https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-108-112

УДК 669.14.018.258

О. М. Сидорчук[1]

ВЛАСТИВОСТІ ШТАМПОВОЇ СТАЛІ 4Х4Н5М4Ф2 ДЛЯ ГАРЯЧОГО ДЕФОРМУВАННЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

[1]Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

Наведено результати досліджень механічних властивостей литої та кованої сталі з регулюванням аустенітного перетворення під час експлуатації після термічного зміцнення. Враховуючи оптимальні режими термічної обробки (гартування 1100 ±5 °С та відпуск) досліджуваної сталі, визначено параметри фізико-механічних властивостей: твердість, межу міцності, межу плинності, ударну в'язкість, питому електричну провідність та мікротвердість у структурі металу. Запропонований покращений склад сталі (4Х4Н5М3Ф2) з підвищенням температури гартування на 60 °С дозволив збільшити теплостійкість на 35 °С у порівнянні зі сталлю марки 4Х3Н5М3Ф з регулюванням аустенітного перетворення під час експлуатації (без деформації — кування). Встановлено відпускну крихкість досліджуваної сталі (4Х4Н5М4Ф2) за температури відпуску 475 ±15 °С (першого роду) та вище 650 °С (другого роду). Підвищення крихкості досліджуваної сталі в інтервалі температур 460…490 °С спричиняє зменшення ударну в'язкість, змінює структурно-чутливу величину (підвищує питому електричну провідність), підвищує твердість відпущеного мартенситу, підвищує поріг міцності та межу плинності. В роботі показана можливість використання досліджуваної сталі для інтервалу температур експлуатації гарячого деформування міді (550…650 °С), мідно-нікелевого (900…950 °С) та алюмінієвого сплаву (450…500 °С) з підвищеним ресурсом експлуатації у порівнянні зі сталями феритного класу 4Х5МФ1С та 3Х3М3Ф сортового прокату. Дослідно-промислові випробування штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення під час експлуатації (4Х3Н5М3Ф та 4Х4Н5М4Ф2) проводились на українських та китайських підприємствах: завод «Спецлитьё» (м. Дніпро, Україна); ВАТ «Артемівський завод по обробці кольорових металів» (Донецька обл., м. Бахмут, Україна); компанія «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, КНР); корпорація «New material technology Co., Ltd» (м. Куньшань, КНР). Зливки з досліджуваних сталей одержували за технологією електрошлакового переплаву: ПАТ «Рівненський науково-дослідний інститут технології машинобудування», (м. Рівне, Україна); корпорація "Tiangong International Co., Ltd" (м. Дан'ян, КНР).

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

Вступ

Відомо, що жароміцні сталі аустенітного класу для виготовлення штампового інструменту (прес-форм, матриць-фільєр, деталей-екструдерів тощо) мають низку недоліків, які обмежують їх застосування: високий коефіцієнт термічного розширення, понижену теплопровідність, погіршення обробкою різанням та високою вартістю легуючих елементів. Тому для виготовлення штампового інструменту використовують сталі феритного класу (наприклад 4Х5МФ1С, 3Х3М3Ф тощо), проте, за робочих екстремальних температур при експлуатації вище 850 °С вони виходять з ладу. Звідси виникає потреба вибору хімічного складу сталі, яка повинна працювати в процесі аустенізації (γ-Fe перетворенні у твердому розчині). Тобто штампова сталь має структуру відпущеного мартенситу, але при нагріванні штампу в процесі експлуатації повинен забезпечитись аустенітний стан сталі за її тривалої роботи. Таким вимогам відповідають сталі з регулюванням аустенітного перетворення під час експлуатації (РАПЕ) [1]—[5]. Виготовлення штампових сталей з вихідною феритною основою для роботи в аустенітному стані визначається положенням температур від α-Fe до γ-Fe перетворення, оскільки розігрів інструмента у процесі експлуатації повинен забезпечити проходження такого перетворення в подальшій тривалій роботі сталі в аустенітному стані. Актуальність роботи полягає в тому, що штампова сталь матиме можливість працювати за робочих температур (нижче критичної точки A_1 та вище критичної A_3) під

© О. М. Сидорчук, 2021

час експлуатації (гарячого деформування кольорових металів та сплавів).

