

Штампова кована сталь 4Х4Н5М4Ф2 підвищеної стійкості

О. М. Сидорчук, кандидат технічних наук, старший дослідник, sedoroleg@ukr.net

Л. А. Миронюк*, кандидат хімічних наук, в. о. наукового співробітника,
liliamolotovska@gmail.com

Д. В. Миронюк*, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий
співробітник, denysmyroniuk@gmail.com

К. О. Гогаєв*, член-кореспондент НАН України, завідувач відділу,
gogaev@ipms.kiev.ua

О. К. Радченко*, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник,
arradch@ipms.kiev.ua

Центр досліджень і технологій ІПМ Нінбо, Китайська Народна Республіка,
м. Нінхай

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

Наведено результати досліджень щодо оптимізації режимів термо-деформаційної обробки сталі 4Х4Н5М4Ф2. Встановлено, що неповний відпал (750 ± 20 °С) у литому та кованому стані, сприяє покращенню сталі при механічній обробці заготовок для виготовлення матриць порівняно з проведенням повного відпалу (860 °С). Показано, що використання неповного відпалу, а саме часткової перекристалізації сприяє утворенню сфероїдизованої, а не пластинчастої карбідної фази, що призводить до зниження характеристик: порогу міцності, порогу текучості, твердості 900 МПа, 800 МПа, $32-33$ HRC у литому стані та 1200 МПа, 1050 МПа, $38-39$ HRC у кованому стані, відповідно. При цьому підвищується ударна в'язкість: 180 Дж/см² у литому та 130 Дж/см² у кованому стані. Оптимізований режим кування за температури 1170 ± 20 °С та термічної обробки (гартування 1100 ± 5 °С, відпуск 595 ± 5 °С) сталі 4Х4Н5М4Ф2 дозволив підвищити ударну в'язкість у п'ять разів порівняно з литою дослідною сталлю, а також підвищити поріг міцності на 100 МПа. Кована сталь 4Х4Н5М4Ф2 має децю нижчі показники теплостійкості у порівнянні з литою, яка розміщується за температури вище 630 °С в процесі експлуатації штампового інструменту. Після експлуатації коліс екструдерів з дослідженої кованої сталі та кованої сталі 4Х5МФ1С, яка використовувалась на підприємстві при обробці міді, були визначені властивості обох сталей. Досліджувана кована сталь 4Х4Н5М4Ф2 характеризується підвищенням порогу міцності на 200 МПа та твердості на 6 HRC. Після експлуатації (виготовлення 60 тон виробів з міді марки М1) інструмент (колесо екструдера) зі сталі марки Н13 (аналог 4Х5МФ1С) мав мікро та макротріщини на бічній та внутрішній частинах, а у дослідженої сталі 4Х4Н5М4Ф2 такі дефекти були відсутні. Таким чином, досліджувана сталь характеризується підвищеною стійкістю.

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

Технологія виготовлення штампового інструменту (матриць) з литої сталі з регульованим аустенітним перетворенням при експлуатації (РАПЕ) пройшла дослідно-промислове випробування на підприємствах України. Ця лита сталь з РАПЕ, для якої було оптимізовано режими термічної обробки [1–8], показала підвищення ресурсу експлуатації порівняно з матрицями зі сталей 3Х3МЗФ та 4Х5МФ1С при обробці мідних сплавів. Метою роботи є одержання кованої сталі з РАПЕ, одержаної електрошлаковим литтям для покращення її механічної обробки та оптимізація режимів термодеформаційної обробки кованої сталі для виготовлення крупних деталей для екструдерів.

Виплавку дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co., Ltd (місто Дан'ян, провінція Цзянсу, Китайська Народна Республіка). Одержано зливки масою по 300 кг, розмірами: $\varnothing$ 180 – 220 мм, довжиною 1100 мм. Загальна маса злиwkів з одної плавки становила 3 тони. Хімічний склад сталі відповідав маркуванню 4Х4Н5М4Ф2: 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. Виготовлення шліфів для металографічних досліджень здійснювали за допомогою приладів: Dincer XQ-2B, Dincer MP-2 та Dincer P-2. Мікроструктури сталі досліджували після протравлення 10 % розчином азотної кислоти в етиловому спирті з добавкою пікринової кислоти за методикою [9] та ГОСТ 10243-75. 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 10x10x55 мм без надрізу.

