

## ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ З УРАХУВАННЯМ ПИТОМОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ ЛИТОЇ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ 4Х4Н5М4Ф2

**Сидорчук О. М.**, к.т.н., старший дослідник Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, e-mail: sedoroleg@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0026-7525

Наведені результати досліджень визначення структурно-чутливої величини (провідності) після термічної обробки (гартування та відпуск) сталі (без деформації-кування) з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації марки 4Х4Н5М4Ф2. Встановлено, що при оптимізованих режимах термічної обробки дослідженої сталі визначалось за мінімальним значенням параметра – питомої електричної провідності. Так для оптимального значення за температурою гартування сталі (1100 °С) питома електрична провідність становила 0,075 Ом·мм<sup>2</sup>/м, а при відпуску (595 °С) – 0,0415 Ом·мм<sup>2</sup>/м. Установлено зв'язок між питомою електричною провідністю та параметром кристалічної чарунки мартенситу, твердості та ударної в'язкості гартованої сталі. Установлено, що в процесі первинної рекристалізації за температури вище 1110 °С, провідність сталі зменшується. Встановлено, що при повторному нагріві (відпуску), провідність сталі збільшується, а також інтенсивно змінюється структурно-чутлива механічна характеристика (ударна в'язкість), яка підвищується у два рази в інтервалі температур відпускнуї крихкості 475±15 °С. Оскільки за такого інтервалу температур відбувається аномальне зниження до 15 Дж/см<sup>2</sup> та збільшується параметр кристалічної чарунки мартенситу (2,8847·10<sup>-1</sup> мкм). Оптимізований режим гартування 1100 °С та відпуску 590 °С дослідженої сталі сприяв підвищенню ударної в'язкості до 30 Дж/см<sup>2</sup> та збільшенням провідності в інтервалі температур відпускнуї крихкості. Це дає можливість підвищити ресурс експлуатації пресового інструменту є (фільтери) зі сталі 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування алюмінієвого сплаву в інтервалі робочих температур 450-500 °С.

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

**DOI:** 10.33815/2313-4763.2021.1.24.129–135

**Методи дослідження.** Хімічний склад сталі відповідав маркуванню 4Х4Н5М4Ф2: 0,40 – 0,42 % С; 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. Випробування на твердість проводили на твердомірі HR150A. Поріг міцності та межу плинності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТом 1497-84 на універсальній установці GNT50. Ударну в'язкість визначали на випробувальній машині NI300 на зразках розмірами 10x10x55 мм без надрізу. Питомий електричний опір вимірювали на поверхні зразка (висота зразка становила 5 мм, відстань між електродами вимірювання становила 5 мм) за допомогою двоканального цифрового електричного вимірювального чотиризондового тестера ST2263. Для отримання дифракційних картин використовували модернізований рентгенівський дифрактометр ДРОН-3, оснащений комп'ютерною системою запису дифрактограм і рентгенівською трубкою з мідним анодом.

**Викладення основного матеріалу.** Авторками (Касілова А. Н. та Касілова О. А.) було показано [1], залежність між фізичними структурно-чутливими властивостями (коерцитивної сили, питомої електричної провідності, намагнічення насиченості та твердості) легованих сталей, що залежало від складу та режиму термічної обробки. Такий методичний підхід при визначенні одною з величин (наприклад, питомою електричною провідністю) дає можливість проводити оптимізацію термічної обробки. В роботах [2–6] було визначено оптимальний режим гартування литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 (1100±5 °С), що дозволило підвищити теплостійкість сталі до температури 650 °С при 40 HRC за кімнатної температури. Мета роботи полягає в тому, щоб установити залежність між структурно-чутливою фізичною властивістю (питома електрична провідність) та механічними