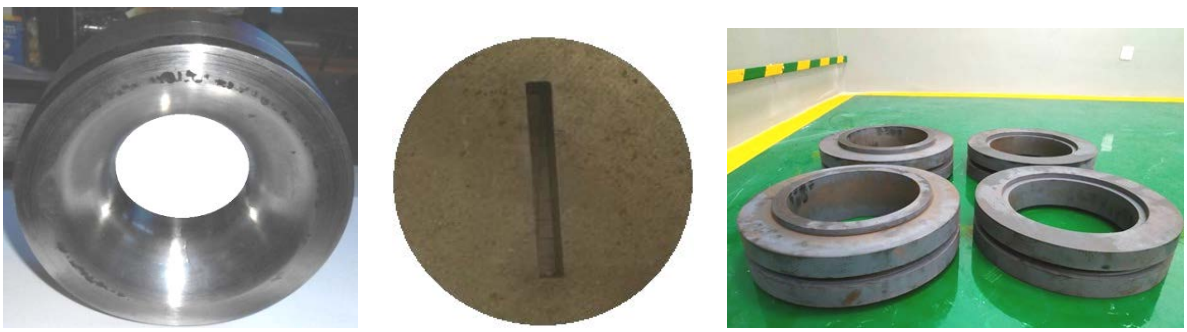
Основна частина дослідження

Для підвищення механічних властивостей досліджуваних сталей використовували технологію електрошлакового переплаву. Зливки з досліджуваних сталей одержували на підприємстві ПАТ «Рівненський науково-дослідний інститут технології машинобудування», (м. Рівне, Україна) та корпорації «Tiangong International Co., Ltd» (м. Дан'ян, провінція Цзянсу, Китайська Народна Республіка). Хімічний склад сталей РАПЕ: марка 4Х3Н5М3Ф — 0,40…0,44 % C; 2,80…3,00 % Cr; 4,70…5,50 % Ni; 2,44…2,60 % Mo; 1,34…1,36 % V; 0,34…0,35 % Si; 0,25…0,28 % Mn; марка 4Х4Н5М4Ф2 — 0,40…0,42 % C; 3,80…3,90 % Cr; 5,00…5,10 % Ni; 3,70…3,80 % Mo; 1,70…1,80 % V; 0,072…0,075 % Si; 0,23…0,24 % Mn. Виготовлення шліфів для металографічних досліджень здійснювали за допомогою приладів: Dincer XQ-2B, Dincer MP-2 та Dincer P-2. Мікроструктуру сталі досліджували після оброблення шліфів 4 % або 10 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті з добавкою пікринової кислоти за ГОСТ 10243-75. Випробування на твердість проводили на твердомірі HR150A. Межі міцності та плинності 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 на зразках типу I за ГОСТ 9454-78. Питомий електричний опір вимірювали на поверхні зразка (висота зразка становила 2,5 мм, відстань між електродами вимірювання — 5 мм) за допомогою двоканального цифрового електричного вимірювального чотиризондового тестера ST2263. 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). Дослідження проводили в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України (м. Київ, Україна) та у Центрі досліджень і технологій ІПМ Нінбо (м. Нінхай, провінція Чжецзян, Китайська Народна Республіка).

Зливки досліджуваних сталей піддавалися термічній обробці (неповний відпал) за температури 750 ±20 °С на підприємстві ПАТ «Рівненський науково-дослідний інститут технології машинобудування», (м. Рівне, Україна) та компанії «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян, Китайська Народна Республіка). Для виготовлення великогабаритних деталей типу коліс екструдерів (масою 47 кг та 59 кг), розмірами (діаметр 400 мм, товщиною 90 мм та 120 мм, відповідно) проводили технологічну операцію кування за температури 1170 ±20 °С під керівництвом компанії «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян Китайська Народна Республіка).

