

УДК 669.14.018.258

doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ШТАМПОВУ СТАЛЬ 4Х4Н5М4Ф2 ТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЇЇ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

О. М. СИДОРЧУК

відділ № 10, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ, УКРАЇНА
Центр досліджень і технологій ІПМ Нінбо, м. Нінхай, КИТАЙСЬКА НАРОДНА РЕСПУБЛІКА
e-mail: sedoroleg@ukr.net

АНОТАЦІЯ Наведено результати досліджень після термічної обробки (гартування та відпуску) легованої конструкційної сталі марки 4Х4Н5М4Ф2 в литому та кованому стані. Рекомендовано здійснювати часткову перекристалізацію (неповний відпал) дослідної сталі (4Х4Н5М4Ф2) за температури 750 ± 20 °С. Запропоновано здійснювати термо-деформаційну обробку (ковка за температури 1170 ± 20 °С), що підвищило у два рази бал зерна гартованої сталі та ударну в'язкість у п'ять разів після відпуску. Встановлено оптимальний температурний режим гартування (1095 ± 5 °С) литої та кованої сталі, твердість якої співпадає на рівні 56 HRC. Показано бал зерна в литому та кованому стані (№ 3 – № 6 та № 6 – № 8, відповідно) дослідженої сталі залежно від температури гартування (1050 – 1110 °С). Встановлена залежність між твердістю та питомою електричною провідністю сталі після гартування у порівнянні з литим та кованим станом. Встановлено, що при оптимізованих режимів термічної обробки дослідженої сталі визначалось за мінімальним значенням параметру – питомої електричної провідності. Так для оптимального значення за температурою гартування сталі (1095 °С) питома електрична провідність становила $0,075$ Ом·мм²/м, а при відпуску (595 °С) – $0,0415$ Ом·мм²/м. Запропоновано методичний підхід після гартування сталі, що дозволяє проводити контроль температурного режиму при нагріві штампового інструменту. Встановлено, що після гартування сталі, найбільшу провідність має кована, ніж лита сталь. Представлено фізико-механічні властивості (поріг міцності, ударна в'язкість, твердість, мікротвердість у структурі металу та питома електрична провідність) дослідженої гартованої сталі (литої та кованої) після відпуску. Встановлено підвищення твердості та міцності литої сталі при відпуску за температур від 450 до 500 °С, що забезпечується виділенням карбідної складової, де спостерігається інтенсивне підвищення мікротвердості. Встановлено, відпускну крихкість дослідженої сталі за температури 475 ± 15 °С. Показано аномальне зниження ударної в'язкості (до 15 Дж/см²) та інтенсивне підвищення питомої електричної провідності литої та кованої сталі при відпуску крихкості. Встановлено збільшення мікротвердості сталі, що впливає на підвищення зносостійкості та ресурсу експлуатації штампового інструменту. 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 відпуску крихкості 475 ± 15 °С. Це дає можливість підвищити ресурс експлуатації пресового інструменту (філь'єри) зі сталі 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування алюмінієвого сплаву в інтервалі робочих температур 450 – 500 °С.

Ключові слова: штампова сталь; склад; термічна обробка; термо-деформаційна обробка; структура; фізико-механічні властивості

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON DIE STEEL 4Kh4N5M4F2 AND ESTABLISHMENT OF ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

O. SYDORCHUK

Department № 10, IPMS NAS of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

Ningbo IPMS research and technology center Co., Ltd. No. Ningbo city, Zhejiang Province, PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

