

Способи формування метастабільних модифікацій сплавів з ефектом самозміцнення при зношуванні

Я. О. Чейлях, кандидат технічних наук

О. П. Чейлях, доктор технічних наук

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь

Узагальнено розроблені способи та технології об'ємно-поверхневого зміцнення різноманітних зносостійких матеріалів, спрямовані на створення поверхневих метастабільних фазово-структурних модифікацій, що забезпечують реалізацію ефекту поверхневого самозміцнення при експлуатації та підвищення зносостійкості виробів.

У більшості існуючих підходів до проектування зміцнюючих технологій для зносостійких сплавів основний акцент робиться на отримання мікроструктури мартенситу і карбідів (карбонітридів), що володіють високою твердістю [1]. Між тим, перспективно створення та регулювання метастабільних станів аустеніту, який здатний до деформаційних фазових перетворень безпосередньо в ході зношування в тонкому поверхневому шарі сплавів для підвищення зносостійкості. Однак, відомості щодо цього досить обмежені [2 – 4].

Метою роботи є узагальнення розроблених способів і технологій об'ємно-поверхневого зміцнення для створення метастабільних фазово-структурних станів, що забезпечують підвищення зносостійкості різноманітних сплавів.

В основу розробки нових способів покладено принцип створення в поверхневих шарах метастабільних фазово-структурних комплексів і модифікацій, здатних до самоорганізації, самоадаптації під дією робочого середовища, що забезпечує ефект самозміцнення.

Виходячи з умов експлуатації та вимог до зносостійких матеріалів найбільш ефективними та перспективними фазово-структурними комплексами в поверхневих шарах функціональних сплавів на залізній основі слід вважати наступні: аустенітно-мартенситні (А – М); мартенситно-аустенітні (М – А); аустенітні (А); аустенітно-феритні (А – Ф); бейнітно-аустенітні (Б – А); аустенітно-карбідні (карбонітридні) (А – К); аустенітно-мартенситно-карбідні (карбонітридні) (А – М – К); мартенситно-аустенітно-карбідні (карбонітридні) (М – А – К); аустенітно-феритно-карбідні (карбонітридні) (А – Ф – К); ферритно-аустенітно-карбідні (карбонітридні) (Ф – А – К); аустенітно-евтектичні (А – Е); аустенітно-мартенситно-евтектичні (А – М – Е).

Основною відмінністю щодо відомих модифікацій в даному сучасному підході є деформаційна (термо-деформаційна) метастабільність аустеніту, а в ряді випадків й інших зазначених вище фаз, здатних до реалізації деформаційних (або термо-деформаційних) фазових перетворень при випробуваннях (ДФПВ). До них відносяться деформаційні мартенситні $\gamma \rightarrow \alpha'$ або $\gamma \rightarrow \varepsilon'$ перетворення при зношуванні (ДМПЗ), динамічне деформаційне старіння (ДДС), динамічне термо-деформаційне старіння (ДТДС), трансформація складу карбідів та інших твердих фаз.

При проектуванні зносостійких матеріалів і зміцнювальних технологій важливо забезпечити регулювання фазового складу, мікроструктури та управління кінетикою, що визначає формування механічних та експлуатаційних властивостей. Це можливо не тільки легуванням, а й способами різноманітних об'ємних і поверхневих обробок.

Визначено наступні основні термодинамічні, фізико-хімічні та фазово-структурні чинники та умови формування метастабільних модифікацій в поверхневих шарах сталей, чавунів та наплавленого металу (НМ) [5]:

- хімічний склад аустеніту і можливості його регулювання легуванням і технологічними прийомами різноманітних обробок, що впливають на температури мартенситних точок (M_n , M_k , M_d), які визначають фазовий склад (і кількість метастабільного, наприклад, залізового аустеніту $A_{зал}$);

- комплексне легування сталей, чавунів і наплавленого металу забезпечує отримання метастабільних фазово-структурних комплексів різних за природою, складом, будовою фаз і концентраційних градієнтів;