Для виготовлення великогабаритних деталей типу коліс екструдерів (масою 47 кг та 59 кг, розмірами Ш 400 мм, товщиною 90 мм та 120 мм, відповідно) зі сталі 4Х4Н5М4Ф2 для гарячого деформування міді, використовували операцію кування за температури 1170 ± 20 °С. Зливки дослідної сталі були піддані термічній обробці (відпалу) за температури 750 ± 20 °С. В цьому випадку, також як і раніше [1–5], застосували спрощений режим термічної обробки сталі 4Х3Н5МЗФ (рис. 1 а). У структурі спостерігалася сфероїдизована карбідна складова. Після неповного відпалу литої сталі її твердість не перевищує 33 HRC, що дає можливість проведення подальшої механічної обробки різанням при виготовленні деталей. У табл. 1, наведені властивості сталі 4Х4Н5М4Ф2 після повного відпалу за розробленим режимом та ступінчастого відпалу за режимом, який був розроблений для сталі 4Х2Н5МЗК5Ф (ЭП – 930), рис. 1 б (технологічні операції 2 та 3). При цьому були одержані достатньо високі характеристики міцності. При неповному відпалі за температури 750 ± 20 °С поріг міцності та текучості дослідженої литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 становили 900 та 800 МПа, відповідно (рис. 1 а). Відносне подовження та звуження становили 15

Термічна і хіміко-термічна обробка

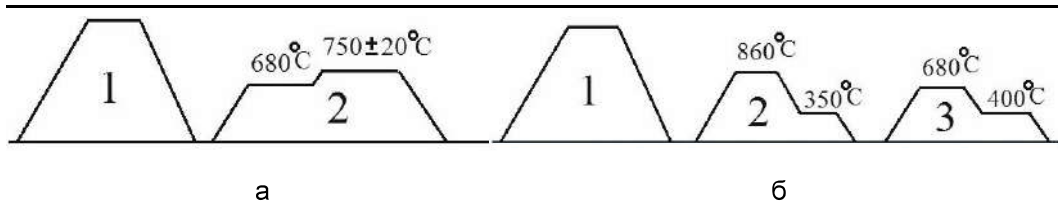


Рис. 1. Схема технологічних операцій обробки сталі: а – рекомендовано [1-5] (1 – одержання зливків електрошлаковим переплавом, 2 – неповний відпал); б – рекомендовано [10, 11] (1 – одержання зливків за технологією лиття у кокіль, 2 – повний відпал, 3 – відпуск).

Таблиця 1

Механічні властивості сталі 4X4H5M4Ф2 після відпалу

Температура, °C	Поріг міцності, МПа	Поріг текучості, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість, HRC
860 ± 20* та 350 ± 20*	1390-1400	1350-1360	11-12	10-11	50-60	37-38
750 ± 20*	900-910	800-810	14-15	11-12	170-180	32-33
750 ± 20**	1190-1200	1050-1060	21-22	5-6	120-130	38-39

Примітка: * - лита, ** - кована

та 12 %, відповідно. Ударна в'язкість (КС) дорівнювала 180 Дж/см². Запропонований нами режим неповного відпалу за температури 750±20 °C дозволив підвищити у три рази ударну в'язкість, знизити твердість на 5 HRC та знизити поріг міцності на 500 МПа порівняно з властивостями сталі з РАПЕ ЕП-930, термічно обробленої за режимом запропонованим професором О. Д. Озерським та його учнями [10-14] (рис. 1 б). Проте, властивості були набагато вищі за властивості литої сталі і, становили: поріг міцності – 1190 – 1200 МПа, поріг текучості – 1050 – 1060 МПа, твердість 38 – 39 HRC при зменшенні ударної в'язкості (130 Дж/см²). Однак, незважаючи на підвищення міцності та твердості дослідної кованої сталі, заготовки для виготовлення деталей великих розмірів задовільно оброблялись різанням (рис. 2).

