

УДК 669.14.018.258

Сидорчук О. М. канд. техн. наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна,  
e-mail: sedorleg@ukr.net

## ШТАМПОВА СТАЛЬ 4Х4Н5М4Ф2 ДЛЯ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ МІДІ

**Мета роботи.** Одержання кованої штампової сталі (4Х4Н5М4Ф2) з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації, електрошлаковим переплавом та встановлення оптимальних режимів термодеформаційної обробки (відпал, ковка, гартування та відпуск). Виготовлення великогабаритних деталей типу коліс екструдерів з кованої сталі марки 4Х4Н5М4Ф2 з проведенням дослідно-промисловим випробуванням для гарячого деформування міді за температури експлуатації нижче критичної точки  $A_1$ .

**Методи дослідження.** Металографічний аналіз дослідних штампових сталей 4Х4Н5М4Ф2 та Н13 (аналог 4Х5МФ1С).

**Наукова новизна.** В процесі часткової перекристалізації легованої конструкційної кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 утворюється сфероїдизована карбідна складова, що спричинює на поліпшення механічної обробки заготовки для виготовлення деталей типу коліс екструдерів.

**Одержані результати.** Дослідно-промислові випробування з деталей типу коліс екструдерів з кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування міді марки М<sub>1</sub>, показало підвищену стійкість у порівнянні зі сталлю Н13, яка застосовується на одному з китайських підприємств.

**Практична цінність.** Показана можливість використання сталі (4Х4Н5М4Ф2) з регульованим аустенітним перетворенням при експлуатації для широкого інтервалу температур експлуатації (нижче критичної точки  $A_1$  та вище критичної точки  $A_3$ ) для гарячого деформування міді (до 630 °С), мідно-нікелевого (900–950 °С) та алюмінієвого сплаву (450–500 °С) з підвищеним ресурсом експлуатації. Для полегшення механічної обробки різанням заготовки при виготовленні матриць з штампової сталі 4Х4Н5М4Ф2, було запропоновано провести часткову перекристалізацію, а саме неповний відпал за температури 750±20 °С. Досліджувана кована сталь 4Х4Н5М4Ф2 характеризується підвищенням твердості та порогу міцності у порівнянні зі сталлю Н13, після експлуатації коліс екструдерів (виготовлення більше 60 тон виробів з міді).

**Ключові слова:** штампова сталь, хімічний склад, термічна обробка, ковка, властивості, гаряче деформування.

### Вступ

Штампові сталі, які використовують для гарячого деформування кольорових металів та сплавів мають низьку стійкість в процесі експлуатації. Утворюються тріщини розгару, що призводить до виходу з ладу інструмента. Тому, розробка нових матеріалів, або розробка режимів кінцевої термічної обробки (гартування, відпуск) сталі, направлені на підвищення гарячої стійкості інструменту є актуальними задачами. Виготовлення штампових сталей з вихідною феритною основою для роботи в аустенітному сталі визначається положенням температур від  $\alpha$ -Fe до  $\gamma$ -Fe перетворення, оскільки розігрів інструмента у процесі експлуатації повинен забезпечити проходження такого перетворення при наступній тривалій роботі сталі в аустенітному стані. Тобто протягом усього періоду високо-температурної експлуатації інструменту зберігається аустенітна структура. Тому хімічний склад сталі вибирається таким чином, що з однієї сторони сталь є феритного класу, а з іншої – сталь працює в процесі експлуатації в області аустенітної структури, що характеризується як сталь з регулюванням аустенітного перетворення під час експлуатації (РАПЕ), яка розігріваються у процесі експлуатації до робочих

температур 950 °С. Технологія виготовлення штампового інструменту (матриць) зі сталі РАПЕ (4Х3Н5М3Ф та 4Х4Н5М4Ф2), пройшла дослідно-промислове випробування на ВАТ «Артемівський прокатний завод по обробці кольорових металів та сплавів, Донецька обл., м. Бахмут, Україна» та корпорації «New material technology Co., Ltd, м. Куньшань, КНР» [1–8]. Виготовленні матриці з цих сталей РАПЕ (без технології кування) з урахуванням розроблених оптимальних режимів термічної обробки для гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву МНЖ 5-1 (температура експлуатації 900–950 °С) та алюмінієвого сплаву АК7ч (450–500 °С), показало підвищений ресурс експлуатації у порівнянні зі сталями марок 3Х3М3Ф та 4Х5МФ1С. Однак, виготовлення великогабаритних деталей типу коліс екструдерів зі сталі РАПЕ для гарячого деформування міді, потребує термодеформаційну обробку (кування) зливків та оптимізації режимів термічної обробки.

