

Підвищення теплостійкості та властивостей штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації

О. М. Сидорчук, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
sedorleg@ukr.net

Д. В. Миронюк*, кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник,
denysmyroniuk@ipms.kiev.ua

О. К. Радченко*, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
arradch@ipms.kiev.ua

К. О. Гогаєв*, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу диспергування матеріалів та пластичної деформації прокатуванням

Є. Хонггуанг, виконавчий директор Центру досліджень і технологій Нінбо ІПМ

Центр досліджень і технологій Нінбо ІПМ, Нінбо

*Інститут проблем металознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Запропоновано покращений склад сталі (4X4H5M3Ф2) для прес-форм для гарячого пресування міді та її сплавів. Сталь одержали методом електрошлакового переплаву, провели її термічну обробку та визначили властивості. Показано, що теплостійкість дослідженої сталі вища на 2 HRC за теплостійкість сталей 4X5MФ1С та 3X3М3Ф, які використовуються у таких же експлуатаційних умовах. Межа плинності та ударна в'язкість сталі 4X4H5M4Ф2 значно перевищує характеристики сталі 3X3М3Ф (сортний прокат).

Ключові слова: штампова сталь, склад, термічна обробка, механічні властивості, теплостійкість.

Позняк Л. О. [1] визначив межу теплостійкості штампових сталей до 40 HRC та встановив такі негативні явища у штампових сталях, як коагуляція карбідної фази, утворення перліто-сорбітної структури та знеміцнення під час експлуатації при підвищених температурах.

Згідно з [1 – 8] для виготовлення прес-форм, що використовують при гарячому пресуванні (температура 920 – 960 °С) мідно-нікелевих сплавів марок МНЖ 5-1 та МНЖМц 30-1-1, успішно використовується сталь з регульованим аустенітним перетворенням при експлуатації (РАПЕ) марки 4X3H5M3Ф. Раніше були відпрацьовані режими гартування та відпуску сталі 4X3H5M3Ф (за температур 1020 – 1030 °С та 550 – 560 °С відповідно), що дозволило експлуатувати вироби з неї в γ -Fe області (за температур вище 900 °С) [6]. Але, для її використання за температур нижче критичної точки сталі A_1 (α -Fe область), слід розробити новий режим

термічної обробки. Сталь 4X3H5M3Ф має теплостійкість 40 HRC за температури 620 °С, вище цієї температури її теплостійкість знижується [6] і проявляється відпускна крихкість другого роду [9]. При експлуатації цієї сталі за температур нижче критичної точки A_1 теплостійкості виявилось недостатньо, і виникла необхідність скорегувати хімічний склад і оптимізувати кінцевий режим термічної обробки виробів.

Метою роботи є підвищення фізико-механічних властивостей сталі 4X3H5M3Ф зокрема її теплостійкості.

Виплавку дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву, що дозволило уникнути операції кування зливка. Отримували зливки масою 300 кг, розмірами: \varnothing 180 – 200 мм, довжиною 1100 мм, загальна маса зливок становила 3 тонни. Хімічний склад сталі: 0,42 % С, 3,87 % Cr, 5,07 % Ni, 3,74 % Mo, 1,75 % V, 0,016 % Al, 0,043 % W, 0,013 % Co, 0,020 % Nb, 0,067 % Cu, 0,003 % Ca, 0,005 % N, 0,075 % Si, 0,24 % Mn, 0,005 % S, 0,004 % P, що відповідає маркуванню сталі 4X4H5M4Ф2. Температура відпалу зливка становила 750 ± 20 °С [6]. Мікротвердість визначали за допомогою цифрової напівавтоматичної системи випробувань мікротвердості EM 4500L (на основі мікротвердоміру МН-5L). Випробування на твердість проводили на стаціонарному твердомірі HR 150A. В'язкість руйнуванню визначали на випробувальній машині для матеріалів NI300 на зразках розмірами 10x10x55 мм без надрізу. Пороги плинності та міцності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТ 1497-84 на універсальній установці GNT50. Теплостійкість визначали за 4-годинною витримкою в інтервалі температур 180 – 660 °С через кожні 10 °С.

Встановлено залежності твердості (теплостійкості) від температури відпуску дослідної сталі для 5 режимів гартування (рис. 1).