Раніше сталь 4Х3Н5М3Ф була використана для виготовлення матриць-фільєр для гарячого пресування мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ5-1, ГОСТ 492-2006 (аналог С70400, США) (рис. 1а).

Температура експлуатації робочих температур становила 900…950 °С. Дослідно-промислові випробування цієї сталі показали підвищення ресурсу експлуатації у три рази порівняно зі сталлю 3Х3М3Ф, ГОСТ5950-2000 (аналог Н10, США) [5]. На підприємстві «Спецлитьё» (м. Дніпро, Україна) проводилось дослідно-промислове випробування матриць-фільєр (рис. 1б) для виготовлення шин з металу міді марки М1, ГОСТ 859–2014. Температура експлуатації робочих температур встановлювалась вищою 600 °С. Проте, як показали дослідження, збільшення робочого розміру (більше 60 мм) в матриці в процесі штампування шин з міді, інструмент виходив з ладу.



а *б* *в*

Рис. 1. Штамповий інструмент для гарячого деформування: *а* — мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1 у ВАТ «Артемівський завод по обробці кольорових металів» (Донецька обл., м. Бахмут, Україна); *б* — міді марки М1 на підприємстві «Спецлитьё» (м. Дніпро, Україна); *в* — міді марки М1, компанія «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян, Китайська Народна Республіка)

г *д*

Продовження рис. 1. Штамповий інструмент для гарячого деформування: *г, д* – алюмінієвого сплаву марки АК7ч в корпорації «New material technology Co., Ltd» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, Китайська Народна Республіка)

Встановлено, що теплостійкість сталі 4Х3Н5М3Ф відповідала 615 ºС за 40 HRC. Таким чином, в роботі [6]—[9] змінено хімічний склад сталі (4Х4Н5М4Ф2) та встановлено оптимізований режим гартування (1100 ±5 ºС). Нагрівання сталі вище температури 1110 ºС є неприйнятним, оскільки відбувається процес первинної рекристалізації. У разі відпуску за температури 650 ºС досліджуваної сталі твердість становила 40 HRC (рис. 2) що вище на 35 ºС порівняно зі сталлю 4Х3Н5М3Ф [7]. Л. О. Позняк [2] визначив межу теплостійкості штампових сталей до 40 HRC (за кімнатної температури) та встановив негативне явище у штампових сталях — коагуляція карбідної складової на знеміцнення під час експлуатації при підвищених температурах. Таким чином, у разі розігріву штампового інструменту (вище 650 ºС) досліджувана сталь, буде знеміцнюватись, що і характеризується як відпускна крихкість другого роду. Таким чином, сталь 4Х4Н5М4Ф2 можна рекомендувати для гарячого деформування металу міді за температури експлуатації, що не перевищує 650 ºС. Під керівництвом компанії «Futec Co., Ltd» (м. Нінхай, провінція Чжецзян Китайська Народна Республіка) проведено термо-деформаційну обробку (ковку) досліджуваної сталі 4Х4Н5М4Ф2 з виготовленням деталей коліс екструдера (рис. 1в) для гарячого деформування металу міді марки М1, ГОСТ 859–2014. Оптимізований режим термічної обробки (гартування 1100 ±5 ºС та відпуск 590 ±5 ºС) досліджуваної кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 забезпечує підвищений комплекс механічних властивостей (табл.). Як показали дослідження [9], характеристики службових властивостей досліджуваної сталі, вищі у порівнянні зі сталлю 4Х5МФ1С, ГОСТ 5950-2000 (аналог Н13, США).

