

УДК 669.017.3:669.15

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОЦИКЛУВАННЯ ЗА ТЕМПЕРАТУР ПЕРИТЕКТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ЯК СПОСІБ ПОДРІБНЕННЯ КАРБІДНИХ ФАЗ У ПРОЦЕСІ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

ФЕДОРКОВА Н. М.^{1*}, к. т. н., доц.,
БАЛАКІН О. А.², с. н. с.,
МИРОНОВА Т. М.³, д. т. н., проф.,
СЕМЕНОВА І. О.⁴, к. т. н., доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 050 482 82 23, e-mail: natfedorkova2014@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1030-9007

² Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 050 363 34 70, e-mail: alexandrbalakinmail@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2542-1368

³ Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 095 584 70 65, e-mail: t.myronova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0105-5479

⁴ Кафедра матеріалознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 066 007 45 85, e-mail: 2803semenova@ukr.net, ORCID ID: [0000-0002-4083-0610](https://orcid.org/0000-0002-4083-0610)

Анотація. Постановка проблеми. Проведення високотемпературного термоцикування в області перитектичного перетворення для отримання подрібненої структури швидкорізальної сталі ще під час кристалізації. **Методика.** Експериментальні зразки отримували за допомогою установки для структурно-гартівних досліджень, що дозволяє здійснювати за допомогою комп'ютерних програм комбінований режим ВТЦО + гарт, фіксувати структуру за необхідної температури, а також подрібнювати карбідні фази. **Результати.** Установлено, що під час термоциклічної обробки змінюється хімічний склад карбідів і фазовий склад сталі, що спричинює подрібнення карбідних включень та більш рівномірний їх розподіл в аустенітній матриці. **Наукова новизна** полягає у визначенні впливу термоциклічної обробки, що відбувається в рідко-твердій області в сталі Р6М5Ф3, на структуроутворення, яке характеризується зменшенням дендритної ліквіації, розмірів карбідних фаз та їх більш рівномірним розташуванням. **Практична значимість.** Застосовуючи високотемпературну термоциклічну обробку литих заготовок під час їх кристалізації, можна отримати більш рівномірну та подрібнену структуру сталі. Це дозволить зменшити витрати на подальшу багаторазову термічну обробку, яка застосовується досі на підприємствах для виготовлення різальних інструментів, що знизить собівартість готового інструменту. Крім того, більш рівномірний розподіл легуючих елементів та подрібнених карбідних фаз забезпечить підвищену вторинну твердість та зносостійкість різального інструменту із сталі Р6М5Ф3.

Ключові слова: високотемпературна термоциклічна обробка; температури перитектичного перетворення; вплив ВТЦО на карбідні фази; вторинна твердість; зносостійкість; різальний інструмент зі сталі Р6М5Ф3

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ПЕРИТЕКТИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ КАК СПОСОБ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ КАРБИДНЫХ ФАЗ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

ФЕДОРКОВА Н. Н.^{1*}, к. т. н., доц.,
БАЛАКИН А. А.², с. н. с.,
МИРОНОВА Т. М.³, д. т. н., проф.,
СЕМЕНОВА И. О.⁴, к. т. н., доц.

^{1*} Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина 4, 49005, Днепр, Украина, тел. +38 050 482 82 23, e-mail: natfedorkova2014@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1030-9007

² Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина 4, 49005, Днепр, Украина, тел. +38 050 363 34 70, e-mail: alexandrbalakinmail@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2542-1368

³ Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина 4, 49005, Днепр, Украина, тел. +38 095 584 70 65, e-mail: t.myronova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0105-5479

⁴ Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина 4, 49005, Днепр, Украина, тел. +38 066 007 45 85, e-mail: 2803semenova@ukr.net, ORCID ID: [0000-0002-4083-0610](https://orcid.org/0000-0002-4083-0610)

Аннотация. Постановка проблемы. Проведение высокотемпературного термоциклирования в области перитектического превращения для получения измельченной структуры быстрорежущей стали еще во время кристаллизации. **Методика.** Экспериментальные образцы получали с помощью установки для структурнозакалочных

