

Сталь з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації

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

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ
Центр досліджень і технологій ІПМ Нінбо, Китайська Народна Республіка,
Нінхай

Проміжний клас сталей, які при кімнатній температурі відносяться до феритного стану, а при температурі експлуатаційній переходять в аустенітну область, називають сталями з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації. Показана можливість підвищення ресурсу експлуатації таких проміжних сталей за високих температур (вище критичної точки A_3). Вперше було досліджено литу структуру та фазово-структурний стан сталі (марка 4X3H5M3Ф), одержаної електрошлаковим переплавом. Запропоновано покращений склад сталі (4X4H5M3Ф) для виготовлення штампного інструменту для гарячого пресування міді, мідних та алюмінієвих сплавів. При встановленні критичних точок (A_1 та A_3) дослідженої сталі, що підтвердилось за результатами високо-температурного рентгено-фазового аналізу оптимізувано режим термічної обробки (відпал) сталі 4X3H5M3Ф та 4X4H5M4Ф2 в литому та кованому стані, що сприяло полегшенню обробки різанням заготовок для виготовлення штампного інструменту. Наведено результати досліджень щодо оптимізації режимів термічної обробки (гартування, відпуск) сталі. Визначені механічні властивості (міцність, ударна в'язкість, теплостійкість) сталі в литому та кованому стані залежно від температури гартування та відпуску. Оцінено відпускну крихкість дослідної сталі. Проведено дослідно-промислове випробування штампного інструменту (матриці-фільтрери, деталі-екструдера) виготовленого з дослідженої сталі. Показана можливість використання штампної сталі з регульованим аустенітним перетворенням для широкого інтервалу температур експлуатації гарячого деформування алюмінієвого сплаву АК7ч (450-500 °С), міді М1 (600-630 °С) та мідно-нікелевого сплаву МНЖ 5-1 (900-950 °С) з підвищеним ресурсом експлуатації у порівнянні зі сталями феритного класу 4X5МФ1С та 3Х3М3Ф.

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

У сучасному виробництві штампного інструменту (прес-форм) для гарячого пресування міді та мідних сплавів використовується сталь феритного класу 4X5МФ1С та 3Х3М3Ф. Проте, такі сталі мають низький ресурс експлуатації. Для їх заміни у штампному інструменті використовують жароміцний сплав. Це дає змогу використовувати потужні установки в яких ресурс експлуатації прес-форм становить близько 100 тон. Один з таких сплавів використовують на підприємствах Китаю (наприклад корпорація

Changzhou riyue machine Co., Ltd, Chine) – це нікель-хромовий жароміцний сплав Inonel Alloy 718 (російський аналог ХН45МВТЮБР, ГОСТ 5632). Патент на цей сплав належить концерну Special Metals Corporation. У сучасному виробництві такий сплав застосовують для деталей газових турбін, елементів та вузлів ракетних та авіаційних двигунів (компресорні лопатки), космічних апаратів, атомних реакторів, у нафтохімічній та газонафтовій промисловості. Проте, жароміцні сплави є надто дорогими при виготовленні інструменту. Альтернативою для виготовлення штампового інструменту для гарячого деформування кольорових металів та сплавів є жароміцні сталі аустенітного класу. Однак, такі сталі мають ряд недоліків, які обмежують їх застосування: понижено теплопровідність та високий коефіцієнт термічного розширення. Їх застосування також обмежене в силу погіршеної оброблюваності різанням та високої вартості легуючих елементів. Такі сталі у порівнянні зі сталлю з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації (РАПЕ), відрізняються тим, що після гартування мають мартенситну структуру, але при роботі штампового інструмента за робочих температур (вище критичної точки A_3) працюють в аустенітній області. Тобто сталі аустенітного класу відрізняються від сталей РАПЕ саме відсутністю поліморфного перетворення. Механізм РАПЕ сталі забезпечується легуванням нікелем, який розчиняється в залізі, забезпечує поліморфне перетворення та розширює температурний інтервал існування γ -Fe модифікації. Це дає змогу при розширенні області γ -Fe модифікації в сталі у вихідному стані і при нагріванні її до температур, за якими відбувається $\alpha \rightarrow \gamma$ перетворення, зберігати аустенітну структуру впродовж усього періоду високотемпературної експлуатації штампового інструмента. Так в роботі [1] було встановлено підвищення ресурсу експлуатації штампового інструмента для гарячого деформування сталі РАПЕ.