ABSTRACT The results of researches after heat treatment (hardening and tempering) of alloyed structural steel of grade 4Kh4N5M4F2 in cast and forged state are given. It is recommended to carry out partial recrystallization (incomplete annealing) of the experimental steel (4Kh4N5M4F2) at a temperature of 750 ± 20 °C. It is recommended to carry out thermo-deformation treatment (forging at a temperature of 1170 ± 20 °C), which doubled the grain yield of hardened steel and increased the toughness five times after tempering. The optimal temperature mode of hardening (1095 ± 5 °C) of cast and forged steel, the hardness of which coincides at the level of 56 HRC, is established. The grain score in cast and forged state (№ 3–№ 6 and № 6–№ 8, respectively) of the investigated steel depending on the quenching temperature (1050 – 1110 °C) is shown. The dependence between hardness and specific electrical conductivity of steel after hardening in comparison with cast and forged state is established. It is established that at optimized modes of heat treatment of the investigated steel it was determined by the minimum value of the parameter – specific electrical conductivity. Thus, for the optimal value of the tempering temperature of steel (1095 °C), the specific electrical conductivity was $0,075$ Ohm·mm²/m, and at tempering (595 °C) – $0,0415$ Ohm·mm²/m. The methodical approach after hardening of steel is offered that allows carrying out control of a temperature mode at heating of the stamp tool. It is established that after hardening of steel, forged has the highest conductivity than cast. Physico-mechanical properties (strength threshold, impact strength, hardness, microhardness in the metal structure and specific electrical conductivity) of the investigated hardened steel (cast and forged) after tempering are presented. An increase in the hardness and strength of cast steel during tempering at temperatures from 450 to 500 °C, which is provided by the release of the carbide component, where there is an intensive increase in microhardness. It was found that the tempering brittleness of the investigated steel at a temperature of 475 ± 15 °C. An anomalous decrease in impact strength (up to 15 J/cm²) and an intensive increase in the specific electrical conductivity of cast and forged steel at tempering brittleness are shown. The increase of microhardness of the investigated steel is established, which promotes increase of wear resistance and increase of service life of the stamping tool. It is established 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. 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 450 – 500 °C.

Keywords: die steel; composition; thermal treatment; thermo-deformation treatment; structure; physical and mechanical properties

Вступ

Штампи та матриці для гарячого деформування кольорових металів та сплавів (головним чином на основі міді та алюмінію) на сьогоднішній день виготовляють зі сталей та сплавів. Жароміцні сталі аустенітного класу для виготовлення штампового інструменту мають ряд недоліків, що обмежують їхнє застосування: понижено теплопровідність та високий коефіцієнт термічного розширення. Їхній вжиток також обмежений через погіршену обробку різанням та високу вартість легуючих елементів.

Тому головним чином на підприємствах відповідного профілю використовують штамповий інструмент феритного класу теплостійких сталей марок 5XHM, 3X3M3Ф, 4X5MФ1С, 5X5MНФС, 4X5B2ФС, 4X3BMФ, 4X4BMФС, 4X2B2MФС, 3X2B8Ф, 5X3B3MФС, 4X2B5MФ, 3X3B9Ф, 6X6M5Ф2, 6X4B9M1Ф і т.д. для гарячого деформування мідних сплавів.

Проте, за робочих температур експлуатації штампового інструменту 600–700 °С при гарячому пресуванні міді та латуні відбувається відпускна крихкість, що призводить до виходу з ладу матриць для гарячого пресування.

За температурних умов експлуатації 900–1000°С при гарячому пресуванні мідно-нікелевого сплаву, штампові сталі феритного класу мають низький ресурс експлуатації. Встановлено, що під дією високих температур та певного навантаження (тиску) при кожному циклі пресування мідного сплаву відбувається пластична деформація поверхневого шару інструменту. Накопичення такої деформації не зміцнює міцності штапкової сталі з ОЦК ґраткою, але може зміцнювати сталі з ГЦК ґраткою. Запропонований новий клас сталі, який за кімнатної температури відноситься до феритного класу, а при експлуатаційній температурі переходить в аустенітну область. Така сталь була названа сталлю з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації (РАПЕ). Відповідно до [1-3] для виготовлення філь'ер-матриць, що використовують при гарячому деформуванні (температура експлуатації 900–950 °С) мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1 успішно використовується сталь з РАПЕ марки 4X3H5M3Ф. Режими термічної обробки (гартування 1030±10 °С та відпуску 560±10 °С), що задовольняло експлуатувати вироби з неї в процесі аустенізації (за температур вище 860 °С) [1-4]. Проте, для її використання за температури нижче критичної точки дослідженої сталі А₁ (α-Fe область), потребувало скорегувати хімічний склад (4X4H5M4Ф2) та розробити новий режим кінцевої термічної обробки [5-8], що дало змогу підвищити її теплостійкість до температури 650°С.