- нерівноважність процесів плавлення, кристалізації і фазових перетворень в рідкому і твердому станах в наплавлювальному металі і зміцнюючих поверхневих шарах сталей та чавунів;

- ступінь зміцнення (підвищення щільності недосконалостей, твердо розчинне та дисперсійне) аустеніту і структури в цілому за рахунок обробок;

Для створення метастабільних станів і регулювання ступеня метастабільності аустеніту в поверхневих шарах визначено наступні механізми та фактори:

щодо стабілізації аустеніту, що сприяє збільшенню його кількості і ступеня тривалості при навантаженні до $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПЗ відносяться наступні:

- термічна стабілізація, яка пов'язана з релаксацією мікронапруг і блокуванням дислокацій домішковими атомами;

- механічна стабілізація, яка пов'язана з підвищенням щільності дислокацій в аустеніті під дією пластичної деформації, наприклад при ТМО або холодної поверхневої пластичної деформації;

- хімічна стабілізація, яка пов'язана з підвищенням вмісту аустенітоутворюючих елементів (вуглець, азот, марганець, нікель, мідь, кобальт і ін.) та інших елементів (хром, кремній), що знижують точку M_n ;

- високоенергетична стабілізація, яка пов'язана з впливом на матеріал високих концентрацій теплової енергії, наприклад при лазерному, плазмовому, електронно-променевому впливі;

– кінетична, пов'язана з особливостями кінетики і механізму фазових перетворень в насичених шарах, наприклад, при бейнітному або ізотермічному мартенситному перетвореннях;

– структурна стабілізація, пов'язана з подрібненням зерна аустеніту тощо;

фактори дестабілізації аустеніту в насичених шарах, що сприяють зменшенню його вмісту і активізації $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПЗ наступні:

– хімічна дестабілізація, пов'язана зі зменшенням концентрації аустенітоутворюючих (С, N, Ni, Mn, Cu, Co) і інших легуючих елементів (Cr, Si) в аустеніті, що викликає підвищення точки M_n і сприяє зменшенню його кількості в структурі та активізації $\gamma \rightarrow \alpha'$ ДМПЗ;

– механічна дестабілізація, пов'язана зі збільшенням рівня внутрішніх напружень, наприклад при пластичній деформації;

– структурна дестабілізація, пов'язана з ростом аустенітного зерна, зменшенням щільності дислокацій;

– вплив магнітного поля, що стимулює мартенситні перетворення за рахунок підвищення точки M_n .

З урахуванням цих чинників і умов були розроблені та узагальнені нові функціональні метастабільні матеріали: зносостійкі сталі, чавуни [2, 3] та наплавлювальні матеріали на Fe – Cr – Mn та Fe – Mn основах з регульованою кількістю і ступенем метастабільності аустеніту і, відповідною кінетикою $\gamma \rightarrow \alpha'$ чи $\gamma \rightarrow \epsilon' (\rightarrow \alpha')$ ДМПЗ в наплавленому металі (НМ) [6, 7] для відновлення та зміцнення деталей машин, що швидко зношуються. В цих матеріалах отримуються структурні комплекси і модифікації вказані вище.

Запропоновані можливі шляхи управління кількістю мартенситу гарту, аустеніту і карбідів (карбонітридів), ступенем метастабільності γ -фази і кінетикою ДМПЗ і ДДС для підвищення зносостійкості наплавленого металу за рахунок способів та параметрів термічної, хіміко-термічної, термоциклічної та високоенергетичних обробок. Технологічні схеми розроблених способів зміцнення НМ наведені на рис. 1. Це регулювання температури гартування (850 – 1150 °С); відпуску (300 – 700 °С) після наплавлення аустенітного металу або після високотемпературного гартування 1100 °С А–М НМ (рис. 1 а – в), числа циклів при термоциклічній обробці (ТЦО) за схемою низькотемпературної обробки (НТЦО) після наплавлення (рис. 1 г).