Одержання інструменту за традиційною технологією лиття, розробленою О. Д. Озерським є енергоємним (повний відпал за температури 860 °С, відпуск 680 °С, ковка заготовок за температури вище 1100 °С [1]. Після повного відпалу сталь досить високої твердості піддається обробці різанням для виготовлення матриць штампового інструменту. В роботах [2-4] було скорочено термо-деформаційну обробку (ковку) сталі РАПЕ (4Х3Н5М3Ф) при використанні технології електрошлакового переплаву (виплавку проводили ПАТ "Рівненський науково-дослідний інститут технології машинобудування, м. Рівне, Україна"). Завдяки високій швидкості кристалізації розплаву, подавляється груба форма карбідної евтектики литої структури [5]. За рахунок наявності мартенситної структури твердість одержаної сталі у литому стані перевищує твердість 50 HRC [6]. Така висока твердість призводить до ускладнень при подальшій її механічній обробці – виготовлення матриць штампового інструменту. Тому, перед механічною обробкою необхідно зменшити твердість сталі та оптимізувати режим термічної обробки (відпал). Для цього необхідно встановити критичні точки A_1 та A_3 , щоб забезпечити оптимальний режим термічної обробки (неповний відпал за температури нагріву сталі між критичними точками). За результатами дослідження [2, 3, 6] встановлено критичні точки: $A_1 = 700$ °С та $A_3 = 850$ °С,

що підтверджувалось методом дилатометричного аналізу на високочутливому катковому оптичному дилатометрі та високотемпературним рентгенофазовим аналізом за допомогою дифрактометра ДРОН-УМ1 в монохроматичному CuK_α -випромінненні. Рекомендований сфероїдизуючий неповний відпал за температури 750 ± 20 °С, як у литому так і в кованому стані, забезпечував сорбіто-перлітну структуру та сферичну карбідну складову при твердості близько 30 HRC [2, 3, 7-10]. Запропонований режим термічної обробки сталі РАПЕ 4Х4Н5М4Ф2 (гартування 1020 ± 10 °С та відпуск $550-560$ °С) дозволив експлуатувати штамповий інструмент (матриці) в γ -Fe області (за температур вище 850 °С) [7, 10]. Однак, за таким режимом термічної обробки (гартування 1020 ± 10 °С) сталь 4Х3Н5М3Ф мала теплостійкість 40 HRC при 620 °С [7]. Для підвищення теплостійкості була спроба змінити хімічний склад дослідженої сталі РАПЕ. При виплавці дослідженої сталі з РАПЕ 4Х3Н5М3Ф був змінений її хімічний склад: збільшено на 0,1 % вміст вуглецю та 1 % – хрому, а вміст нікелю був зменшений на 1 %, що відповідало сталі 5Х4Н4М3Ф2. Було проведено гартування цієї сталі за різних температур, що дозволило визначити оптимальні режими термічної обробки: гартування – 1050 ± 10 °С та відпуск – 560 °С. Цьому режиму термічної обробки відповідала твердість 45 HRC. Визначено, що теплостійкість сталі при відпуску за температури 620 °С становить 42 HRC. Підвищення температури (вище 630 °С) експлуатації зі сталі РАПЕ відбувається при збільшенні каліброваного отвору штампового інструменту, що призводить до зменшення ресурсу його експлуатації (випробування проводили на підприємстві ТОВ "СпецЛитьє, м. Дніпро, Україна та компанії Changzhou riye machine Co., Ltd, China"). Спостерігався дефект в макроструктурі сталі, а саме вклинення міді у сталевий виріб та утворення мікротріщини. Процес такого розміцнення сталі супроводжується коагуляцією карбідної складової. В роботі [11, 12] було запропоновано покращений склад сталі РАПЕ (4Х4Н5М4Ф2) з урахуванням підвищення температури гартування 1095 ± 5 °С (не перевищуючи температуру 1100 °С, оскільки відбувається процес первинної рекристалізації) та оптимізовано режимом відпуску. Було підвищено теплостійкість (40 HRC при 650 °С) дослідженої сталі РАПЕ та встановлено, що поріг плинності та ударна в'язкість запропонованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 (одержаної без деформації-кування) значно перевищують значення для сталі 3Х3М3Ф (сортовий прокат) [11]. Таким чином, при використанні сталі 4Х4Н5М4Ф2 для штампового інструменту гарячого пресування міді вдалось підвищити температури його експлуатації до 650 °С. Це дає можливість розширити сортамент штампового інструменту (збільшити розміри каліброваного отвору матриці). Для виготовлення великогабаритних деталей типу коліс екструдерів (наприклад: масою 47 кг та 59 кг, розмірами $\varnothing 400$ мм, товщиною 90 мм та 120 мм, відповідно) зі сталі РАПЕ 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування міді, необхідно використовувати технологічну операцію кування за температури 1170 ± 20 °С [9]. Виплавку дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co., Ltd (місто Дан'ян, провінція Цзянсу,

