

УДК 669.14.018.258

**ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ УМОВ НА СТРУКТУРУ
ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ 4X4H5M4Ф2**

*К. О. ГОГАЄВ¹, О. М. СИДОРЧУК^{1,2}, О. М. МИСЛИВЧЕНКО¹,
Я. І. ЄВИЧ¹, Ye. HONGGUANG²*

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ;

² Ningbo IPMS research and technology center Co., Ltd. No 218, China

Досліджено структуру та механічні властивості сталі 4X4H5M4Ф2 у термодетформованому і литому станах після гартування та відпуску, а також додаткового нагріву. Показано, що після додаткового нагріву гартованої та відпущеної сталі 4X4H5M4Ф2, який моделює умови експлуатації оснащення (робочу температуру за квазістаціонарної витримки), при 630...650°C відбувається її знеміцнення, що пов'язано з утворенням карбідів типу M_7C_3 . У литій сталі за цих умов така карбідна фаза у структурі металу відсутня, що супроводжується підвищенням її теплостійкості. Розширення температурного інтервалу експлуатації литої сталі 4X4H5M4Ф2 після оптимального режиму гартування і відпуску дасть змогу застосовувати інструмент, виготовлений з цієї сталі, до температури експлуатації 650°C. Рекомендовано не використовувати цю сталь в литому і термодетформованому станах для виготовлення інструменту, який працює в умовах циклічних ударних навантажень, для гарячого деформування кольорових металів та сплавів.

Ключові слова: штампова сталь, термодетформаційна і термічна обробки, фазовий склад, кристалічна структура, механічні властивості.

The structure and mechanical properties of 4X4H5M4Ф2 steel in heat-deformed and cast states after quenching and tempering, as well as additional heating are investigated. It is shown that after additional heating of hardened and tempered 4X4H5M4Ф2 steel, which models the operating conditions of the equipment (operating temperature during quasi-stationary exposure), its weakening occurs at 630...650°C, which is associated with the formation of M_7C_3 carbides. Cast steel under these conditions does not have such a carbide phase in the metal structure, which is the cause of an increase in its heat resistance. The expansion of the operating temperature range of cast 4X4H5M4Ф2 steel after the optimal mode of hardening and tempering allows us to use a tool made of this steel up to an operating temperature of 650°C. It is recommended not to use such steel in the cast and heat-deformed states for the manufacture of a tool for hot deformation of non-ferrous metals and alloys, which operates under conditions of cyclic impact loading.

Keywords: die steel, thermodeformation and heat treatments, phase composition, crystal structure, mechanical properties.

Вступ. Для гарячого деформування виробів з кольорових металів в інтервалі температур 400...650°C застосовують матриці зі сталі типу 4X4H5M4Ф2, яка належить до класу сталей з регульованим аустенітним перетворенням [1–5]. Сталі цього класу схильні до відпускнуї крихкості у певному температурному інтервалі [6–8]. Дослідження цієї сталі після термодетформаційного оброблення куванням (при $1060 \pm 20^\circ\text{C}$ і ступеня деформації 25%) і оптимальної термічної обробки (гартування $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ в оливі; відпуск $590 \pm 5^\circ\text{C}$, 4 h) показали [9], що вона має пере-

важно структуру відпущеного кубічного мартенситу із тетрагональністю ґратки $c/a \approx 1$, про що свідчить відсутність розщеплення піків на рентгенівських дифрактограмах. При цьому сталь має високі механічні характеристики [9].

Виготовлення екструдерів з кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 трудомістке і дорого-вартісне. Тому практичний інтерес викликає використання для цього сталі у литому і термообробленому станах. Проте відомо [10], що температура відпускної крихкості литої сталі становить 475°C і вона зумовлена формуванням твердого розчину типу $Fe_{1-x}Ni_x$. Крім цього, потрібно враховувати можливі зміни вихідної структури і службових характеристик сталі в експлуатаційних умовах, оскільки гаряча деформація кольорових сплавів може здійснюватись при 400...650°C впродовж тривалого часу.

Мета роботи – порівняти структуру і механічні властивості сталі 4Х4Н5М4Ф2 у термодеформованому куванням і литому станах після оптимальної термічної обробки та додаткового нагріву, який моделює вплив експлуатаційних умов.

Матеріал і методика. Виплавили дослідну сталь хімічного складу (mass%): 0,4...0,42 С; 3,8...3,9 Cr; 5...5,1 Ni, 3,7...3,8 Мо; 1,7...1,8 V; 0,014...0,016 Al; 0,04...0,043 W; 0,01...0,013 Co; 0,018...0,02 Nb; 0,065...0,067 Cu; 0,002...0,003 Ca; 0,003...0,005 N; 0,072...0,075 Si; 0,23...0,24 Mn; 0,004...0,005 S; 0,003...0,004 P за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co., Ltd (Китай). Порівнювали результати досліджень різних варіантів сталі у литому стані та після термодеформаційного оброблення куванням залежно від режимів термічної обробки та додаткового нагріву (табл. 1).