исследований, которая позволяет осуществлять с помощью компьютерных программ комбинированный режим ВТЦО-закалка, фиксировать структуру при необходимой температуре, а также измельчать карбидные фазы. **Результаты.** Установлено, что при термоциклической обработке изменяется химический состав карбидов и фазовый состав стали, что приводит к измельчению карбидных включений и более равномерному их распределению в аустенитной матрице. **Научная новизна** заключается в определении влияния термоциклической обработки, которая осуществляется в жидкотвердой области в стали Р6М5Ф3, на структурообразование, которое характеризуется уменьшением дендритной ликвации, размеров карбидных фаз и их более равномерным расположением. **Практическая значимость.** Применяя высокотемпературную термоциклическую обработку литых заготовок в процессе их кристаллизации, можно получить более равномерную и измельченную структуру стали. Это позволит уменьшить затраты на дальнейшую многократную термическую обработку, которая используется до сих пор на предприятиях при изготовлении режущих инструментов, что снизит себестоимость готового инструмента. Кроме того, более равномерное распределение легирующих элементов и измельченных карбидных фаз обеспечит повышенную вторичную твердость и износостойкость режущего инструмента из стали Р6М5Ф3.

Ключевые слова: высокотемпературная термоциклическая обработка (ВТЦО); температуры перитектического превращения; влияние ВТЦО на карбидные фазы; вторичная твердость; износостойкость; режущий инструмент из стали Р6М5Ф3

USING THERMAL CYCLING AT PERITECTIC TRANSFORMATION TEMPERATURES FOR CARBIDE PHASE CRUSHING DURING CRYSTALLIZATION

FEDORKOVA N.M.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.,
BALAKIN O.A.², Senior researcher,
MYRONOVA T.M.³, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
SEMENOVA I.O.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.

^{1*} Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 050 482 82 23, e-mail: natfedorkova2014@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1030-9007

² Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 050 363 34 70, e-mail: alexandrbalakinmail@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2542-1368

³ Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 095 584 70 65, e-mail: t.myronova@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0105-5479

⁴ Department of Materials Science, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4 Gagarin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 066 007 45 85, e-mail: 2803semenova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4083-0610

Summary. Problem statement. Using high-temperature thermal cycling in the field of peritectic transformation to obtain atomized high-speed steel structure during its crystallization. **Method.** Experimental samples were obtained using a structure and hardening test facility which makes it possible to use a computer-aided high-temperature thermal cycling + hardening combined mode, fix the structure at desired temperature and crush carbide phases. **Results.** It has been found that during thermal cyclic treatment the chemical composition of carbides and phase composition of steel change which results in crushing of carbide particles and their more uniform distribution in the austenitic matrix. **The scientific novelty** consists in determining the effect of thermal cyclic treatment that occurs in the liquid-solid region in R6M5F3 steel on the structure formation which is characterized by a decrease in dendritic segregation and the sizes of carbide phases and their more uniform distribution. **Practical significance.** High-temperature thermal cyclic treatment of cast billets during their crystallization makes it possible to obtain more uniform and atomized steel structure. This will reduce costs required for further multiple heat treatments which are still used at factories in the manufacture of cutting tools and therefore reduce the cost price of the finished tool. Moreover, a more uniform distribution of alloying elements and crushed carbide phases will ensure increased secondary hardness and durability of cutting tools made of R6M5F3 steel.

Keywords: high-temperature thermal cyclic treatment; peritectic transformation temperatures; effect of HTCT on carbide phases; secondary hardness; durability; cutting tools made of R6M5F3 steel

Вступ

Матеріалом дослідження в цій роботі служили зразки із сталі Р6М5Ф3, отримані за допомогою експериментальної установки для структурно-гартівних досліджень, розробленої професором, доктором технічних наук Є. П. Калінушкіним, яка дозволяє здійснювати за допомогою комп'ютерного управління будь-який необхідний режим

термообробки і, завдяки надшвидкому охолодженню, фіксувати кінцеву структуру загартуванням від заданої температури. Такі можливості установки дозволили досліджувати процеси структуроутворення в сплавах і досягати додаткового подрібнення карбідних фаз ще в процесі кристалізації сплаву.