властивостями сталі з урахуванням оптимізації режимів термічної обробки. Досліджена сталь 4X4H5M4Ф2 відноситься до сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації (РАПЕ). Сталь РАПЕ, відрізняється від штампової сталі феритного класу, тим, що після гартування має мартенситну структуру, але при роботі штампового інструмента за робочих температур (вище критичної точки  $A_3$ ) працює в аустенітній області [7–13]. Механізм РАПЕ сталі забезпечується легуванням нікелем, котрий розчиняється в залізі та розширює температурний інтервал існування  $\gamma$ -Fe модифікації. Це дає змогу зберігати аустенітну структуру впродовж усього періоду високотемпературної експлуатації штампового інструмента. В роботах [14, 15] показана можливість використання штампової сталі з РАПЕ (4X3H5M3Ф) для гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву МНЖ 5-1 за температур експлуатації (900–950 °С) з підвищеним ресурсом експлуатації порівнюючи зі сталлю 3X3M3Ф. У роботі запропоновано покращений склад сталі з РАПЕ (4X4H5M4Ф2) для виготовлення штампового інструмента для гарячого деформування міді, мідних та алюмінієвих сплавів при експлуатації нижче критичної точки  $A_1$  дослідженої сталі.

Раніше було встановлено оптимальні температури гартування ( $1100 \pm 5$  °С) та відпуску ( $600 \pm 5$  °С) сталі 4X4H5M4Ф2 [3], цим режимам відповідали підвищені міцність та теплостійкість порівняно зі стандартними сталями феритного класу 4X5MФ1С та 3X3M3Ф у вигляді сортового прокату. Результати досліджень при визначенні питомої електричної провідності в залежності від температури гартування від 1040 до 1140 °С та відпуску від 560 до 660 °С дослідженої сталі представлено на рис. 1. Установлено, що при оптимальних режимах термічної обробки дослідженої сталі відповідає мінімальне значення питомої електричної провідності при гартуванні за температури 1100 °С –  $0,075 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  (лінія 1, рис. 1) та відпуску 595 °С –  $0,0415 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  (лінія 2, рис. 1). Максимальне значення питомої електричної провідності ( $0,138 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ) дослідженої сталі відповідає температурі гартування  $1060 \pm 5$  °С (лінія 1, рис. 1). Установлено, що за температури гартування литої сталі  $1060 \pm 5$  °С та відпуску  $600 \pm 5$  °С, механічні властивості занижені (зниження твердості на 5–9 HRC, порогу міцності на 210–280 МПа та межа плинності 210–220 МПа), порівнюючи за температури гартування  $1100 \pm 5$  °С (твердість 49 HRC, поріг міцності 1600 МПа та межа плинності 1500 МПа) (таблиця). Отже, підвищення механічних властивостей термічно-зміцненої сталі залежить від мінімального значення питомої електричної провідності (підвищення провідності). Встановлено, що за температури гартування вище 1110 °С дослідженої сталі, відбувається процес первинної рекристалізації та зменшується її провідність (підвищується питома електрична провідність від  $0,095$  до  $0,140 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  (лінія 1, рис. 1).