### Методи дослідження

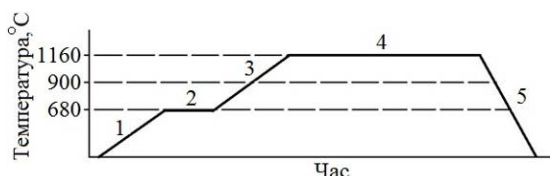
Хімічний склад досліджуваної сталі визначали за допомогою стаціонарного спектрометра SPECTROMAXx LMX07. Встановлено хімічний склад зразка отриманої сталі: 0,40–0,42% С; 3,8–3,9% Cr;

5,0–5,1% Ni; 3,7–3,8% Mo; 1,7–1,8% V та домішок 0,003–0,005 %N; 0,004–0,005 %S; 0,003–0,004 % P; 0,072–0,075% Si; 0,23–0,24% Mn; 0,014–0,016% Al; 0,040–0,043% W; 0,010–0,003% Ca. Мікроструктури сталі досліджували після програвлення 10 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті з додавкою пікринової кислоти за ГОСТ 10243–75. Структуру металу досліджували за допомогою металографічного мікроскопа МІМ 10 (збільшення  $\times 400$ ). Випробування на твердість проводили на твердомірі HR-150A. Ударну в'язкість визначали на випробувальній машині NI300 на зразках розмірами  $10 \times 10 \times 55$  мм без надризу. Пороги міцності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТ 1497–84 на універсальній установці GNT50. Мікротвердість визначали за допомогою цифрової напівавтоматичної системи випробувань мікротвердості EM 4500L (на основі мікротвердоміру МН – 5 L).

Виплавку дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co., Ltd (місто Дан'ян, КНР). Одержували зливки масою по 300 кг, розмірами  $\varnothing 180$ – $220$  мм, довжиною 1100 мм. Загальна маса зливок з одної плавки становила 3 тони. Термодеформаційну обробку (ковку) зливок з дослідної сталі проводили за температури  $1170 \pm 20$  °C під керівництвом компанії «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян, КНР).

#### Викладення основного матеріалу

Відпал дослідної сталі проводили за температури  $750 \pm 20$  °C. Для виготовлення великогабаритних деталей типу коліс екструдерів зі сталі використовувати технологічну операцію – кування за температури  $1160 \pm 20$  °C (рис. 1).



**Рис. 1.** Технологічна схема процесу ковки штампової сталі 4X4H5M4Ф2, одержаної після електрошлакового переплаву, проводилось під керівництвом компанії «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян, КНР):

- 1 – нагрів до 10 °C/хв; 2 – ізотермічна витримка 1 год;
- 3 – нагрів до 10 °C/хв; 4 – ізотермічна витримка 3,5 год;
- 5 – охолодження на повітрі з урахуванням проведення ковки за температурою 900 °C

Оптимізований режим гартування сталі від  $1100 \pm 5$  °C забезпечує одержання розміру зерна в межах від № 5 до № 7 і твердості 55–56 HRC. Після відпуску гартованої сталі за температури  $600 \pm 5$  °C ударна в'язкість становила 40–70 Дж/см<sup>2</sup> [9, 10]. Термічну обробку (гартування) сталі для коліс екструдерів проводили в компанії «Chagzhou riye machine Co., Ltd»

(м. Нінхай, провінція Чжецзян КНР), рис. 2. З використанням розроблених режимів кування та термічної обробки [9] були виготовлені колеса екструдери масою 47 кг та 59 кг,  $\varnothing 400$  мм, товщиною 90 мм та 120 мм, відповідно. Після експлуатації коліс екструдерів при гарячому деформуванні міді марки М1 (ГОСТ 859-2014) з кованої сталі 4X4H5M4Ф2 та кованої сталі 4X5МФ1С з них були вирізані зразки для проведення дослідження. Визначено, що мікротвердість мартенситу відпуску у структурі металу дослідженої сталі є набагато вищою (6,2–6,8 ГПа) за сталь Н13 (аналог 4X5МФ1С) (3,4–4,0 ГПа), рис. 3. Встановлено, що поріг міцності та твердість кованої дослідженої сталі 4X4H5M4Ф2 були вищими (1590–1650 МПа та 48,5 HRC) ніж у кованої сталі 4X5МФ1С (1350–1400 МПа та 42,5 HRC). Уда Дж/см<sup>2</sup>, що є оптимальною для штампових сталей при гарячому деформуванні (ГОСТ 5950–2000). Колеса екструдери з дослідженої сталі 4X4H5M4Ф2 в процесі гарячого деформування міді не перегрівались вище температури 630 °C. Підтвердженням якого є визначення механічних властивостей (за кімнатної температури) дослідженої сталі. Показано, що за температури відпуску 630 °C твердість сталі знижується і, становить менше 40 HRC (після гартування  $1100 \pm 5$  °C та відпуску  $590 \pm 5$  °C) [10], а також після гартування  $1100 \pm 5$  °C, відпуску  $590 \pm 5$  °C з наступним нагрівом інструменту до температури 630 °C при якому твердість становила 40 HRC, поріг міцності до 1300 МПа та ударної в'язкості до 60 Дж/см<sup>2</sup> (рис. 4).