Один із способів дії на структуру і властивості сталей – це термоциклічна обробка [1–3]. Під час проведення високотемпературної ТЦО за температур перитектичного перетворення (далі – ВТЦО) в

результаті дифузійного перерозподілу легуючих елементів характер структуроутворення у процесі подальших перитектичного та евтектичного перетворень змінюється. Підвищення розчинності компонентів дає можливість дифузійного масопереносу через рідкий та твердий розчини, завдяки чому з'являється можливість дифузійного розділення евтектичних та надлишкових карбідних фаз, а також їх сфероїдизації та коалесценції [4; 5]. Відомо, що ВТЦО істотно впливає на структурний стан карбідів, коли з безперервної сітки пластинчастої будови утворюються ізольовані дисперсні карбіди глобулярної форми, більш рівномірно розподілені у твердому розчині [6; 7].

Результати досліджень та їх обговорення

Під час кристалізації сталі Р6М5 за стандартною заводською технологією евтектичні колонії переважно формують суцільну сітку пластинчастої або скелетної морфології, а всередині зерна розташовані вкраплення вторинних карбідів.

У сталі Р6М5Ф3 евтектична складова відрізняється порівняно із структурою сталі Р6М5, завдяки вищому вмісту ванадію, а саме, в основному евтектична складова представлена двома типами – Аустеніт + МС на базі кубічного карбіду ванадію і Аустеніт + М₂С на базі метастабільного карбіду молібдену з пластинчастою морфологією [8].

У процесі росту карбіди МС можуть зростатися з пластинами карбідів М₂С, утворюючи безперервну

сітку. У промисловій сталі Р6М5Ф3 евтектика на базі карбіду МС, як правило, характеризується слабкою мірою розгалуження, що створює ілюзію наявності дуже великих і ізольованих монокарбідів ванадію по межах колонії пластинчатого типу на базі карбідів вольфраму і молібдену.

Існуючі режими ТЦО за температур твердофазних перетворень впливають на рівень механічних властивостей сталі. Проте практично відсутні роботи, спрямовані на вивчення впливу ВТЦО за температур рідко-твердого стану, тобто за температур кристалізації.

Тому це дослідження спрямоване на розробку режимів ВТЦО за температур подальшого перитектичного і евтектичного перетворення, які дозволять отримувати подрібнену структуру ще на стадії кристалізації. Це дозволить знизити енерговитрати на подальшу багатостадійну термообробку литого різального інструменту. Отож ця робота є актуальна і важлива як із наукової, так і з практичної точки зору.

За допомогою установки для структурно-гартівних досліджень були випробувані комбіновані режими твердіння (рис. 1), які відрізнялися один від одного кількістю циклів ВТЦО (1, 2 і 3 цикли), а також тривалістю ізотермічних витримок за верхньої (1 330 – 1 320 °С) і нижньої (1 260 °С) температур, які складали відповідно до 5/2 хвилини, 30/10 секунд і 0/0 секунд.

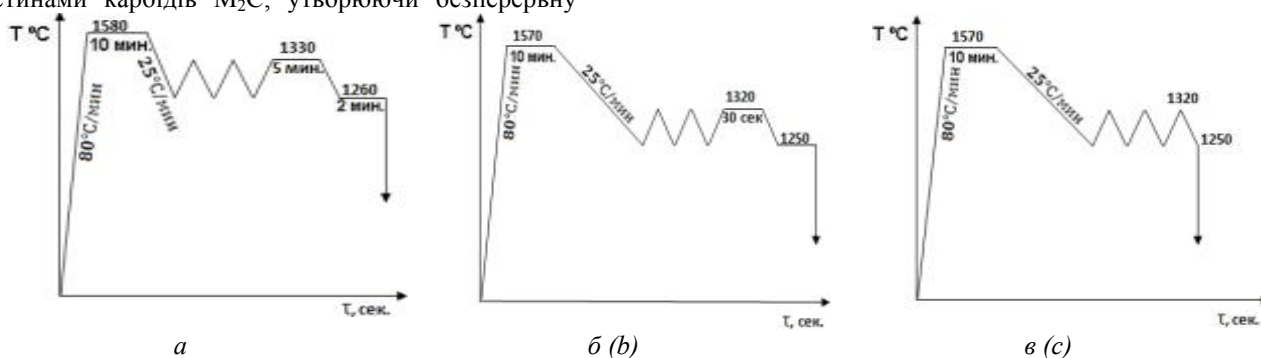


Рис. 1. Приклади комбінованих режимів кристалізації з трьома циклами ВТЦО з різними витримками: а – 5/2 хв; б – 30/10 с; в – 0/0 с /

