зношування. Після притирання стабілізується коефіцієнт тертя, інтегральні температури спряжених поверхонь і мастила не перевищують 70-75<sup>0</sup>С.

Борохромованням у порошкових сумішах на сталях 45, ст.3, 20Х, 40Х, чавунах ВЧ 40 – 10, СЧ 30 за температур насичення 1000<sup>0</sup>С - 1050<sup>0</sup>С можна отримати рівномірні за товщиною дифузійні покриття, мікротвердість яких досягає 5 – 12 ГПа. Елементний аналіз показав, що бор і хром у покриттях розміщений нерівномірно. Внутрішні шари його містять високу концентрацію бору, який входить до складу Fe<sub>2</sub>B, що має характерну голчасту структуру. У зовнішніх шарах присутня значна кількість хрому. Боридні фази, для яких характерна висока мікротвердість, сприяють підвищенню стійкості покриттів до зносу, а хромові – до корозії.

Розрахунки показали, що швидкість лінійного зносу борохромового покриття за усталеного тертя становить 5,97÷6,34\*10<sup>-6</sup> мм/год. Таким чином, тривалість експлуатації борохромованої сталі в умовах тертя, протягом якого товщина покриття зменшується удвічі, становить 14500÷15900 год.

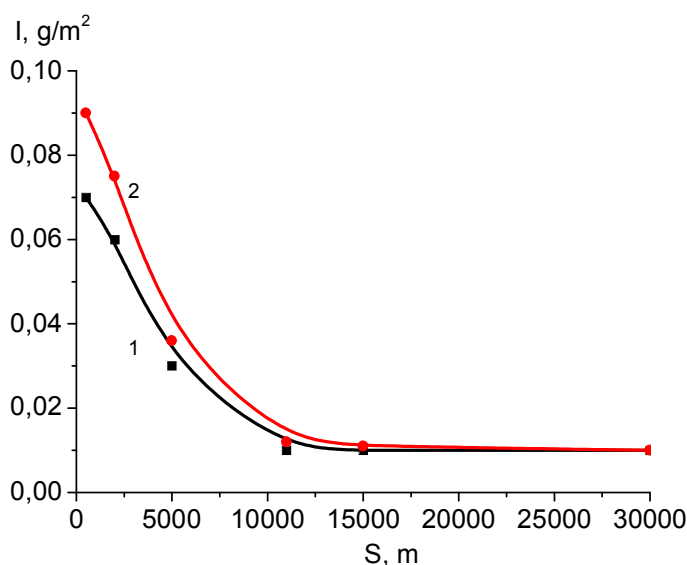


Рис. 3. Знос сталі 45 з борохромовим покриттями у мастилі I-20. Контактний тиск:  
1 – 2,5 МПа; 2 – 5 МПа.

Метод борохромовання реалізовано для нових та для реновації зношених золотників на Львівському заводі фрезерних верстатів (рис. 4 і 5). Рекомендації щодо режиму нанесення покриття.  
©В.В.Широков, Я.О.Шахбазов

тів на довгомірні вироби типу золотників наступні: склад суміші - 92% -  $V_4C$ , 4% - Cr, 4 – бора; температура  $1000^{\circ}C$  -  $1050^{\circ}C$ , тривалість 5 год. Хімічний та фазовий склад покриттів забезпечує їх стійкість до зносу і корозії.

Борохромування сталі 60С. Сталі типу 60С2 слугують конструкційним матеріалом для ряду деталей, що входять в номенклатуру складових дросельних клапанів гідророзподільників автотранспортної, дорожньої та будівельної техніки. Проте високий вміст вуглецю та кремній гальмують процеси борохромування. Результати апробації рекомендованих режимів свідчать, що вони можуть бути застосованими і в цьому випадку. Зокрема після борохромування шорсткість зростає незначно. Згідно металографічного аналізу тріщин не виявлено. Структура металу після нанесення покриття зернена. В покривах спостерігаються боридні голки.

Отже, борохромуванням у порошкових сумішах на сталях отримано рівномірні за товщиною дифузійні покриття, мікротвердість яких досягає 5 – 12 ГПа. Внутрішні шари його містять високу концентрацію бору, який входить до складу  $Fe_2B$ , у зовнішніх шарах присутня значна кількість хрому. Боридні фази сприяють підвищенню стійкості покриттів до зносу, а хромові – до корозії.