Правильний вибір хімічного складу сталі та технології термічної обробки можливий лише за рахунок встановлення як природи впливу легуючих компонентів на фізико-механічні властивості, так і на сутність процесів, що відбуваються у сталі, легованій різними компонентами при нагріві вище критичної точки А_{с3} (при гартуванні) та нижче – А_{с1} (при відпуску). Для цього необхідно розробити оптимальні параметри кінцевої термічної обробки (гартування та відпуск) дослідженої сталі з РАПЕ.

Методи дослідження

Виплавку дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co., Ltd (м. Дан'ян, провінція Цзянсу, КНР). Одержано зливки масою по 300 кг, розмірами: Ø 180–220 мм, довжиною 1100 мм. Хімічний склад сталі відповідав маркуванню 4X4H5M4Ф2: 0,40–0,42 % С; 3,8–3,9 % Cr; 5,0–5,1 % Ni; 3,7–3,8 % Mo; 1,7–1,8 % 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. Вміст вуглецю у сталі визначали за допомогою експрес-аналізаторів АН 7560М та АН 7529М з кулонометричними комірками титрування СО₂ у потоці кисню. Хімічний склад сталі визначали за допомогою стаціонарного спектрометра для аналізу металу SPECTROMAX LMX07 (Німеччина). Метод визначення кількості Cr, Ni, Mo, V, Mn, Si та ін. за спектральним аналізом проводили за ГОСТ 22536.13-77.

Металографічний аналіз зразків сталі, що досліджували проводили на базі металографічної лабораторії відділу 10 (Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ) та Ningbo IPMS research and technology center Co., Ltd. (м. Нінхай, провінція Чжецзян, КНР). Шліфування та полірування шліфів проводили із використанням абразивних матеріалів різної зернистості. Полірування шліфів проводили алмазною пастою різної зернистості згідно ГОСТу 25593-83. Виготовлення шліфів проводили за допомогою приладів: Dincer XQ-2B, Dincer MP-2 та Dincer P-2. Досліджували мікрошліфи сталі після травлення травником наступного складу: 4,0 або 10,0 % розчин азотної кислоти в етиловому спирті з добавкою та без добавки пікринової кислоти за методикою ГОСТ 10243-75. Величину зерна визначали лінійним металографічним аналізом за методикою ГОСТ 5639-82 із використанням світлового металографічного мікроскопу фірми Achua technology Co., Ltd. Мікротвердість досліджували за допомогою цифрової напівавтоматичної системи випробувань мікротвердості EM-4500L (на основі мікротвердоміра МН-5L). Навантаження на алмазну пірамідку становило 10 грамів. Час витримки під навантаженням 11 секунд (EM-4500L).

Питомий електричний опір вимірювали на поверхні зразка (висота зразка становила 2,5 та 5 мм, відстань між електродами вимірюванні становила 5 мм) за допомогою двоканального цифрового електричного вимірювального чотирьохзондового тестера ST2263.

Випробування на твердість проводили на твердомірі HR150A. Пороги плинності та міцності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТ 1497-84 на універсальній установці GNT50.

Ударну в'язкість визначали на випробувальній машині NI300 на зразках розмірами 10×10×55 мм без надрізу.

Мета дослідження

Метою роботи є встановлення фізико-механічних властивостей литої та кованої сталі 4X4H5M4Ф2, одержаної електрошлаковим переплавом та термічного зміцнення.

Викладення основного матеріалу

Використовували операцію кування зливок (одержаних електрошлаковим переплавом) масою по 300 кг зі сталі 4X4H5M4Ф2 за температури нагріву 1170 ± 20 °С, під керівництвом компанії «Futes Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян, КНР).