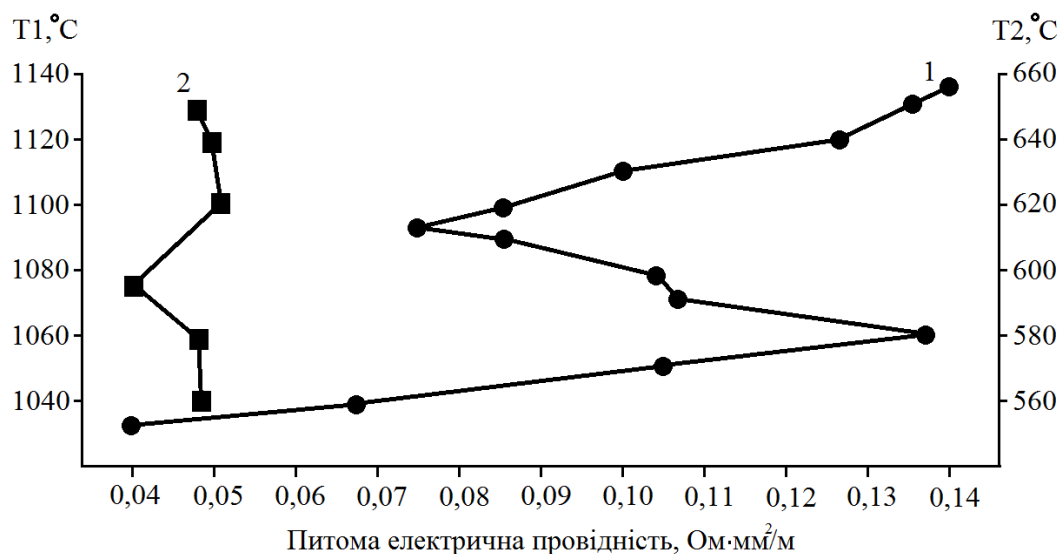


Рисунок 1 – Залежність питомої електричної провідності (за кімнатної температури) від режимів термічної обробки сталі 4X4H5M4Ф2: 1 – гартування за температур  $T_1$ , 2 – відпуск за температур  $T_2$

Таблиця – Фізико-механічні властивості штампової сталі 4X4H5M4Ф2 після гартування та відпуску 600 °С

Властивості	Температура гартування		
	1065±5 °С *	1065±5 °С **	1100±5 °С * [3]
Поріг міцності, МПа	1390	1320	1600
Межа плинності, МПа	1280	1290	1500
Твердість, HRC	40	44	49

\* – гартування (одноразове), \*\* – гартування (подвійне)

У роботі встановлено, що відпускна крихкість дослідженої сталі (4X4H5M4Ф2) за температури 475±15 °С пов'язана з максимальним значенням параметра «а» кристалічної структури (кристалічної чарунки мартенситу –  $2,8847 \cdot 10^{-1}$  nm) при формуванні твердого розчину заміщення на основі системи «Fe-C» (лінія 3, рис. 2). Встановлення зв'язку між особливостями кристалічної структури дослідженої сталі та комплексу фізико-механічних властивостей показало інтенсивне зміння параметра фізичної структурно-чутливої величини (підвищення питомої електричної провідності до 0,200 Ом·мм<sup>2</sup>/м (лінія 1, рис. 2), де підвищується крихкість за температур 460–490 °С при аномальному зниженні ударної в'язкості до 15 Дж/см<sup>2</sup> (лінія 1, рис. 3) та підвищується твердість до 56,5 HRC (лінія 2, рис. 3). Поясненням цього є підвищення теплостійкості сталі в температурному інтервалі відпуску 450–500 °С, що пов'язано зі збереженням кількості низькотемпературних карбідних фаз та збільшенням кількості високотемпературних карбідних фаз з підвищеною твердістю. Максимальне значення параметра кристалічної чарунки мартенситу досягається за температури відпуску 475 °С. Такі високі значення можна пояснити формуванням твердого розчину заміщення.