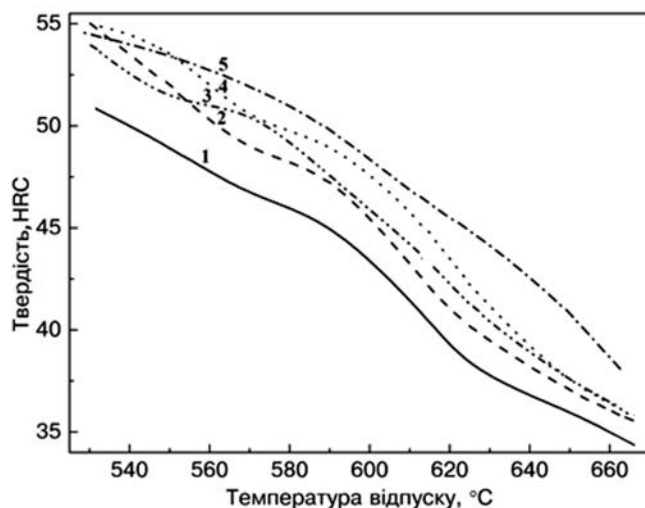


Рис. 1. Залежність твердості (теплостійкості) сталі 4X4H5M4Ф2 від температур гартування і відпуску. 1 – температура аустинізації 1075 °С, 2 – 1085 °С, 3 – 1095 °С, 4 – 1100 °С, 5 – 1110 °С.

Визначено оптимальний режим гартування (1095 ± 5 °C), що дозволило підвищити теплостійкість сталі до температури 650 °C. Також було досліджено залежності фізико-механічних властивостей сталі від температури відпуску і охолодження на повітрі при оптимальній температурі гартування 1095 ± 5 °C (рис. 2). Праворуч від вертикальної штрихової лінії (рис. 2 а) сталь РАПЕ 4Х4Н5М4Ф2 має теплостійкість нижчу за гранично допустиму (40 HRC) [1], тобто при відпуску вище цієї температури штамповий інструмент непридатний для експлуатації (виникають тріщини). Праворуч від штрих пунктирної лінії не бажано проводити відпуск сталі, оскільки твердість становитиме менше 45 HRC. Найкраща твердість після відпуску для штампової сталі гарячого деформування повинна становити вище 46 HRC (трооститна структура). Поріг міцності повинен становити вище 1300 МПа (горизонтальна штрих пунктирна лінія на рис. 2 б). Поріг плинності, відповідно, становити вище 900 МПа. На рис. 2 в (горизонтальна штрих пунктирна лінія) показано, що поріг плинності становить вище 1200 МПа. В'язкість руйнуванню в інтервалі 600 – 620 °C мало збільшується, і складає більше 32 Дж/см² (рис. 2 г горизонтальна пунктирна лінія).

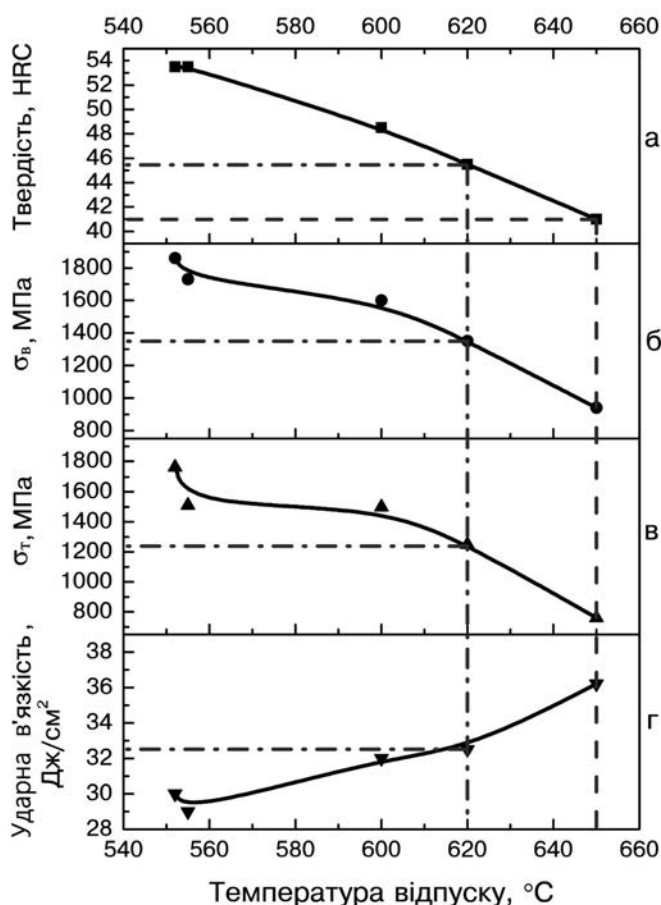


Рис. 2. Фізико-механічні властивості сталі 4Х4Н5М4Ф2 залежно від температури відпуску після гартування від 1095 °C. а – твердість, б – поріг міцності, в – поріг плинності, г – ударна в'язкість.