Механічні властивості (за кімнатної температури) кованої сталі 4Х4Н5М4Ф2 після термічного зміцнення (гартування 1100 ±5 ºС та відпуск 590 ±5 ºС)

Поріг міцності ($\sigma_в$), МПа	Поріг плинності ($\sigma_{0,2}$), МПа	Твердість, HRC	Ударна в'язкість (КС), Дж/см^2
1690...1710	1530...1550	48...49	100...150

Нагрів штампової сталі (нижче критичної точки A_1 на основі системи «Fe–C») при відпуску може призвести до відпускної крихкості першого роду за певним температурним інтервалом в залежності від хімічного складу [10]. В роботі встановлено, що температурний інтервал відпускної крихкості досліджуваної сталі 4Х4Н5М4Ф2 складає 475 ±15 °С (рис. 2). Найбільш структурно-чутливою механічною характеристикою пов'язаною з відпускною крихкістю першого роду є ударна в'язкість. На одержаній кривій залежності ударної в'язкості від температури відпуску при охолодженні на повітрі спостерігається аномальне зниження її величини за температури 475 ±15 °С (рис. 2). Встановлено, що початком зниження вели-

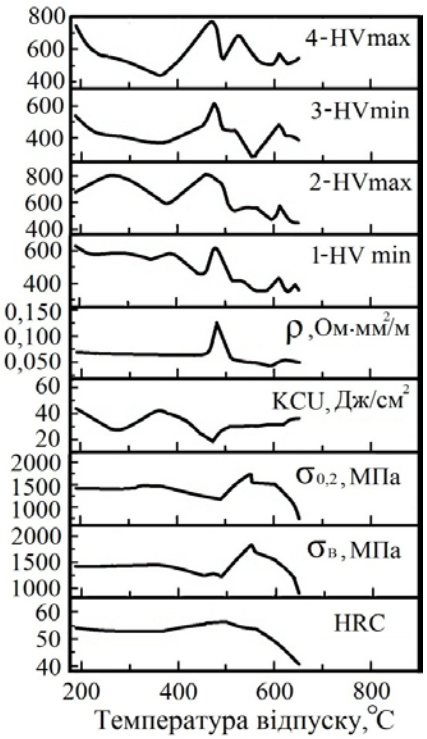


Рис. 2. Залежність параметрів (за кімнатної температури) фізико-механічних властивостей від температури відпуску сталі 4Х4Н5М4Ф2 (мікротвердість: 1 — HVmin світлого поля мінімального значення, 2 — HVmax світлого поля максимального значення, 3 — HVmin темного поля мінімального значення, 4 — HVmax темного поля максимального значення). Температура гартування 1100 ±5 °С

чини ударної в'язкості досліджуваної сталі відбувається за температури 450 °С, а поріг міцності та твердість підвищуються. Інтенсивно зменшується мікротвердість світлого поля до 6,5…8,0 ГПа (475 °С) та темного 6,3…7,8 ГПа (470 °С). За температури відпуску до 475 °С спостерігається інтенсивне збільшення і максимум величини питомої електричної провідності (0,150 Ом·мм^2/м) та зниження до мінімуму величини ударної в'язкості (до 15 Дж/см^2). Підвищення твердості сталі при відпуску за температур від 450 до 500 °С забезпечується завдяки виділенню карбідної складової. Використовуючи пресовий інструмент (матриць-фільєр, рис. 1*г, д*) в корпорації «New material technology Co., Ltd» (м. Куньшань, провінція Цзянсу, Китайська Народна Республіка), після експлуатації гарячого деформування алюмінієвого сплаву АК7ч, ГОСТ 1583-93 (аналог SG70A, США) [8], визначено мікротвердість досліджуваної сталі (див. рис. 2). Інструмент імовірно не перегрівався в інтервалі температур відпускної крихкості (вище 470ºС), що підтверджується підвищенням мікротвердості (до 7,8 ГПа) у структурі металу (рис. 2). Підвищення мікротвердості досліджуваної сталі зумовлює підвищення її зносостійкості, і таким чином, підвищення ресурсу експлуатації інструменту.

