

УДК 539.62: 621.793.8: 669.268

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ БОРОХРОМОВИХ ПОКРИВІВ, ОТРИМАНИХ НА СТАЛЯХ У РОЗПЛАВІ ЛІТІЮ

В. В. ШИРОКОВ, Х. Б. ВАСИЛІВ, Л. А. АРЕНДАР, Є. М. РУДКОВСЬКИЙ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Розроблено та апробовано новий спосіб одночасного нанесення на сталі двокомпонентних борохромових покривів у середовищі розплав літію–оксид хрому–бор. Встановлено механізм формування покриву: спочатку транспортний розплав збагачується хромом, відновленим з оксиду, а далі порошок бору розчиняється. Тому на сталі спочатку формується хромовий покрив, який згодом легують бором. Метод одночасного борохромовання з літію дає можливість у 2–3 рази скоротити тривалість нанесення покривів порівняно з поетапним.

Ключові слова: *хромоборидні покриви, дифузія, розплав літію, борохромовання.*

Для забезпечення зносотривкості поверхневих шарів виробів із заліза, вуглецевих сталей та багатьох тугоплавких металів застосовують борування, внаслідок якого утворюються високотверді ($HV = 2000$ і вище) бориди. Боруванням найчастіше отримують двофазні ($FeB + Fe_2B$) чи однофазні (Fe_2B) шари та перехідні на основі твердого розчину бору в залізній чи іншій матрицях [1–11]. Між однофазними покриттями і матрицею градієнт напружень незначний, для двофазних виникає їх різкий перепад на міжфазних границях. Як правило, у шарі монобориду реалізуються напруження розтягу, а дибориду – стиску. Перші істотно знижують пластичність покриву. Вже за незначних навантажень розтягом, стиском і, особливо, ударом він руйнується аж до відшарування [10, 11]. Така ситуація можлива і за контактної взаємодії спряжених поверхонь тертя. При цьому відколювання твердих уламків особливо небажане, оскільки за тертя вони відіграють роль абразиву, який порушує цілісність поверхневих шарів, а отже, інтенсифікує зношування.

Відомо, що за спільного насичення оброблюваної поверхні сталевих виробів хромом і бором можливе утворення модифікованого шару, в якому поряд з високими твердостями, але крихкими боридами заліза формуються бориди хрому значної твердості (до $HV = 2300$) та з високим опором тріщиноутворенню за динамічних навантажень [10]. Оскільки бориди хрому і заліза мають однаковий характер зв'язку та близькі параметри ґраток, взаємно розчинні одні в одних, борохромованням можна досягти однорідної рівноважнішої, на відміну від голкоподібної (борування), структури, а відтак, сприятливішого розподілу залишкових напружень. Тому згідно з працями [6–8] роботоздатність борохромованих шарів інколи у 1,5–1,75 рази вища, ніж борованих. Крім того, борохромованням можна не лише знизити крихкість поверхневих шарів, але підвищити їх корозійну тривкість за практично однакових твердості та зносотривкості порівняно з борованими [6–8].

Борохромові покриття зазвичай отримують послідовним високотемпературним насиченням бором і хромом у розплавах солей і оксидів; у газових середовищах; з паст (обмазок); гальванотермічним методом [2, 6, 8, 10]. Хоча ці технології постійно вдосконалюють, діапазон їх застосування обмежений. Насамперед це пов'язано із низькою деформівною здатністю боридів, зумовленою пористістю, за-

брудненістю шкідливими домішками з транспортних та супутніх середовищ, залишковими напруженнями, специфічною будовою дифузійних шарів. Наносять покриття у декілька етапів, через що збільшується тривалість процесу. Дані про ефективні способи одноетапного насичення поверхні сталі бором і хромом обмежені. Як правило, застосовують високотемпературну ізотермічну або ізотермічно-ступінчасту витримку чи термоциклування у порошкових сумішах та обмазках на основі карбиду бору, ферохрому, бориду та оксиду хрому, бури тощо. Крім згаданих недоліків, цими методами не можна забезпечити високу якість покриття на внутрішніх та розвинених зовнішніх поверхнях деталей. Ефективніші тут способи нанесення покриттів у металевих розплавах [12–17], теорію і практику яких розроблено у ФМІ НАН України та сьогодні активно розвивають в інших країнах [14]. Так вдається отримувати боридні, хромові та інші покриття з окремих ванн.