Встановлено також оптимальну температуру відпуску дослідної сталі – 590 °С, якій відповідають теплостійкість 49,5 HRC, поріг плинності – 1500 МПа, поріг міцності – 1620 МПа та в'язкість руйнування – 32 Дж/см². За температури відпуску 620 °С теплостійкість сталі нижча і становить 46,0 HRC, поріг міцності – 1020 МПа, поріг плинності – 880 МПа та в'язкість руйнування – 31,0 Дж/см². В інтервалі температур від 620 °С до 650 °С в'язкість руйнування підвищується від 31,0 до 36,0 Дж/см². За температури відпуску 650 °С знижується теплостійкість до 41 HRC, поріг міцності до 950 МПа та поріг плинності до 770 МПа. Після відпуску за температур 600 – 660 °С утворюється трооститна структура та ще відсутня коагуляція карбідної складової (рис. 3 а, б). На рисунках наведено структури, що відповідають температурам відпуску 640 та 660 °С. Структура складається з темної і світлої фаз, які, ймовірно, являють собою відпущений мартенсит (троостит). При температурі відпуску 640 °С темна і світла фази практично мало розрізняються, і їх твердість (HV) становить відповідно $478,6 \pm 40,6$ і $427,8 \pm 19,0$. При температурі відпуску 660 °С темна і світла фази чітко вирізняються, і їх твердість (HV) становить $459,8 \pm 71,2$ і $376,0 \pm 38,3$, відповідно.

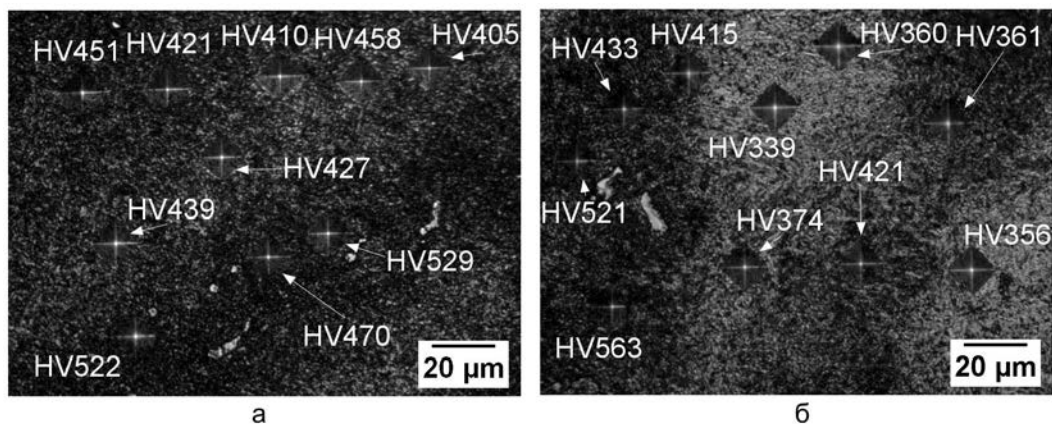


Рис. 3. Мікроструктури сталі 4X4H5M4Φ2 (без деформування-кування) після гартування 1095 ± 5 °С і відпуску при 640 °С (а) та 660 °С (б) протягом 4 годин.

Таким чином, після оптимізації кінцевої ТО та зміни хімічного складу сталі на 4X4H5M4Φ2 її теплостійкість підвищилась порівняно зі стандартними сталями 4X5MΦ1С та 3X3М3Φ, а поріг міцності знаходиться практично на одному рівні з ними (таблиця).

Встановлено, також, що поріг плинності та в'язкість руйнування запропонованої сталі 4X4H5M4Φ2 (одержаної без деформації-кування) значно перевищують значення для сталі 3X3М3Φ (сортовий прокат). При використанні дослідженої литої сталі 4X4H5M4Φ2 для штампового інструменту гарячого пресування міді та латуні вдалось підвищити температури його експлуатації до 650 °С, що дозволило розширити сортамент штампового інструменту (збільшити розміри каліброваного отвору матриці) тощо.