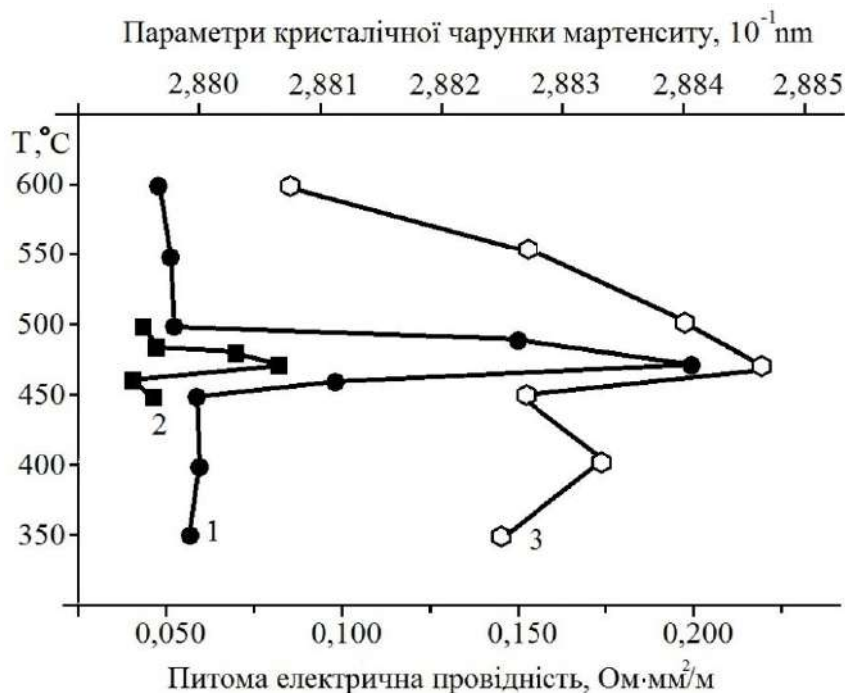


Рисунок 2 – Залежність параметрів (за кімнатної температури) від режимів термічної обробки сталі 4X4H5M4Ф2:

1 – питома електрична провідність (гартування за температури 1100±5 °С та відпуск за температур Т), 2 – питома електрична провідність (гартування за температури 1100±5 °С, відпуск за температури 590±5 °С та наступний нагрів за температур Т), 3 – параметри кристалічної чарунки мартенситу (гартування за температури 1100±5 °С та відпуск за температур Т)

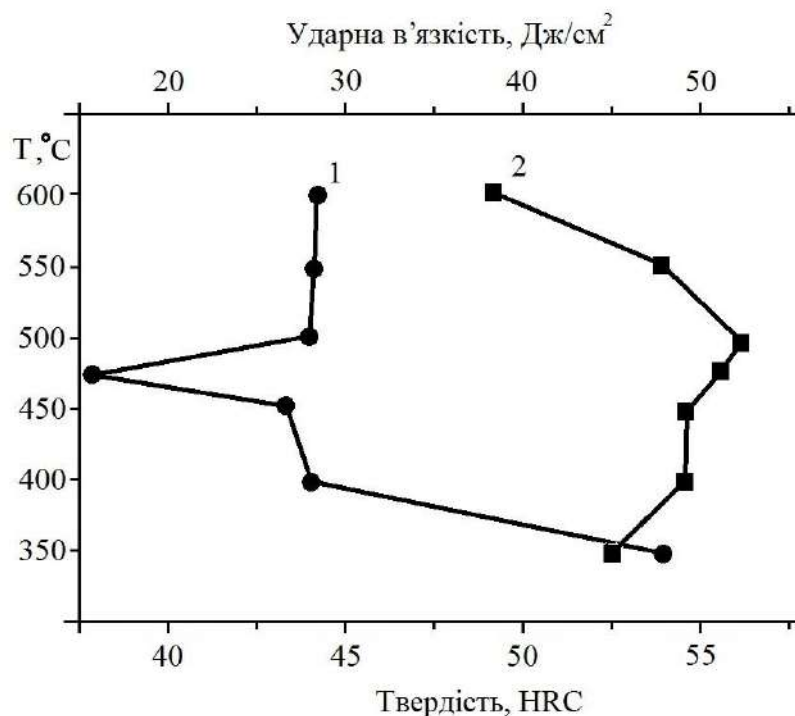


Рисунок 3 – Залежність параметрів (за кімнатної температури) від температури відпуску за температур (Т) гартованої (1100±5 °С) сталі 4Х4Н5М4Ф2: 1 – ударна в'язкість, 2 – твердість

Установлено, що при застосуванні оптимізованих режимів гартування та відпуску (1100 °С, 595 °С, відповідно) дослідженої сталі, це сприяє підвищенню ударної в'язкості до 30 Дж/см<sup>2</sup> в інтервалі температур 460–490 °С відпускнуї крихкості [4] та зменшенню питомої електричної провідності до 0,080 Ом·мм<sup>2</sup>/м (лінія 2, рис. 2). Підвищуючи механічну характеристику (ударну в'язкість) сталі 4Х4Н5М4Ф2, це дає можливість при ударних циклічних навантаженнях, підвищити ресурс експлуатації пресового інструмента (матриці-фільери) для гарячого пресування алюмінієвого сплаву (наприклад, АК7ч) в інтервалі температур відпускнуї крихкості 450–500 °С [4, 5].