Нижче теоретично обґрунтовано та розроблено спосіб одноетапного борохромовання залізоборидних сплавів з металевих розплавів. Суть відомого методу нанесення дифузійних покриттів з розплавів металів полягає ось у чому. У металеві контейнери (ампули) завантажують вироби і вводять джерело дифузанта, зокрема, дрібнодисперсні порошки елементів у кількості, необхідній для формування покриття. У барокамері, за необхідності, в інертній атмосфері, наприклад очищеному аргону, ампули заповнюють розплавом легкоплавкого металу (літієм, натрієм, свинцем) і герметизують. Контейнери нагрівають до заданої температури, витримують в ізотермічному чи неізотермічному режимах, охолоджують на повітрі та розгерметизовують у барокамері. Вироби очищають від транспортного розплаву.

Вибираючи транспортний розплав для нанесення дифузійних покриттів, необхідно враховувати низку факторів [17]. Зокрема, слід мінімізувати корозійний вплив рідкометалевого середовища на матеріали виробу та робочої ампули, забезпечити утворення ювенільної поверхні виробів перед нанесенням покриттів. Найповніше цим умовам відповідають розплави лужних металів, зокрема, натрію та літію. Розчинність заліза, нікелю, вольфраму, ніобію, титану та інших компонентів сталей у цих металах незначна. Зокрема, при 1000°C в літії розчинність заліза становить 0,01, ніобію $6,7 \cdot 10^{-3}$, молібдену 10^{-3} , нікелю 0,2, титану 0,02, вольфраму 0,0001 at.%. У натрії розчинність цих елементів не перевищує $1 \dots 2 \cdot 10^{-4}$ at.%. Натрій та літій відновлюють оксидні плівки з поверхні конструкційних матеріалів, забезпечуючи формування ювенільних поверхонь [17]. Вироби після нанесення покриттів легко очищаються від решток транспортного розплаву у воді чи бутанолі.

Рушійною силою перенесення дифузанта з рідкої фази у тверду є різниця його хімічних потенціалів у транспортному розплаві і металі основи, які є системою двох незмішуваних розчинів, де розчиняється дифузانت. Тому його дифузія з розплаву в основу можлива за умови більшого хімічного потенціалу дифузанта в рідкій фазі, ніж у твердій.

Що менша розчинність твердого металу, то вища його активність у розчиннику [17]. Це положення дає можливість окреслити шляхи отримання багатоконпонентних дифузійних покриттів у середовищі легкоплавких металів. Отже, вводячи до складу ванни дифузанти з різною розчинністю, можна отримати багатоконпонентні покриття заданого складу.

Результати про розчинність бору в натрії та літії і енергозатрати на розчинення відсутні. Відомо, що бор з цими металами утворює низку нестійких за високих температур інтерметалідів [18, 19]. У залізі та його сплавах він розчиняється слабо ($< 0,13$ at.%,), але формує стійкі бориди FeB , Fe_2B , Fe_4C , Cr_2B , CrB_2 , CrB , V_4C , TiB_2 тощо) з ентальпіями утворення $-50 \dots -150$ kJ/mol. Тому перенесення бору з рідкої фази у тверду енергетично вигідне, що підтверджено експеримен-

тально: вироби зі сталей та тугоплавких металів борують у розплавах натрію чи літію, використовуючи як джерело дифузанта дрібнодисперсний порошок бору [13, 15, 16].

