

ОДЕРЖАННЯ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ ЗЛИВКІВ ЗАЛІЗА, ЛЕГОВАНОГО КАРБІДОМ КРЕМНІЮ

С.В. Ахонін¹, В.О. Березос¹, А.Ю. Северин¹,
М.П. Гадзира², Я.Г. Тимошенко², Н.К. Давидчук²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України. 03142, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: post@ipms.kiev.ua

Для досягнення високих механічних характеристик матеріалу на основі заліза в якості лігатури використано модифікатор високодисперсної сполуки карбиду кремнію, що забезпечує в процесі електронно-променевої плавки зміцнену наночастинками структуру матеріалу, придатного до подальшої деформаційної обробки. З метою створення нанорозмірних легуючих модифікаторів для матеріалів на основі заліза синтезовано нанорозмірний порошок у вигляді твердого розчину вуглецю в карбіді кремнію. Розроблено технологію виробництва способом електронно-променевої плавки зливків на основі заліза, легуваних високодисперсною сполукою карбиду кремнію. Проведено роботи по отриманню зливків заліза діаметром 200 мм з додаванням 1, 2 та 3 % синтезованих нанорозмірних легуючих модифікаторів на основі карбиду кремнію. Проведено термодеформаційну обробку зливків. Досліджено структуру та властивості отриманого матеріалу. Визначено, що одержані матеріали на основі заліза з додаванням нанорозмірного карбиду кремнію характеризуються дисперсним розміром зерен та нанорозмірними карбідними утвореннями пластинчастого типу. Зростання концентрації нанорозмірного карбиду кремнію від 1 до 3 % призводить до формування наноструктурованої перлітної структури. Бібліогр. 11, табл. 3, рис. 12.

Ключові слова: залізо; карбід кремнію; легування; електронно-променеве плавлення; хімічний склад; деформаційна обробка; фізико-механічні властивості; структура

При забезпеченні низької вартості до створених нових високоміцних сталей пред'являються високі експлуатаційні вимоги [1]. В останнє десятиліття значний інтерес проявляється до розробки високоміцних сталей, в яких відбувається часткова заміна дорогих легуючих елементів або застосовуються спеціальні модифікатори. Одним із перспективних напрямів в області порошкової металургії є отримання матеріалів та виробів з субмікрокристалічною структурою для досягнення в них високих показників фізико-механічних

та експлуатаційних властивостей [2]. Підвищення механічних властивостей конструкційних матеріалів здійснюється за рахунок формування в них ультрадрібнозернистої структури з розміром зерна до 1 мкм [3, 4]. Корозійностійка аустенітна сталь 12X18H10T після рівноканального кутового пресування при кімнатній температурі з розміром зерна 100 нм має межу плинності 1340 МПа, що фактично в 6 разів перевищує межу плинності цієї сталі після термообробки. При цьому пластичність зберігається на достатньо високому для такої міцності рівні ($\delta = 27\%$) [5, 6].

Для отримання нового матеріалу на основі заліза було вирішено використовувати легуючий елемент у вигляді порошку карбиду кремнію, який додавався в необхідних пропорціях до порошку заліза. Синтез порошку SiC заснований на проведенні реакції самостійно поширювального високотемпературного синтезу (СВС) в спеціально розроблених графітових або керамічних тиглях визначеного об'єму, а також створенні необхідного температурного режиму [7–9]. Загальний вигляд частинок отриманого порошку приведено на рис. 1, а його фазовий склад — в табл. 1.

З метою отримання придатних для подальшої плавки шихтових заготовок у вигляді брикетів

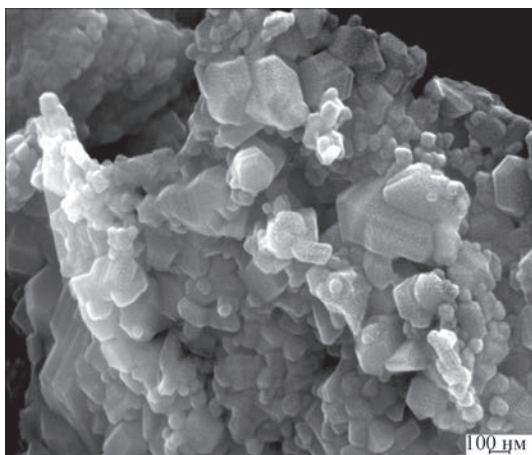


Рис. 1. Загальний вигляд частинок порошку карбиду кремнію

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>,
А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>, М.П. Гадзира — <https://orcid.org/0000-0003-4778-8352>,
Я.Г. Тимошенко — <https://orcid.org/0000-0003-4330-0970>, Н.К. Давидчук — <https://orcid.org/0000-0003-4065-9590>

