

PACS numbers: 68.35.bd, 68.35.Dv, 68.35.Gy, 68.35.Rh, 81.15.Rs, 81.40.Cd, 81.40.Ef

Вплив високоциклового навантаження та термооброблення на структуру хромових електроіскрових покриттів сталі 30ХГСА

Ю. О. Вронська, Н. В. Зайцева, С. М. Захаров, О. А. Шматко

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадського, 36,
03680, ГСП, Київ-142, Україна*

Досліджено вплив знакозмінного високоциклового (10^7 циклів) навантаження і температури на структуру поверхневих шарів хромових електроіскрових покриттів на сталі 30ХГСА. Установлено зміцнення цих шарів унаслідок перерозподілу основних легувальних елементів, зміни фазового складу багат шарової структури перехідної області леґованої хромом та розпаду твердих розчинів за комірчастим механізмом, яке сприяє зростанню на порядок дисперсності структури.

Исследовано влияние знакопеременной высокочикловой (10^7 циклов) нагрузки и температуры на структуру поверхностных слоёв хромовых электроискровых покрытий на стали 30ХГСА. Установлено упрочнение этих слоёв вследствие перераспределения основных легирующих элементов, изменения фазового содержания многослойной структуры переходной области легирующей хромом и распада твёрдых растворов по ячеистому механизму, которое приводит к увеличению на порядок дисперсности структуры.

The effect of high-cycle alternating load (10^7 cycles) and temperature on the structure of surface layers of the electro-spark chromium coatings on steel 30HGSA is investigated. Hardening of these layers because of redistribution of the main alloying elements, change the phase content of the transition region of multilayer structure doped with chromium, and decomposition of solid solution by cellular mechanism is established. The hardening leads to an increase in dispersion of the surface layers' structure on the order of magnitude.

Ключові слова: сталь, структура, електроіскрове леґування, знакозмінне навантаження, тверді розчини, комірчастий розпад.

(Отримано 5 грудня 2012 р.; остаточн. варіант — 22 березня 2013 р.)

1. ВСТУП

Електроіскрове легування є ефективним методом поверхневого зміцнення деталей машин та інструмента. Зазвичай вивчають залежність фізико-механічних властивостей поверхнево легованих сталей від режимів нанесення покриттів [1–4]. Однак фізичні процеси, через які формуються фазовий склад та структура покриття, що зумовлюють його стійкість до нагрівання та знакозмінного навантаження (ЗЗН), вивчено частково.

Для дослідження було обрано хромове електроіскрове покриття на промисловій конструкційній сталі 30ХГСА з початковою феритно-перлітною структурою, оскільки хром є одним з елементів, що найчастіше застосовують для легування сталевих деталей. Він утворює із залізом безперервний ряд твердих розчинів, має близьку до заліза густину, температуру плавлення і коефіцієнт теплового розширення.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Електроіскрове легування (ЕІЛ) хромом виконано на устаткуванні ЕЛФА-41 за режимами [5], ЗЗН — на вібраційному електродинамічному стенді ВЭДС-200 з базою випробування 10^7 циклів. Зразки з хромовим електроіскровим покриттям відпалювали згідно [6] за температури 953 К, нижчої від температури фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення. Структуру легованого шару для металографічних досліджень виявляли за допомогою іонного травлення в плазмі вуглецю протягом 40 хв. (ВУП-3). Дослідження виконано методами рентгеноструктурного фазового аналізу (ДРОН-3М), оптичної металографії (МИМ-8), сканувальної електронної мікроскопії (TESLA-2), локального спектрального аналізу (Самеса MS 46 з енергодисперсійним рентгенівським спектрометром Link-Analitical) та мікродюрOMETрії (ПМТ-3).

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Структура хромового електроіскрового покриття. Електроіскрове легування хромом спричиняє утворення на поверхні сталеві деталі характерної структури (рис. 1), яку формують краплі розплавленого хрому, що переносяться в плазмі електроіскрового розряду на холодну (293 К) сталеву підкладку. Рельєф поверхні доволі грубий, шорсткість її після електроіскрового легування хромом становить $\cong 1,35$ мкм.