Підвищення значень ударної в'язкості дослідженої сталі свідчить про те, що у процесі часткової перекристалізації за неповного відпалу у структурі як у литої, так і кованої сталей утворилась сфероїдизована, а не пластинчаста,



Рис. 2. Деталь (маса 47 кг, розміри: діаметр 400 мм, товщина 90 мм) зі сталі 4X4H5M4Ф2 для екструдера.

карбідна фаза. Це полегшило проведення операцій механічної обробки заготовок.

Оптимізований режим гартування сталі від 1095 ± 5 °C забезпечує одержання розміру зерна в межах № 5 – № 7 і твердості 55 – 56 HRC. Нижче цієї температури розмір зерна зменшується, а вище оптимальної температури розмір зерна збільшується внаслідок первинної рекристалізації (рис. 3 а – г). Після відпуску за температури 590 ± 5 °C гартованої сталі ударна в'язкість мала підвищені значення (120 Дж/см^2), але за температури відпуску 600 ± 5 °C її твердість була на тому ж рівні. Для з'ясування робочих температур сталі було проведено додаткове дослідження теплостійкості. При нагріві сталі до 650 °C ударна в'язкість була оптимальною $120 - 180 \text{ Дж/см}^2$ (табл. 2), але заниженою була її теплостійкість (нижче 40 HRC) у порівнянні з литою сталлю 4X4H5M4Ф2 [15]. При встановленні оптимальних режимів (гартування та відпуск за температур 1095 ± 5 °C та 600 ± 5 °C, відповідно) кованої сталі 4X4H5M4Ф2 дає можливість підвищити міцність та ударну в'язкість у п'ять разів порівняно з литим станом [15] (табл. 3). За температури нагріву до 650 ± 5 °C, кована сталь мала межу плинності 930–960 МПа та підвищену ударну в'язкість 120–180 МПа, проте