**Висновок.** Отже, при проведенні оптимізації режимів термічної обробки можна враховувати змінення параметра фізичної структурно-чутливої величини (питомої електричної провідності) для підвищення основних механічних властивостей сталі.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Касилов А. Н., Касилов О. А. Зависимость физических структурно-чувствительных свойств и твердости легированных сталей от состава и режима термической обработки. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, 2013. № 2 (9). С. 171–182.
2. Штампова сталь : пат. 141447 Україна : МПК С22С 38/00. № u 2019 09670 ; заявл. 05.09.2019 ; опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7.
3. Сидорчук О. М., Миронюк Д. В., Радченко О. К., Гогаєв К. О., Хонгтуанг Є. Підвищення теплостійкості та властивостей штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації. *Металознавство та обробка металів*. 2019. № 2. С. 19–25. <https://doi.org/10.15407/mom2019.02.019>.
4. 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>.
5. Сидорчук О. М. Властивості штампової сталі 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування кольорових металів та сплавів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 1. С. 108–112. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112>.

6. Сидорчук О. М. Вплив термічної обробки на штампову сталь 4X4N5M4F2 та встановлення її фізико-механічних властивостей. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2021. № 1 (7). С. 34–38. <https://doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05>.
7. Озерский А. Д., Кругляков А. А., Данил А. Н. О выборе стали для матриц горячего прессования медных сплавов. *Цветные металлы*. 1981. № 8. С. 83–84.
8. Озерский А. Д., Кругляков А. А. Упрочнение стали ЭП930 для матриц горячего прессования медных сплавов. *Цветные металлы*. 1984. № 10. С. 76–78.
9. Озерский А. Д., Кругляков А. А. Штамповые стали с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации. Ленинград : ЛДНТП, 1988. 26 с.
10. Позняк Л. А. Инструментальные стали. Киев : Наук. думка, 1996. 488 с.
11. Лебедева Н. В. Современные штамповые стали для горячего деформирования. *Балтийские металлы*. 2003. № 1. С. 7–9.
12. Лебедева Н. В. Повышение стойкости инструмента для прессования труднодеформируемых цветных сплавов из сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации : автореф. дис ... канд. техн. Наук : 05.02.01. Санкт-Петербург, 2005. 18 с.
13. Перепьолкіна М. Н., Грабовський 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.
14. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Лук'янчук В. В. Технологія виготовлення штампової сталі 40X3N5M3Ф 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.
15. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Лук'янчук В. В., Орел Г. Г. Дослідження режимів термічної обробки штампової сталі 4X3N5M3Ф. *Современные проблемы физического материаловедения. Труды Института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Серия «Физико-химические основы технологии порошковых материалов»*. Киев, 2016. Выпуск 25. С. 105–108.