Таблиця 1. Характеристики синтезованого порошку SiC

Середній розмір зерен, нм	Параметр ґратки, нм	Вміст домішкових фаз, %		
		C	Si ₃ N ₄	Si ₂ N ₂ O
70	0,43486	0,2	2,0	3,0

було проведено попередню термічну обробку їх в спеціальних карбідо-кремнієвих тиглях. Після проведення термічної обробки порошок суміші набували циліндричної форми та достатньої для їх транспортування міцності. Проведений рентгенографічний аналіз показав, що при такій термічній обробці компоненти порошкової суміші зберігаються. Суттєвих взаємодій з утворенням нових фаз не виявлено.

В сучасній спеціальній електromеталургії електронно-променева плавка (ЕПП) є одним з ефективних способів вакуумної металургії і знайшла застосування в дослідницькій практиці і промисловості для отримання сплавів, в тому числі тугоплавких і високореакційних, з наднизьким вмістом газів, летючих домішок і неметалевих включень [10]. При ЕПП в широких межах можливе регулювання швидкості плавлення зливка завдяки незалежному джерелу нагріву, що, в свою чергу, дозволяє регулювати тривалість перебування металу в рідкому перегрітому стані. ЕПП є найбільш ефективною технологією, що дозволяє практично повністю забезпечити видалення включень високої і низької щільності з металу [11]. Для експериментальної оцінки характеристик запропонованих сплавів заліза, легованого 1, 2 та 3 % SiC, проводилися дослідні плавки зливок діаметром 200 мм у електронно-променевій установці УЕ-121.

У якості шихтових матеріалів для виплавки зливок діаметром 200 мм на основі заліза використовували шихтові заготовки циліндричної форми, які були спечені з порошкового заліза марки ПЖР-3М з додаванням 1, 2 та 3 % синтезованого порошку SiC (рис. 3). В процесі плавки витратна

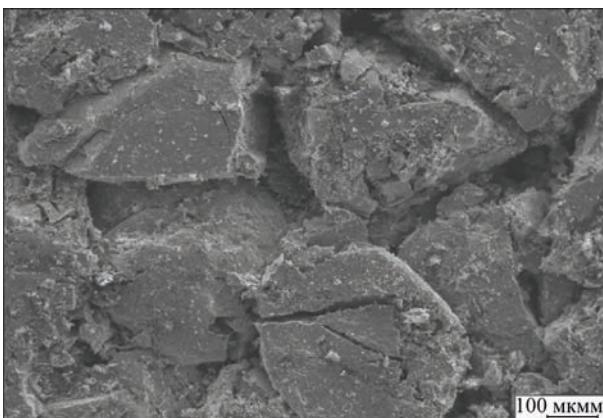


Рис. 2. Мікроструктура порошкової суміші заліза з 1 % карбіду кремнію після термообробки при 1000 °С



Рис. 3. Заготовка циліндричної форми з порошку заліза та SiC лігатурою

заготовка безперервно подавалася в робочу область над проміжною ємністю, де під дією електронно-променевого нагріву відбувалося її плавлення (рис. 4).

Зовнішній вигляд зливок після плавки представлено на рис. 5.

З метою проведення дослідження якості металу одержаних зливок заліза діаметром 200 мм, легованих 1, 2 та 3 % SiC, поверхневий шар обдирали на токарному верстаті для видалення поверхневих дефектів, що утворилися в процесі плавки (рис. 6). Зовнішній вигляд зливок після обробки їх поверхні зображено на рис. 7.