Нанесення хромових покривів у середовищі літію чи натрію малоефективне [12]. Розчинність хрому в літії при 900...1000°C не перевищує 0,0016 at.%, у натрії – 0,0002 at.%, час насичення становить десятки годин і суттєво залежить від температури, а розчинення за 900...1000°C супроводжується поглинанням енергії 25...56 і 215...220 kJ/mol, відповідно [12]. Менш енергозатратним у цьому температурному діапазоні є відновлення хрому з оксиду Cr_2O_3 , яке в натрії протікає з виділенням 50...70, а в літії 205...210 kJ/mol енергії (рис. 1). Тому, щоб інтенсифікувати насичення транспортного розплаву атомами хрому та пришвидшити формування покриву, доцільно використовувати літій як транспортний розплав і оксид хрому Cr_2O_3 як джерело дифузанта. У результаті реакції відновлення оксиду хрому літієм ($\text{Cr}_2\text{O}_3 + 6\text{Li} = 3\text{Li}_2\text{O} + 2\text{Cr}$) можливе збагачення транспортного середовища активними атомами хрому, який переноситься до поверхні виробів, адсорбується на ній та дифундує в матрицю, формуючи покрив [12]. Отже, розплав літію як транспортне середовище і бор та оксид хрому Cr_2O_3 як джерела дифузанти можна використовувати для нанесення двокомпонентних покривів на основі бору і хрому. Так вдається позбутися основної причини етапності нанесення бору і хрому: низької дифузійної активності хрому порівняно з бором, оскільки спочатку формуються шари, насичені хромом, а потім їх легують бором. Тобто, оскільки оксид хрому як джерело дифузанта пришвидшує хромування, слід сподіватись, що у середовищі літій–бор–оксид хрому можна отримати двокомпонентні покриви з однієї ванни: на початковому етапі у матрицю виробів дифундуватиме хром, відновлений літієм з оксиду, а відтак – бор, концентрація якого в розчині поступово збільшуватиметься внаслідок розчинення порошкової фракції.

Відомі оптимальні режими хромування, які забезпечують утворення покривів товщиною не менше 50...100 μm з концентрацією хрому у приповерхневих шарах від 5%: середовище (5...7% $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Li}$), температура витримки 900...950°C, тривалість 10...15 h [12]. Для нанесення боридних покривів вироби витримують у розплаві (5...6 mass.% B – Li) при 850...950°C упродовж 6...10 h [13, 15, 16]. На основі цих даних вибрано режими для борохромування сталей.

Методика експерименту. Сталь 45 у металевих розплавах борохромували за таких умов: середовище – розплав літію; джерело дифузанта – дрібнодисперсні порошки оксиду хрому Cr_2O_3 (5...7 mass.%) та аморфного бору (ХЧ) 5...6 mass.%; температура витримки 850...1050°C; тривалість 8...10 h. Контейнери для нанесення покривів виготовляли з корозійнотривкої у літій сталі 12Х18Н10Т. Їх заповнювали розплавом у барокамері в атмосфері аргону, герметизували, нагрівали у печі типу СШОЛ до заданої температури, витримували упродовж заданого часу і охолоджували на повітрі.

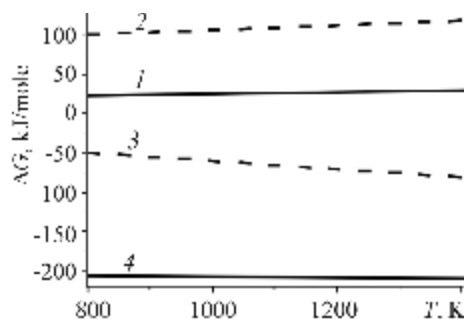


Рис. 1. Температурні залежності ізобарно-ізотермічних потенціалів розчинення хрому в літії (1) та натрії (2) і відновлення хрому з оксиду Cr_2O_3 натрієм (3) і літієм (4).

Fig. 1. Temperature dependence of energy dissolution of chromium in Li (1) and Na (2) and reducing of chromium from Cr_2O_3 oxide by sodium (3) and lithium (4).

Мікроструктуру покривів оцінювали металографічним методом на оптичному мікроскопі "Neophot-2", сканівному електронному EVO 40XVP зі системою мікрорентгеноспектрального аналізу на енергодисперсійному рентгенівському спектрометрі INCA ENERGY 350. ДюрOMETричний аналіз виконували за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3. Фазовий склад матеріалів визначали дифрактометром ДРОН-3.

Результати експерименту та їх обговорення. Після ізотермічної витримки сталі 45 у середовищі літій-бор-оксид хрому при 850°C впродовж 8 h отримано покриття товщиною до 150 μm. Він має голчасту будову, характерну для боридних фаз, і складається переважно з бору. Як свідчить елементний аналіз, за цієї температури в матрицю з транспортного розплаву дифундує переважно бор, оскільки його концентрація на поверхні покриття досягає 16,8 mass.%, а хрому не перевищує 4 mass.%. Це пов'язано з низькою за цих умов швидкістю дифузії хрому у матрицю сталі. Мікроструктуру та розподіл мікротвердості елементів за глибиною покриття наведено на рис. 2 і 3.