Результати дюрOMETричних досліджень легованого хрому шару сталі 30ХГСА показали, що середнє значення мікротвердості пере-

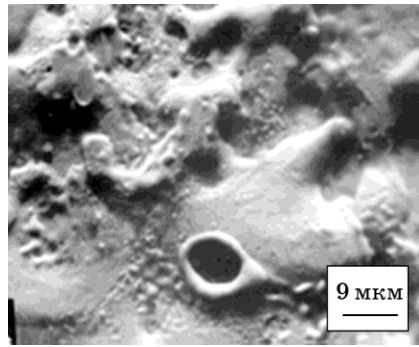
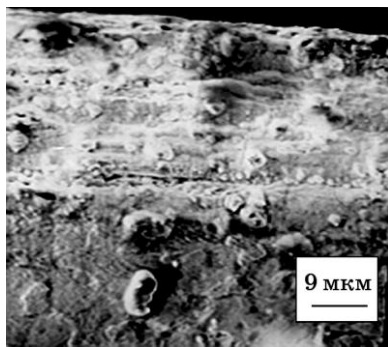


Рис. 1. Структура поверхні хромового електроіскрового покриття сталі 30ХГСА.

хідного шару становить 7,3 ГПа, а широкий розкид її значень (3,67–13,7 ГПа) свідчить про істотну неоднорідність структури.

Для виявлення структури легованих хромом поверхневих шарів, як було зазначено вище, застосовано іонне травлення в плазмі вуглецю, позаяк ні хімічна, ні електролітична процедури не дали помітних результатів. Металографічно виявлено, що структура легованої зони є багатошаровою (рис. 2). Відомо [7], що перехід від одного шару до іншого змінює знак напруження. Цим пояснюється непридатність хімічного і електролітичного виявлення мікроструктури такої системи. Причини виникнення, так званого, «білого шару» достеменно не відомі, але цілком ймовірно, що воно пов'язане з комплексом легування поверхневого шару матеріалом катода елементами атмосфери (азот), дисперсністю структури та складнонапруженим станом поверхневого шару.

Фазовий склад легованої хромом поверхні сталі 30ХГСА визначено



a



б

Рис. 2. Мікроструктура перерізу шліфа (*a*) та схема розташування фаз за глибиною (*б*) в хромовому електроіскровому покритті на сталі 30ХГСА.

методами фазового рентгеноструктурного аналізу. Як і в попередніх дослідженнях [7], встановлено, що легована хромом поверхня складається з власне покриття та перехідного шару, який пролягає на межі покриття та матриці. Легований хромом перехідний шар в електроіскрових покриттях містить велику кількість фаз. На рисунку 2, б наведено схему розташування виявлених фаз за глибиною. На поверхні маємо пересичений твердий «розчин 2» на основі хрому, за ним — інтерметалідний шар σ -FeCr, далі пересичений твердий «розчин 1» на основі α -Fe з карбідами Fe_3C , Cr_{23}C_6 та силіцидами Cr_5Si_3 , FeSi_2 . Глибше виявлено твердий «розчин 3» на основі γ -Fe (високолегований метастабільний аустеніт), карбіди, силіциди та інтерметаліди. Результати рентгенівського визначення параметрів ґраток пересичених твердих розчинів наведено в таблиці. Для порівняння під таблицею наведено параметри ґраток чистих хрому та α -заліза. Наявність цих твердих фаз впливає на величину мікротвердості легovanого шару.

Результати дослідження розподілу основних легувальних елементів за глибиною подано на рис. 3. Спостерігається проникнення мангану та кремнію в хромове покриття з основи, що містить 1% цих елементів. Суттєве зростання їх концентрації в перехідному шарі пов'язане з їх висхідною дифузією з об'єму матриці, яка обумовлена значним нагріванням поверхні сталі при електроіскровому обробленні. Зміцнення поверхневого шару глибиною 30–40 мкм та збагачення його кремнієм і манганом задовільно узгоджуються між собою.

