

Відпускна крихкість литої штампової сталі 4X4H5M4Ф2

О. М. Сидорчук, кандидат технічних наук, старший дослідник, sedoroleg@ukr.net,
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0026-7525>

О. І. Биков*, кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник,
abykov@ipms.kiev.ua

А. П. Позній*, науковий співробітник, Poznyu.a@nas.gov.ua

Центр досліджень і технологій ІПМ Нінбо, Китайська Народна Республіка,
м. Нінхай)

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

Наведено результати досліджень конструкційної сталі марки 4X4H5M4Ф2 після термічної обробки. Встановлено прояви відпускної крихкості за температури 450-500 °С, пов'язаної з максимальним значенням параметру «а» кристалічної будови при формуванні твердого розчину заміщення в системі "Fe-C". Встановлено зв'язок між особливостями кристалічної будови дослідженої сталі та комплексом фізико-механічних властивостей. Максимальне значення параметру «а» ($a = 0,28848$ нм) елементарної ґратки мартенситу кристалічної ґратки відображає максимальну насиченість α -твердого розчину, що зумовлює підвищення опору кристалічної ґратки деформації, дозволяє підвищити твердість мартенситу відпуску (до 56 HRC), змінити параметр фізичної структурно-чутливої величини (підвищення питомої провідності до 0,200 Ом·мм²/м), підвищувати межу міцності, зменшити рівень ударної в'язкості (до 15 Дж/см²) та підвищити крихкість за температур 450-500 °С. Продемонстрована можливість використання матриць (сталь 4X4H5M4Ф2, без технології-кування) для гарячого деформування алюмінієвого сплаву АК7ч, що в процесі експлуатації не досягає температури відпускної крихкості (вище 460 °С).

Ключові слова: штампова сталь, кристалічна структура, термічна обробка, фізико-механічні властивості

Нагрів гартованої легованої конструкційної сталі нижче критичної точки A_1 на основі системи "Fe-C" при відпуску може призвести до відпускної крихкості у певному температурному інтервалі залежно від хімічного складу [1–4]. При відпуску сталі відбувається розпад структурних складових і в процесі охолодження сталі при повільній коагуляції дисперсних частинок карбідної складової, може виникнути відпускна крихкість.

Метою роботи було встановити передумови виникнення відпускної крихкості сталі та встановити зв'язок між особливостями кристалічної будови сталі та комплексу її фізико-механічних властивостей.

Хімічний склад сталі відповідав маркуванню 4X4H5M4Ф2: 0,40 – 0,42 % C; 3,80 – 3,90 % Cr; 5,00 – 5,10 % Ni, 3,70 – 3,80 % Mo; 1,70 – 1,80 % V; 0,014 – 0,016 % Al; 0,040 – 0,043 % W; 0,010 – 0,013 % Co; 0,018 – 0,020 % 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. Ударну в'язкість визначали на випробувальній машині NI300 на зразках розмірами 10x10x55 мм без надрізу. Випробування на твердість проводили на твердомірі HR150A. Межу міцності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТ 1497–84 на універсальній установці GNT50. Мікротвердість досліджували за допомогою цифрової напівавтоматичної системи випробувань мікротвердості ЕМ-4500L (на основі мікротвердоміра МН-5L). Навантаження на алмазну пірамідку становило 10 грамів. Час витримки під навантаженням 11 секунд (ЕМ-4500L). Питому електропровідність вимірювали на поверхні зразка (висота зразка становила 5 мм, відстань між електродами вимірювання становила 5 мм) за допомогою двоканального цифрового електричного вимірювального чотирьохзондового тестера ST2263. Параметр елементарної чарунки «а» розраховували по експериментальній дифрактограмі. Для одержання дифракційних картин використовували рентгенівський дифрактометр ДРОН-3 та рентгенівські трубки з мідним анодом при Cu-K_α-випромінненні.

Найбільш структурно-чутливою механічною характеристикою пов'язаною з фазово-структурним станом сталі є її ударна в'язкість. На одержаній кривій залежності ударної в'язкості від температури відпуску в межах 450–550 °С при охолодженні на повітрі спостерігається максимальне зниження її величини за температури 475 °С (рис. 1). Встановлено, що початок зниження величини ударної в'язкості дослідженої сталі спостерігається за температури 450 °С. Поріг міцності та твердість при цьому підвищується (рис. 1). Цей процес супроводжувався зміною мікроструктури (укрупнення елементів структури, а саме темних полів мартенситу відпуску), де інтенсивно зменшується мікротвердість 4,0 – 4,5 ГПа (470 °С). При температурах вище 450 °С спостерігається збільшення кількості високотемпературних карбідів з підвищеною твердістю до 56 HRC, що є суттєвим внеском у зростання теплостійкості сталі. Також були проведені дослідження щодо зміни електропровідності залежно від температури відпуску. У певному температурному інтервалі спостерігається кореляція між значеннями ударної в'язкості та питомим електроопором (рис. 1). Так, за температури відпуску до 475 °С спостерігали інтенсивне збільшення та максимум величини питомого опору (0,200 Ом·мм²/м) та зниження до мінімуму величини ударної в'язкості (до 15 Дж/см²) (рис. 1). При цій температурі встановлено максимальне значення параметру «а» (а = 0,28848 нм) елементарної чарунки мартенситу кристалічної ґратки (рис. 1), що відображає максимальну насиченість α-твердого розчину заміщення. Це забезпечує підвищення опору кристалічної ґратки деформації, і, тим самим, збільшує твердість мартенситу відпуску та його крихкості, де спостерігається підвищення його мікротвердості (5,5 – 7,0 ГПа). Підвищення