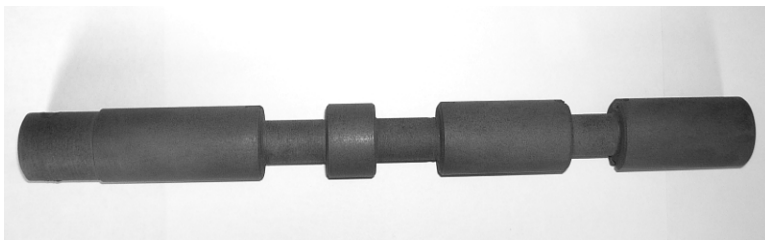


Рис.4. Загальний вигляд золотника з борохромовим покриттям та корпусу.



Рис. .5. Промислова партія гідророзподільників.

Метод борохромування застосовано для реновації деталей трібовузлів гідравлічних систем на Львівському заводі фрезерних верстатів. Розроблено і впроваджено режими нанесення покриттів на вироби типу золотників: склад суміші: 92% -  $V_4C$ , 4% - Cr, 4 – бора; температура  $1000^{\circ}C$  -  $1050^{\circ}C$ , тривалість 5 год.

Проведені дослідження показали можливість одночасного комплексного насичення поверхні сталевих деталей бором та хромом. Для цього застосовували спосіб отримання відповідних покриттів у розплавах легкоплавких металів.

Попередня термодинамічна оцінка можливих основних і супутніх фізико-хімічних процесів під час борохромування в розплавах та розчинності бору, хрому і компонентів сталей дозволила вибрати як транспортне середовище літій, а матеріал реакційних контейнерів – сталь 12Х18Н9Т.

Згідно діаграм стану, розчинність хрому в літії за  $1000^{\circ}C$  дуже низька і не перевищує 0,016 ат.%. Для того, щоб інтенсифікувати процес хромування, застосовують джерело дифузанта – оксид хрому. Активний хром утворюється в розплаві літію внаслідок реакції відновлення хрому з його оксиду:  $Cr_2O_3 + 6Li = 3Li_2O + 2Cr$ . Крім того, розплав літію очищує поверхню металу підкладки від оксидних та інших плівок, що сприяє утворенню ювенільних поверхонь та стимулює адсорбційні та дифузійні процеси при формуванні покриву. Розчинність бору в літії на 2-3 порядки вища, ніж хрому, тому застосовують джерело дифузанта – дрібнодисперсний порошок бору.

©В.В.Широков, Я.О.Шахбазов

Борохромовання проводили за температури 850 та 950 °С протягом 8 годин. Експериментально встановлено, що ізотермічна витримка досліджуваних матеріалів (сталі 45, 40Х) у реакційному середовищі (4%В+7%Cr+89% Li), що містить чистий хром, як джерело дифузанта, навіть за температури 950°С не сприяє отриманню двокомпонентних покриттів, що пов'язано з низькою дифузійною активністю хрому.

Застосування оксиду хрому Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> замість чистого хрому дозволило отримати покриття, до складу яких входить як бор, так і хром. Так, після ізотермічної витримки сталі 45 у середовищі (4%В+7%Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+89% Li) за температури 850 °С протягом 8 год отримано покриття товщиною до 150 мкм. Покриття має голчасту будову, характерну для боридних фаз і складається переважно з бору. Як свідчить елементний аналіз та мікротвердість, за цієї температури в матрицю з транспортного розплаву дифундує переважно бор, оскільки його концентрація на поверхні покриття досягає 16,8 мас.%, а хрому - не перевищує 4 %. Це пов'язано з низькою швидкістю дифузії хрому у матрицю сталі за цієї температури.

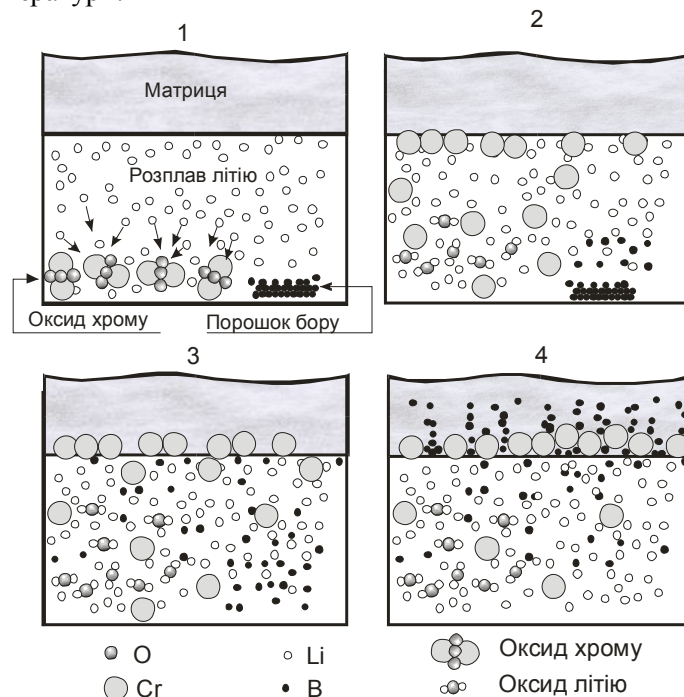


Рис. 6. Схема формування борохромових покриттів у розплаві літію.