Вплив відпалу на структуру твердого розчину. Для стабілізації фазового складу та структури зразки були відпалені протягом 3600 с за температури 953 К. Після відпалу середня мікротвердість електроіскрового покриття на сталі 30ХГСА знизилась приблизно в 1,5 рази (4,95 ГПа), а розкид значень мікротвердості істотно зменшився (4–6 ГПа). Зі значним подрібненням зернистої структури перехідного шару відбувається знеміцнення легovanого шару приблизно в 3–5 разів. Електроіскрові покриття являють собою нестабільну «миттєво заморожену» (10^{-3} с) багатофазну систему, тому нагріван-

ТАБЛИЦЯ. Параметри ґраток твердих розчинів після електроіскрового легування та знакозмінного навантаження.

Розчини	Параметри ґраток, нм	
	ЕІЛ	ЕІЛ+ЗЗН
1	0,2864	0,2863 0,2850
2	0,2848	0,2857
3	0,3585	$c/a = 1,0028$

Параметри ґраток чистих хрому та α -заліза:
 $a_{\text{осr}} = 0,2885$ нм, $a_{\text{оFe}} = 0,2866$ нм [8].

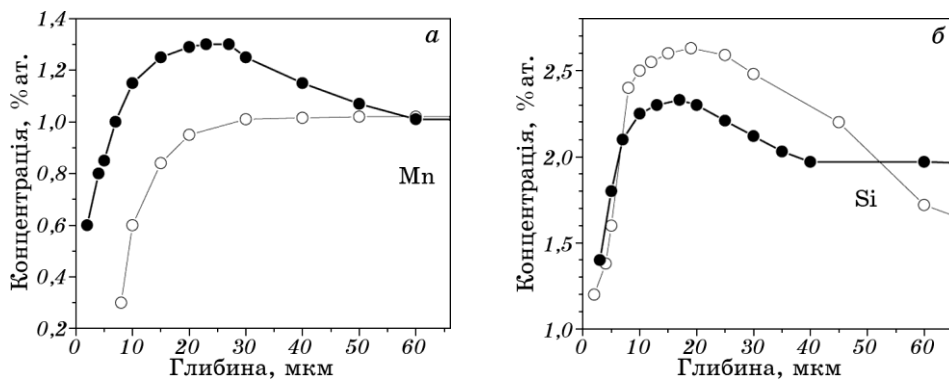


Рис. 3. Розподіл за глибиною легованого шару хромових електроіскрових покриттів основних легувальних елементів до (○) та після (●) знакозмінного навантаження.

ня призводить до змін в її структурі. Мікроструктуру перехідного шару хромового електроіскрового покриття на сталі 30ХГСА після відпалу подано на рис. 4, а. В середині зерна маємо сформовані евтектоїдні колонії. Згідно [6], в подібних багатокомпонентних системах на основі Fe–Cr при ізотермічному відпалі може відбуватися розпад твердого розчину за комірчастим механізмом.

Рентгеноструктурний аналіз підтвердив, що відбувається розпад пересиченого твердого «розчину 1» на основі α -заліза. На рисунку 5 наведено рентгеновський рефлекс [211] ґратки твердого розчину на основі α -Fe після ЕІЛ (а), відпалу (б) та знакозмінного навантаження (в). Широкий розмитий рефлекс на рис. 5, а свідчить про високі напруження, що виникли під час формування структури під електроіскровим впливом (короткий час дії і високі швидкості відведен-