Технічна інформація

Китайська Народна Республіка). Одержано зливки масою по 300 кг, розмірами: $\varnothing 180 - 220$ мм, довжиною 1100 мм. Зливки дослідної сталі були піддані термічній обробці (відпалу) за температури 750 ± 20 °С. При встановленні оптимальних режимів (гартування та відпуск за температур 1095 ± 5 °С та 600 ± 5 °С, відповідно) кованої сталі 4X4H5M4Ф2 дає можливість значно підвищити ударну в'язкість порівняно з литим станом при зниженні теплостійкості (40 HRC при 630 °С) порівняно з литою сталлю 4X4H5M4Ф2 [8, 9].

Термічну обробку (гартування) сталі 4X3H5M3Ф, а також дослідно-промислове випробування здійснювали на ВАТ "Артемівський завод кольорових металів та сплавів" (м. Артемівськ, Україна). Порівняльні дослідно-промислові випробування сталі РАПЕ 4X3H5M3Ф для гарячого пресування мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1 (аналог С70400, США) за температур нагріву до 950 °С та одержання заготовок діаметра $67 \pm 0,1$ мм та сталі феритного класу 3X3M3Ф (аналог Н10, США), яку використовують на підприємстві, показали, що кращі експлуатаційні властивості має досліджена сталь РАПЕ (4X3H5M3Ф). Її стійкість у порівнянні зі стійкістю зі сталі 3X3M3Ф вища у три рази [7, 10]. Проведене випробування литої сталі 4X4H5M4Ф2 з виготовлених матриць для гарячого деформування (температура експлуатації 450-500 °С) алюмінієвого сплаву АК7ч (корпорації New material technology Co., Ltd, Chine) показало, що ресурс експлуатації відповідають рівню кованої та азотованої сталі 4X5MФ1С (аналог Н13, США) при виготовленні трубних заготовок [8]. Проте, використовувати штамповий інструмент з цієї дослідженої сталі в якості циклічних ударних навантажень не рекомендується, оскільки за температури нагріву 475 ± 15 °С відбувається аномальне зниження ударної в'язкості пов'язане з відпускнуою крихкістю. Випробування деталей екструдера з кованої сталі 4X4H5M4Ф2 показало, що міцність та твердість були вищими ніж у кованої сталі 4X5MФ1С, яка використовувалась на підприємстві [9]. Крім того, після експлуатації (виготовлення 60 тон виробів з міді) інструмент зі сталі 4X5MФ1С мав мікро та макротріщини на бічній та внутрішній частинах колеса екструдера, а у дослідженої сталі 4X4H5M4Ф2 такі дефекти були відсутні.

Показана можливість використання штампової сталі з регульованим аустенітним перетворенням для широкого інтервалу температур (вище критичної точки A_3 та нижче A_1) експлуатації гарячого деформування кольорових металів та сплавів з підвищеним ресурсом експлуатації у порівнянні зі сталями феритного класу.

Література

1. 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.
2. Сидорчук О. М. Фазово-структурний стан сталі 40X3H5M3Ф в процесі перекристалізації // *Современные проблемы физического материаловедения*.