Fig. 1. Examples of combined crystallization modes with three HTCT cycles with different holding times: a – 5/2 min; b – 30/10 sec; c – 0/0 sec

Як видно з рисунка 2, тривалі витримки (5/2 хв) викликали істотне збільшення розмірів аустенітних зерен і розчинення колоній первинних карбідів, які ми спостерігаємо вже у вигляді залишків розірваної карбідної сітки по межах зерен аустеніту (рис. 2 а), а також появу зон підплавлення аустенітної матриці, в яких під час загартування утворювалися тонкодиференційовані А-К колонії.

Зменшення тривалості витримок до 30/10 с (рис. 2 б) істотно зменшило розміри аустенітних зерен, при цьому карбідна сітка складалася з великих і складних за морфологією евтектичних колоній. Тому очікувалося, що в режимах без витримки ми отримаємо ще більш подрібнену структуру, як за

розмірами аустенітних зерен, так і за розмірами колоній і самих карбідів. Проте дослідження отриманої структури (рис. 2 в) показало наявність ділянок δ-фериту, збільшення аустенітного зерна і зменшення карбідних колоній. Поява δ-фериту пов'язана з тим, що ВТЦО проводили за температур перитектичного перетворення і циклічний нагрів у двофазну область існування δ-Ф + рідина викликав зворотну перитектичну реакцію і появу ділянок δ-фериту.

Таким чином, нагріваючи до температури вище перитектичної з ізотермічними витримками по 30/10 с зумовлює, з одного боку, розчинення великих пластинчатих карбідів на основі молібдену

і вольфраму, виділення вторинних карбідів на основі ванадію, а, з іншого – утворення в місцях появи рідких прошарків тонкодиференційованих аустенітно-карбідних евтектичних колоній (рис. 3 а). Зменшення розмірів аустенітного зерна (рис. 3 б), потовщення евтектичних колоній в місцях підплавлення матриці, виділення дисперсних вторинних карбідів спричинює

подрібнення карбідних фаз і більш рівномірний їх розподіл у матриці сталі.

Після трьох циклів ВТЦО в матриці залишаються переважно ванадієві карбіди: великі первинні, дрібні в місцях підплавлення, що мають кутову форму (рис. 3 е), а також дрібні вторинні, такі, що виділилися з матриці аустеніту в процесі ВТЦО.