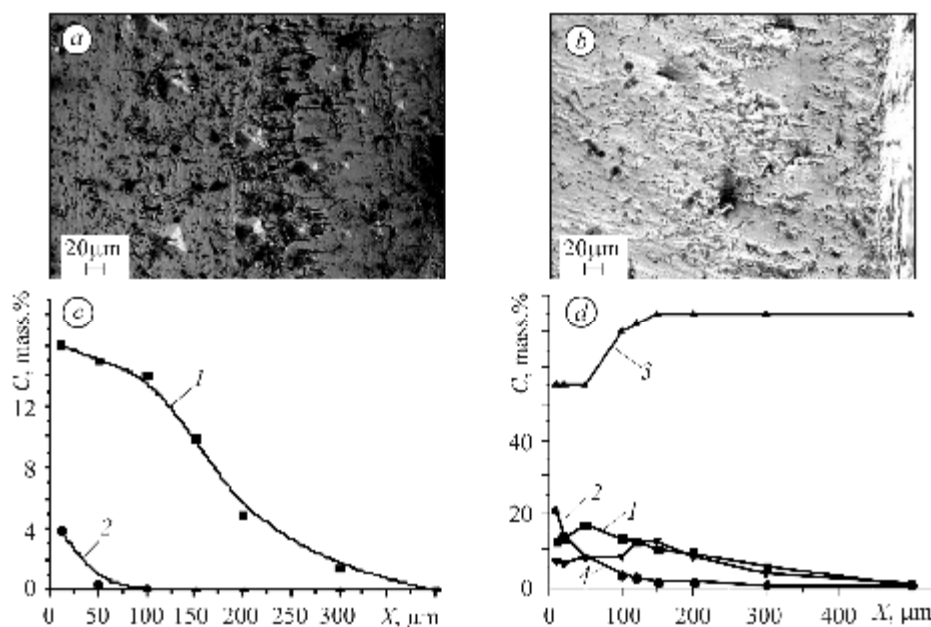


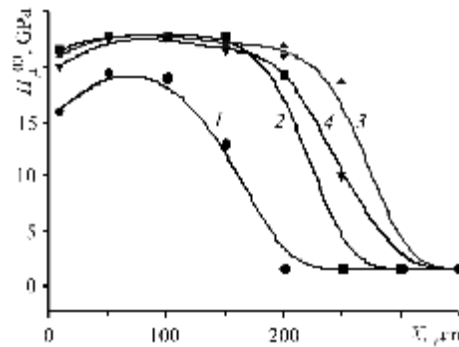
Рис. 2. Мікроструктура (a, b) та хімічний склад (c, d) борохромових покривів на сталі 45. Температура витримки: a, b – 850°C; c, d – 950°C, тривалість 8 h; 1 – B; 2 – Cr; 3 – Fe; 4 – C.

Fig. 2. Microstructure (a, b) and chemical composition (c, d) of boron-chromium coating on steel 45. Holding temperature: a, b – 850°C; c, d – 950°C, duration 8 h; 1 – B; 2 – Cr; 3 – Fe; 4 – C.

З підвищенням температури ізотермічної витримки від 850 до 1050°C та часу витримки зростають товщина покривів та їх мікротвердість (рис. 2 і 3). Покриття одношаровий, його товщина досягає 250...300 μm, мікротвердість 22 МПа. Під видимим його шаром на глибині до 280...320 μm утворюється дифузійна зона з підвищеною мікротвердістю. У приповерхневих ділянках товщиною 120...150 μm покриття суцільний, на межі з матрицею дифузійний шар має голчасту будову, характерну для боридних фаз. Порівняно з покриттями, отриманими за 850°C, кінці голок закругленіші, товщина їх більша, вони розташовані не тільки вздовж нормалі до поверхні, але і під деяким кутом.

Рис. 3. Мікротвердість борохромових покривів на сталі 45. Режими нанесення:
 1 – 850°C; 2, 4 – 950°C;
 3 – 1050°C. Тривалість:
 1–3 – 8 h; 4 – 10 h.

Fig. 3. Microhardness of boron-chromium coatings on steel 45. Application regimes:
 1 – 850°C;
 2, 4 – 950°C; 3 – 1050°C.
 Duration: 1–3 – 8 h; 4 – 10 h.