Результати проведених досліджень показують, що структура металу зливок щільна, однорідна, з відсутністю зон, що по-різному травляться по перетину зливка. Істотної різниці в структурі цен-

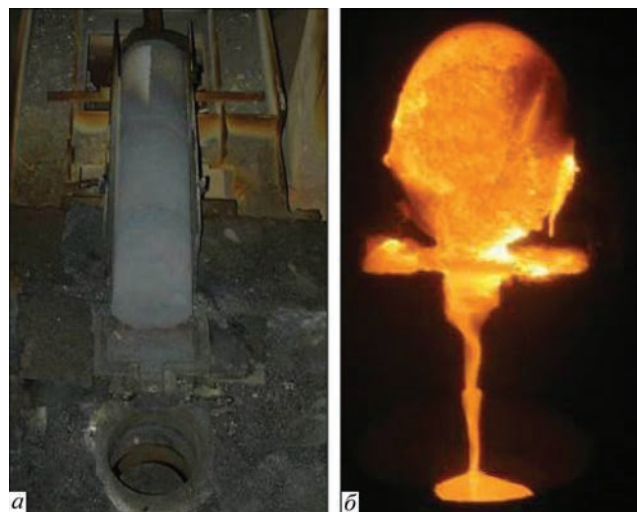


Рис. 4. Підготовлена до плавки оснастка (а) та процес плавки (б) зливок діаметром 200 мм заліза, легованого нанорозмірними частками SiC

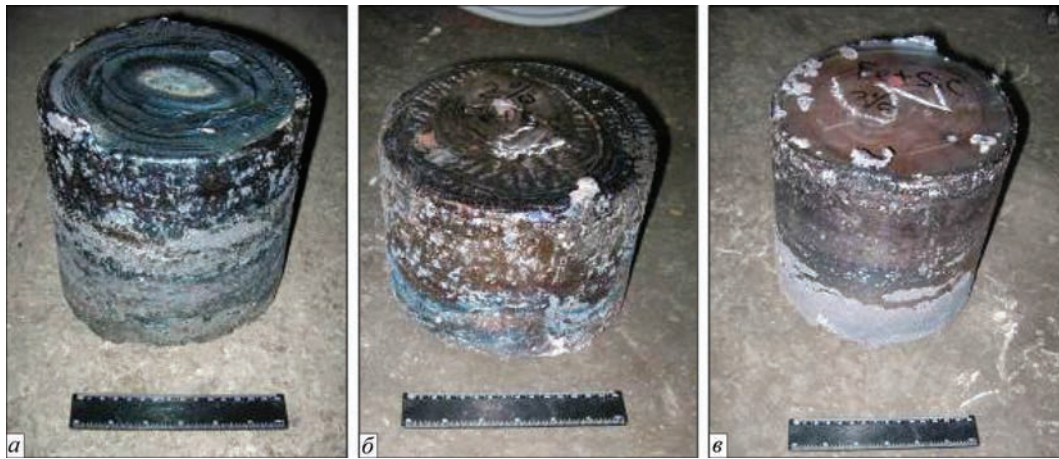


Рис. 5. Зовнішній вигляд виплавлених зливків діаметром 200 мм заліза з додаванням нанорозмірного порошку SiC, %: *a* — 1; *б* — 2; *в* — 3



Рис. 6. Процес токарної обробки поверхневого шару зливків заліза діаметром 200 мм

тральної і периферійної зон зливків не спостерігається. Дефекти у вигляді пор, раковин, тріщин і неметалевих включень не виявлені.

Рентгенографічними дослідженнями встановлено, що структура зливків однофазна і відповідає α -Fe. Додаткових фаз не виявлено (рис. 8).

Покращення структури литого матеріалу досягається шляхом подальшого застосування технологій деформаційної та термічної обробки. Пластична деформація отриманих зливків проводилася на реверсивному двовалковому прокатному стані марки Skoda 355/500. Зливки заліза піддавали га-

рячій пластичній деформації спочатку на гідравлічному пресі П-457 з наступною прокаткою на стані при температурі 1050 °С без застосування захисної атмосфери і захисних покриттів.

Були проведені дослідження механічних властивостей металу зразків заліза, легованого 1, 2 та 3 % SiC (табл. 2). Як видно з таблиці, підвищення вмісту нанорозмірного порошку SiC призводить до збільшення показників міцності й твердості, але в той же час знижується пластичність та ударна в'язкість.