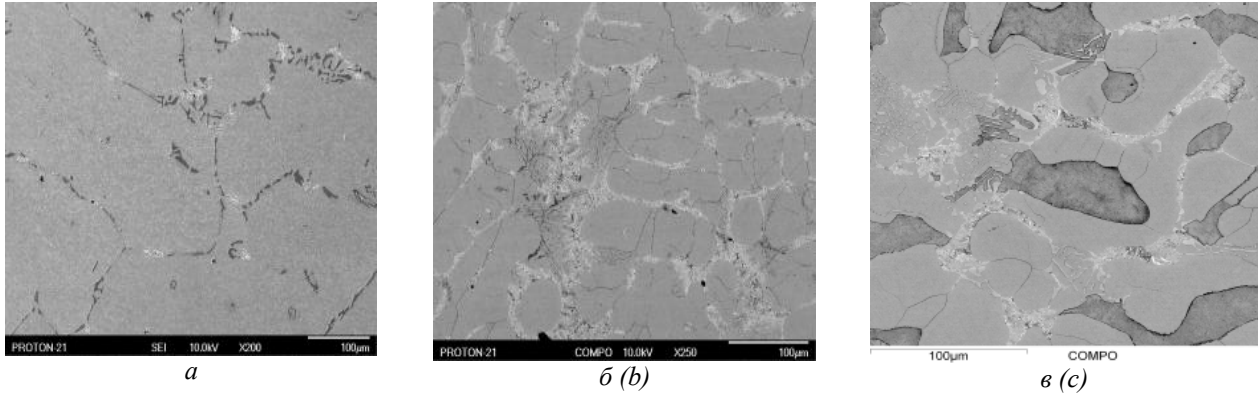


Рис. 2. Мікроструктура сталі Р6М5Ф3 після трьох циклів ВТЦО з різними витримками: а – 5/2 хв; б – 30/10 с; в – 0/0 с, РЕМ, × 250 /
 Fig. 2. Microstructure of R6M5F3 steel after three HTCT cycles with different holding times: а – 5/2 min; б – 30/10 sec; в – 0/0 sec, SEM, × 250

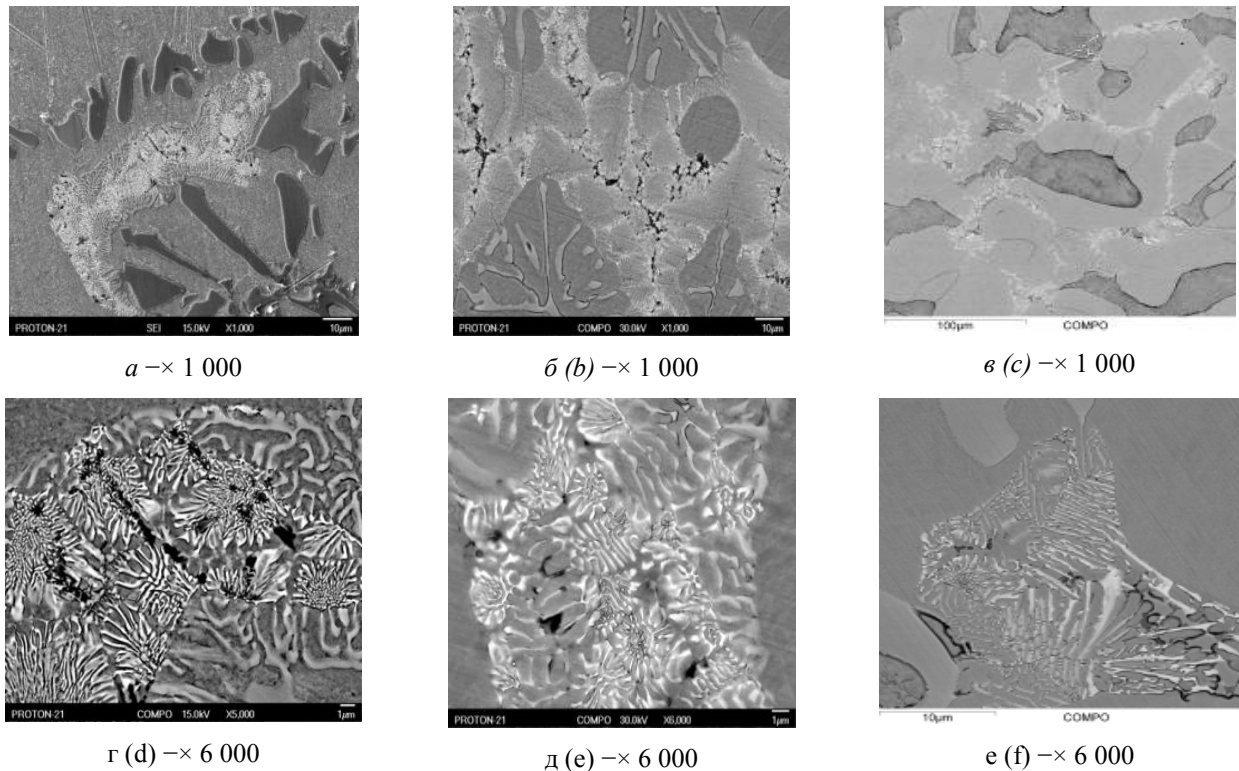


Рис. 3. Вплив тривалості витримок трьох циклів ВТЦО на морфологію карбідних колоній : а, г – 5/2 хв; б, д – 30/10 с; в, е – 0 с, РЕМ /
 Fig. 3. Effect of tempering times of three HTCT cycles on the morphology of carbide colonies: а, d – 5/2 min; б, e – 30/10 sec; в, f – 0/0 sec, SEM

Дослідження хімічного складу фаз сталі Р6М5Ф3 методом локального спектрального аналізу і еже-

спектроскопії дозволили виявити вплив тривалості ізотермічних витримок ВТЦО комбінованих режимів

кристалізації і провести порівняльні дослідження охолодження заготівель литого інструменту складу фаз із стандартним заводським режимом (таблиця).