Фізико-механічні властивості штампових сталей

Марка сталі	Температура відпуску, °С	σ_t , МПа	σ_b , МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість, HRC
4Х5МФС1 (сортовий прокат)	600	1470	1620	44	47
3Х3М3Ф (сортовий прокат)		1290	1670	22	47
4Х4Н5М4Ф2 (без деформації-кування)		1500	1600	32	49

Література

1. Позняк Л. А. Инструментальные стали. – К.: Наук. Думка, 1996. – 488 с.
2. Озерский А. Д., Кругляков А. А., Данилов А. Н. О выборе стали для матриц горячего прессования медных сплавов // Цветные металлы – 1981. – Т. 8. – С. 83-84.
3. Озерский А. Д., Кругляков А. А. Упрочнение стали ЭП930 для матриц горячего прессования медных сплавов // Цветные металлы. – 1984. – Т. 10. – С. 76-78.
4. Патент № 94746 Україна, МПК C21 D8/00. Спосіб термічної обробки сталі для гарячого пресування / О.М. Сидорчук, О.К. Радченко, В.В. Лук'янчук, К.О. Гогаєв. – № u201407076; заявл. 23.06.2014; опубл. 25.11.2014. – Бюл. №22. – 2014, 4 с.
5. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Мамонова А. А. Штампова сталь для гарячого деформування з регульованим аустенітним перетворенням // Металознавство та обробка металів. – 2014. – № 1. – С. 40-44.
6. Гогаєв К.О., Радченко О.К., Сидорчук О.М., Лук'янчук В.В. Технологія виготовлення штампової сталі 40ХЗН5М3Ф для гарячого деформування // Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. – 2015. – С. 669-672.
7. Перепьолкіна М. М., Грабовский В. Я. Вибір ефективного легування нових штампових сталей з аустенітним перетворенням при експлуатації // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – Т. 1. – С. 11-15.
8. Гогаєв К.О., Ласконе О.П., Радченко О.К., Дудецька Л.Р., Сидорчук О.М. Розробка наукових і технологічних основ виготовлення формотворного штампового інструменту на основі створення і використання нових перспективних сталей і ливарно-деформаційних методів їх обробки // Анотований збірник проєктів спільного конкурсу ДФФД-БРФФД. Академперіодика – 2017. – С. 125-128.
9. Кондратюк С.Є., Кіндрачук М.В., Степаненко В.О., Москаленко Ю.Н. Металознавство та обробка металів (у запитаннях і відповідях) – К.: Вікторія, 2000. – 372 с.
10. Стеблов А.Б., Ленартович Д.В., Понкратин Е.И. Новая сталь для штампов горячего деформирования // Металлург. – 2006. –Т. 2. – С. 41-43.

References

1. Pozniak, L. A. *Instrumentalnyye stali (Instrument steels)*, Kiev: Naukova Dumka, 1996, 488 p. [in Russian].
2. Ozerskii, A. D., Krugliakov, A. A., Danilov, A. N. *Tsvetnyie metally*, 1981, Vol. 8, pp. 83-84 [in Russian].
3. Ozerskii A. D., Krugliakov A. A. *Tsvetnyie metally*, 1984, Vol. 10, pp. 76-78 [in Russian].
4. Patent No. 94746 Ukraine, MPK C21 D8/00. *Sposib termichnoyi obrobky stali dlya haryachoho presuvannya* [Method of heat treatment of steel for hot pressing]. K.O. Hohaiev, O.M Sydorchuk ., O.K. Radchenko, V.V. Lukianchuk, no. u201407076; zayavl. 23.06.2014; opubl. 25.11.2014, Bul. no. 22/2014, 4 p. [in Ukrainian].
5. Hohaiev K.O., Sydorchuk O.M., Radchenko O.K., Mamonova A.A. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2014, No 1, pp. 40-44 [in Ukrainian].
6. Hohaiev K. O., Radchenko O. K., Sydorchuk O. M., Lukianchuk V. V. *Tekhnolohiia vyhotovlennia shtampovoi stali 40KH3N5M3F dlia hariachoho deformuvannia* (The 40KH3N5M3F die steel manufacture technology for hot pressing). *Target complex program of NAS of Ukraine "Problems of the resource and safety of the exploitation of structures, construction and machines"* YE. O. Paton Institute of electric welding NAS of Ukraine, 2015, pp. 669-672 [in Ukrainian].
7. Perepolkina M. M., Hrabovskii V. Ya. *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2016, No 1, pp. 11-15 [in Ukrainian].
8. Hohaiev K. O., Laskonev O. P., Radchenko O. K., Dudetska L. R., Sydorchuk O. M. *Anotovanyi zbirnyk proektiv spilnoho konkursu DFFD-BRFFD*, 2017, pp. 125-128 [in Ukrainian].
9. Kondratiuk S. Ye., Kindrachuk M. V., Stepanenko V. O., Moskalenko Yu. N. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv (u zapytanniakh i vidpovidiakh): pidruchnyk dlia PTNZ* (Metallurgy and metal processing (in questions and answers), Kyiv: Viktoriia, 2000, 372 p. [in Ukrainian].
10. Stieblov A. B., Lienartovich D. V., Ponkratin Ye. I. *Metallurg*, 2006, No 2, pp. 41-43 [in Russian].