Технічна інформація

- Труды института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Серия “Физико-химические основы технологии порошковых материалов” Выпуск 22. – Киев. – 2013. – С. 186-188.
3. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Мамонова А. А. Штампова сталь для гарячого деформування з регульованим аустенітним перетворенням // *Металознавство та обробка металів*. – 2014. – № 1. – С. 40-44.
 4. Патент № 94746 Україна, МПК С21 / D8 / 00. Спосіб термічної обробки сталі для гарячого пресування / О. М. Сидорчук, О. К. Радченко, В. В. Лук'яничук, К. О. Гогаєв. – № u201407076; заявл. 23.06.2014; опубл. 25.11.2014. – Бюл. № 22 / 2014, 4 с.
 5. Сидорчук О.М., Мамонова А.А., Лук'яничук В.В., Гогаєв К.О., Радченко О.К., Миронюк Л.А., Коновал В.П., Шведова Г.Л., Миронюк Д.В. Лита сталь з регульованим аустенітним перетворенням під час експлуатації, одержана електрошлаковим переплавом. *Успіхи матеріалознавства*. Київ: Інститут проблем матеріалознавства НАН України. 2020. № 1. С. 71-80.
 6. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Карпець М. В., Пятачук С. Г. Структура та властивості загартованої сталі 40ХЗН5М3Ф, одержаної електрошлаковим перетопленням за високих температур // *Металофізика та новітні технології*. – 2015. – Т. 37, № 12. – С. 1653-1661. <https://doi.org/10.15407/mfint.37.12.1653/>
 7. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Лук'яничук В. В. Технологія виготовлення штампової сталі 40ХЗН5М3Ф 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.
 8. Сидорчук О.М., Гогаєв К.О., Радченко О.К., Миронюк Л.А., Миронюк Д.В. Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості // *Металознавство та обробка металів*. – 2020. – № 2. – С. 29-37. <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.029>.
 9. Сидорчук О.М., Миронюк Л.А., Миронюк Д.В., Гогаєв К.О., Радченко О.К. Штампова кована сталь 4Х4Н5М4Ф2 підвищеної стійкості // *Металознавство та обробка металів*. – 2020. – № 4. – С. 3-11. <https://doi.org/10.15407/mom2020.04.030>.
 10. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Лук'яничук В. В., Орел Г. Г. Дослідження режимів термічної обробки штампової сталі 4ХЗН5М3Ф // *Современные проблемы физического материаловедения*. Труды института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Серия “Физико-химические основы технологии порошковых материалов” Выпуск 25. – Киев. – 2016. – С. 105-108.
 11. Сидорчук О. М., Миронюк Д. В., Радченко О. К., Гогаєв К. О., Хонггуанг 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>.

12. Гогаєв К.О., Радченко О.К., Сидорчук О.М., Миронюк Д.В. Штампова сталь: пат. 141447 Україна, МПК C22C 38 / 00. / – № u2019 09670; заявл. 05.09.2019; опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7.2020. 2 с.