Встановлена висока ефективність використання цементації низьковуглецевого наплавленого металу та гартування при різних температурах 800 – 1150 °С (рис. 1 д) для створення метастабільності аустеніту в поверхневому шарі, використання ДМПЗ в процесі випробувань для додаткового підвищення зносостійкості.

Запропоновано плазмова та електронно-променева технології обробки наплавлених Fe – Cr – Mn сталей різних структурних класів (мартенситного, М – А, А – М, А та ін. (рис. 1 е) з регульованою величиною тепловкладення і, відповідно, температурами поверхневого гартування (800 – 1400 °С) або різного ступеня оплавлення (1450 – 1650 °С).

Структура, зношування, руйнування

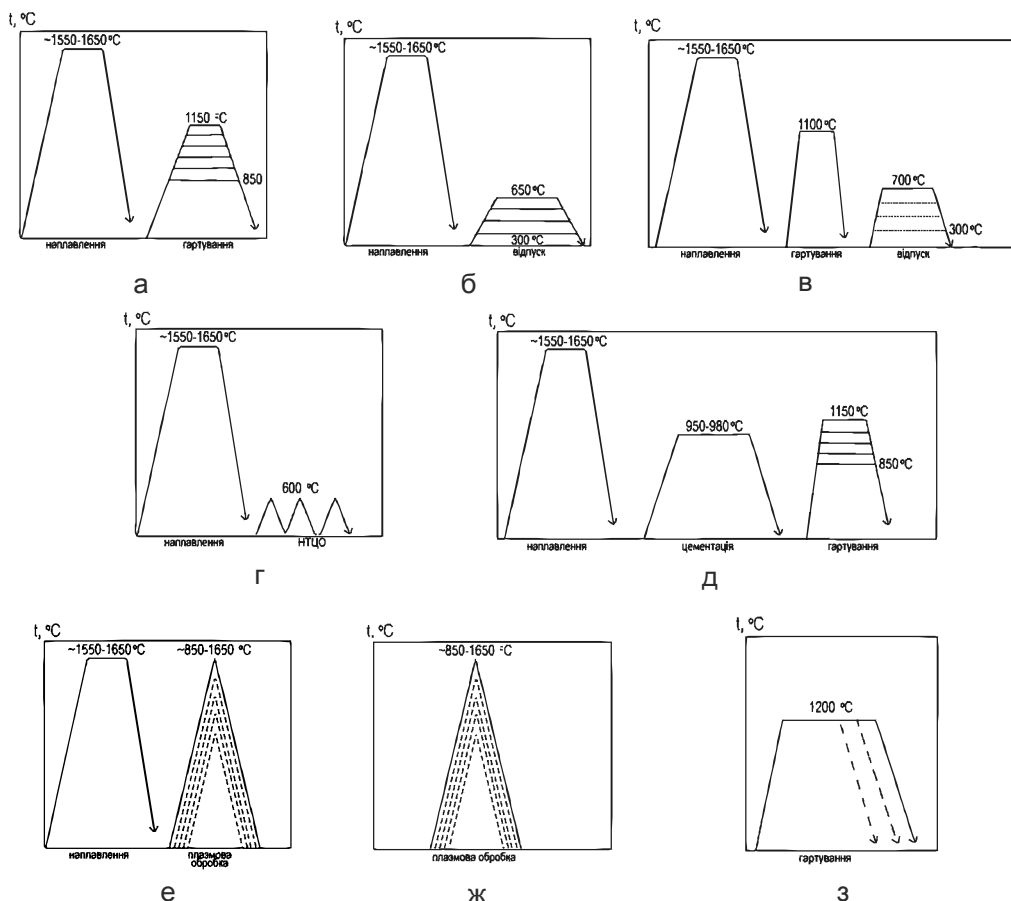


Рис. 1. Технологічні схеми створення поверхневої фазово-структурної модифікації наплавленого металу і сталей та регулювання метастабільності. а – гартування від різних температур 850 – 1150 °С, б – відпуск при різних температурах 300 – 650 °С, в – гартування з 1100 °С, відпуск при температурах від 300 до 700 °С, г – плазмова або електронно-променева обробка з заданою величиною тепловкладення і температурами нагріву (800 – 1400 °С) або переплаву (1450 – 1650 °С), д – цементация при 980 °С і гартування при різних температурах 800 – 1150 °С, е – низькотемпературна темоциклічна обробка (НТЦО), наприклад 600 ↔ 20 °С з різною кількістю циклів ($n = 2 - 15$), ж – гартування (або переплав) сталей з плазмовим, електронно-променевим або СВЧ нагрівом з різним тепловкладенням при температурах нагріву 900 – 1600 °С, з – гартування сталі 110Г13, а також наплавленого металу Г13 зі зневуглецюванням поверхневого шару при аустенізації (1150 – 1200 °С).

Нові технології гартування з прискореним (нерівноважним) нагріванням плазмовим струменем, електронним променем, СВЧ до температур 900 – 1650 °С (рис. 1 ж) з різною величиною тепловкладення з подальшою швидкою кристалізацією (можлива і аморфізація) ефективно використовувати для спеціальних легованих сталей [8].

Розроблено нову технологію гартування зі зневуглецюванням при 1150 – 1200 °С (рис. 1 з) високовуглецевих марганцевих сталей і НМ Г13 [9], при якій за рахунок різної тривалості витримки (30 – 120 хв) виникають концентраційні градієнти по вуглецю від ~ 0,35 % (на поверхні) до ~ 1,3 % що викликають диференційовану дестабілізацію аустеніту. Це дає можливість реалізації $\gamma \rightarrow \alpha'$ або $\gamma \rightarrow \epsilon' (\rightarrow \alpha')$ ДМПЗ (що не має місця в 110Г13Л після

стандартної обробки) і додаткового більш високого самозміцнення поверхневого шару в ході експлуатації виробів.

На рис. 2 наведено технологічні схеми використання хіміко-термічної обробки (ХТО) в поєднанні з розробленими технологіями об'ємного та поверхневого зміцнення різних сталей.