Одержано 22.04.19

О. Н. Сидорчук, Д. В. Миронюк, А. К. Радченко, К. А. Гогаев, Е. Хонггуанг

Повышение теплостойкости и свойств штамповой стали с регулированием аустенитного превращения при эксплуатации

Резюме

Стали с регулируемым аустенитным преобразованием при эксплуатации (РАПЭ) разработаны для работы в температурном интервале 800 – 950 °С, что соответствует аустенитной структуре, однако при более низкой температуре (630 – 650 °С) возникает отпускная хрупкость второго рода, что затрудняет их эксплуатацию. Предложен улучшенный состав стали 4Х4Н5М3Ф2 для пресс-форм горячего прессования меди и ее сплавов при температурах 630 – 650 °С. Показано, что теплостойкость исследованной

стали вище на 2 HRC чем теплостойкость сталей 4X5MФ1С и 3X3M3Ф, которые используются в таких же условиях эксплуатации. Предел текучести и ударная вязкость стали 4X4H5M4Ф2 значительно превышают характеристики стали 3X3M3Ф (сортовой прокат). При повышении температуры отпуска от 640 до 660 °С твердость (HV) темной и светлой составляющих уменьшается от 479 до 460 и от 428 до 376 соответственно. Теплостойкость исследованной стали после проведения закалки и отпуска по оптимальным режимам повысилась до 650 °С (41 HRC).

Ключевые слова: штамповая сталь, термическая обработка, механические свойства, теплостойкость.

**O. M. Sydorchuk, D. V. Myroniuk, O. K. Radchenko, K. O. Gogaev,
Ye. Hongguang**

Increase of heat resistance and properties of die steel with control of austenitic transformation during operation

Summary

Steels with adjustable austenitic transformation during the exploitation (RAPE) are designed for applied in the temperature range of 800 – 950 °C, which corresponds to the austenitic structure, but at the lower temperature range (630 – 650 °C) tempering fragility of the second kind occurs, which makes it difficult to operate. This is inconvenient when the die tool works in a wide range of temperatures during deformation of various metals and alloys. An improved steel composition (4H4N5M3F2) (RAPE) for press molds for hot pressing of copper and its alloys at temperatures of 630 – 650 °C is proposed. Steel was obtained by electroslag remelting, it was heat treated and the properties were determined. It is shown that the heat resistance of the investigated steel is higher by 2 HRC than the heat resistance of steels grade 4H5MF1S and 3H3M3F, which are used under the same operating conditions. The yield strength and impact strength of steel 4H4N5M4F2 considerably exceeds the characteristics of steel 3H3M3F (high-grade rolled products). The annealing temperature limits, which allow obtaining the necessary technological properties of steel, were established. It is shown that the steel structure consists of two areas: dark (obviously it is released martensite) and light (the area with a lower content of the carbide component). With an increase in tempering temperature from 640 to 660 °C, the hardness (HV) of the dark and light components decreases from 478.6 to 459.8 and from 427.8 to 376.0, respectively. The heat resistance of the investigated steel after quenching and tempering in optimal conditions increased to 650 °C (41 HRC).

Keywords: die steel, thermal treatment, mechanical properties, heat resisting quality.