References

1. Hohaiev K. O., Sydorчук O. M., Radchenko O. K. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2016, No. 3, pp. 18-24 [in Ukrainian].
2. Sydorчук O. M., *Suchasni problem fizychnoho materialoznavstva. Pratsi instytutu problem materialoznavstva im. I. M. Frantsevycha NAN Ukrainy. Seriya "Fizyko-himichni osnovy tehnolohii poroshkovykh materialiv"* Kyiv, 2013, Vol 22, pp. 186-188 [in Ukrainian].
3. Hohaiev K. O., Sydorчук O. M., Radchenko O. K., Mamonova A. A., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2014, No. 1, pp. 40-44 [in Ukrainian].
4. Patent No. 94746 Ukraine. МПК C21 / D8 / 00. *Sposib termichnoyi obrobky stali dlya haryachoho presuvannya* [Method for heat treatment of hot pressing steel], Hohaiev, K. O., Sydorчук, O. M., Radchenko, O. K., Lukianchuk, V. V., No. u201407076; zaiavl. 23.06.2014; opubl. 25.11.2014, Biul. No.22/2014, 4 p. [in Ukrainian].
5. Sydorчук O.M., Mamonova A.A., Lukianchuk V. V., Hohaiev K. O., Radchenko O. K., Myroniuk L.A., Konoval V.P., Shvedova H.L., Myroniuk D.V. *Uspikhy materialoznavstva. Instytutu problem materialoznavstva im. I. M. Frantsevycha NAN Ukrainy*, 2020, № 1, pp. 71-80 [in Ukrainian].
6. Hohaiev K. O., Sydorчук O. M., Radchenko O. K., Karpets M. V., Piatachu S. H., *Metalofizyka ta novitni materialy*, 2015, Vol. 37, No. 12, pp 1653-1661 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mfint.37.12.1653>
7. Hohaiev K.O., Radchenko O.K., Sydorчук O.M., Lukianchuk V.V. *Tekhnolohiia vyhotovlennia shtampovoi stali 40KH3N5M3F dlia hariachoho deformuvannia, Tsilova kompleksna prohrama NAN Ukrainy «Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruksii, sporud ta mashyn» Instytut elektrozvariuvannia im. Ye. O. Patona NAN Ukrainy (Target complex program of NAS of Ukraine "Problems of the resource and safety of the exploitation of structures, construction and machines" Ye. O. Paton Institute of electric welding NAS of Ukraine)*, 2015, pp. 669-672 [in Ukrainian].
8. Sydorчук O.M., Hohaiev K.O., Radchenko O.K., Myroniuk L.A., Myroniuk D.V. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2020, No. 2, pp. 29-37 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2020.02.029>.
9. Sydorчук O.M., Myroniuk L.A., Myroniuk D.V., Hohaiev K.O., Radchenko O.K., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2020, No. 4, pp. 3-11 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2020.04.030>.
10. Hohaiev K.O., Sydorчук O.M., Radchenko O.K., Lukianchuk V.V., Orel H.H. *Pratsi instytutu problem materialoznavstva im. I. M. Frantsevycha NAN Ukrainy. Seriya "Fizyko-himichni osnovy tehnolohii poroshkovykh materialiv"*, 2016, Vol. 25, pp. 105-108 [in Ukrainian].

11. Sydorчук O.M., Myroniuk D.V., Radchenko O.K., Hohaiev K.O. Hongguang Ye, *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2019, No.2, pp. 19-25 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/mom2019.02.019>.
12. Patent No. 141447 Ukraine. MPK C22C 38 / 00. *Shampova stal* [Stamped steel] Hohaiev, K. O., Radchenko, O. K., Sydorчук, O. M, Myroniuk, D.V., No. u2019 09670; zaiavl. 05.09.2019; opubl. 10.04.2020, Biul. No.7/2020, 2 p. [in Ukrainian].

Одержано 08.12.20

O. M. Sydorчук

Steel with control austenitic transformation during operation

Summary

The intermediate class of steels, which at room temperature belong to the ferritic state, and at operating temperature pass into the austenitic region, are called steels with control of austenitic transformation during operation. The possibility of increasing the service life of such intermediate steels at high temperatures (above the critical point A_3) is shown. For the first time, the cast structure and phase-structural state of steel (grade 4Kh3N5M3F) obtained by electroslag remelting were studied. An improved composition of steel (4Kh4N5M3F) for the production of stamping tools for hot pressing of copper, copper and aluminum alloys is proposed. When setting the critical points (A_1 and A_3) of the investigated steel, which was confirmed by the results of high-temperature X-ray phase analysis, it was possible to optimize the heat treatment (annealing) of steel 4Kh3N5M3F and 4Kh4N5M4F2 in cast and forged condition, which facilitated processing tool. The results of researches on optimization of modes of heat treatment (hardening, tempering) of steel are given. The mechanical properties (strength, toughness, heat resistance) of steel in cast and forged state depending on the tempering and tempering temperature are determined. The tempering brittleness of the experimental steel is determined. An experimental-industrial test of a stamping tool (die dies, extruder parts) made of the investigated steel was carried out. The possibility of using stamped steel with adjustable austenitic transformation for a wide range of operating temperatures of hot deformation of aluminum alloy AK7h (450-500 °C), copper M1 (600-630 °C) and copper-nickel alloy MNZh 5-1 (900-950 °C) with increased service life in comparison with steels of ferrite class 4Kh5MF1S and 3Kh3M3F.

Keywords: die steel, composition, thermal treatment, structure, mechanical properties.