Зливки (ливої сталі) та заготовки (кованої сталі) були піддані термічній обробці (відпалу) за температури 750 ± 20 °С. Аналіз результатів досліджень (високотемпературний X-променевиї фазовий аналіз, дилатометричний аналіз та металографічний аналіз) дослідженої сталі з РАПЕ (4X4H5M4Ф2) дозволив визначити критичні точки ($A_1=700$ °С та $A_3=850$ °С), тобто вдалось зменшити значення критичних точок A_1 та A_3 у порівнянні зі сталлю 3X3M3Ф ($A_1=815$ °С та $A_3=875$ °С) та рекомендувати проведення неповного відпалу за температурою 750 ± 20 °С, коли відбувається процес часткової перекристалізації твердого розчину, де утворюється сфероїдизація карбідної складової з твердістю менше 35 HRC, що дозволяє краще обробляти різанням деталі при виготовленні штампового інструменту (філь'єр-матриць, прес-форм, деталей-екструдерів, тощо) [1,2,4].

У [2] температура гартування дослідженої сталі 4X4H5M4Ф2 становила 1030 ± 10 °С і при відпуску 615 °С її твердість становила 40 HRC (за кімнатної температури). Для того, щоб підвищити теплостійкість сталі, було прийняте рішення підвищувати температуру гартування, у супереч усіх літературних посилань при одержанні балу зерна № 10. Бал зерна у структурі металу зменшувався у процесі термічної обробки (гартування). Встановлено, що за температури гартування дослідженої сталі (вище 1110 °С) відбувався процес первинної рекристалізації, що унеможливило проведення термічної обробки (укрупнення зерна та зниження механічних властивостей). В [5] було визначено оптимальний режим гартування сталі 4X4H5M4Ф2 (1095 ± 5 °С), що дозволило підвищити теплостійкість сталі до температури 650 °С. Визначено, що питома електрична провідність дослідженої сталі відповідає мінімальному значенню $0,075$ Ом·мм²/м (рис. 1а, штрихова лінія) при твердості 56 HRC (рис. 1а, суцільна лінія). Максимальне значення питомої електричної провідності ($0,138$ Ом·мм²/м) дослідженої сталі відповідає температурі гартування 1060 ± 5 °С (рис. 1а). Встановлено, що за температури гартування литої сталі 1060 ± 5 °С та відпуску 600 ± 5 °С механічні властивості є занижені (зниження твердості на 5 HRC та порогу міцності на 250 МПа), порівнюючи за температури гартування 1095 ± 5 °С (твердість 49,5 HRC та поріг міцності 1580 МПа). Отже, підвищення механічних властивостей термічно-зміцненої сталі залежить від мінімального значення питомої електричної провідності (підвищення провідності). Як показують дослідження в широкому інтервалі температур гартування ($1080-1120$ °С), мінімальне значення питомої електричної провідності ($0,0415$ Ом·мм²/м) відповідає при температурі відпуску 595 °С (рис. 1б) та співпадає з оптимальним режимом остаточної термічної обробки сталі. Таким чином було прийняте рішення проводити гартування литої та кованої сталі 4X4H5M4Ф2 за температури 1095 ± 5 °С [5-8], твердість якої співпадає на

рівні 56 HRC (рис.2), бал зерна №4 та №7 за ГОСТ 5639-65 (в литому та кованому стані, відповідно) (рис.3). Теплостійкість сталі було підвищено до 650 °С в литому стані [6] та кованому 630 °С [7] при 40 HRC (за кімнатної температури). Підвищення температури гартування сталі дало змогу більше розчинити карбідну фазу в процесі аустенізації, на основі якого є хром. Оскільки такий карбід виділяється при відпуску, коагулює та знижує теплостійкість сталі. Температурний інтервал гартування сталі в інтервалі $1050-1070$ °С показує підвищення твердості кованої сталі до 2 HRC, а вище 1070 °С до 1 HRC (рис.2). За таких температур гартування сталі співпадає зміна фізичного параметру - питомої електричної провідності. Для температури $1050-1070$ °С показує підвищення питомої електричної провідності литої сталі (рис. 2).