1 етап: відновлення хрому літієм з оксиду Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

2 етап: перенесення хрому до поверхні сталі; розчинення бору в літії;

3 етап: дифузія хрому в сталь, адсорбція бору на поверхню хромового покриття;

4 етап: дифузія бору у хромовану сталь, формування борохромового покриття.

З підвищенням температури ізотермічної витримки від 850 до 950 °С зростає товщина покриттів та їх мікротвердість. Покриття одношарове. Під видимим шаром покриття на глибині до 250-280 мкм утворюється дифузійна зона з підвищеною мікротвердістю – до 22 МПа. У приповерхневих ділянках товщиною 80-100 мкм покриття суцільне, на межі з матрицею дифузійний шар має голчасту будову, характерну для боридних фаз.

Пошаровий аналіз хімічного складу покриття показав, що максимальна концентрація бору і хрому спостерігається на поверхні, де досягає відповідно 13,8...14,0 і 10,4...14,1 мас.%. В окремих місцях вміст хрому становить 20,8 мас.% внаслідок його кристалізації на поверхні при охолодженні ампули з розплавом. Максимальний вміст бору зберігається у підповерхневому шарі покриття товщиною від 50 до 100-120 мкм (видима зона) і плавно знижується у дифузійній зоні (до 300 мкм). Концентрація хрому у підповерхневому шарі зменшується і на глибині 50-80 мкм становить 1,6-2%. На границі покриття з матрицею спостерігається підвищена порівняно концентрація вуглецю.

Аналіз фазового складу покриття показав, що у зовнішньому суцільному шарі покриття присутні монобориди FeB, сполуки типу Cr<sub>0,9</sub>Fe<sub>1,1</sub>B<sub>0,9</sub> і сліди Fe<sub>2</sub>B. Нижній шар неоднорідний і складається з голок твердих боридів і карбоборидів Fe<sub>3</sub>(C, B) і Fe<sub>23</sub>(C,B)<sub>6</sub> та м'якшої фази твердого

розчину бору, хрому та вуглецю в альфа-залізі. Третій шар містить залишки бориду заліза і альфа-фази; четвертий шар - вихідна структура сталі.

Таким чином, метод дифузійного насичення у розплаві літію дає можливість одночасного комплексного насичення поверхні сталевих деталей бором та хромом.

Запропоновано механізм формування борохромових покриттів у розплаві літію, схема якого наведена на рис.6.

Використання оксиду хрому в якості джерела дифузанта дозволяє інтенсифікувати процес насичення розплавом хромом. Активний хром утворюється в результаті реакції:  $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 6\text{Li} = 3\text{Li}_2\text{O} + 2\text{Cr}$ . Згідно термодинамічного аналізу, відновлення літієм хрому з його оксиду енергетично вигідніше, ніж розчинення, оскільки відбувається з виділенням 210 кДж/моль енергії, а розчинення бору і хрому у літії – з її поглинанням (відповідно 6,5 і 35,1 кДж/моль).

Тому в розплаві буде утворюватися активний атомарний хром. Наступний етап – перенесення хрому до поверхні сталі, його адсорбція і дифузія в матрицю. Водночас відбувається розчинення бору в літії. Оскільки процес більш енергозатратний, насичення транспортного середовища бором відбувається повільніше, ніж хромом. Наступний етап – перенесення бору до поверхні сталі, його адсорбція і дифузія вглиб матриці, на якій вже утворилося хромове покриття. Таким чином, утворюється дифузійна зона, збагачена бором і хромом. Оскільки радіус бору на 30 % менший, ніж заліза, а хрому – на 6 % більший, глибина проникнення бору у сталь у 1,5 рази більша, ніж хрому. У приповерхневих шарах, де концентрація дифузандів найвища, співвідношення вмісту компонентів (в ат.%):  $\text{B}:\text{Cr}:\text{Fe}:\text{C} = 34:11:28:26$ , тобто атомів бору в залізо дифундує, принаймні, втричі більше, ніж хрому. Характер розподілу вуглецю в сталі свідчить про його витіснення з приповерхневих шарів бором і хромом.