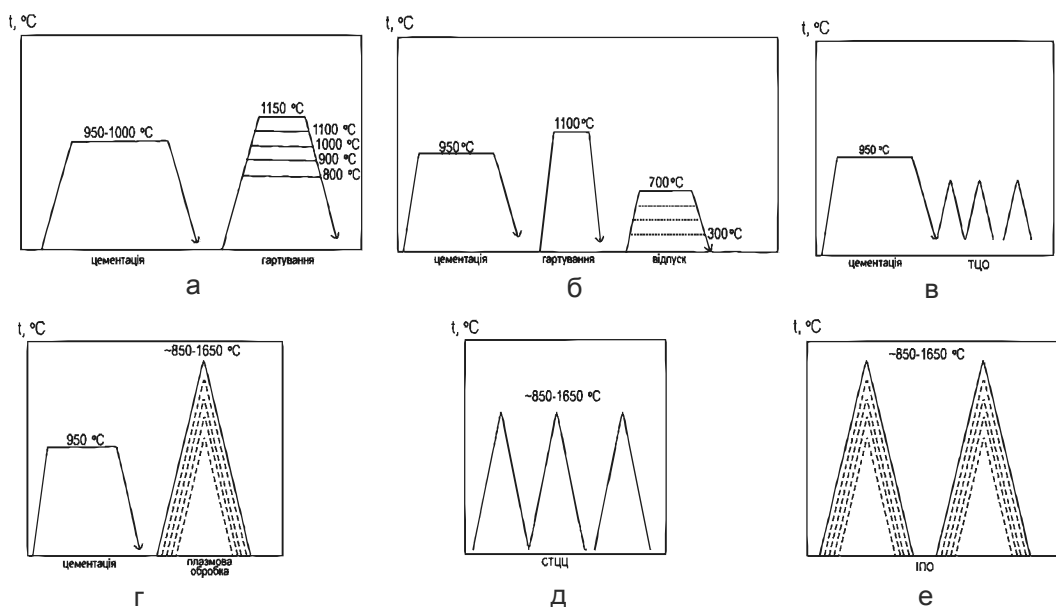


Рис. 2. Технологічні схеми способів поверхневого зміцнення сталей після ХТО. а – цементация 950 °С, 8 – 12 год., гартування при різних температурах від 850 до 1150 °С (відпуск 200 °С), б – цементация, гартування з 1100 °С, відпуск в інтервалі температур от 300 до 700 °С, в – цементация, термоциклічна обробка 950 °С ↔ 20 °С, г – цементация та плазмова обробка з різною величиною тепловкладення, д – швидкісне термоциклічне ціанування, е – імпульсно-плазмова обробка з поверхневим легуванням.

Запропонована цементация з наступним гартуванням при підвищених температурах (850 – 1150 °С) (рис. 2 а), яка формує в науглецьованих шарах хромомарганцевих (2 – 22 % Cr, 0,3 – 8,0 % Mn) і хромистих сталей (марок 12X17, 20X13), НМ Fe-Cr-Mn мікроструктуру А-М-К з високим (до ~ 45 %) вмістом карбідів. Це дозволяє істотно збільшувати (вище рівноважного) вміст вуглецю (2,7 – 3,0 %), створювати концентраційні градієнти по вуглецю і легуючим елементам. В результаті в поверхневому шарі формується структура білих хромистих чавунів, а в серцевині – структура високоміцних або високопластичних легуваних сталей, що фактично є біметалом та значно підвищує зносостійкість [10].

Комплексний вплив на цементовані шари відомих сталей 18ХГТ, 25ХГТ, 20ГЛ, 18Х2Н4А наступних способів термічної обробки: високотемпературного гартування (1150 °С) та відпуску в інтервалі температур 300 – 700 °С (рис. 2 б); термоциклічної обробки, наприклад за схемою НТЦО (600 ↔ 20 °С), або ВТЦО (950 ↔ 20 °С), кількість циклів 2 – 15 (рис. 2 в); плазмової обробки з різною величиною тепловкладення та температур швидкісного нагріву 850 – 1650 °С (рис. 2 г). Розроблені технології швидкісного термоциклічного ціанування 1000 – 1100 ↔ 20 °С з

нагрівом СВЧ в середовищі жовтої кров'яної солі або карбаміду (рис. 2 д), імпульсно-плазмової обробки з поверхневим легуванням нелегованих і низколегованих сталей різними металами (Ti, Ni, Cr, тощо) (рис. 2 е), що робить їх різнофункціональними [11].

Незаперечною перевагою нового підходу при проектуванні перспективних технологій поверхневої модифікації є менший рівень залишкових напружень одержуваних структур, що містять порівняно м'яку і релаксуючу фазу – аустеніт (у ряді випадків і ферит) на відміну від більш твердого мартенситу гартування. Мартенсит деформації, який утворюється в результаті $\gamma \rightarrow \alpha'$ або $\gamma \rightarrow \epsilon'$ ДМПЗ, відрізняється більш високими дисперсністю, щільністю дислокацій і твердістю, а механізм його утворення характеризується релаксацією мікронапружень і створює стискуючі напруження в тонкому поверхневому шарі. Це значно підвищує зносостійкість і працездатність наплавлених, насичених і додатково зміцнених різними способами шарів різних матеріалів.

Таким чином, розглянуті способи та технології об'ємного та поверхневого зміцнення та їх комбінацій для створення фазово-структурних модифікацій, регулювання ступеня метастабільності структури наплавленого металу і сталей забезпечують ефект поверхневого самозміцнення при експлуатації та підвищення механічних та експлуатаційних властивостей виробів.