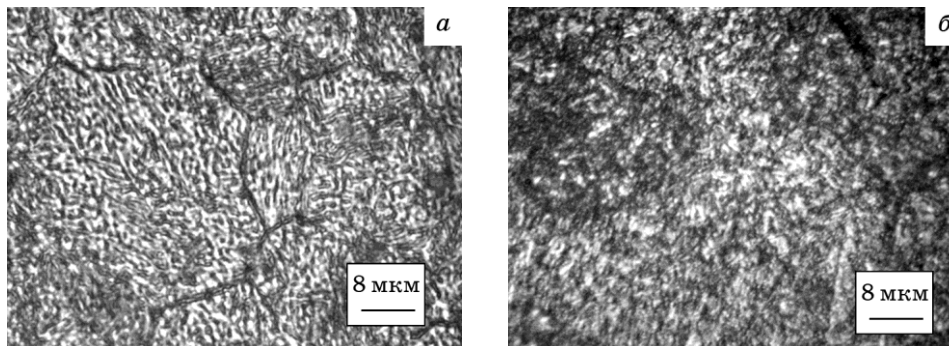


Рис. 4. Структура перехідної зони хромового електроіскрового покриття на сталі 30ХГСА: після ізотермічного відпалу ($T = 973$ К, $t = 3600$ с) (а) та після циклічного навантаження (б).

ня тепла).

Відпал (рис. 5, б) електроіскрового покриття спричинив релаксацію цих напружень та розпад пересиченого багатокомпонентного

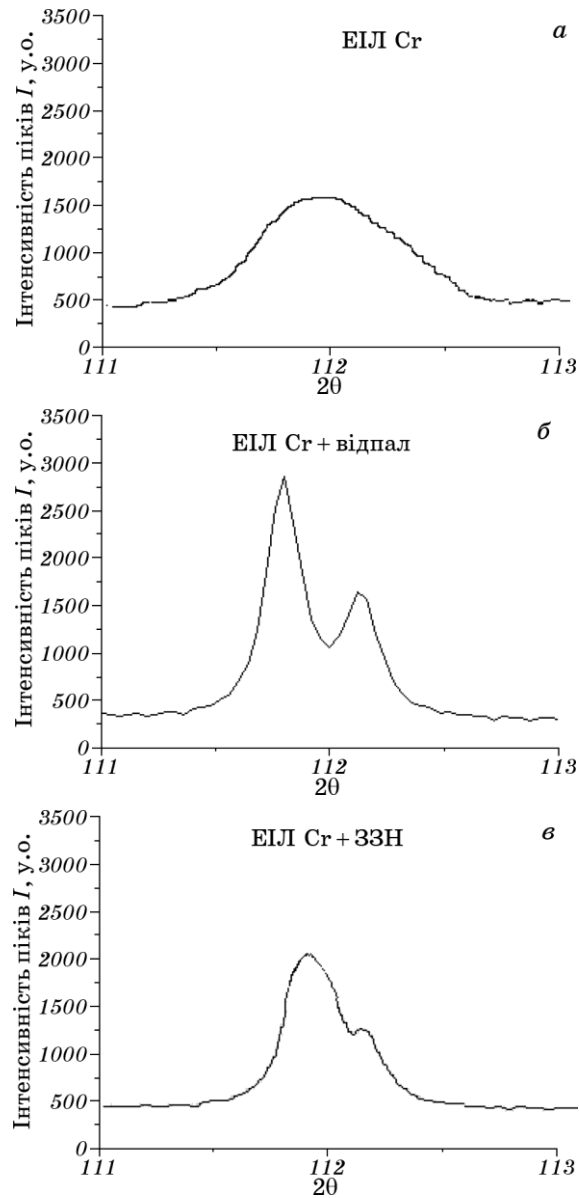


Рис. 5. Вплив оброблення хромового електроіскрового покриття сталі 30ХГСА на розщеплення дифракційного рентгенівського максимуму Fe_{211} : вихідний стан (а), відпал за 973 К (б), знакозмінне навантаження (10^7 циклів) (в).

твердого розчину хрому, мангану, кремнію в α -Fe з випаданням термічно стабільних силіцидів, карбідів, інтерметалідів [7].

Сукупність експериментальних даних свідчить, що розпад твердих розчинів електроіскрових хромових покриттів сталі 30ХГСА при відпалі ймовірно відбувається за комірчастим механізмом.

Вплив знакозмінного навантаження на структуру покриття. Подібно ізотермічному відпалові циклічне навантаження призводить до фазових перетворень та зміни складу твердих розчинів електроіскрових покриттів. На відміну від відпалу, після циклічного навантаження середні значення мікротвердості зростають до 9,7 ГПа. Значення мікротвердості легованого шару під впливом ЗЗН підвищуються (до 4,5–17 ГПа), порівняно з мікротвердістю вихідного електроіскрового покриття.