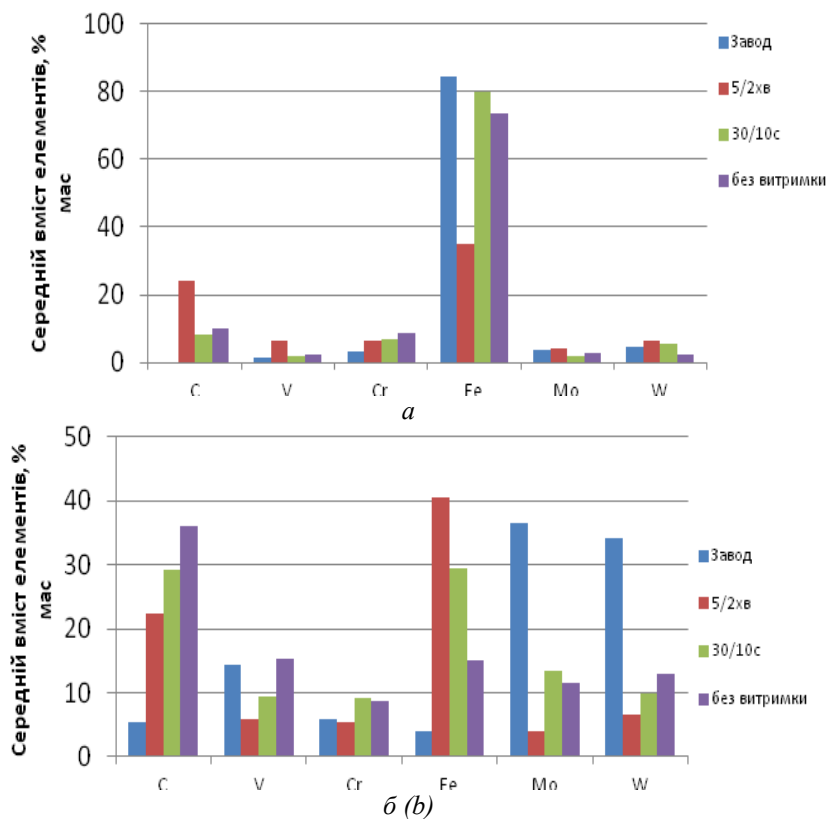
Таблиця

**Хімічний склад карбідних фаз у сталі Р6М5Ф3 після різних обробок /
The chemical composition of carbide phases in steel R6M5F3 after different treatments**

Кількість циклів/ витримка	Середній вміст елементів, %					
	Mo	C	V	Cr	Fe	W
Карбіди МС на основі ванадію						
5/2 хв	7,1	47,6	44,6	-	-	4,5
30/10 с	6,36	47,8	36,8	0	2,7	2,44
0 с	7,4	47,6	36,8	4,0	2,0	5,6
Карбіди М ₂ С на основі Мо, W, Cr, V, Fe						
5/2 хв	4,0	22,3	5,8	5,5	40,4	6,5
30/10 с	13,5	29,3	9,5	9,1	29,5	9,9
0 с	11,6	36,0	15,4	8,8	15,1	13,0
Аустенітна матриця						
5/2 хв	4,1	24,3	6,6	6,3	35,0	6,4
30/10 с	1,97	8,1	2,0	7,1	79,7	5,5
0 с	2,8	10,2	2,2	8,9	73,4	2,5
Після стандартної заводської технології охолодження під час кристалізації						
Карбід МС	4,7	15,1	68,4	4,8	2,3	4,7
Карбід М ₂ С	36,4	5,3	14,4	5,8	4,0	34,1
Матриця А	3,9	н/в	1,3	3,4	84,5	4,7

На рисунку 4 наведено гістограми середнього вмісту основних хімічних елементів в аустенітній матриці сталі, в карбідах М₂С (на основі молібдену і вольфраму) і МС (на основі ванадію). Як видно з гістограм, змінилися середні значення вмісту

легуючих елементів не лише порівняно із заводським режимом, а й зі зміною тривалості витримки. Стався перерозподіл легуючих елементів у фазах, їх деяке «усереднення».



