

УДК 669.14.018.258

ШТАМПОВА СТАЛЬ 4X4H5M4Ф2 (БЕЗ ОБРОБКИ КУВАННЯМ) ДЛЯ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

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

Мета роботи. Одержання сталі з регульованим аустенітним перетворенням при експлуатації марки 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням) за технологією електрошлакового переплаву та встановлення оптимальних режимів термічної обробки (відпал, гартування та відпуск). Виготовлення інструменту (матриць) зі сталі 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням) для гарячого деформування алюмінієвого сплаву за температури експлуатації нижче критичної точки A_1 .

Методи дослідження. Металографічний аналіз дослідних штампових сталей 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням) та кованої 4X5MФ1С: дослідження структури металу; визначення питомого опору; визначення порогової міцності; визначення твердості та ударної в'язкості.

Одержані результати. Наведено результати досліджень щодо оптимізації режимів термічної обробки (гартування та відпуск) сталі 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням). Скорегований хімічний склад (4X4H5M4Ф2) та оптимізований режим термічної обробки сталі, що дозволили підвищити теплостійкість до температури 650 °С. Встановлено температуру відпуску сталі (475±25 °С) при якій відбувається відпускна крихкість першого роду. Представлено дослідно-промислове випробування сталі 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням), для гарячого деформування алюмінієвого сплаву марки АК7ч, показано, що у дослідній сталі у порівнянні з кованою сталлю Н13 (аналог 4X5MФ1С), яка використовується на одному із китайських підприємств, практично так же стійкість.

Наукова новизна. В процесі часткової перекристалізації (неповний відпал за температури 750±20 °С) сталі 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням) утворюється сфероїдизована карбідна складова, що спричинює на поліпшення механічної обробки заготовки для виготовлення матриць.

Практична цінність. Показана можливість використання сталі з регульованим аустенітним перетворенням при експлуатації марки 4X4H5M4Ф2 (без обробки куванням) для широкого інтервалу температур експлуатації гарячого деформування: мідно-нікелевого (за температури експлуатації вище критичної точки A_3) та алюмінієвого сплаву (за температури експлуатації нижче критичної точки A_1) з підвищеним ресурсом експлуатації у порівнянні з кованою сталлю 4X5MФ1С.

Ключові слова: штампова сталь, склад, термічна обробка, ковка, властивості.

Вступ

Традиційна технологія ливарного виробництва вимагає проведення енергоємних технологічних операцій (термо-деформаційної та хіміко-термічної обробки) штампових сталей. Основний недолік цих литих сталей є низький опір крихкому руйнуванню. Використання технології електрошлакового переплаву зумовлює одержати більш пластичний матеріал зі скороченням таких енергоємних технологічних операцій, що представлено у роботі [1]. Використання технології електрошлакового переплаву, дає можливість як скоротити технологічну операцію (ковку) сталей (4X3H5M3Ф та 4X4H5M4Ф2) з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації, оскільки при високій швидкості кристалізації розплаву не сприяє утворенню карбідної евтектики грубої форми [2], так і підвищити ресурс експлуатації для гарячого деформування міді [1] та мідно-нікелевого сплаву [3, 4] у порівнянні з штампових сталей (3X3M3Ф та 4X5MФ1С), одержаних за традиційною ливарною технологією та проведенням термо-деформаційної

обробки. Для підвищення теплостійкості дослідженої сталі [5], одержаної електрошлаковим переплавом, було прийняте рішення скоригувати її хімічний склад (4X4H5M4Ф2) та оптимізувати термічну обробку з підвищенням механічних властивостей [6-8]. Метою роботи є встановлення можливості збільшення інтервалу експлуатаційних температур дослідної сталі у область температур нижче критичної точки A_1 (α -Fe область) для гарячого деформування алюмінієвого сплаву.

Методи дослідження

Хімічний склад досліджуваної сталі визначали за допомогою стаціонарного спектрометра SPECTROMAXx LMX07. Встановлено хімічний склад зразка отриманої сталі (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 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 – 0,013 % Co; 0,018 – 0,020 % Nb; 0,065 – 0,067 % Cu; 0,002 – 0,003 % Ca. Досліджували мікрошліфи сталі

травлення травником: 10 %- ний розчин азотної кислоти в етиловому спирті з добавкою пікринової кислоти за ГОСТ 10243–75. Випробування на твердість проводили на твердомірі HR-150A. Ударну в'язкість визначали на випробувальній машині NI300 на зразках розмірами 10x10x55 мм без надрізу. Пороги міцності визначали за стандартною методикою випробування на розтяг за ГОСТ 1497–84 на універсальній установці GNT50. Питомий опір сталі 4X4H5M4Ф2 вимірювали за допомогою двоканального цифрового електричного вимірювального чотирьохзондового тестера ST2263. На приладі питомий опір проводили на поверхні зразка та визначали як одиниця виміру – Ом·мм²/м. Висота зразка становила 2,5 мм. Відстань між електродами при вимірюванні становила приблизно 5 мм.