Дослідження структури металу показали, що середній розмір зерен зменшується від 10 до



Рис. 7. Зовнішній вигляд зливків заліза діаметром 200 мм після токарної обробки їх поверхневого шару

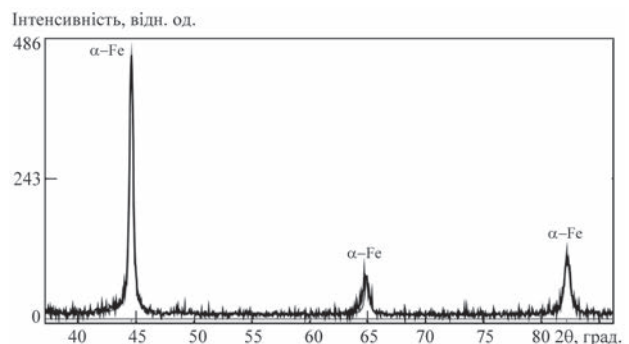


Рис. 8. Фрагмент рентгенограми зразка, утвореного з додаванням 3 % SiC

Таблиця 2. Механічні характеристики гарячекатаних зразків на основі заліза з додаванням нанорозмірного карбиду кремнію

Склад зразків	Межа короткочасної міцності (σ_b), МПа	Межа плинності ($\sigma_{0,2}$), МПа	Пластичність (δ), %	Ударна в'язкість (KCU), кДж/м ²	Твердість (HV_{30}), ГПа
Fe + 1,0 % SiC	455	257	28,4	>3000	1,5
Fe + 2,0 % SiC	629	438	25,4	725	2,0
Fe + 3,0 % SiC	651	458	21,6	670	2,5

2 мкм при зростанні вмісту карбиду кремнію від 1 до 3 %, що сприяє реалізації високої пластичності та ударної в'язкості (рис. 9).

Особливо виділяється високим значенням ударної в'язкості зразок, утворений з додаванням 1 % нанорозмірного карбиду кремнію.

Застосування растрової електронної мікроскопії показало, що досліджувані зразки мають перлітну структуру (рис. 10). Зростання вмісту нанорозмірного порошку SiC призводить до подібнення зерен фериту та формування нанорозмірного пластинчастого карбиду заліза. Як показали дослідження електронної мікроскопії високої роздільної здатності, карбідні пластинчасті утворення не перевищують товщини 20...25 нм з середньою відстанню між ними до 150 нм (рис. 11). В окремих випадках вона не перевищує 100 нм, що свідчить про наноструктурованість в цілому структури одержаного матеріалу.

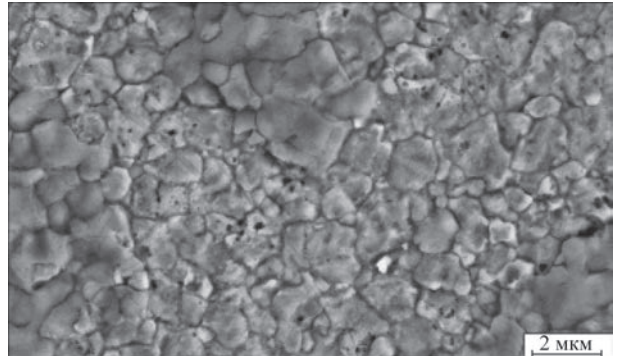


Рис. 9. Зеренна структура одержаного матеріалу на основі заліза, утвореного з додаванням 3 % нанорозмірного карбиду кремнію

Сформована структура нанорозмірного перліту є досить стабільною і не пов'язана з режимом охолодження.

Гартування одержаного матеріалу проводили у воді при температурі 20 °С. Температура нагріву в