## REFERENCES

1. Kasilov A. N., Kasilov O. A. (2013). Zavisimostj fizicheskikh strukturno-chuvstvitel'nykh svoystv i tvyordosti legirovanih staley ot sostava i rezhima termicheskoy obrabotki. *Naukoviyj visnik Khersons'koyi derzhavnoyi mors'koyi akademii*, 2 (9), 171–182.
2. *Shtampova stalj* : pat. 141447 Ukraïna : MPK S22S 38/00. № u 2019 09670 ; zayavl. 05.09.2019 ; opubl. 10.04.2020. Byul. № 7.
3. Sidorchuk O. M., Mironyuk D. V., Radchenko O. K., Gogaev K. O. & Khongguang E. (2019). Pidvithennya teplostiykosti ta vlastivostey shtampovoi stali z reguluyuvannya austenitnogo peretvorennya pri ekspluatatsii. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2, 19–25. Doi: 10.15407/mom2019.02.019.
4. Sidorchuk O. M., Gogaev K. O., Radchenko O. K., Mironyuk D. V. & Mironyuk L. A. (2020). Termichna obrobka shtampovoi stali pidvithenoï stiykosti. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2, 29–37. DOI: 10.15407/mom2020.02.003.
5. Sydorchuk O. M. (2021). Vlastyivosti shtampovoyi stali 4X4N5M4F2 dlya garyachogo deformuvannya kolorovykh metaliv ta splaviv. *Visnyk Vinnyczkogo politexnichnogo instytutu*, 1, 108–112. DOI: 10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112.
6. Sydorchuk O. M. (2021). Vplyv termichnoyi obrobky na shtampovu stal 4X4N5M4F2 ta vstanovlennya yiyi fizyko-mexanichnykh vlastyvostey. *Visnyk NTU «XPI»*, 1 (7), 34–38. DOI: 10.20998/2413-4295.2021.01.05.
7. Ozerskiy A. D., Kruglyakov A. A., Danil A. N. (1981). O vihbore stali dlya matric goryachego pressovaniya mednykh splavov. *Cvetnihe metallih*, 8, 83–84.

8. Ozerskiy A. D., Kruglyakov A. A. (1984). Uprochnenie stali EhP930 dlya matric goryachego pressovaniya mednikh splavov. *Cvetnihe metallih*, 10, 76–78.
9. Ozerskiy A. D., Kruglyakov A. A. (1988). *Shtampovihe stali s reguliruemihm austenitnihm prevratheniem pri ehkspluatacii*. Leningrad : LDNTP.
10. Poznyak L. A. (1996). *Instrumentaljnihe stali*. Kiev : Nauk. dumka.
11. Lebedeva N. V. (2003). Sovremennihe shtampovihe stali dlya goryachego deformirovaniya. *Baltiyskie metallih*, 1, 7–9.
12. Lebedeva N. V. (2005). Povihshenie stoykosti instrumenta dlya pressovaniya trudnodeformiruemihkh cvetnikh splavov iz stalej s reguliruemihm austenitnihm prevratheniem pri ehkspluatacii : extended abstract of candidate's thesis. Sankt Peterburg.
13. Perepolkyna M. N., Grabovskiy V. Ya. (2016). Vybir efektyvnogo leguvannya novyx shtampovykh stalej z austenitny`m peretvorennyam pry ekspluatacii. *Novi materialy i tekhnologiyi v metalurgiyi ta mashynobuduvanni*, 1, 11–15.
14. Gogayev K. O., Radchenko O. K., Sydorhuk O. M. & Lukyanchuk V. V. (2015). Tekhnologiya vy`gotovlennya shtampovoyi stali 40X3N5M3F dlya goryachogo deformuvannya. *Cilova kompleksna programa NAN Ukrayiny «Problemy resursu i bezpeky ekspluatacii konstrukcij, sporud ta mashyn»*. Instytut elektrozvaryuvannya im. Ye. O. Patona NAN Ukrayiny, 669–672.
15. Gogayev K. O., Sydorhuk O. M., Radchenko O. K., Lukyanchuk V. V. & Orel G. G. (2016). Doslidzhennya rezhymiv termichnoyi obrobky` shtampovoyi stali 4X3N5M3F. *Sovremennye problemi fizycheskogo materialovedeniya. Sovremennihe problemih fizycheskogo materialovedeniya. Trudih instituta problem materialovedeniya im. I. N. Francevicha NAN Ukrainih. Seriya «Fiziko-khimicheskie osnovih tekhnologi poroshkovihkh materialov»*. Kiev, 25, 105–108.