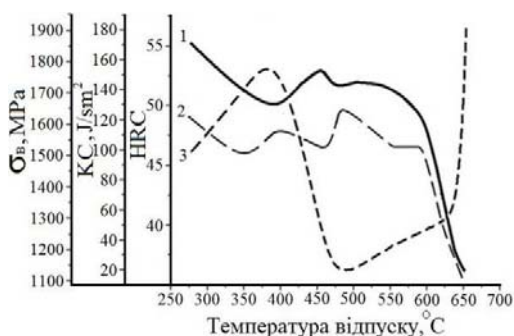
**Рис. 2.** Технологічна схема термічної обробки (гартування) штампового інструмента з кованої сталі 4X4H5M4Ф2, проводилось в компанії «Dazhong» (повітє місто Нінхай, провінція Чжецзян, КНР):

- 1, 2 – нагрів до 10 °C/хв; 2 – температура 670–680 °C ізотермічна витримка 120 хв; 3, 4 – нагрів до 10 °C/хв; 4 – температура 1090–1100 °C ізотермічна витримка 180 хв; 5 – охолодження в масилі



**Рис. 3.** Мікротвердість мартенситу відпуску сталей у коліс екструдерів після експлуатації:

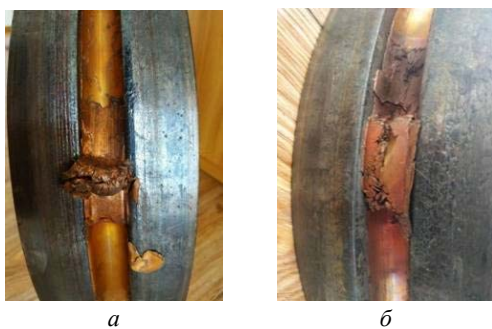
- 1 – сталь 4X4H5M4Ф2; 2 – сталь 4X5МФ1С



**Рис. 4.** Залежність механічних властивостей кованої сталі 4X4H5M4Ф2 від термічної обробки: гартування за температури 1100±5 °С, відпуск 590±5 °С, наступний нагрів (відпуск) за температур від 275 до 650 °С:

1 – твердість, HRC; 2 – поріг міцності, МПа; 3 – ударна в'язкість, Дж/см<sup>2</sup>

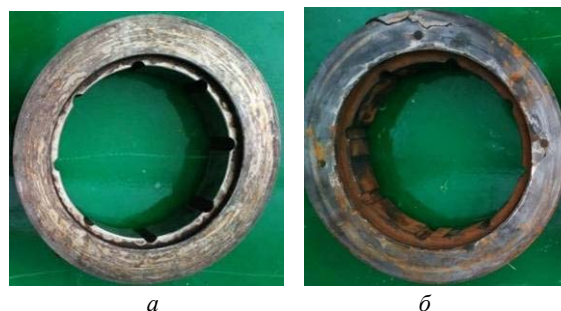
Під час експлуатації коліс екструдерів в основному дефект дослідної сталі 4X4H5M4Ф2 та сталі 4X5MФ1С, виникав у бічній сторони внаслідок відриву гарячого металу міді, що змушував призупинити виробництво при випуску продукції (рис. 5а, б). Тому, експлуатація коліс екструдерів при випуску продукції може коливатись від десятки до сотні тон міді. Проте, після експлуатації (більше 60 тон продукції) інструмент зі сталі 4X5MФ1С мав мікро- та макротріщини на бічній та внутрішній частинах колеса екструдера, а у дослідженій сталі 4X4H5M4Ф2 такі дефекти були відсутні (рис. 6, рис. 7а, б). Тому, при експлуатації гарячого деформування міді, досліджена сталь характеризується підвищеною стійкістю у порівнянні зі сталлю 4X5MФ1С, яка використовується на підприємстві.



**Рис. 5.** Дефекти коліс екструдерів у бічній стороні при відриву гарячого металу міді: а – сталь 4X4H5M4Ф2; б – сталь 4X5MФ1С



**Рис. 6.** Частина деталі-екструдера (дефекти) кованої сталі 4X5MФ1С після експлуатації



**Рис. 7.** Колеса екструдерів після експлуатації: а – кована сталь 4X4H5M4Ф2; б – тріщини розгару з кованої сталі 4X5MФ1С

### Висновок

Сталь з РАПЕ (марки 4X4H5M4Ф2), котра була рекомендована працювати при високих температурах експлуатації (900–950 °С) гарячого деформування мідно-нікелевого сплаву, здатна працювати і при температурах нижче критичної точки А1 = 700 °С, а саме до температури 630 °С. Отже, виникає можливість використати ковану сталь з РАПЕ для розширення температурного інтервалу експлуатації (вище критичної точки А3 та нижче критичної точки А1) для гарячого деформування кольорових металів та сплавів.