Таким чином, після гартування більшу провідність має кована сталь, ніж лита. В інтервалі температур гартування сталі $1050-1110$ °С в литому стані максимальне значення питомої електричної провідності досягає $0,115$ Ом·мм²/м (1070 °С), а кованої $0,085$ Ом·мм²/м (1110 °С) (рис.2).

Такий методичний підхід після гартування сталі дозволяє проводити контроль температурного режиму при нагріві штампового інструменту.

Показано, що після термо-деформаційної обробки (кування) гартованої сталі зменшується розмір зерна (підвищено у два рази бал зерна від №8 до №7, ГОСТ 5639-65) (рис. 3). Це сприяло підвищенню ударної в'язкості сталі (у 5 разів) при відпуску у порівнянні з литим станом (рис. 4).

На одержаній кривій залежності ударної в'язкості від температури відпуску при охолодженні на повітрі литої та кованої сталі спостерігається аномальне зниження її величини за температури 475 °С (рис. 4). У певному температурному інтервалі спостерігається кореляція між залежностями ударної в'язкості та питомої електричної провідності. Так, за температури відпуску до 475 °С відбувається інтенсивне збільшення та максимум величини питомої електричної провідності (особливо в кованому стані) та зниження до мінімуму величини ударної в'язкості (в литому та кованому стані) (рис. 4). Такий методичний підхід при визначенні питомої електричної провідності для встановлення відпускнуї крихкості сталі дозволяє замінити потужне устаткування при визначенні ударної в'язкості. Початок зниження величини ударної в'язкості дослідженої литої та кованої сталі відбувається за температури 450 °С при підвищенні міцності та твердості та зміні структурно-чутливої величини (зменшення провідності) (рис. 4).

Встановлено, що застосування оптимізованих режимів гартування та відпуску (1095 °С, 590 °С, відповідно) дослідженої сталі підвищує ударну в'язкість до 30 Дж/см² в інтервалі температур ($460-490$ °С) відпускнуї крихкості [6], де спостерігається збільшення провідності сталі (рис. 5). Підвищення механічної характеристики (ударна в'язкість) сталі 4X4H5M4Ф2 дає можливість при ударних циклічних навантаженнях підвищити ресурс експлуатації пресового інструменту (матриці-фільєри) для гарячого пресування алюмінієвого сплаву (наприклад АК7ч) в інтервалі температур відпускнуї крихкості $450-500$ °С.

Підвищення твердості та міцності литої сталі при відпуску за температур від 450 до 500 °С забезпечується завдяки виділенню карбідної складової на границях зерен,

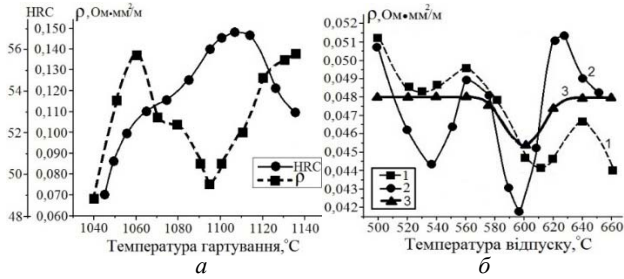


Рис. 1 – Залежність фізико-механічних властивостей (за кімнатної температури) від режимів термічної обробки литої сталі 4Х4Н5М4Ф2. а – твердості (HRC) та питомої електричної провідності від температури гартування, б – питомої електричної провідності від температури гартування (1-1085±5°C, 2-1100±5°C, 3-1115±5°C) та відпуску