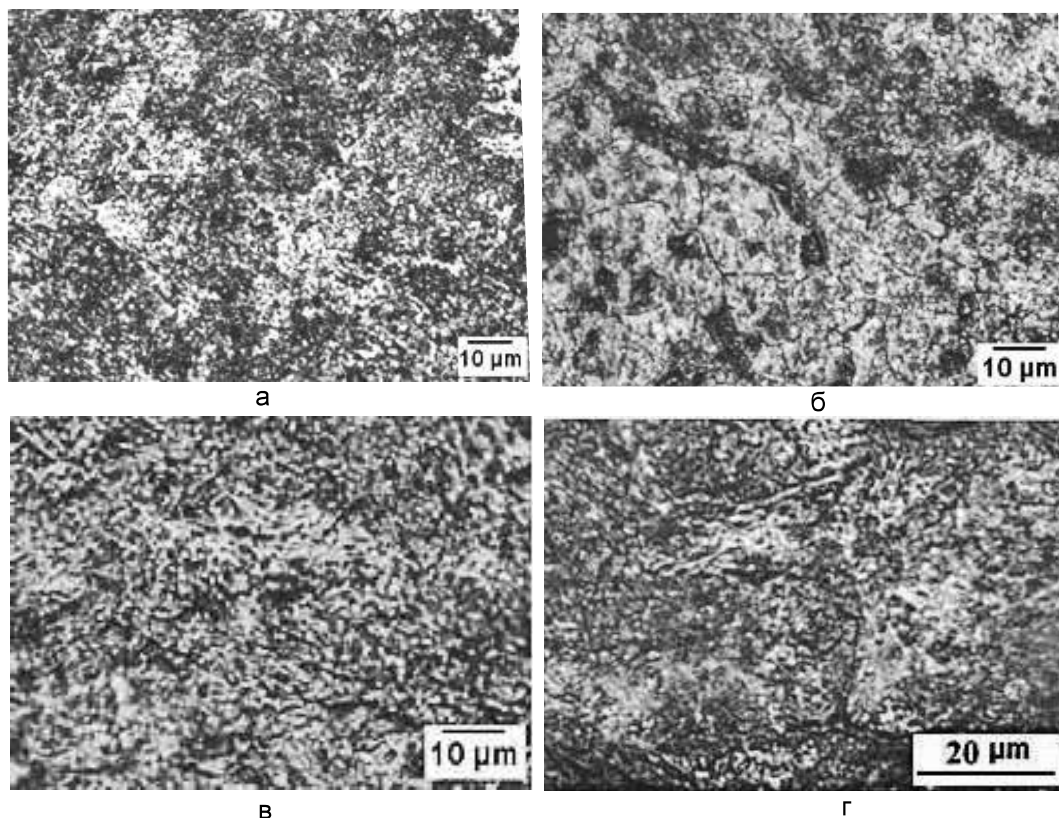


Рис. 3. Мікроструктури кованої сталі 4X4H5M4Ф2 за різних температур гартування. а – 1050 ± 5 °C, б – 1070 ± 5 °C, в – 1090 ± 5 °C, г – 1110 ± 5 °C.

Термічна і хіміко-термічна обробка

Таблиця 2

Механічні властивості кованої сталі 4X4H5M4Ф2 за різних режимів термічної обробки

Термічна обробка	Твердість, HRC	Ударна в'язкість (KC), Дж/см ²
Гартування 1050 ± 5 °C, відпуск 590 ± 5 °C, відпуск 650 ± 5 °C	35-36	130-150
Гартування 1070 ± 5 °C, відпуск 590 ± 5 °C, відпуск 650 ± 5 °C	35-37	80-110
Гартування 1090 ± 5 °C, відпуск 590 ± 5 °C, відпуск 650 ± 5 °C	37-38	120-180
Гартування 1110 ± 5 °C, відпуск 590 ± 5 °C, відпуск 650 ± 5 °C	38-40	10-20

Таблиця 3

Механічні властивості кованої сталі 4X4H5M4Ф2 після гартування 1095 ± 5 °C та відпуску 600 ± 5 °C та наступним нагрівом (ізотермічна витримка 2 год)

Властивості	Температура нагріву, °C				
	600	620	630	640	650
Поріг міцності, МПа	1520-1580	1310-1330	1210-1240	1190-1210	1100-1120
Поріг плинності, МПа	1410-1450	1190-1220	1070-1100	1030-1050	930-960
Ударна в'язкість, Дж/см ²	40-70	50-75	60-80	70-90	120-180
Твердість, HRC	46,547,5	42,043,0	40,041,0	37,038,0	36,037,0

її теплостійкість є заниженою 36–37 HRC (табл. 3) у порівнянні з литою сталлю 4X4H5M4Ф2 [15]. Проте, міцність кованої сталі 4X4H5M4Ф2 є вищою за сталь того ж хімічного складу та підвищену ударну в'язкість у п'ять разів, а твердість після кінцевої термічної обробки знижується не значно (табл. 3).

З використанням розроблених режимів кування та термічної обробки були виготовлені деталі для екструдерів масою 47 кг та 59 кг, Ø 400 мм, товщиною 90 мм та 120 мм, відповідно. Після експлуатації деталей для гарячого деформування міді марки М1 (ГОСТ 859 – 2014) з кованої сталі 4X4H5M4Ф2 та кованої сталі Н13 (аналог 4X5МФ1С) з них були вирізані зразки та визначені їх властивості (табл. 4).

Таблиця 4

Механічні властивості сталей після експлуатації коліс екструдерів (гарячого деформування міді)

Марка сталі	Поріг міцності, МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Твердість, HRC
Н13 (кована) *	1350-1400	250-260	41-42
4X4H5M4Ф2 (кована)	1580-1640	90-140	47-48
Примітка: * - аналог, сталь 4X5МФ1С			

Встановлено, що міцність та твердість кованої дослідженої сталі 4Х4Н5М4Ф2 були вищими ніж у кованої сталі Н13, але ударна в'язкість дослідженої сталі виявилась у два рази нижчою. Її величина – 90-140 Дж/см² насправді є оптимальною для штампових сталей при гарячому деформуванні (ГОСТ 5950 – 2000). Крім того, після експлуатації (виготовлення 60 тон виробів з міді) інструмент зі сталі Н13 мав мікро та макротріщини на бічній та внутрішній частинах колеса екструдеру, а у дослідженої сталі 4Х4Н5М4Ф2 такі дефекти були відсутні.