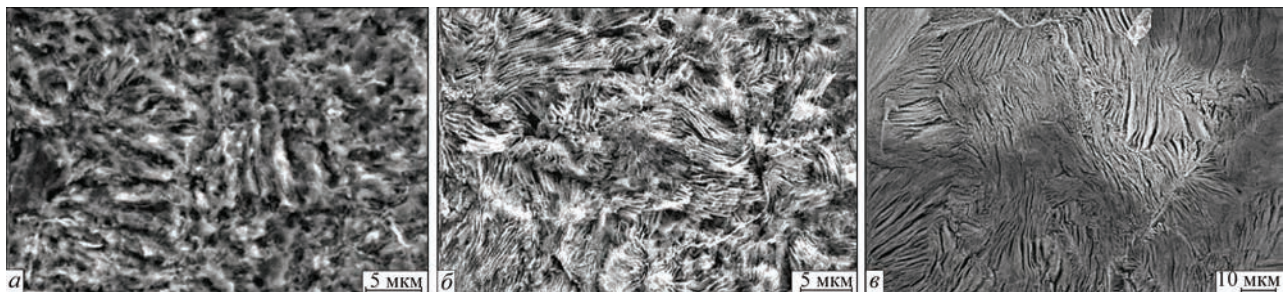


Рис. 10. Мікроструктури зразків на основі заліза, утворених з додаванням нанорозмірного карбиду кремнію: а — Fe + 1,0 % SiC; б — Fe + 2,0 % SiC; в — Fe + 3,0 % SiC

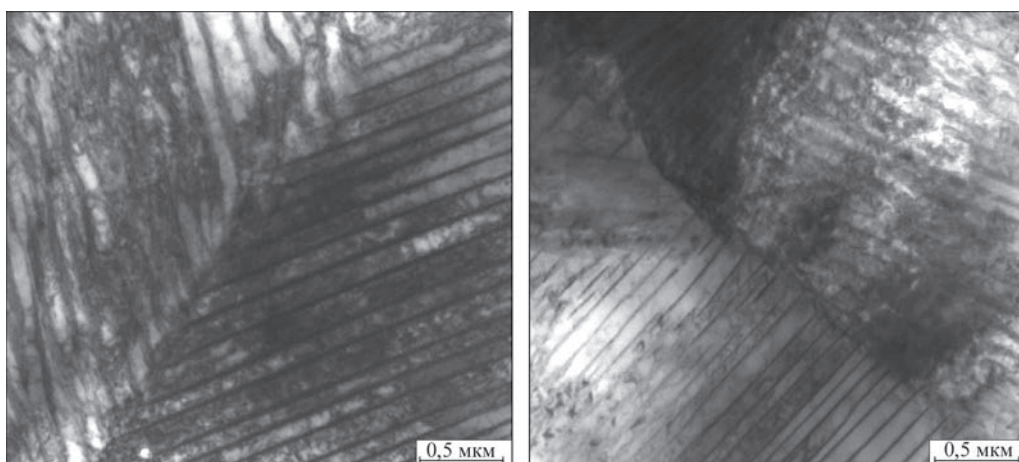


Рис. 11. Мікроструктури високодисперсних перлітних зерен гарячекатаних зразків на основі заліза, утворених з додаванням 3,0 % SiC

Таблиця 3. Механічні характеристики гартованих зразків на основі заліза, одержаних з додаванням нанорозмірного карбиду кремнію

Склад зразків	Межа короткочасної міцності (σ_B), МПа	Межа плинності ($\sigma_{0,2}$), МПа	Пластичність (δ), %	Твердість (HRC)
Fe + 1,0 % SiC	892	592	15,3	30...32
Fe + 2,0 % SiC	1556	1431	1,8	60...62
Fe + 3,0 % SiC	1820	1517	5,5	62...64

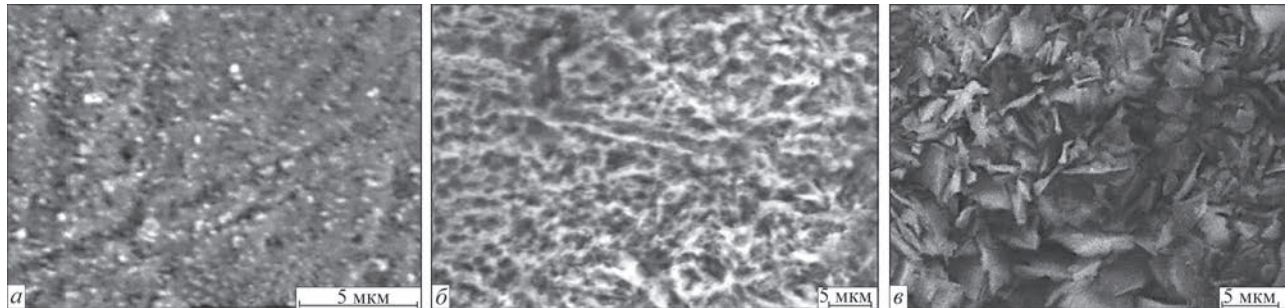


Рис. 12. Мікроструктури гартованих зразків на основі заліза, утворених з додаванням нанорозмірного порошку карбиду кремнію: а — Fe + 1,0 % SiC; б — Fe + 2,0 % SiC; в — Fe + 3,0 % SiC

резистивній печі не перевищувала 870 °С. Механічні характеристики наведені в табл. 3.