Таблиця 1. Варіанти досліджуваної сталі

№ варіанта	Вихідний стан	Режими термодеформаційної і термічної обробки				Додатковий нагрів
		Кування	Відпал	Гартування	Відпуск	
1	Л	–	750°C, 2 h	1100°C, охол. в оливі	–	–
2					590°C, 4 h	–
3					475°C, 2h	475°C, 2 h
4 [10]					475°C, 2h	–
5					590°C, 4 h	500°C, 2 h
6 [10]					500°C, 2h	–
7						630°C, 2 h
8					590°C, 4 h	640°C, 2 h
9						650°C, 2 h
10 [9]	ТД	1070°C			–	–
11 [9]					–	–
12					475°C, 2 h	–
13					590°C, 4 h	630°C, 2 h
14 [9]					640°C, 2 h	–
15 [9]					650°C, 2 h	–

Примітка: Л – литий стан; ТД – термодеформований куванням.

Методики рентгенофазового і рентгеноструктурного аналізів, а також вимірювання твердості (HRC), визначення границі міцності за розтягу (σ_{UTS}) та ударної в'язкості (КС) описані раніше [9]. Випробовували на стиск за додаткового нагріву зразків для визначення границі плинності (σ_{YS}^{comp}) на устаткуванні "CERAMTEST" (UTM-100).

Результати та їх обговорення. Після гартування та відпуску сталі 4X4H5M4Ф2 за оптимальних режимів термічної обробки та додаткового нагріву, який моделює умови експлуатації оснащення, порівняли фазовий склад, кристалічну структуру та механічні характеристики сталей в литому та термодетформованому станах (табл. 2). Під час гартування карбідна складова в її структурі розчиняється, а за охолодження в оливi фіксуємо метастабільну гратку кубічного мартенситу зі залишковим аустенітом. Ідентифікована фаза є мартенситом з малим співвідношенням осей (кубічний мартенсит). Зафіксовано ~ 96 та 95% мартенситу ($a = 2,8828 \text{ \AA}$ та $2,88 \text{ \AA}$) відповідно для литого та термодетформованого станів (варіанти № 1 та № 10, табл. 2). Крім мартенситу, тут зафіксовано ~ 4 та 5% аустеніту ($a = 3,6 \text{ \AA}$). Подальший відпуск гартованої сталі призвів до розпаду залишкового аустеніту та зменшення періоду гратки мартенситу ($2,8772 \text{ \AA}$ та $2,876 \text{ \AA}$ відповідно № 2 та № 11). Додатковий нагрів до 475... 500°C вплинув на параметри кристалічної структури та механічні властивості (№ 3, № 5 та № 12). Раніше виявили [10] високі параметри кристалічної гратки мартенситу після гартування литої сталі 4X4H5M4Ф2 за температури $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ та відпуску в діапазоні 280...550°C, де максимальне їх значення досягається за температури 475°C (№ 4 та № 6). Їх можна пояснити формуванням твердого розчину заміщення (хімічна формула фази $\text{Fe}_{0,93}\text{Ni}_{0,056}$). У зв'язку з цим можна очікувати відпускну крихкість сталі в діапазоні температур 475...500°C. Проте параметри кристалічної гратки зменшуються за оптимальної температури відпуску сталі $590 \pm 5^\circ\text{C}$ (№ 3 та № 5). Після нагріву гартованої литої сталі до 475°C ударна в'язкість є вищою на 5 J/cm^2 , а границя плинності більша на 200 МПа порівняно з термодетформованою (№ 3 та № 12). За однакової твердості (50...52 HRC) і вищої міцності за кімнатної температури на 200 МПа перевагу має лита сталь для виготовлення екструзійного штамп (матриці) для гарячого деформування кольорових металів та сплавів. Необхідно зауважити, що температура відпускну крихкості литої сталі становить 475°C і не збігається з температурою експлуатації екструзійного штамп (> 500°C) для гарячого деформування алюмінієвих сплавів.

За підвищення робочої температури > 630°C у термодетформованій сталі вуглець виділяється з мартенситу у вигляді ромбічного карбиду типу Me_7C_3 з періодами гратки $a = 4,537 \text{ \AA}$; $b = 6,892 \text{ \AA}$; $c = 11,91 \text{ \AA}$, що супроводжується зниженням її твердості (< 40 HRC), міцності та опору плинності (№ 14, табл. 2). В литій сталі після нагріву до 650°C фаза типу Me_7C_3 у структурі металу відсутня, що супроводжується підвищенням її твердості до 40 HRC (№ 9). Незважаючи на те, що границя плинності за температур 630...650°C є пониженою (№ 8 та № 9), литу сталь можна пропонувати для інструмента (матриці) для гарячого деформування міді. Використовувати з цієї сталі матриці, які піддають циклічним ударним навантаженням, недоцільно, оскільки ударна в'язкість у 5 разів менша, ніж кованої (№ 9 проти № 15, табл. 2). Тому литу сталь 4X4H5M4Ф2 рекомендовано для виготовлення матриць для гарячого деформування міді лише під час екструзії без циклічних ударних навантажень.