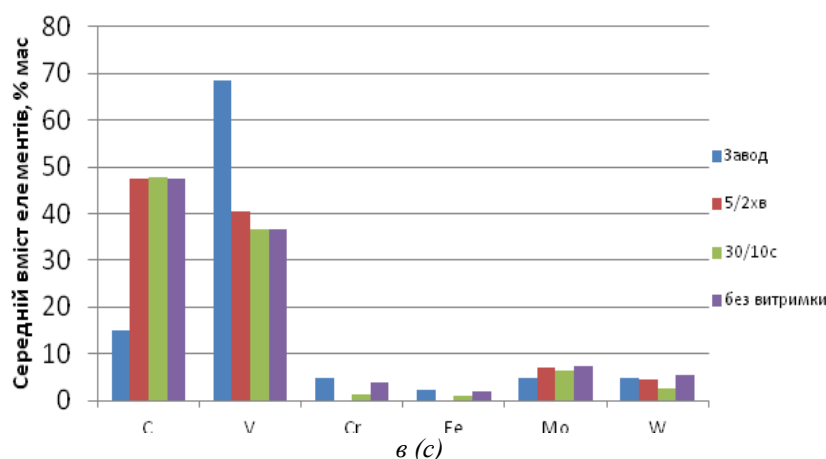


Рис. 4. Розподіл хімічних елементів у фазах сталі Р6М5Ф3 після твердіння за різними технологіями:
а – аустенітна матриця; б – карбіди M_2C ; в – карбіди MC /

Fig. 4. Chemical elements distribution in R6M5F3 steel phases after the concretion by different technologies:
a – austenitic matrix, b – M_2C carbides, c – MC carbides

Так, у карбідах M_2C зі зменшенням тривалості витримки зріс вміст C, Cr, V, Fe, зменшився вміст Mo і W, у карбідах MC – зменшився вміст C, Mo, W, а V і Cr – збільшився, в матриці також підвищився вміст усіх легуючих елементів.

Висновки

1. Визначено вплив комбінованих режимів ВТЦО, що забезпечують наявність твердо-рідкого стану, на формування кінцевої структури сталі Р6М5Ф3. У первинній литій структурі сталі відбуваються такі перетворення:

– часткове розчинення масивних пластин карбідів M_2C в евтектичних колоніях, при цьому спостерігається перехід легуючих елементів у твердий розчин;

– утворення тонкодиференційованих аустенітно-карбідних колоній складної морфології на базі карбідів MC і M_2C у ділянках підплавлення;

Такий дифузійний перерозподіл елементів сприяє формуванню в аустенітній матриці більшої кількості карбідних фаз і виділенню їх у вигляді вторинних дрібних карбідів.

– виділення дрібних вторинних карбідів MC завдяки активізації дифузійних процесів в аустеніті;

– зменшення розмірів аустенітного зерна і збільшення розмірів аустенітно-карбідних колоній, що утворилися в місцях підплавлення аустеніту;

– збільшення загальної кількості карбідів MC на базі ванадію.

2. Установлено, що зменшення тривалості ізотермічних витримок під час ВТЦО додатково сприяє збільшенню загальної кількості карбідів за рахунок виділення вторинних дрібних карбідів, зменшенню зерен аустеніту.