Висновок. Показана можливість використання штампової сталі з регульованим аустенітним перетворенням для широкого інтервалу температур експлуатації гарячого деформування міді та мідно-нікелевого сплаву (600–630 °С та 900–950 °С, відповідно) з підвищеним ресурсом експлуатації у порівнянні зі сталями феритного класу 4Х5МФ1С та 3Х3М3Ф.

Література

1. Сидорчук О. М. Фазово-структурний стан сталі 40Х3Н5М3Ф в процесі перекристалізації // Современные проблемы физического материаловедения. Труды института проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины. Серия “Физико-химические основы технологии порошковых материалов” Выпуск 22. – Киев. – 2013. – С. 186-188.
2. 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.
3. Патент № 94746 Україна, МПК С21/Д8/00. 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.
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 // Металофізика та новітні технології. – 2015. – Т. 37, № 12. – С. 1653-1661. <https://doi.org/10.15407/mfint.37.12.1653>
5. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Лук'яничук В. В. Технологія виготовлення штампової сталі 40Х3Н5М3Ф 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.
6. 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.
7. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Лук'яничук В. В., Орел Г. Г. Дослідження режимів термічної обробки штампової сталі 4Х3Н5М3Ф // 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.

8. Гогаєв К. О., Ласконеv О. П., Радченко О. К., Дудецька Л. Р., Сидорчук О. М. Розробка наукових і технологічних основ виготовлення формотворного штампового інструменту на основі створення і використання нових перспективних сталей і ливарно-деформаційних методів їх обробки // Анотований збірник проектів спільного конкурсу ДФФД-БРФФД. Академперіодика – 2017. – С. 125-128.
9. Панченко Е. В. Скаков Ю. А., Кример Б. И., Арсентьев П. П., Попов К. В., илинг М. Я. Лаборатория металлографии. – М.: Металлургия, 1965. – 440 с.
10. Озерский А. Д. О выборе стали для матриц горячего прессования медных сплавов / А. Д. Озерский, А. А. Кругляков, А. Н. Данилов // Цветные металлы – 1981. – Т. 8. – С. 83-84.
11. Озерский А. Д. Упрочнение стали ЭП-930 для матриц горячего прессования медных сплавов / А. Д. Озерский, А. А. Кругляков // Цветные металлы. – 1984. – Т. 10. – С. 76–78.
12. Перепьолкіна М. М. Вибір ефективного легування нових штампових сталей з аустенітним перетворенням при експлуатації / М. М. Перепьолкіна, В. Я. Грабовский // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – Т. 1. – С. 11-15.
13. Лебедева Н. В. Повышение стойкости инструмента для прессования труднодеформируемых цветных сплавов из сталей с регулируемым аустенитным превращением при эксплуатации : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.02.01 «Материаловедение (машиностроение)» / Н. В. Лебедева. - СПб., 2005. – 18с.
14. Лебедева Н. В. Современные штамповые стали для горячего деформирования // Балтийские металлы. – 2003. – № 1. – С. 7-9.
15. 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>

References

1. Sydorhuk 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].
2. Hohaiev K. O., Sydorhuk O. M., Radchenko O. K., Mamonova A. A., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2014, No. 1, pp. 40-44 [in Ukrainian].
3. Patent No. 94746 Ukraine. MPK C21 / D8 / 00. *Sposib termichnoyi obrobky stali dlya haryachoho presuvannya* [Method for heat treatment of hot pressing steel], Hohaiev, K. O., Sydorhuk, 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].
4. Hohaiev K. O., Sydorhuk O. M., Radchenko O. K., Karpets M. V., Piatachuk, 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>
5. Hohaiev K. O., Radchenko O. K., Sydorhuk O. M., Lukianchuk V. V. *Tekhnolohiia vyhotovlennia shtampovoi stali 40KH3N5M3F dlia haryachoho*