Виплаву дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co., Ltd (місто Дан'ян, провінція Цзянсу, КНР). Одержували зливки масою по 300 кг, розмірами Ø 180–220 мм, довжиною 1100 мм. Загальна маса злиwkів з одної плавки становила 3 тони.

Викладення основного матеріалу

Температура відпалу зливка (одержаного електрошлаковим переплавом) становила 750±20 °С [6].

Для одержання кінцевої структури сталі з високими експлуатаційними властивостями необхідно оптимізувати режими термічної обробки при проміжних операціях. Встановлено, що ударна в'язкість досліджуваної литої сталі 4X4H5M4Ф2 мала найбільшу величину за температури гартування 1090±10 °С, при чому при збільшенні температури відпуску від 580 до 620 °С ударна в'язкість збільшувалась по лінійному закону від 29 до 31 Дж/см² (залежність 5, рис. 1). При цьому було встановлено, що охолодження на повітрі після відпуску збільшує ударну в'язкість (залежності 4, 5, рис. 1), тоді як охолодження у печі призводить до зниження ударної в'язкості (залежності 1, 2, 3, рис. 1) при чому рівень цього зниження збільшується з ростом температури гартування.

Описане дослідження ударної в'язкості проводили у досить вузькому інтервалі температур відпуску 580–620 °С (рис. 1). При цих температурах традиційно проводять відпуск штампових сталей. Для встановлення максимальних значень ударної в'язкості, інтервал температур відпуску був суттєво розширений (530–660 °С). Встановлено, що зі зміною температури відпуску твердість сталі при охолодженні у печі на декілька одиниць вища за таку, що одержана при охолодженні на повітрі. Виявили, що найкращим режимом гартування є температура 1100±10 °С, тому, що при охолодженні на повітрі, досягається більша ударна в'язкість. Дослідження відповідних структур сталі показало, що при охолодженні на повітрі після відпуску на границях зерен виділяється менша кількість карбідної складової ніж у випадку охолодження зразків з піччю, що призводить до збільшення ударної

в'язкості (більше ніж у 2 рази). Менша кількість виділених карбідів не дозволяє їм сформуватися у суцільну сітку, яка обмежує зерна сталі, тоді як при охолодженні у печі така сітка частково спостерігається.

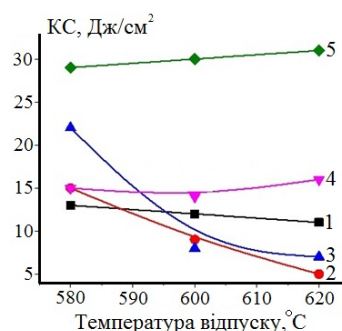


Рис. 1. Залежність ударної в'язкості сталі 4X4H5M4Ф2 від температури відпуску для різних режимів гартування:

- 1, 2, 3 – охолодження у печі, 4, 5 – охолодження на повітрі). Температура гартування (1 – 1080±10 °С, 2 – 1090±10 °С, 3 – 1100±10 °С, 4 – 1080±10 °С, 5 – 1090±10 °С

Таким чином, було встановлено, що найкращим режимом охолодження після відпуску є охолодження на повітрі, а не в печі. Встановлено, що основний режим гартування сталі за температур 1095–1105 °С, який відповідає підвищеним значенням теплостійкості при відпуску. Використання температури гартування у 1100±10 °С, дозволило підвищити теплостійкість литої сталі 4X4H5M4Ф2 до температури 650 °С (твердість 40 HRC за кімнатної температури), тоді як раніше для сталі 4X3H5M3Ф теплостійкість становила 620 °С (твердість 39,5 HRC) [1, 5, 9].

В роботі було встановлено відпускну крихкість першого роду сталі 4X4H5M4Ф2 за температур відпуску 450–500 °С [10]. Також були проведені дослідження по зміні питомої провідності в залежності від температури відпуску (рис. 2). У певному температурному інтервалі спостерігається кореляція між залежностями ударної в'язкості та питомої провідності. Так за температури відпуску 465–490 °С спостерігали інтенсивне збільшення та максимум величини питомої провідності (480±5 °С) та зниження до мінімуму величини ударної в'язкості до 15 Дж/см². При відпуску вище температури 500 °С, відбувається зростання ударної в'язкості та починається зниження твердості сталі, а за температури вище 650±1 °С відбувається різке падіння теплостійкості (нижче 40 HRC).