Гартування призводить до суттєвих змін структури (рис. 12). Для зразка Fe + 1,0 % SiC характерним є наявність високодисперсних карбідних утворень, які рівномірно розподілені в матриці заліза. Розмір таких карбідних утворень не перевищує 0,2...0,3 мкм. При зростанні концентрації нанорозмірного карбиду кремнію формується матеріал, для якого при гартуванні карбідні утворення мають вигляд подовжених структур і наближаються за формою до пластинчастих утворень. Тому для зразка Fe + 2,0 % SiC протяжність карбідних утворень досягає 10 мкм і більше, що суттєво позначається на пластичності. Форма карбідних утворень та їх розміри в більшій мірі впливають не стільки на міцність та твердість, як на здатність до пластичного деформування.

Для зразка Fe + 3,0 % SiC форма карбідних утворень набуває вигляду хаотично розподілених в металевій матриці пластин, розміри яких по довжині не перевищують 5 мкм, а по товщині 0,2...0,3 мкм. Така структура більш здатна до пластичної деформації.

Висновки

1. Розроблено технологію електронно-променевої виплавки зливків на основі заліза з додаванням нанорозмірного карбиду кремнію.

2. Визначено, що одержані матеріали на основі заліза з додаванням нанорозмірного карбиду кремнію характеризуються дисперсним розміром зерен та нанорозмірними карбідними утвореннями пластинчастого типу. Зростання концентрації нанорозмірного карбиду кремнію від 1 до 3 % при-

зводить до формування наноструктурованої перлітної структури.

3. Гартування заліза, легованого нанорозмірним карбідом кремнію, призводить до суттєвого зростання міцності та зниження пластичності. Найкраще поєднання міцності та пластичності досягається при гартуванні матеріалу, утвореного з додаванням 3 % нанорозмірного кремнію.

Список літератури

1. Ершов Г.С., Бычев О.Б. (1982) *Физико-химические основы рационального легирования сталей и сплавов*. Москва, Металлургия.
2. Гусев А.И., Ремпель А.А. (2001) *Нанокристаллические материалы*. Москва, Физматлит.
3. Meyers, M.A., Mishra, A., Benson, D.J. (2006) Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progr. Mater. Sci.*, **51**, 427–556.
4. Валиев Р.З., Александров И.В. (2007) *Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства*. Москва, ИКЦ «Академкинга».
5. Косицына И.И., Сагарадзе В.В., Копылов В.И. (1999) Формирование высокопрочного и высокопластичного состояния в метастабильных аустенитных сталях методом равноканально-углового прессования. *Физика металлов и металловедение*, **88(5)**, 99–104.
6. Korznikov, A.V., Safarov, I.M., Nazarov, A.A., Valiev, R.Z. High strength state in low carbon steel with submicron fibrous structure. *Materials Science and Engineering, A*, **206**, 1, 39–44.
7. Gadzira, M., Gnesin, G., Mykhaylyk, O. et al. (1998) Solid solution of carbon in β -SiC. *Materials Letters*, **35**, 277–282.
8. Gadzira, M., Gnesin, G., Mykhaylyk, O., Andreyev, O. (1998) Synthesis and structural peculiarities of nonstoichiometric β -SiC. *Diamonds and Related Materials*, **7**, 1466–1470.
9. Гадзира Н.Ф., Гнесин Г.Г., Михайлик А.А. (2001) Механизм образования твердого раствора углерода в карбиде кремния. *Порошковая металлургия*, **9–10**, 15–18.
10. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. (2008) *Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорреакционных металлов*. Киев, Наукова думка.

11. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.