Таблиця 2. Фазовий склад, кристалічна структура і механічні характеристики досліджуваних варіантів сталі

№ варіанта	Фазовий склад, %	Параметри субструктури матриці			Механічні характеристики			
		D , nm	a , Å	$\Delta a / a$	HRC	σ_{UTS} , МПа	σ_{YS}^{comp} , МПа	KIC , J/cm ²
1	4A+96M	12,90	2,8828	0,004086	–	–	–	–
2	100 M	23,96	2,8772	0,00317	48...49	1600...1680	1430...1480*	30...33
3	100 M	24,83	2,8739	0,001449	49...51	1370...1470	1330...1390*	25...29
4 [10]	–	–	2,8823	–	–	–	–	–
5	100 M	29,01	2,8744	0,001261	–	–	–	–
6 [10]	–	–	2,884	–	–	–	–	–
7	–	–	–	–	–	–	1050...1090**	–
8	–	–	–	–	–	–	850...890**	–
9	100 Ф	35,98	2,8751	0,001087	39...41	1060...1100	710...750**	33...37
10 [9]	5A+95 M	24,2	2,88	0,0032	55...56	–	–	–
11 [9]	100 M	27,8	2,876	0,002	48...49	1580...1640	1410...1450*	110...130
12	–	–	–	–	50...52	1580...1620	1090...1150*	19...23
13	–	–	–	–	–	–	810...850**	–
14 [9]	2Me ₇ C ₃ + 98 Ф	33	2,875	0,0011	37...38	1190...1210	650...690**	70...90
15 [9]	2Me ₇ C ₃ + 98 Ф	34	2,875	0,0011	36...37	1100...1120	530...570**	120...180

Примітка: А – аустеніт; М – мартенсит; Ф – ферит; D – розмір областей когерентного розсіювання; a – параметр кристалічної ґратки; $\Delta a/a$ – спотворення ґратки; № варіанта згідно з табл. 1; * – за кімнатної температури, ** – за температури додаткового нагріву.

ВИСНОВКИ

Дослідження додаткового нагріву гартованої та відпущеної сталі 4Х4Н5М4Ф2, який моделює умови експлуатації оснащення (робочу температуру за квазістаціонарної витримки), показали, що в термодетформованій сталі при 630...650°C відбувається її знеміцнення, що пов'язано з утворенням карбідів типу М₇С₃. У литій сталі за цих умов така карбідна фаза у структурі металу відсутня, що супроводжується підвищенням її теплостійкості. Розширення температурного інтервалу експлуатації литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 після оптимального режиму гартування і відпуску дає змогу застосовувати інструмент, виготовлений з цієї сталі, до температури 650°C. Рекомендовано не використовувати таку сталь у литому і термодетформованому станах для виготовлення інструмента, який працює в умовах циклічних ударних навантажень, для гарячого деформування кольорових металів та сплавів.

1. *Озерский А. Д., Кругляков А. А., Данилов А. Н.* О выборе стали для матриц горячего прессования медных сплавов // Цветные металлы. – 1981. – № 8. – С. 83–84.
2. *Позняк Л. А.* Инструментальные стали. – К.: Наук. думка, 1996. – 488 с.
3. *Лебедева Н. В.* Современные штамповые стали для горячего деформирования // Балтийские металлы. – 2003. – № 1. – С. 7–9.
4. *Лебедева Н. В.* Повышение стойкости инструмента для прессования труднодеформируемых цветных сплавов из сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2005. – 18 с.
5. *Перепьолкина М. Н., Грабовский В. Я.* Вибір ефективного легування нових штампових сталей з аустенітним перетворенням при експлуатації // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 1. – С. 11–15.
6. *Лысак Л. И., Николин Б. И.* Физические основы термической обработки стали. – К.: Техника, 1975. – 304 с.
7. *Геллер Ю. А.* Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
8. *Касилов А. Н., Касилов О. А.* Зависимость физических структурно-чувствительных свойств и твердости легированных сталей от состава и режима термической обработки // Наук. вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – 9, № 2. – С. 171–182.
9. *Structure and properties of forged steel with regulated austenite transformation / O. M. Sydorochuk, O. M. Myslyvchenko, K. O. Gogaev, and Ye. Hongguang // Materials Science. – 2022. – 58, № 1. – P. 119–125.*
10. *Рентгенівський аналіз особливостей формування кристалічної структури основних фаз та властивостей сталі 4X4H5M4Ф2 у разі відпуску / О. І. Биков, О. М. Сидорчук, Л. А. Миронюк, Д. В. Миронюк, Г. Л. Шведова, В. П. Коновал, С. Ф. Корічев, А. П. Позній // Металофізика і новітні технології. – 2021. – № 11. – С. 1523–1536.*

Одержано 03.01.2023