Для виготовлення інструменту зі сталі 4X4H5M4Ф2 проводили механічну обробку заготовок у компанії «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чженцзян, КНР), рис. 3. Кінцеву термічну обробку (гартування та відпуск) виготовленого штампового інструменту (матриці) проводили у компанії «Dazhong» (м. Нінхай, провінція Чженцзян, КНР). Матриці з литої сталі 4X4H5M4Ф2 були використані для дослідно-промислового випробування, а саме гарячого деформування алюмінієвого сплаву АК7ч (аналог АЛ9) у

корпорації «New material technology Co., Ltd» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, КНР). Після експлуатації інструменту з нього були вирізані зразки для дослідження структури та властивостей, як для дослідженої литої сталі 4X4H5M4Ф2, так і для кованої сталі марки Н13 (аналог марки 4X5МФ1С), яка використовувалася на підприємстві. Було проведено порівняльне дослідження мікроструктур. Так для сталі Н13, яка використовувалася на підприємстві була прокована, а її поверхневий шар був азотований на глибину до 300 мкм. Структура кованої сталі Н13 з робочої матриці складалася з дрібних зерен (менше 10 мкм), а карбідна складова при такому ж збільшенні не спостерігалася. Встановлено, що сталь 4X4H5M4Ф2 (без технології кування) мала великі розміри зерен по межах яких була розташована карбідна складова (товщиною близько 20 мкм). Структура сталі 4X4H5M4Ф2, одержаної з використанням електрошлакового переплаву, після експлуатації складалася з крупних зерен (більше 100 мкм) по межах яких спостерігалася виділена карбідна складова. Ударна в'язкість кованої сталі Н13, виявилася на порядок вищою (у 20 разів) за литу сталь 4X4H5M4Ф2 (240–280 та 9,5–13,7 Дж/см² відповідно), але її твердість була нижчою приблизно на 3 HRC (табл. 1). Не зважаючи на такі механічні властивості штамповий інструмент з литої сталі 4X4H5M4Ф2, за обсягом продукції (виготовлені деталі з алюмінієвого сплаву) знаходився на одному рівні з кованою та азотованою сталлю Н13. Це може бути пов'язане з тим, що сталь у литому стані після оптимального режиму термічної обробки (з урахуванням вищої температури гартування) має більший опір зносу, а ніж деформована (кована), що підтверджує одержані раніше результати [11, 12].

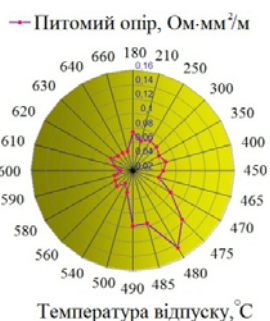


Рис. 2. Діаграма залежності питомого опору (за кімнатної температури) сталі 4X4H5M4Ф2 після гартування за температури 1100±5 °С від температури відпуску



Рис. 3. Інструмент (матриць) зі сталі 4X4H5M4Ф2 (без технології кування) для гарячого деформування алюмінієвого сплаву марки АК7

Таблиця 1 – Механічні властивості (за кімнатної температури) сталей після гарячого деформування алюмінієвого сплаву марки АК7ч

Зразки	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість, HRC
Сталь Н13 (аналог 4X5МФ1С), кована та азотована	240–280	42–45
Сталь 4X4H5M4Ф2 (лита)	9,5–13,7	42–48

Матриці з литої сталі 4X4H5M4Ф2 відпресували більше 6000 кг на рівні кованої сталі Н13. Необхідно зауважити, що досліджена сталь 4X4H5M4Ф2 (без технології кування) мала структуру литого стану і її поверхня не була азотована, на протигагу кованих та азотованих сталей Н13.

Висновок

В роботі показана можливість використання штампової сталі 4X4H5M4Ф2 (без технології кування) для гарячого деформування кольорових металів та сплавів у широкому інтервалі температур (нижче критичної точки А₁ дослідженої сталі).