Пошаровий аналіз хімічного складу покриву показав, що максимальна концентрація бору і хрому на поверхні досягає відповідно 13,8...14,0 і 10,4...14,1 mass.%. В окремих місцях вміст хрому становить 20,8 mass.% внаслідок його кристалізації на поверхні під час охолодження ампули з розплавом. Максимальний вміст бору зберігається у підповерхневому шарі покриву товщиною від 50 до 100...120 μm (видима зона) і плавно знижується у дифузійній зоні (до 300 μm). Концентрація хрому у підповерхневому шарі зменшується і на глибині 50...80 μm становить 1,6...2%. На межі покриву з матрицею виявлено підвищену концентрацію вуглецю. Аналіз фазового складу покриву (рис. 4 і 5) виявив, що у його зовнішньому суцільному шарі присутні монобориди FeB, сполуки типу Cr_{0,9}Fe_{1,1}B_{0,9} і сліди Fe₂B.

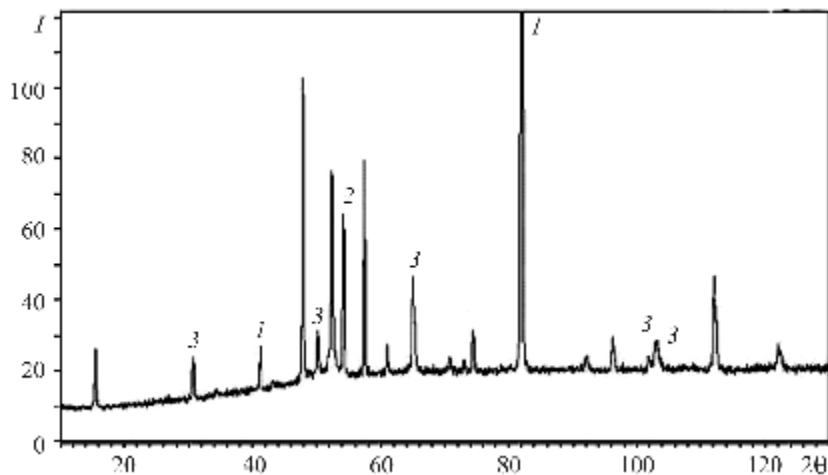


Рис. 4. Дифрактограма поверхні борохромових покривів на сталях.
 Фази: 1 – Fe₂B; 2 – FeB; 3 – Cr_{0,9}Fe_{1,1}B_{0,9}.

Fig. 4. Diffraction spectrum of boron-chromium coatings on steels.
 Phases: 1 – Fe₂B; 2 – FeB; 3 – Cr_{0,9}Fe_{1,1}B_{0,9}.

Нижній шар неоднорідний і складається з голоч твердих боридів і карбоборидів Fe₂B, Fe₂(C,B) і Fe₂₃(C,B)₆ та м'якшої фази твердого розчину бору, хрому та вуглецю в α-залізі. Третій шар містить твердий розчин бору та вуглецю в залізі; четвертий – вихідна структура сталі.

Таким чином, метод дифузійного насичення у розплаві літію дає можливість одночасно комплексно насичувати поверхню сталевих деталей бором та хромом. Запропоновано механізм формування борохромових покривів у розплаві літію (рис. 6).

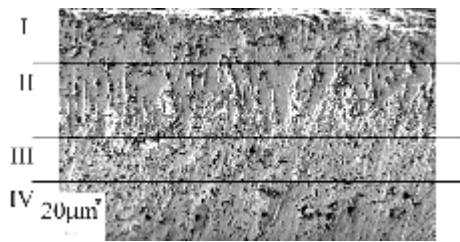


Рис. 5. Структура борохромових покриттів, отриманих на сталях у розплаві літію:
 I – FeB, (Fe,Cr)B, сліди Fe₂B; II – Fe₂B, твердий розчин B, Cr у Fe; (Fe)₃(C,B), (Fe,Cr)B; III – твердий розчин B, Cr, C у Fe; IV – вихідна структура.

Fig. 5. Structure of boron-chromium coatings on steel 45, obtained in the lithium melt:
 I – FeB, (Fe,Cr)B, traces of Fe₂B; II – Fe₂B; B, Cr in Fe; (Fe)₃(C,B), (Fe,Cr)B solid solution;
 III – B, Cr, C in Fe solid solution; IV – initial structure.