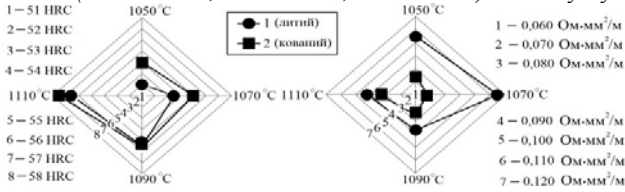


Рис. 2 – Залежність параметрів (твердість та питома електрична провідність) від температури гартування литої та кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2

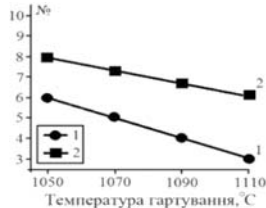


Рис. 3 – Залежність балу зерна аустеніту від температури гартування сталі 4Х4Н5М4Ф2 (1-литий, 2-кований)

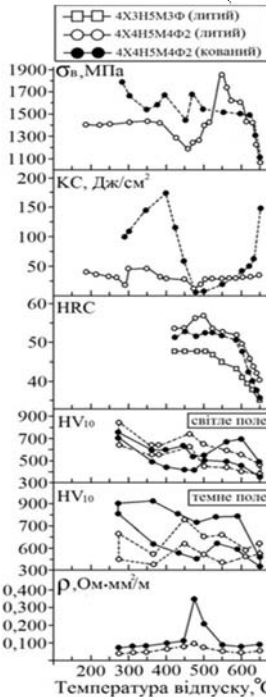


Рис. 4 – Залежність фізико-механічних властивостей від температури відпуску литої та кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2: поріг міцності (МПа), ударна в'язкість (Дж/см²), твердість (HRC), мікротвердість у структурі металу (HV₁₀) та питома електрична провідність (Ом·мм²/м)

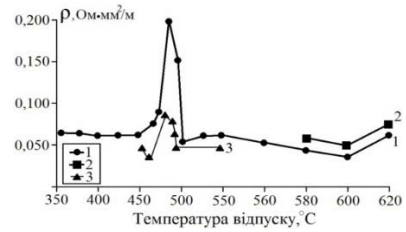


Рис. 5 – Залежність питомої електричної провідності (за кімнатної температури) від режимів температури відпуску литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 (гартованої 1100±5 °С).

1 - відпуск (охолодження на повітрі), 2 - відпуск (охолодження в печі), 3 - відпуск за температури 590±5 °С (охолодження на повітрі) з наступним нагрівом в інтервалі температур (450–500 °С)

де спостерігається інтенсивне підвищення мікротвердості та твердості (рис. 4), порівняно з кованою сталлю такі показники властивостей є набагато нижчими. Підвищення мікротвердості дослідженої сталі 4Х4Н5М4Ф2 зумовлює підвищення її зносостійкості та ресурсу експлуатації пресового інструменту, проте сприяє підвищенню крихкості сталі і тим самим унеможливило проводити циклічні ударні навантаження при експлуатації інструменту. Отже, лита сталь має більшу перевагу при високій зносостійкості інструменту, ніж кована при гарячому пластичному деформуванню алюмінієвого сплаву за температур експлуатації 450-500 °С.

Штамповий інструмент при гарячому деформуванні міді або латуні проводиться за температури експлуатації 600 °С і вище. Результати досліджень (рис. 4) показують, що при зміні хімічного складу дослідної сталі (4Х4Н5М4Ф2) та підвищення її температури гартування на 70 °С (1095±5 °С), вдалось підвищити теплостійкість на 35 °С при 650 °С (40 HRC) в литому стані та на 15 °С при 630 °С (40 HRC) в кованому.

Висновки

Таким чином, сталь з РАПЕ (марки 4Х4Н5М4Ф2), яка була рекомендована працювати за високих температур експлуатації (900-950 °С) гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1, здатна працювати і при температурах нижче критичної точки А₁ (Т_{А1}=700 °С), а саме до температури 630 °С в кованому та 650 °С в литому стані для гарячого деформування міді та латуні.