Перелік посилань

1. Сидорчук О.М. Технологічні основи виготовлення інструменту з штампової сталі 4X3H5M3Ф / Сидорчук О.М. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2021. – № 2. – С. 17–20.
2. Литая сталь з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації, одержана електрошлаковим переплавом / Сидорчук О. М., Мамонова А. А., Лук'яничук В. В. та ін. // Успіхи матеріалознавства – 2020. – № 1 (01). – С. 77–5.
3. Сидорчук О. М. Одержання трубних заготовок з мідно-нікелевого сплаву МНЖ 5-1 при використанні інструменту з штампової сталі регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації / Сидорчук О. М. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2021. – № 1. – С. 24–28.
4. Сидорчук О. М. Властивості штампової сталі 4X4H5M4Ф2 для гарячого деформування кольорових металів та сплавів / Сидорчук О. М. // Науковий Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2021. – № 1 (154). – С. 108–112.
5. Пат. № 94746 Україна UA, МПК C21 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 ; заяв. 23.06.2014 ; опубл. 25.11.2014, Бюл. № 22/2014.
6. Пат. № 141447 Україна UA, МПК C22C 38/00. 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; заяв. 05.09.2019; опубл. 10.04.2020, Бюл. № 7/2020.

7. Підвищення теплостійкості та властивостей штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації / Сидорчук О. М., Миронюк Д. В., Радченко О. К., Гогаєв К. О., Є. Хонггуанг // Металознавство та обробка металів. – № 2. – 2019. – С. 19–25.

8. Сидорчук О. М. Вплив термічної обробки на штампову сталь 4X4H5M4Φ2 та встановлення її фізико-механічних властивостей / Сидорчук О. М. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Нові рішення в сучасних технологіях». – № 1 (7). – 2021. – С. 34–38.

9. Лита сталь 4X4H5M4Φ2 для прес-форм гарячого пресування міді М1 та алюмінієвого сплаву АК7ч / Сидорчук О. М. // Успіхи матеріалознавства – 2021. – № 2 (02). – С. 54–62.

10. Рентгенівський аналіз особливостей формування кристалічної структури основних фаз та властивостей сталі 4X4H5M4Φ2 у разі відпуску / Биков О. І., Сидорчук О. М., Миронюк Л. А. та ін. // Металлофізика та новітні технології. – 2021. – № 11 (43). – С. 1523–1536.

11. Позняк Л. А. К вопросу о теплостойкости штамповых сталей для горячего деформирования / Позняк Л. А., Ульшин В. И. // Разработка, производство и применение инструментальных материалов, Киев, ИПМ АН УССР, 1987. – С. 55–57.

12. Гогаєв К. А. Порошковая металлургия инструментальных сталей / Гогаєв К. А., Ульшин В. И. // Донецк : Ноулиндж. – 2012. – 367 с.

Одержано 18.07.2022
Після доробки 29.07.2022

DIE STEEL 4X4H5M4Φ2 (WITHOUT FORGING TREATMENT) FOR HOT DEFORMATION OF ALUMINUM ALLOY

Sydorchuk O.

PhD, Institute of Problems of Materials Science named after I. M. Frantsevich National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev), e-mail: sedorleg@ukr.net

Purpose. Production of steel with controlled austenitic transformation during operation of the 4X4H5M4Φ2 grade (without forging treatment) using the technology of electroslag remelting and establishing optimal modes of heat treatment (annealing, quenching and tempering). Production of tools (matrices) from 4X4H5M4Φ2 steel (without forging treatment) for hot deformation of aluminum alloy at operating temperatures below the critical point A_1 .

Research methods. Metallographic analysis of experimental die steels 4X4H5M4Φ2 (without forging treatment) and forged 4X5MΦ1C: study of metal structure; determination of specific resistance; determination of tensile strength; determination of hardness and impact strength.

Results. The results of research on the optimization of heat treatment modes (quenching and tempering) of 4X4H5M4Φ2 steel (without forging treatment) are given. Adjusted chemical composition (4X4H5M4Φ2) and optimized mode of heat treatment of steel, which allowed to increase heat resistance up to a temperature of 650 °C. The tempering temperature of steel (475±25 °C) at which irreversible temper brittleness occurs is established. Experimental and industrial tests of steel 4X4H5M4Φ2 (without forging treatment) for hot deformation of AK7ч aluminum alloy are presented. It is shown that compared to forged steel H13 (an analogue of 4X5MΦ1C), which is used at one of the Chinese enterprises, the experimental steel has practically the same resistance.

Scientific novelty. In the process of partial recrystallization (incomplete annealing at a temperature of 750±20 °C) of 4X4H5M4Φ2 steel (without forging treatment), a spheroidized carbide component is formed, which leads to an improvement in the mechanical processing of the workpiece for the manufacture of matrices.

Practical value. The possibility of using steel with an adjustable austenitic transformation during operation of the 4X4H5M4Φ2 grade (without forging treatment) is shown for a wide range of operating temperatures of hot deformation: copper-nickel (at an operating temperature above the critical point A_3) and aluminum alloy (at an operating temperature below the critical point A_1) with increased service life compared to forged steel 4X5MΦ1C.

Key words: die steel, composition, heat treatment, forging, properties.