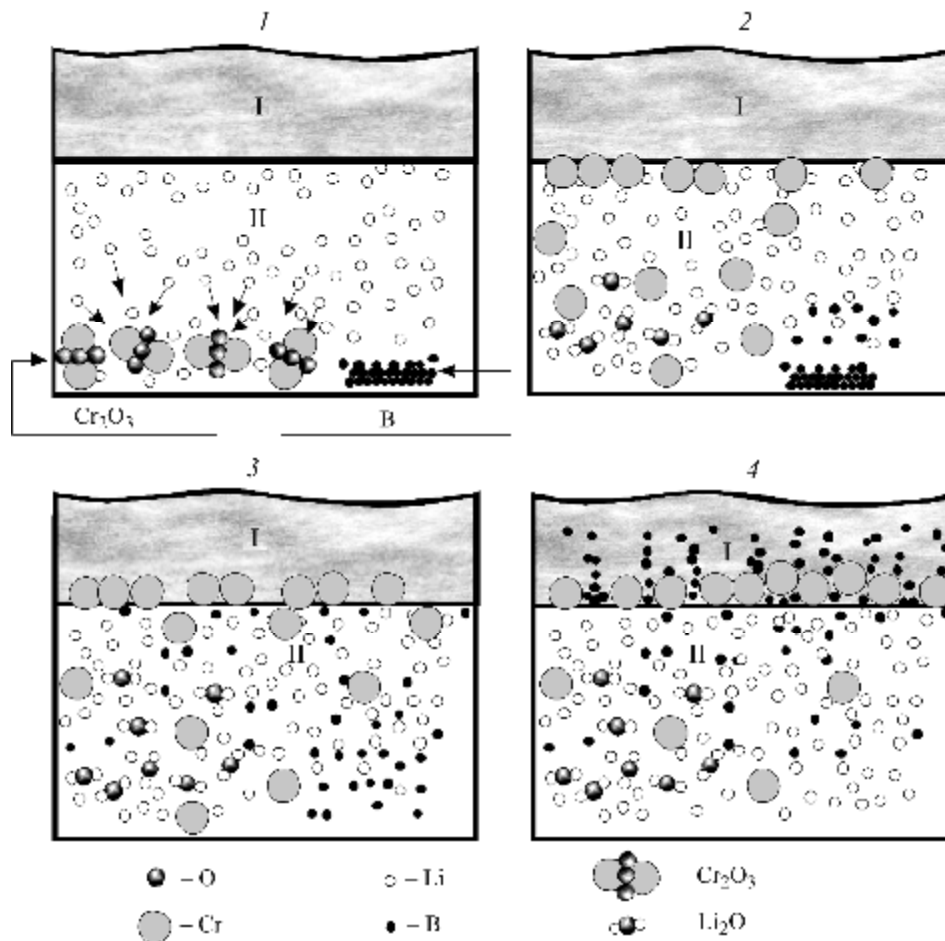


Рис. 6. Етапи формування борохромових покриттів у розплаві літію: 1 – відновлення хрому літієм з оксиду Cr₂O₃; 2 – перенесення його до поверхні сталі; розчинення бору в літії; 3 – дифузія хрому в сталь, адсорбція бору на поверхню хромованої сталі; 4 – дифузія бору у хромовану сталь, формування борохромового покриття. I – матриця; II – розплав літію.

Fig. 6. Stages of boron-chromium coatings formation in the lithium melt: 1 – reducing of lithium from chromium oxide Cr₂O₃; 2 – transfer of chromium to the steel surface; dissolution of boron in lithium; 3 – diffusion of chromium in steel, boron adsorption on the surface of chromized steel; 4 – diffusion of boron in chromized steel, the boron-chromium coating formation.
 I – matrix; II – lithium melt.

Використання оксиду хрому як джерела дифузанта дає можливість інтенсифікувати насичення транспортного розплаву хромом. Згідно з термодинамічним аналізом, відновлення літієм хрому з його оксиду енергетично вигідніше, ніж

розчинення [12]. Тому розплав у першу чергу збагачуватиметься активним атомарним хромом, який переноситься до поверхні сталі (заздалегідь очищеної літієм від окисних плівок), адсорбується на ній та дифундує в матрицю. Тим часом у розплаві збільшується концентрація розчиненого бору. Він переноситься до попередньо легованої хромом поверхні сталі і дифундує в матрицю. У приповерхневих шарах, де концентрація дифузандів найвища, співвідношення вмісту компонентів (в ат. %): В:Cr:Fe:C = 34:11:28:26, тобто атомів бору принаймні втричі більше, ніж хрому. Характер розподілу вуглецю в сталі свідчить про його відтіснення вглиб з приповерхневих шарів бором і хромом.