Технічна інформація

твердості сталі при відпуску за температур від 450 до 500 °С забезпечується завдяки виділенню карбідної складової на границях зерен. Вище температури 500 °С при відпуску сталі, відбувається початок розпаду мартенситу і зменшення параметру «а» елементарної чарунки мартенситу кристалічної будови, зниження твердості та підвищення питомої провідності (рис. 1).

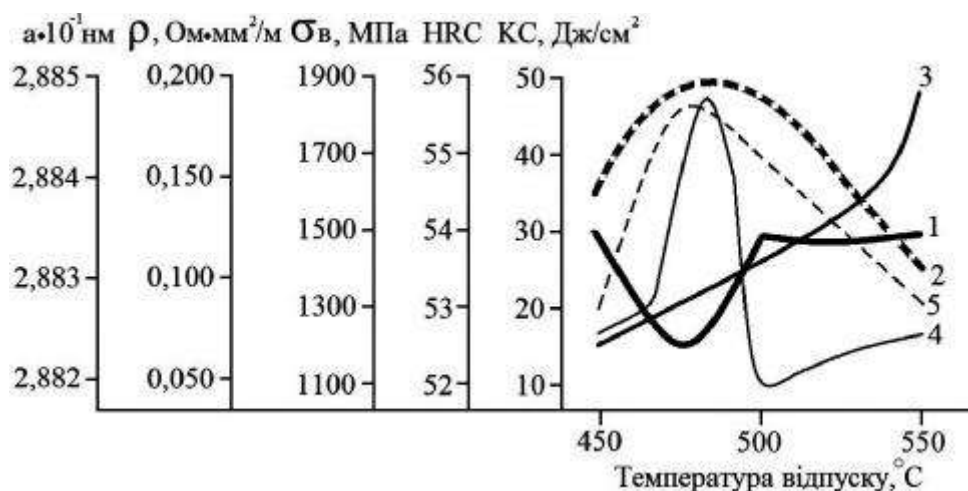


Рис. 1. Зміни параметрів сталі 4Х4Н5М4Ф2 (без технології кування), гартованої за температури 1100 ± 5 °С та відпуску: 1 – ударна в'язкість (Дж/см²); 2 – твердість (HRC); 3 – поріг міцності (МПа); 4 – питомий опір (Ом*мм²/м); 5 – розмір кристалічної ґратки мартенситу (нм)

В нашій роботі [5] продемонстровано можливість використання сталі 4Х4Н5М4Ф2 (без технології кування) для гарячого пресування алюмінієвого сплаву АК7ч у корпорації «New Material Technology Co., Ltd» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР). Після експлуатації матриць зі сталі

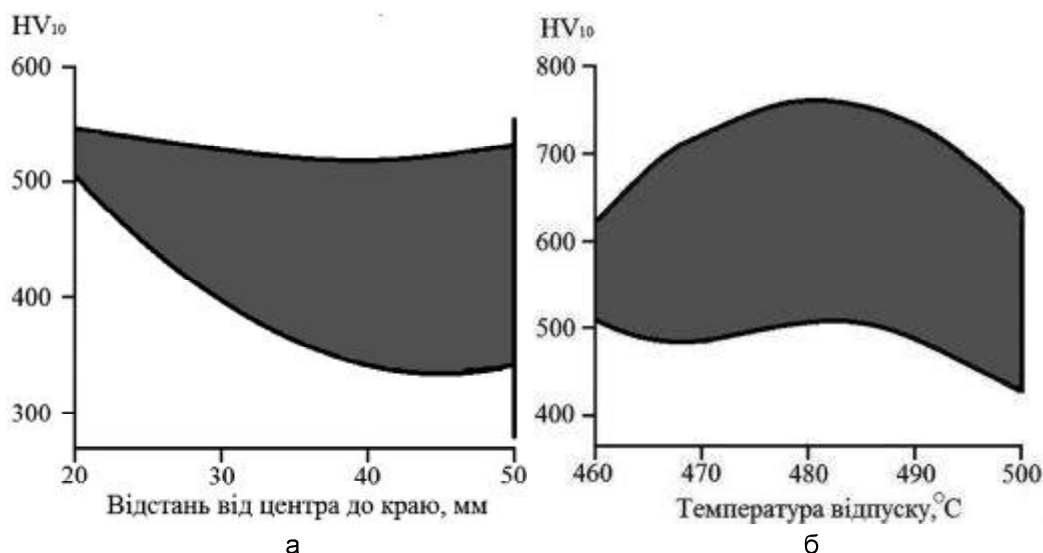


Рис. 2. Мікротвердість мартенситу (сталь 4Х4Н5М4Ф2, без технології кування): штампового інструмента після гарячого деформування алюмінієвого сплаву АК7ч (а); еталонного зразка (гартування 1100 ± 5 °С, відпуск 595 ± 5 °С та нагрів в інтервалі температури відпускнуї крихкості 460-500 °С) (б).