References

1. Ershov, G.S., Bychev, O.B. (1982) *Physico-chemical principles of rational alloying of steels and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Gusev, A.I., Rempel, A.A. (2001) *Nanocrystalline materials*. Moscow, Fizmatlit [in Russian].
3. Meyers, M.A., Mishra, A., Benson, D.J. (2006) Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progr. Mater. Sci.*, **51**, 427–556.
4. Valiev, R.Z., Aleksandrov, I.V. (2007) *Bulk nanostructural metallic materials: producing, structure and properties*. Moscow, Akademkniga in Russian].
5. Kositsyna, I.I., Sagaradze, V.V., Kopylov, V.I. (1999) Formation of high-strength and high-plastic state in metastable austenitic steels by method of equal channel angular pressing. *Fizika Metallov i Metallovedenie*, **88(5)**, 99–104 [in Russian].
6. Korznikov, A.V., Safarov, I.M., Nazarov, A.A., Valiev, R.Z. High strength state in low carbon steel with submicron fibrous structure. *Mater. Sci. and Engineering, A*, **206**, 1, 39–44.
7. Gadzira, M., Gnesin, G., Mykhaylyk, O. et al. (1998) Solid solution of carbon in β -SiC. *Materials Letters*, **35**, 277–282.
8. Gadzira, M., Gnesin, G., Mykhaylyk, O., Andreyev, O. (1998) Synthesis and structural peculiarities of nonstoichiometric β -SiC. *Diamonds and Related Materials*, **7**, 1466–1470.
9. Gadzira, N.F., Gnesin, G.G., Mikhaylik, A.A. (2001) Mechanism of formation of carbon solid solution in silicon carbide. *Poroshk. Metallurgiya*, **9–10**, 15–18 [in Russian].
10. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2008) *Electron beam melting of refractory and high-reactive metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
11. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

PRODUCING BY ELECTRON BEAM MELTING THE INGOTS OF IRON ALLOYED WITH SILICON CARBIDE

S.V. Akhonin¹, V.O. Berezos¹, A.Yu. Severin¹, M.P. Gadzira², Ya.G. Timoshenko², N.K. Davidchuk²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevykh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²I.M. Frantsevich IPM of the NAS of Ukraine.

3 Krzhizhanivskogo Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: post@ipms.kiev.ua

In order to achieve high mechanical characteristics of iron-based material, a modifier of highly-dispersed silicon carbide compound was used as master alloy that during electron beam melting provides a strengthened by nanoparticles structure of a material, suitable for further deformation processing. A nanosized powder was synthesized in the form of solid solution of carbon in silicon carbide, to create nanosized alloying modifiers for iron-based materials. A technology was developed for producing by electron beam melting iron-based ingots, alloyed by a highly-dispersed silicon carbide compound. Work was performed on producing 200 mm diameter iron ingots, with addition of 1, 2 and 3 % of synthesized nanosized alloying modifiers, based on silicon carbide. Thermal deformation processing of the ingots was conducted. The structure and properties of the produced material were studied. It was established that the produced materials based on iron with addition of nanosized silicon carbide are characterized by a dispersed size of the grains and nanosized carbide formations of platelike type. Increase of the concentration of nanosized silicon carbide from 1 to 3 % leads to formation of nanostructured pearlite structure. Ref. 11, Tabl. 3, Fig. 12.

Key words: iron; silicon carbide; alloying; electron beam melting; chemical composition; deformation processing; physico-mechanical properties; structure

Надійшла до редакції 30.06.2020

НОВА КНИГА

Рябцев И.А., Демченко Ю.В., Панфилов А.И. *Износостойкий и коррозионностойкий биметалл*. – Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2020. – 224 с.

Наведено класифікацію багатшарових металів, описано основні способи їх виробництва, охарактеризовано структура і властивості матеріалів, які застосовуються в якості основного і плакуючого шарів. Висвітлено питання теорії і практики отримання багатшарових матеріалів, наведено методики оцінки якості і властивостей багатшарових матеріалів, отриманих різними способами. Велику увагу приділено особливостям їх зварювання і застосування в різних галузях промисловості.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників, зайнятих в області наплавного і ремонтного виробництва. Може бути корисною викладачам, аспірантам і студентам технічних університетів.

Замовлення на книгу прохання надсилати в редакцію журналу