Література

1. Асонов А.Д. Технология термической обработки деталей машин. – М.: Машиностроение, 1969. – 120 с.
2. Чейлях А.П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологии. – Мариуполь: изд-во ПГТУ, 2009. – 483 с.
3. Малинов Л.С., Малинов В.Л. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки. – Мариуполь: изд-во «Рената», 2009. – 568 с.
4. Филиппов М.А., Литвинов В.С., Немировский Ю.Р. Стали с метастабильным аустенитом. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.
5. Чейлях Я.А., Чигарев В.В. Создание поверхностных метастабильных фазово-структурных модификаций для повышения износостойкости сталей // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: VI Междунар. науч-техн. конф. (Минск, 14-16 сентября 2011 г.): Сб. материалов : в 3 кн. Кн. 2. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2011. – С. 394 – 401.
6. Cheiliakh Y., Chidgarev V., Sheychenko G. The creation of a new economical (nickel free) powder-like wire for surfacing made of metastable metal, self-strengthened during // 1-st Mediterranean Conference: Heat Treatment and Surface Engineering in the Manufacturing of Metallic Engineering Components. – Sharm El-Sheikh, Egypt, December 1-3, 2009. – P. 74 – 75.
7. Чейлях Я.А., Чигарев В.В. Структура и свойства наплавленной износостойкой Fe-Cr-Mn стали с регулируемым содержанием метастабильного аустенита // Автоматическая сварка. – 2011. – №8. – С. 20 – 24.
8. Чигарев В.В., Пирч И.И., Чейлях Я.А. Создание метастабильных состояний и повышение износостойкости хромистых инструментальных сталей плазменной и

- електронно-лучевой обработками // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 2. – С. 67 – 70.
9. Патент 93842 Україна, МПК С21D 3/00. Спосіб хіміко-термічної обробки для знеуглецювання високовуглецевих сталей: / Я. О. Чейлях, В. В. Чигарьов, Г. В. Шейченко ; заявитель и патентообладатель Призов. держ. техн. ун-т. – № 201008023 ; заявл. 29.06.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.
10. Чейлях Я.А., Чигарев В.В., Олейник И.М. Влияние легирующих элементов и термообработки на микроструктуру, метастабильности и свойства науглероженных слоев Fe-Cr-Mn сталей // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту : зб. наук. праць / ПДТУ. – Серія: Технічні науки. – Маріуполь, 2010. – Вип. 20. – С. 120 – 124.
11. Чейлях А.П., Куцомеля Ю.Ю., Федун В.И. Структура и свойства стали 40X после импульсно-плазменной обработки с использованием титанового электрода // Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science, 2013. – 8. – P. 79 – 84.

References

1. Assonov A.D. (1969) *Tehnologija termicheskoj obrabotki detalej mashin.* [The technology of heat treatment of machine parts]. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].
2. Cheylyakh A.P. (2009) *Jekonomnolegированные metastabil'nye splavy i uprochnjajushhie tehnologii.* [Ehkonomnolegированные metastable alloys and hardening technology]. Mariupol: izdateistvo PGTU [in Russian].
3. Malinov L.S., Malinov V.L. (2009) *Resursosberegajushhie jekonomnolegированные splavy i uprochnjajushhie tehnologii, obespechivajushhie jeffekt samozakalki.* [Resource-saving at the expense of economically alloyed alloys and strengthening technologies providing reception of multiphase metastable structures and control of structural and phase transformations (review)]. Mariupol: izdateistvo «Renata» [in Russian].
4. Filippov M.A. Litvinov V.S., Nemirovskij Ju.R. (1988) *Stali s metastabil'nyim austenitom* [Steels with metastable of austenite]. Moskva: Metallurgija. [in Russian]
5. Cheylyakh Ja. A., Chigarev V.V. *Sozdanie poverhnostnyh metastabilnyh fazovostrukturnykh modifikacij dlja povyshenija iznosostojkosti stalej.* [Creating of surfaces of the metastable phase of structural modifications to improve the wear resistance of steels]. Abstracts of Papers: *VI Mezhdunarodnaja nauchno – tehnokogicheskaja konferensaja. Sovremennye metody i tehnologii sozdanija i obrabotki materialov (14 – 16 sentjabrja 2011 hoda)* – 6nd International Scientific Technical Conference. (394 – 401 p.) Minsk: FTI NAN Belarusi [in Russian].
6. Cheylyakh Y., Chidgarev V., Sheychenko G. The creation of a new economical (nickel free) powder-like wire for surfacing made of metastable metal, self-strengthened during wear. Abstracts of Papers: *1-st Mediterranean Conference: Heat Treatment and Surface Engineering in the Manufacturing of Metallic Engineering Components* (1 – 3 december, 2009). 74 – 75 p. Sharm El-Sheikh. [in English].
7. Cheylyakh Ja. A., Chigarev V.V. (2011) *Struktura i svojstva naplavlennoj iznosostojknoj Fe-Cr-Mn stali s reguliruемым soderzhaniem metastabil'nogo austenita* [The structure and properties of the of deposited wear-resistant Fe-Cr-Mn steel with controlled content of metastable austenite]. *Avtomaticheskaja svarka – Automatic welding*, 8, 20 – 24 [in Russian].
8. Chigarev V.V., Pirch I. I., Cheylyakh Ja. A. (2008) *Sozdanie metastabil'nyh sostojanij i povyshenie iznosostojkosti hromistyh instrumentalnyh stalej plazmennoj i jelektronno-luchevoj obrabotkami* [Create the metastable phase state and increase the wear resistance of chromium tool steel, plasma and electron beam processing]. *Novi*