Висновки

В роботі показана можливість використання штампових сталей марок 4Х3Н5М3Ф та 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування алюмінієвого сплаву, міді та мідно-нікелевого сплаву за робочих температур експлуатації (450…500 °С, 600…650 °С та 900…950 °С, відповідно). Збільшення температури гартування (до первинної рекристалізації) сталі, дозволяє при відпуску підвищити її теплостійкість. За температури відпускної крихкості (475 ±15 °С) досліджуваної сталі 4Х4Н5М4Ф2, змінюється структурно-чутлива величина (зменшується провідність), інтенсивно підвищується твердість, міцність та знижується ударна в'язкість сталі. Підвищення мікротвердості сталі, дозволяє підвищити її зносостійкість та підвищити ресурс експлуатації пресового інструменту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] А. Д. Озерский, «Упрочнение стали ЭП930 для матриц горячего прессования медных сплавов,» *Цветные металлы*, № 10, с. 76-78, 1984.

[2] Л. А. Позняк, *Инструментальные стали.* Киев: Наукова думка, 1996, 488 с.

[3] Н. В. Лебедева, «Повышение стойкости инструмента для прессования труднодеформируемых цветных сплавов из сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации.» автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.01, СПб., 2005, 18 с.

[4] М. Н. Перепьолкина, і В. Я. Грабовский, «Вибір ефективного легування нових штампових сталей з аустенітним перетворенням при експлуатації,» *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 1, с. 11-15, 2016.

[5] К. О. Гогаєв, О. М. Сидорчук, і О. К. Радченко, «Інструментальні штампові сталі для гарячого деформування (огляд),» *Металознавство та обробка металів*, № 3, с. 18-24, 2016.

[6] К. О. Гогаєв, О. К. Радченко, О. М. Сидорчук, і Д. В. Миронюк «Штампова сталь,» *Патент України № 141447 МПК С22С 38/00, № u201909670*; заявл. 05.09.2019; опубл. 10.04.2020. Бюл. № 7, 2020, 2 с.

[7] О. М. Сидорчук, Д. В. Миронюк, О. К. Радченко, К. О. Гогаєв, і Є. Хонггуанг, «Підвищення теплостійкості та властивостей штампової сталі з регулюванням аустенітного перетворення при експлуатації,» *Металознавство та обробка металів*, № 2, с. 19-25, 2019. https://doi.org/10.15407/mom2019.02.019 .

[8] О. М. Сидорчук, К. О. Гогаєв, О. К. Радченко, Д. В. Миронюк, і Л. А. Миронюк, «Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості,» *Металознавство та обробка металів*, № 2, с. 29-37, 2020. https://doi.org/10.15407/mom2020.02.003

[9] О. М. Сидорчук, К. О. Гогаєв, О. К. Радченко, Д. В. Миронюк, і Л. А. Миронюк, «Штампова кована сталь 4Х4Н5М4Ф2 підвищеної стійкості,» *Металознавство та обробка металів*, № 4, с. 30-38, 2020. https://doi.org/10.15407/mom2020.04.030 .

[10] Я. С. Спектор, В. И. Саррак, и Р. И. Энтин, «Склонность стали к хрупкому разрушению и тонкая структура стали,» *Физика металлов и металловедение*, № 6, т. 18, с. 915-920, 1964.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 4.02.2021

Сидорчук Олег Миколайович — канд. техн. наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, e-mail: sedoroleg@ukr.net .

Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, Київ

O. M. Sydorchuk[1]

Properties of Stamped Steel 4Kh4N5M4F2 for Hot Deformation of Non-Ferrous Metals and Alloys