- deformuvannya, Tsilova kompleksna prohrama NAN Ukrainy «Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktsii, sporud ta mashyn» Instytut elektrozvaruvannya 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].
6. Hohaiev K. O., Sydorchuk O. M., Radchenko O. K. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2016, No. 3, pp. 18-24 [in Ukrainian].
 7. Hohaiev K. O., Sydorchuk 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].
 8. Hohaiev K. O., Laskonev O. P., Radchenko O. K., Dudetska L.R., Sydorchuk O.M. *Anotovanyi zbirnyk proektiv spilnoho konkursu DFFD-BRFFD*, Akadempriodyka, 2017, pp. 125-128 [in Ukrainian].
 9. Panchenko E. V., Skakov Yu. A., Krimer B. I., Arsentiev P. P., Popov K. V., Tsviling, M. Ya., *Laboratoriia metallografii* (Metallography laboratory), Moscow, Metallurgiya, 1965, 440 p. [in Russian].
 10. Ozerskii, A. D., Krugliakov, A. A., Danilov, A. N. *Tsvetnyie metally*, 1981, Vol. 8, pp. 83-84 [in Russian].
 11. Ozerskii, A. D., Krugliakov A. A. *Tsvetnyie metally*, 1984, Vol. 10, pp. 76-78 [in Russian].
 12. Perepolkina, M. M., Hrabovskii V. Ya. *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 2016, No 1, pp. 11-15 [in Ukrainian].
 13. Lebedeva, N. V. (2005) *Povyshenie stoikosti instrumenta dlya pressovaniya trudnodeformiruemyyh cvetnykh splavov iz stalei s reguliruemym austenitnym prevrashcheniem pri ekspluatatsii: avtoreferat, dissertatsiia* Extended abstract of candidate's thesis. St. Petersburg [in Russian].
 14. Lebedeva, N. V. *Baltijskie metally*, 2003, N.1, pp. 7-9. [in Russian].
 15. Sydorchuk 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>.

Одержано 25.06.20

O. M. Sydorchuk, L. A. Myroniuk, D. V. Myroniuk, K. O. Gogaev, O. K. Radchenko

Increased stability die forged steel 4H4N5M4F2

Summary

The results of researches on steel 4H4N5M4F2 modes thermo-deformation processing optimization are given. It is established that incomplete annealing (750 ± 20 °C in comparison with full annealing 860 °C) in cast and forged condition promotes to improve the machining of blanks for the manufacture of matrices. It is shown that the use of incomplete annealing, namely partial recrystallization promotes the formation of spheroidized rather than lamellar carbide phase, which leads to a decrease in the characteristics: strength threshold, yield strength, hardness 900 MPa, 800 MPa, 32-33 HRC in the cast state and 1200 MPa, 1050 MPa, 38-39 HRC in forged condition, respectively.

Термічна і хіміко-термічна обробка

This increases the fracture toughness: 180 J/cm² in the cast state and 130 J/cm² in the forged state. The optimized mode of forging at the temperature of 1170 ± 20 °C and heat treatment (hardening at 1100 ± 5 °C and tempering at 595 ± 5 °C) of steel 4H4N5M4F2 allowed to increase impact strength five times in comparison with cast experimental steel, and also to increase strength threshold of 100 MPa. Forged steel 4H4N5M4F2 has slightly lower heat resistance compared to cast, which hardens at temperatures above 630 °C during operation of the die steel tool. After operation of the extruder wheels made of investigated forged steel and forged steel 4H5MF1S, which was used at the enterprise in copper processing, the properties of both steels were determined. The investigated forged steel 4H4N5M4F2 is characterized by an increase in the strength threshold by 200 MPa and hardness by 6 HRC. After operation (production of 60 tons of copper products of M1 grade) the tool (wheel extruder) from H13 steel (analog 4H5MF1S) had micro and macrocracks on the side and inner parts, and in the investigated steel 4H4N5M4F2 such defects were absent. Thus, the studied steel is characterized by increased stability.

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

Журнал **МОН** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно наказу Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу
**"Науково-технічний журнал
"Металознавство та обробка металів"**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість
заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного
інституту металів та сплавів НАН України.
Вартість одного номера журналу - 50 грн., передплата на рік – 200 грн.
Ціна архівних номерів 1995 – 2018 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,
спонсорів і рекламодавців:**

р/р UA828201720313251001201012215,
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172
Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,
з посиланням на журнал "МОН"
Копію документа передплати та відомості про передплатника
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.