### Список літератури

1. Пат. № 94746 Україна UA, МПК С21/ D 8/00. Спосіб термічної обробки сталі для гарячого пресування / Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Лук'яничук В. В. ; заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – № u201407076 ; заявл. 23.06.2014 ; опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22/2014.
2. Сидорчук О. М. Одержання трубник заготовок з мідно-нікелевого сплаву МНЖ5-1 при використанні інструменту з штампової сталі регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації / Сидорчук О. М. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, Запорізький національний технічний університет. – 2021. – № 1. – С. 24–28.
3. Сидорчук О. М. Властивості штампової сталі 4X4H5M4Ф2 для гарячого деформування кольорових металів та сплавів // Науковий вісник Вінницького політехнічного інституту, м. Вінниця». – № 1. – 2021. – С. 108–112.
4. Г Пат. № 141447 Україна UA, МПК С22/ С38/00. Штампова сталь / Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Миронюк Д. В. ; заявник і патентовласник Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. – № u201909670 ; заявл. 05.09.2019 ; опубл. 10.04.2020, Бюл. № 7/2020.
5. Сидорчук О. М. Технологічні основи виготовлення інструменту з штампової сталі 4X3H5M3Ф / Сидорчук О. М. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – № 2. – 2021. – С. 17–20.
6. Сидорчук О. М. Лита штампова сталь 4X4H5M4Ф2 для прес-форм гарячого пресування міді М1 та алюмінієвого сплаву АК7ч / Сидорчук О. М. //

Успіхи матеріалознавства. – 2021. – № 1. – С. 54–62.

7. Сидорчук О. М. Сталь з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації / Сидорчук О. М. // Металознавство та обробка металів. – № 2. – 2021. – С. 47–53.

8. Сидорчук О.М. Штампова сталь для гарячого деформування кольорових металів та сплавів. Тез. допов. конференцій молодих учених «Інноваційні технологічні рішення в науково-дослідницькій роботі молодих вчених ВФТПМ», 3–5 вересня, 2021, с. Сичавка, Одеська обл. – С. 28–32.

9. Штампова кована сталь 4X4H5M4Ф2 підви-

щеної стійкості / Сидорчук О. М., Миронюк Л. А., Миронюк Д. В. и др. // Металознавство та обробка металів. – № 4. – 2020. – С. 3–11.

10. Сидорчук О. М. Вплив термічної обробки на штампову сталь 4X4H5M4Ф2 та встановлення її фізико-механічних властивостей / Сидорчук О. М. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – № 1. – 2021. – С. 34–38.

Одержано 08.05.2022

### Sydorchuk O. Die steel 4Kh4N5M4F2 for hot deformation of copper

**Purpose.** Obtaining forged die steel (4X4H5M4Ф2) with adjustable austenitic transformation during operation, electroslag remelting and installation of optimal modes of heat-deformation treatment (annealing, forging, hardening and tempering). Manufacture of large parts such as wheels of extruders from forged steel brand 4X4H5M4Ф2 with experimental and industrial tests for hot deformation of copper at operating temperatures below the critical point  $A_1$ .

**Methods of research.** Metallographic analysis of experimental die steels 4X4H5M4Ф2 and H13 (analog 4X4H5M4Ф2).

**Results.** Experimental-industrial tests of 4X4H5M4Ф2 forged steel extruder wheels for hot deformation of M1 copper have shown increased stability compared to H13 steel used at one of the Chinese enterprises.

**Scientific novelty.** In the process of partial recrystallization of alloyed structural forged steel 4X4H5M4Ф2 a spheroidized carbide component is formed, which leads to improved machining of the workpiece for the manufacture of parts such as extruder wheels.

**Practical value.** The possibility of using steel (4X4H5M4Ф2) with adjustable austenitic transformation in operation for a wide range of operating temperatures (below the critical point  $A_1$  and above the critical point  $A_3$ ) for hot deformation of copper (up to 630 °C), copper-nickel (900–950 °C) and aluminum alloy (450–500 °C) with increased service life was shown. To facilitate machining by cutting the workpiece in the manufacture of dies from steel 4X4H5M4Ф2, it was proposed to conduct a partial recrystallization, namely incomplete annealing at a temperature of 750±20 °C. The studied forged steel 4X4H5M4Ф2 is characterized with increased in hardness and strength limit compared to H13 steel, after operation of the wheels of extruders (manufacture of more than 60 tons of copper products).

**Key words:** die steel, chemical composition, heat treatment, forging, properties, hot deformation.