Наведено (рис. 7) термограми поетапного (за традиційними методиками) та одночасного (згідно з запропонованим способом) борохромовання, які ілюструють переваги останнього. Тривалість одноетапного нанесення двокомпонентних покривів удвічі менша, ніж послідовного борохромовання і хромування.

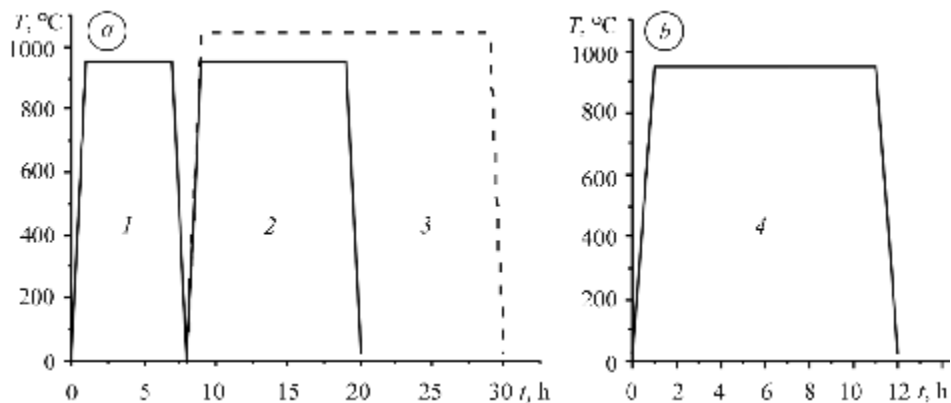


Рис. 7. Термограми поетапного (а) та одноетапного (б) борохромовання: 1 – борохромовання з Li–В; 2 – хромування з Li–Cr₂O₃; 3 – хромування з Li–Cr; 4 – борохромовання з В–Cr₂O₃–Li.

Fig. 7. Thermogram of gradual (a) and one-step (b) boron-chromizing: 1 – boronizing from Li–B; 2 – chromizing from Li–Cr₂O₃; 3 – chromizing from Li–Cr; 4 – boron-chromizing from B–Cr₂O₃–Li.

ВИСНОВКИ

Розроблено та апробовано новий спосіб одночасного нанесення двокомпонентних (борохромових) покривів у середовищі розплав літію–оксид хрому–бор. Встановлено механізм формування покриву. Показано, що оксид хрому як джерело дифузанта інтенсифікує насичення транспортного розплаву хромом, в результаті чого на першому етапі покрив адсорбується на поверхні сталі та дифундує в матрицю. Наступний етап – дифузія бору та формування борохромового покриву.

Отримано покрив товщиною до 300 μm з максимальною концентрацією бору і хрому на поверхні відповідно 13,8...14,0 і 10,4...14,1 mass.% та мікротвердістю до 22 GPa. Встановлено фазовий склад покривів. У зовнішньому суцільному шарі покриву присутні монобориди FeB, (Fe,Cr)B і Fe₂B. Глибший шар складається з Fe₃(C,B) і Fe₂₃(C,B)₆, і твердого розчину бору, хрому та вуглецю в α-залізі. Під ним міститься твердий розчин В, Cr, С у залізі. Метод одночасного борохромовання з літію дає можливість у 2–3 рази скоротити тривалість нанесення покривів порівняно з поетапним.

РЕЗЮМЕ. Разработан и апробирован новый способ одновременного нанесения на стали двухкомпонентных борохромовых покрытий в среде расплав лития–оксид хрома–бор. Установлен механизм формирования покрытия: вначале хром, восстановленный литием из оксида Cr₂O₃, диффундирует в сталь, далее происходит легирование бором хромированного слоя и формирование борохромового покрытия. Метод одноэтапного боро-

хромирования из лития позволяет в 2–3 раза сократить время нанесения покрытий в сравнении с поэтапным.