Список літератури

1. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К., Мамонова А.А. Штампова сталь для гарячого деформування з регульованим аустенітним перетворенням. *МОН*. 2014. 1. С. 40-44.
2. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Лук'янець В. В. Технологія виготовлення штампової сталі 40Х3Н5М3Ф для гарячого деформування. Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. *Зб. наук. статей за результатами, отриманими в 2013–2015 рр. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ*. 2015. 669-672.
3. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К. Інструментальні штампові сталі для гарячого деформування (огляд). *Металознавство та обробка металів*. 2016. № 3. С. 18–24.
4. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К., Карпець М.В., Пятачук С.Г. Структура та властивості загартованої сталі 40Х3Н5М3Ф, одержаної електрошлаковим перетопленням за високих температур. *Металознавство та новітні технології*. 2015. Т. 37. 12. С. 1653–1661.
5. Сидорчук О.М., Миронюк Д.В., Радченко О.К., Гогаєв К.О., Хонгуанг Є. Підвищення теплостійкості та властивостей

- штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації. *МОН*. 2019. 2. 19–25. doi:10.15407/mom2019.02.019
- Сидорчук О.М., Гогаєв К.О., Радченко О.К., Миронюк Л.А., Миронюк Д.В. Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості. *МОН*. 2020. 2. 29–37. doi:10.15407/mom2020.02.029
 - Сидорчук О.М., Миронюк Л.А., Миронюк Д.В., Гогаєв К.О., Радченко О.К. Штампова кована сталь 4X4H5M4Ф2 підвищеної стійкості. *МОН*. 2020. 4. 30–38. doi:10.15407/mom2020.04.030
 - Гогаєв К.О., Радченко О.К., Сидорчук О.М., Миронюк Д.В. Штамповасталь: пат. 141447 Україна: МПК C22C38/00. № u2019 09670; заявл. 05.09.2019; опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7. 2020. 2 с.

References (transliterated)

- Gogaev K.A., Sydorчук O.M., Radchenko O.K., Mamonova A.A. Shtampova stal dlya garyachogo deformuvannya [Stamped steel for hot deformation with adjustable austenitic transformation]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2014, 1, 40–44.
- Gogaev K.A., Radchenko O.K., Sydorчук O.M., Lukianchuk V.V. Tekhnolohiia vyhotovlennia shtampovoi stali 40Kh3N5M3F dlia hariachoho deformuvannya. Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktzii, sporud ta mashyn [Technology of production of stamped steel 40X3H5M3Ф for hot deformation. Problems of resource and safety of operation of structures, constructions and machines]. *Instytut elektrozvarivannia im. YE. O. Patona NAN Ukrainy*, 2015, 669–672.
- Gogaev K. A., Sydorчук O. M., Radchenko O. K. Instrumentalni shtampovi stali (oglyad) [Tool die steels for hot

- deformation (review)]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2016, 3, 18–24.
- Gogaev K. O., Sydorчук O. M., Radchenko O. K., Karpets M. V., Piatachuk, S. H. Struktura ta vlastuvosti zagartovanoi stali 40Kh3N5M3F, oderjanoi elektroshtakovym peretoplenniam za vysokih temperature [Structure and properties of hardened steel 40X3H5M3Ф, obtained by electroslag remelting at high temperatures]. *Metalofizyka ta novini tehnologii [Metal physics and the latest technologies]*, 2015, 12 (37), 1653–1661.
 - Sydorчук O.M., Myroniuk D.V., Radchenko O.K., Gogaev K.A., Hongguang Ye. Pidvyshennya teplostiikosti ta vlastyvostei shtampovoi stali z reguluvanniam austenitnogo peretvorennya pry ekspluatatsii [Improving heat resistance and properties of stamped steel with adjustment of austenitic transformation during operation]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2019, 2, 19–25. doi: 10.15407/mom2019.02.019.
 - Sydorчук O.M., Gogaev K.A., Radchenko O.K., Myroniuk L.A., Myroniuk D.V. Termichna obrobka shtampovoi stali pidvyshenoї stiikosti [Heat treatment of stamped steel of the increased stability]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2020, 2, 29–37. doi: 10.15407/mom2020.02.029.
 - Sydorчук O.M., Myroniuk L.A., Myroniuk D.V., Gogaev K.A., Radchenko O.K. Shtampova kovana stal 4Kh4N5M4F2 pidvyshenoї stiikosti [Stamped forged steel 4X4H5M4Ф2 of the increased stability]. *Metalozn. obrobka met [Metallurgy and metal processing]*, 2020, 4, 3–11. doi: 10.15407/mom2020.04.030.
 - Gogaev K. A., Radchenko O. K., Sydorчук O. M., Myroniuk D.V. Shtampova stal. Patent No.141447 Ukraine. MПК C22C38/00., u201909670; app. 05.09.2019; publ. 10.04.2020.