4X4H5M4Ф2 було встановлено, що штамповий інструмент не перегрівався вище температури 460 °С (початок відпускнуї крихкості), оскільки була занижена мікротвердість мартенситу відпуску у порівнянні з еталонним зразком (гартування 1100 ± 5 °С, відпуск 595 ± 5 °С, нагрів в інтервалі температури відпускнуї крихкості 460-500 °С), рис. 2.

Таким чином встановлено, що максимально високі значення параметру «а» кристалічної ґратки досягаються за температури відпускнуї крихкості 475 °С внаслідок значного підвищення ступеня легованості твердого розчину, що суттєво підвищує характеристики твердості мартенситу і зумовлює зниження показників ударної в'язкості сталі 4X4H5M4Ф2 та зменшення електропровідності. За температури відпуску понад 450 °С відбувається також збільшення кількості високотемпературних карбідів з підвищеною твердістю, що є вагомим внеском у зростання теплостійкості сталі.

Література

1. Завялов А. С. К теории легирования и термической обработки стали. НКТП СССР ЦНИИ, 1943. – 132 с.
2. Спектор Я. С., Саррак В. И. Энтин Р. И. Склонность стали к хрупкому разрушению и тонкая структура стали // Физика металлов и металловедение. – 1964. – Т. 18, № 6. – С. 915-920.
3. Лысак Л. И., Николин Б. И. Физические основы термической обработки стали. – К.: Техника, 1975. – 304 с.
4. 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. – Т. 9, № 2. – С. 171-182.
5. Сидорчук О.М., Гогаєв К. О., Радченко О. К., Миронюк Д. В., Миронюк Л. А. Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості // Металознавство та обробка металів. – 2020. – № 2. – С. 29-37. <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.003>

References

1. Zavialov A. S. *K teorii legirovaniia i termicheskoi obrabotki stali* (To the theory of alloying and heat treatment of steel), NKTP-SSSR TsNII, 1943, 132 p. [in Russian].
2. Spektor Ya. I., Sarrak V.I., Entin R. I. *Fizika metallov I metallovedeniie*, 1964, Vol. 18, No. 6, pp. 915-920 [in Russian].
3. Lysak L. I., Nikolin B. I. *Fizicheskie osnovy termicheskoi obrabotki stali* (Physikal fundamentals of heat treatment of stell), Kyiv, Tekhnika, 1975, 304 p. [in Russian].
4. Kasylov A. N., Kasylov O. A. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 2013, Vol. 9, No. 2, pp. 171-182 [in Russian].
5. Sydorchuk O.M., Hohaiev K.O., Radchenko O.K., Myroniuk L.A., Myroniuk D.V. *Metaloznnavstvo ta obrobka metaliv*, 2020, No.2, pp. 29-37 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.029>.

Одержано 03.02.21

О. М. Sydorchuk, О. І. Bykov, А. Р. Pozniy

Tempering brittleness of die steel 4Kh4N5M4F2

Summary

The results of research of structural steel brand 4Kh4N5M4F2 after heat treatment are given. Manifestations of tempering brittleness at a temperature of 450-500 °C, associated with the maximum value of the parameter «a» of the crystal structure during the formation of a solid substitution solution in the system "Fe-C". The connection between the peculiarities of the crystal structure of the studied steel and the complex of physical and mechanical properties is established. The maximum value of the parameter «a» ($a = 0.28848 \text{ nm}$) of the elementary cell of martensite crystal lattice reflects the maximum saturation of the α -solid solution, which increases the resistance of the crystal lattice to deformation, increase the hardness of tempering martensite (up to 56 HRC), change the physical structure sensitive value (increase in specific conductivity to $0,200 \text{ Ohm}\cdot\text{mm}^2/\text{m}$), increase the tensile strength, reduce the impact strength (up to $15 \text{ J}/\text{cm}^2$) and increase the brittleness at temperatures of 450-500 °C. The possibility of using matrices (steel 4Kh4N5M4F2, without forging technology) for hot deformation of aluminum alloy AK7ch, which during operation does not reach the temperature of brittleness (above 460 °C), is demonstrated.

Keywords: die steel, crystal structure, heat treatment, physical and mechanical properties

Журнал **МОМ** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу
**"Науково-технічний журнал
"Металознавство та обробка металів"**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Вартість одного номера журналу - 50 грн., передплата на рік – 200 грн.
Доступні також архівні номери журналу, починаючи з 1995 р.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

р/р UA828201720313251001201012215,
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172

Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,
з посиланням на журнал "МОМ"

Копію документа передплати та відомості про передплатника
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.