[1]I. M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine, Kyiv

The results of researches of mechanical properties of cast and forged steel with regulation of austenitic transformation at operation, after thermal hardening are resulted. Taking into account the optimal modes of heat treatment (hardening 1100 ±5 °C and tempering) of the investigated steel, the parameters of physical and mechanical properties were determined: hardness, strength threshold, yield strength, toughness, electrical conductivity and microhardness in the metal structure. The proposed improved composition of steel (4Kh4N5M4F2) with an increase in quenching temperature by 60 °C, allowed to increase heat resistance by 35 °C in comparison with steel with regulation of austenitic transformation during operation of 4Kh3N5M3F brand (without deformation-forging). The tempering brittleness of the investigated steel (4Kh4N5M4F2) at the tempering temperature of 475 ±15 °C (first kind) and above 650 °C (second kind) was established. Increasing the brittleness of the studied steel in the temperature range of 460…490 °C causes to reduce the toughness, change the structurally sensitive value (increase in electrical conductivity), increase the hardness of the released martensite, increase the strength threshold and yield strength. The paper shows the possibility of using the investigated steel for the operating temperature range of hot deformation of copper (550…650 °C), copper-nickel (900…950 °C) and aluminum alloy (450…500 °C) with increased service life in comparison with ferritic steels 4Kh5MF1S and 3Kh3M3F of rolled grade. Experimental and industrial tests of die steel with regulation of austenitic transformation during operation (4Kh3N5M3F and 4Kh4N5M4F2) were carried out in Ukrainian and Chinese enterprises: Spetslityo plant (Dnipro, Ukraine); Artemivsk plant for non-ferrous metals processing (Donetsk Region, Bakhmut, Ukraine); Futec Co., Ltd (Ninghai, China); New material technology Co., Ltd (Kunshan, China). Ingots from the investigated steels were obtained by the technology of electroslag remelting: Rivne Research Institute of Mechanical Engineering Technology (Rivne, Ukraine); Tiangong International Co., Ltd (Danyang, China).

Keywords: die steel, composition, heat treatment, structure, physical and mechanical properties.

Sydorchuk Oleh M. — Cand. Sc. (Eng), Senior Researcher, Senior Research Fellow, e-mail: sedoroleg@ukr.net

О. Н. Сидорчук[1]

Свойства штамповой стали 4Х4Н5М4Ф2 для горячего деформирования цветных металлов и сплавов

[1]Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины, Киев

Приведены результаты исследований механических свойств литой и кованой стали с регулировкой аустенитного превращения при эксплуатации после термического упрочнения. Учитывая оптимальные режимы термической обработки (закалка 1100 ±5 °С и отпуск) исследованной стали, определены параметры физико-механических свойств: твердость, порог прочности, предел текучести, ударная вязкость, удельная электрическая проводимость и микротвердость в структуре металла. Предложен улучшенный состав стали (4Х4Н5М3Ф2) с повышением температуры закалки на 60 °С, что позволило повысить теплостойкость на 35 °С по сравнению со сталью с регулированным аустенитным превращением при эксплуатации марки 4Х3Н5М3Ф (без деформации — ковки). Установлена отпускная хрупкость исследованной стали (4Х4Н5М4Ф2) при температуре отпуска 475 ±15 °С (первого рода) и выше 650 °С (второго рода). Повышение хрупкости исследованной стали в интервале температур 460…490 °С приводит к уменьшению ударной вязкости, изменяет структурно-чувствительную величину (повышение удельной электрической проводимости), повышает твердость отпущенного мартенсита, повышает порог прочности и предел текучести. В работе показана возможность использования исследованной стали для интервала температур эксплуатации горячего деформирования меди (550…650 °С), медно-никелевого (900…950 °С) и алюминиевого сплава (450…500 °С) с повышенным ресурсом эксплуатации по сравнению со сталями ферритного класса 4Х5МФ1С и 3Х3М3Ф сортового проката. Опытно-промышленные испытания штамповой стали с регулированным аустенитным превращением при эксплуатации (4Х3Н5М3Ф и 4Х4Н5М4Ф2) проводились на украинских и китайских предприятиях: завод «Спецлитьё» (г. Днепр, Украина); ОАО «Артемовский завод по обработке цветных металлов» (Донецкая обл., г. Бахмут, Украина); компания «Futec Co., Ltd» (г. Нинхай, КНР) корпорация «New material technology Co., Ltd» (г. Куньшань, КНР). Слитки из исследованных сталей получали по технологии электрошлакового переплава: ОАО "Ровенский научно-исследовательский институт технологии машиностроения" (г. Ровно, Украина); корпорация «Tiangong International Co., Ltd» (г. Даньян, КНР).

Ключевые слова: штамповая сталь, состав, термическая обработка, структура, физико-механические свойства.

***Сидорчук Олег Николаевич* —** канд. техн. наук, старший исследователь, старший научный сотрудник e-mail: sedoroleg@ukr.net