3. Указані чинники сприяють підвищенню твердості, зносостійкості, а зменшення розмірів карбідних фаз – ударній в'язкості сталі Р6М5Ф3.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Леговані сталі та сплави з особливими властивостями : монографія / [В. З. Куцова, М. А. Ковзель, О. А. Носко]. – Дніпропетровськ : НМетАУ, 2008. – 350 с.
2. Меськин В. С. Основы легирования стали : монографія / В. С. Меськин. – Москва : Металлургия, 1964. – 684 с.
3. Металознавство і термічна обробка металів і сплавів : монографія / [Ю. М. Таран, С. П. Калінушкін, В. З. Куцова та ін.]. – Дніпропетровськ : Дніпрокнига, 2002. – 260 с.
4. Основы материаловедения : учеб. для вузов / Под ред. И. И. Исидорина. – Москва : Машиностроение, 1976. – 436 с.
5. Гудремон Э. Специальные стали : монографія / Э. Гудремон. – Москва : Металлургия, 1966. – 234 с.
6. Федоркова Н. Н. Влияние высокотемпературного термоциклирования на распределение легирующих элементов в фазах стали Р6М5Ф3 / Н. Н. Федоркова, А. А. Балакин, В. А. Соколянский, А. В. Сидоренко, Н. В. Лозовой // XIV Междунар. науч. конф. – Честошово. – 2013. – С. 11–14.
7. Balakin A. A. Thermal cyclic treatment of high-speed steel Р6М5 in subperitectic region as a factor of finite structure characteristics regulation / A.A. Balakin, N.M. Fedorkova, E.V. Bal', E.M. Karlova // Металлургия-2012. Новые технологии и достижения металлургии. – 2012. – № 25. – С. 147–157.
8. Миронова Т. М. Влияние высокотемпературной термоциклической обработки на формирование структуры в литых быстрорежущих сталях / Т. М. Миронова, О. А. Балакин, Н. Н. Федоркова, Ю. В. Головки // Металознавство та термічна обробка металів. – 2011. – № 1–2. – С. 192–199.

REFERENCES

1. Kutsova V.Z., Kovzel M.A. and Nosko O.A. *Legovani stali ta splavi z osoblivimi vlastivostyami* [Alloyed steels and alloys with special properties]. Dnipropetrovsk: National Metallurgical Academy of Ukraine Press, 2008, 350 p. (in Ukrainian).
2. Mes'kin V.S. *Osnovy legirovaniya stali* [Basics of steel alloying]. Moscow: Metallurgy Publ., 1964, 684 p. (in Russian).
3. Taran Yu.M., Kalinushkin E.P., Kutsova V.Z. and al. [Metallurgy and heat treatment of metals and alloys]. Dnipropetrovsk: Dniproknyga Publ., 2002, 260 p. (in Ukrainian).
4. Edited by Isidorina I.I. *Osnovy materialovedeniya* [Basics of Materials Science]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1976, 436 p. (in Russian).
5. Gudremon E. *Special'nye stali* [Special Steel]. Moscow: Metallurgy Publ., 1966, 234 p. (in Russian).
6. Fedorkova N.M., Balakin O.A., Sokolyanskiy V.A., Sydorenko A.V. and Lozovoy N.V. *Vliyanie vysokotemperaturnogo termociklirovaniya na raspredelenie legiruyuschih `elementov v fazah stali R6M5F3* [Effect of high-temperature thermal cycling on distribution of alloying elements in R6M5F3 steel phases]. XIV intern. scien. conf. Czestochowa, 2013, pp. 11–14. (in Russian).
7. Balakin O.A., Fedorkova N.M., Bal' E.V. and Karlova E.M. Thermal cyclic treatment of R6M5 high-speed steel in subperitectic region as a factor of finite structure characteristics regulation. *Metallurgiya-2012. Novye tehnologii i dostizheniya metallurgii* [Metallurgy 2012. New technologies and achievements]. 2012, no. 25, pp. 147–157. (in English).
8. Myronova T.M., Balakin O.A., Fedorkova N.M. and Golovko Yu.V. *Vliyanie vysokotemperaturnoj termociklicheskoj obrabotki na formirovanie struktury v lityh bystrorezhuschih stalyah* [Effect of high temperature thermal cycling treatment on the formation of structure in cast high-speed steels]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2011, no. 1–2, pp.192–199. (in Russian).

Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. В. Ю. Карповим (Україна); д-ром техн. наук, проф. К. І. Узловим (Україна)

Надійшла до редколегії 26.04.2016

Прийнята до друку 29.04.2016