materiali i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and machine building. 2, 67 – 70 [in Russian].

9. Patent 93842 Ukraina, MPK C21D 3/00. Sposib himiko-termichnoї obrobki dlja znevuglecjuvannja visokovuglecevih stalej [Method thermochemical treatment for decarbonization high carbon steel] / Ja.O. Cheylyakh, V.V. Chigarov, G.V. Shejchenk. zajavitel' i patentoobladatel Azov State Technical University. – № 201008023 ; zajavl. 29.06.2010; opubl. 10.03.2011, Bjul. № 5 [in Ukraine].
10. Cheylyakh Ja.A., Chigarev V.V., Olejnik I.M. (2010) Vlijanie legirujushhih elementov i termoobrabotki na mikrostrukturu, metastabil'nosti i svojstva nauglerozhennyh sloev Fe-Cr-Mn stalej [The influence of alloying elements and heat treatment on microstructure, metastability and properties of carbonized balls of Fe – Cr – Mn steels]. *Visnik Priazovskogo derzhavnogo tehničnogo universitetu (Serija: Tehnični nauki) – Journal Azov State Technical University (Series: Technical sciences) Vip. 20, 120 – 124 [in Russian].*
11. Cheylyakh A.P., Kucomelja Ju.Ju., Fedun V.I., Rjabikina M.A. (2013) Struktura i svojstva stali 40X posle impul'sno-plazmennoj obrabotki s ispol'zovaniem titanovogo jelektroda [The structure and properties of steel 40X after pulsed plasma processing using titanium electrodes]. *Science and Education a New Dimension: Natural and Technical Science, 8, 79 – 84 [in Russian].*

Одержано 05.08.16

Я. А. Чейлях, А. П. Чейлях

Способы формирования метастабильных модификаций сплавов с эффектом самоупрочнения при изнашивании

Резюме

Обобщены разработанные способы и технологии объемно-поверхностного упрочнения разнообразных износостойких материалов, направленные на создание поверхностных метастабильных фазово-структурных модификаций, обеспечивающие реализацию эффекта поверхностного самоупрочнения при эксплуатации и повышения износостойкости изделий.

Y. O. Cheylyakh, O. P. Cheiliakh

Methods formation of meta-stable modifications alloys with the effect of self-strengthening at wear

Summary

Generalized methods and technologies developed body-surface hardening variety of wear-resistant materials, designed to create the surface of the meta-stable phase and structural modifications to ensure the realization of self-strengthening effect of the surface during operation and increase wear resistance.