**Сидорчук О. М. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМООБРАБОТКИ С УЧЕТОМ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЛИТОЙ ШТАМПОВОЙ СТАЛИ 4X4N5M4F2**

Приведены результаты исследований по определению структурно-чувствительной величины (электропроводности) после термической обработки (закалки и отпуска) стали (без деформационно-ковки) с регулированием аустенитного превращения в процессе эксплуатации марки 4X4N5M4F2. Установлено, что при оптимизированных режимах термической обработки исследуемой стали определялось минимальное значение параметра – удельной электропроводности. Так, при оптимальном значении температуры отпуска стали (1100 °C) удельная электропроводность составила 0,075 Ом·мм<sup>2</sup>/м, а при отпуске (595 °C) – 0,0415 Ом·мм<sup>2</sup>/м. Связь между удельной электропроводностью и параметром кристаллической ячейки мартенсита, твердостью и ударной вязкостью закаленной стали. Установлено, что в процессе первичной рекристаллизации при температурах выше 1110 °C электропроводность стали снижается. Установлено, что при повторном нагреве (отпуске) в стали увеличивается проводимость и интенсивно изменяется структурно-чувствительная механическая характеристика (ударная вязкость), которая увеличивается вдвое в диапазоне температур отпускной хрупкости 475 ± 15 °C. Поскольку его аномалия возникает в таком температурном диапазоне, уменьшение составляет до 15 Дж/см<sup>2</sup>, а параметр кристаллической ячейки мартенсита увеличивается (2,8847·10<sup>-1</sup> нм). Оптимизированный режим закалки 1095 °C и отпуска 590 °C исследуемой стали позволил повысить ударную вязкость до 30 Дж/см<sup>2</sup> и повысить проводимость в диапазоне температур отпускной хрупкости первого рода. Это позволяет увеличить срок службы пресс-инструмента (штампа) из стали 4X4N5M4F2 для горячей деформации алюминиевого сплава в интервале температур 450–500 °C.

**Ключевые слова:** штамповая сталь, состав, термообработка, механические свойства.

**Sydorchuk O. M. OPTIMIZING HEAT TREATMENT MODES WITH ALLOWANCE FOR SPECIFIC ELECTRIC CONDUCTIVITY OF CAST DIE STEEL 4KH4N5M4F2**

The results of research on determination of structurally sensitive value (conductivity) after heat treatment (hardening and tempering) of steel (without deformation-forging) with adjustment of austenitic transformation during operation of the brand 4Kh4N5M4F2 have been disclosed. It has been established that the minimum value of the parameter – specific electric conductivity was being determined at optimized

*modes of heat treatment of the investigated steel. Thus, for the optimal value of the tempering temperature of steel (1100 °C), the specific electric conductivity was 0,075 Ohm·mm<sup>2</sup>/m, and at tempering (595 °C) – 0,0415 Ohm·mm<sup>2</sup>/m. The relationship between the specific electric conductivity and the parameter of the crystal cell of martensite, hardness and toughness of hardened steel. It has been established that in the process of primary recrystallization at temperatures above 1110 °C, the conductivity of steel decreases. It has been proved that during reheating (tempering), the conductivity in steel increases, and the structurally sensitive mechanical characteristic (impact strength) changes intensively, which increases twice in the range of tempering brittleness temperatures of 475±15 °C. Since its anomaly occurs at that kind of temperature range, the decrease is up to 15 J/cm<sup>2</sup> and the parameter of the crystalline cell of martensite increases (2.8847·10<sup>-1</sup> nm). The optimized mode of hardening of 1095 °C and tempering of 590 °C of the investigated steel, enabled to increase impact strength to 30 J/cm<sup>2</sup> and increased conductivity in the range of temperatures of tempering brittleness of the first kind. This makes it possible to increase the service life of the press tool (die) made of steel 4Kh4N5M4F2 for hot deformation of aluminum alloy in the temperature range of 450-500 °C.*

**Keywords:** die steel, composition, heat treatment, mechanical properties

© Сидорчук О. М.

Статтю прийнято  
до редакції 07.06.21