Відомості про автора (About author)

Сидорчук Олег Миколайович – кандидат технічних наук, старший дослідник, ППМ ім. І.М. Францевича НАНУ, старший науковий співробітник відділу №10, м.Київ, Україна, ORCID:0000-0003-0026-7525; e-mail: sedoroleg@ukr.net.

Oleh Sydorчук – Ph.D, senior researcher, Frantsevich Institute for Problems in Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, senior researcher of the department No.10, Kyiv, Ukraine, ORCID: 0000-0003-0026-7525; e-mail: sedoroleg@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сидорчук О. М. Вплив термічної обробки на штампову сталь 4X4H5M4Ф2 та встановлення її фізико механічних властивостей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 1 (7). С. 34-38. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05.

Please cite this article as:

Sydorчук O. M. Influence of heat treatment on die steel 4Kh4N5M4F2 and establishment of its physical and mechanical properties. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 1 (7). pp. 34-38. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сидорчук О. Н. Влияние термической обработки на штамповую сталь 4 X4H5M4Ф2 и установления ее физико-механических свойств. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 1 (7). С. 34-38. doi:10.20998/2413-4295.2021.01.05.

АННОТАЦІЯ Приведены результаты исследований после термической обработки (закалки и отпуска) легированной конструкционной стали марки 4 X4H5M4Ф2 в литом и ковном состоянии. Рекомендуются проводить частичную перекристаллизацию (неполный отжиг) исследовательской стали (4X4H5M4Ф2) при температуре 750±20 °С. Предлагается проводить термо-деформационную обработку (ковка при температуре 1170±20 °С), что повысило в два раза балл зерна закаленной стали и повысило ударную вязкость в пять раз после отпуска. Установлен оптимальный температурный режим закалки (1095±5 °С) литой и ковеной стали, твердость которой совпадает на уровне 56 HRC. Показано балл зерна в литом и ковном состоянии (№ 3 – № 6 и № 6 – № 8, соответственно) исследованной стали в зависимости от температуры закалки (1050–1110 °С). Установлена зависимость между твердостью и удельной электрической проводимостью стали после закалки по сравнению с литым и ковным состоянием. После закалки стали предложен методический подход, который позволяет проводить контроль температурного режима при нагреве штампового инструмента. Установлено, что после закалки стали, наибольшую проводимость имеет ковкая, чем литая сталь. Представленные физико-механические свойства (порог прочности, ударная вязкость, твердость, микротвердость в структуре металла и удельная электрическая проводимость) исследованной закаленной стали (литой и ковеной) после отпуска. Установлено повышение твердости и прочности литой стали при отпуске при температурах от 450 до 500 °С, обеспечивается выделению карбидной составляющей, где наблюдается интенсивное повышение микротвердости. Установлено, отпускную хрупкость исследованной стали при температуре 475±15 °С. Показано аномальное снижение ударной вязкости (до 15 Дж/см²) и интенсивное повышение удельной электрической проводимости литой и ковеной стали при отпускной хрупкости. Установлено повышение микротвердости исследованной стали, которое способствует повышению износостойкости и ресурса эксплуатации штампового инструмента.

Ключевые слова: штамповая сталь; состав; термическая обработка; термо-деформационная обработка; структура; физико-механические свойства

Надійшла (received) 22.02.2021