**Висновок.** Розроблено новий спосіб одночасного нанесення двокомпонентних (борохромових) покриттів у середовищі «розплав літію - оксид хрому – порошок бор». Встановлено механізм формування покриття. Показано, що застосування оксиду хрому як джерела дифузанта сприяє інтенсифікації процесу насичення транспортного розплаву хромом, в результаті чого на першому етапі формування покриття відбувається його адсорбція на поверхні сталі та дифузія в матрицю. Наступний етап - адсорбція та дифузія в сталь розчиненого з порошку бору, радіус якого на 34 % менший, ніж хрому. Отримано покриття товщиною до 300 мкм з максимальною концентрацією бору і хрому на поверхні відповідно 13,8...14,0 і 10,4...14,1 мас.% та мікротвердістю до 22 ГПа. Встановлено фазовий склад покриттів. У зовнішньому суцільному шарі покриття присутні монобориди  $\text{FeB}$  та  $\text{Fe,CrB}$  і сліди  $\text{Fe}_2\text{B}$ . Нижній шар складається з  $\text{Fe}_3(\text{C, B})$  і  $\text{Fe}_{23}(\text{C,B})_6$ , і твердого розчину бору, хрому та вуглецю в альфа-залізі. Третій шар містить залишки  $\text{FeB}$  і альфа-фази.

Метод одночасного борохромовання з літію дозволяє у 2-3 рази скоротити тривалість нанесення покриттів порівняно з поетапним.

1. Новіков М.В., Шепелєв В.О., Клименко С.А., Лаврінєнко В.І. Технології механообробки інструментами з надтвердих матеріалів і твердих сплавів у ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2005. – Вип. 2 – с. 91 – 101.
2. Виговський Г.М., Крижановський В.Б., Кур'ята П.В. та ін. Температурні поля при обробці металів фрезами із надтвердих матеріалів: фізична постановка задачі, її математичне і програмне забезпечення//Вісник Житомирського державного технологічного університету, 2001.-вип.16.- С. 60
3. Крижанівський В.Б. Програмне та математичне забезпечення процесу формування температурних полів при торцевому фрезеруванні//Процеси механічної обробки в машинобудуванні, 2007.- Випуск 5 (1) .-С.88
4. Лоєв В.Ю.,Кравчук О.М. Торцеве фрезерування широких плоских поверхонь нежорстких деталей.Сучасний стан проблеми//Процеси механічної обробки в машинобудуванні,2009.-Випуск 7.-С.114
5. Мельничук П.П., Лоєв В.Ю. Новий спосіб фінішної обробки плоских поверхонь деталей торцевим лезовим інструментом//Процеси механічної обробки в машинобудуванні,2009.-Випуск 7.- С.178.

6. Патент на корисну модель №44185 від 25.09.09р. Бюл№.18.від 25.09.2009р., G01N13/00/.Спосіб нанесення дифузійних борохромових покриттів/В.В. Широков, Л.А. Арендар, Є.М. Рудковський, Х.Б. Василів, Н.Б. Рацька
7. Підвищення корозійної тривкості сталі 45 дифузійним борохромованням з металевих розплавів/ Широков В.В., Василів Х.Б., Арендар Л.А.Эффект. реализации научн., ресурсного и пром. потенциала в совр. усл. Мат. 10-ой ежегодн. Межд.Научно- Практ. конф. и блиц выставки, 18-22 февраля 2010г., п. Славское,Карпаты,260-262.
8. вплив борохромовання на зносотривкість сталі 45 за обмеженого машення/ В.В.Широков, Л.А.Арендар, Х.Б.Василів/Тези доп, МНТК, «Сучасні проблеми трибології», Київ,19-21 травня 2010.- К.: ІВЦ АЛКОН НАН України, 2010, -200с. с. 119.
9. Особливості формування та властивості борохромових покриттів, отриманих на сталях у розплаві літію. В.В. Широков, Х.Б.Василів, Л.А.Арендар, Є.М.Рудковський/ФХММ, №4, 2010, с.13-20.
10. підвищення зносотривкості сталей нанесенням багатокомпонентних покриттів на основі бору і хрому/Л.А.Арендар, В.В.Широков, А.В. Шостак Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: Материалы Одиннадцатой международной конференции, 10 – 14 февраля 2011 г., п. Плавья, Карпаты – Киев: УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2011, 321 с.,с.266-268.