Дані рентгеноструктурного аналізу свідчать, що внаслідок ЗЗН фазовий склад хромових електроіскрових покриттів сталі кардинально змінився: виявлено термічно стабільніші карбіди та силіциди. У перехідному шарі замість карбіду заліза Fe_3C виявлено карбід хрому Cr_{23}C_6 , вміст вуглецю в якому вищий. У силіциді заліза FeSi_2 відбулося витіснення атомів заліза атомами хрому з утворенням ізоструктурного силіциду хрому CrSi_2 . Ініційований циклічними навантаженнями перерозподіл основних легувальних елементів системи спричинив зміну фазового складу досліджуваних шарів, а також хімічного складу ОЦК-твердих розчинів [9], які було виявлено в поверхневому шарі після електроіскрового легування сталі хромом. Наприклад, у «розчині 1» кількість хрому і кремнію зменшилася відповідно до 1,75 ат.% і 2,2 ат.%, а кількість мангану зросла до 1,2 ат.%.

Аналіз рентгенівських дифракційних рефлексів пересичених твердих розчинів, ідентифікованих у легованому хромом шарі, показав, що високолегований аустеніт («розчин 3») перетворився на мартенсит деформації під дією ЗЗН. Параметр ґратки ОЦК-твердого «розчину 2» зріс (табл.). Дифракційні рефлекси пересиченого твердого «розчину 1» на основі α -заліза розпадаються на два піки, що свідчить про його розпад (рис. 5, в).

На рисунку 4, б наведено мікроструктуру хромового електроіскрового покриття на сталі 30ХГСА після ЗЗН, де також спостерігаються колонії евтектоїдоподібних комірок, як і після відпалу (рис. 4, а). Однак розмір зерен після ЗЗН в 5–10 разів менший, ніж після відпалу. Отже цілком можливо, що саме комірчастий розпад «розчину 1» привів до рекристалізації.

4. ВИСНОВКИ

Таким чином, у фазовому складі та структурі електроіскрового хромового покриття на сталі 30ХГСА під дією температури і висо-

коциклового навантаження відбулися зміни, обумовлені дифузійним перерозподілом елементів, релаксацією напружень та розпадом пересичених твердих розчинів з утворенням інтерметалідних сполук карбідів і силіцидів. Вперше показано, що під дією знакозмінного навантаження відбувається розпад багатокomпонентного пересиченого ОЦК-твердого розчину на основі α -Fe, який, ймовірно, відбувається за комірчастим механізмом.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. И. А. Подчерняева, А. Д. Панасюк, В. А. Лавренко и др., *Порошковая металлургия*, № 5–6: 42 (1999).
2. М. С. Ковальченко, А. В. Паустовский, В. П. Ботвинко, *Сверхтвердые материалы*, № 2: 61 (2005).
3. А. И. Михайлюк, В. Г. Ревенко, Н. Н. Натаров, *ФХОМ*, № 1: 101 (1993).
4. Г. М. Сорокин, Е. М. Зяблицкий, Е. А. Зяблицкая, *Заводская лаборатория*, № 10: 40 (1996).
5. N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, I. L. Oborsky, and O. A. Shmatko, *Scientific Problems of Mashines Operation and Maintenace*, 45, No. 1 (161): 81 (2010).
6. Л. П. Лариков, О. А. Шматко, *Ячеистый распад пересыщенных твердых растворов* (Киев: Наукова думка: 1976).
7. N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, A. G. Molyar, and O. A. Shmatko, *Металлофиз. новейшие технол.*, 23, спецвып.: 262 (2001).
8. W. Pearson, *Handbook of Lattice Parameters* (London: Pergamon Press: 1967).
9. N. V. Zaitseva, S. M. Zakharov, and O. A. Shmatko, *Технологічний вісник Поділля*, 2, № 1: 88 (2003).