SUMMARY. A new method of one-stage boron-chromizing of steels in the Li–Cr₂O₃–B melt is proposed. The mechanism of coating formation is presented. At the first stage the chromium, that was reduced from oxide Cr₂O₃ by lithium, diffuses in steel and at the second stage the boron alloying of the chromium coating with boron, takes place, and boron-chromizing coating is formed. The method of one-stage boron-chromizing allows us to decrease the time of coating formation in 2–3 times to compare with the gradual boron-chromizing method.

1. *Похмурский В. И., Далисов В. Б., Голубец В. М.* Повышение долговечности машин с помощью диффузионных покрытий. – К.: Наук. думка, 1980. – 188 с.
2. *Многокомпонентные диффузионные карбидные покрытия на железоуглеродистых сплавах / Л. Г. Ворошнин, А. А. Шматов, Б. Б. Хина, С. Д. Башлак.* – Минск: БНТУ, 2007. – 470 с.
3. *Иванов С. Г.* Разработка состава насыщающей смеси и технологии диффузионного борохромирования тяжело нагруженных деталей машин и инструмента: Автореф. дис. ... д-ра тех. наук. – Барнаул, 2007. – 29 с.
4. *Лыгденев Б. Д.* Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей: Автореф. дис. ... д-ра тех. наук. – Барнаул, 2008. – 32 с.
5. *Гармаева И. А.* Фазовый состав и кинетика формирования диффузионных слоев при борировании сталей 05.02.01: Автореф. дис. ... д-ра тех. наук. – Барнаул, 2008. – 34 с.
6. *Влияние параметров борохромирования на структуру стали и физико-механические свойства диффузионного слоя / А. М. Гурьев, С. Г. Иванов, Б. Д. Лыгденев и др. // Ползуновский вестник.* – 2007. – № 3. – С. 28–34.
7. *Фазовый состав и механизм образования диффузионного слоя при борировании сталей в условиях циклического теплового воздействия / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденев, О. А. Власова и др. // Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2008. – № 1. – С. 20–27.
8. *Гальнская Н. А.* Особенности технологии получения комплексных диффузионных покрытий на основе бора и хрома // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов / Под ред. Л. Г. Ворошнина. – Минск: Изд-во БНТУ, 2004. – С. 48–52.
9. *Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом / А. М. Гурьев, Б. Д. Лыгденев, С. Г. Иванов и др. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* – 2007. – № 1. – С. 30–35.
10. *Химико-термическая обработка металлов и сплавов: Справ. / Под ред. Л. С. Ляховича.* – М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
11. *Ворошнин Л. Г., Ляхович Л. С.* Борирование стали. – М.: Металлургия, 1978. – 239 с.
12. *Широков В. В., Василів Х. Б.* Розробка альтернативних джерел дифузанта для металізації з рідкої фази // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2002. – № 4. – С. 85–89.
13. *Широков В. В., Василів Х. Б., Арендар Л. А.* Рідкометалева борування сплавів системи Fe–C і його особливості // Вісник двигунобудування. – 2004. – № 3. – С. 138–142.
14. *Чалов А. А.* Разработка упрочняющей химико-термической обработки деталей на основе многокомпонентного диффузионного покрытия: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Краснодар, 2006. – 18 с.
15. *Широков В. В., Василів Х. Б., Рудковський Є. М.* Особливості дифузійного борування деяких інструментальних сталей в металевих розплавах. Ч. 1. Борування в розплаві літію // Інструменти та інструментальне виробництво: Матеріали Першої наук.-практ. конф. – Львів: ЛВЦНТЕІ, 2007. – С. 57–63.
16. *Особливості дифузійного борування деяких інструментальних сталей в металевих розплавах Ч. 2. Борування в розплаві натрію / В. В. Широков, Х. Б. Василів, Л. А. Арендар, О. В. Широков // Там же.* – С. 64–67.
17. *Шатинский В. Ф., Збожняя О. М., Максимович Г. Г.* Получение диффузионных покрытий в среде легкоплавких металлов. – К.: Наук. думка, 1976. – 204 с.
18. *Двойные и тройные системы, содержащие бор: Справ. / Ю. Б. Кузьма, Н. Ф. Чабан.* – М.: Металлургия, 1990. – 320 с.
19. *Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под ред. Н. П. Лякишева.* – М.: Машиностроение, 1996. – 1. – 498 с.

Одержано 22.01.2010