

Термічна обробка штампової сталі підвищеної стійкості

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

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

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

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

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

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

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

Досліджено вплив режимів термічної обробки штампової сталі 4X4H5M4Ф2 для гарячого деформування на її фізико-механічні властивості. Враховуючи важливість режимів охолодження при відпуску, були досліджені різні режими охолодження (в маслі, в печі та на повітрі після гартування від 1100 ± 5 °C). Визначено фізико-механічні властивості литої сталі 4X4H5M4Ф2 після відпуску за температури 550 ± 5 °C та 600 ± 5 °C. Оптимальний режим відпуску сталі за температури 550 ± 5 °C з охолодженням на повітрі забезпечує: поріг міцності 1860 МПа та межу плинності 1760 МПа. Встановлено також оптимальний режим відпуску сталі за температури 600 ± 5 °C з охолодженням на повітрі: поріг міцності 1600 МПа, межа плинності 1500 МПа, теплостійкість 48,5 HRC. Після подвійного гартування та відпуску сталі за температури 600 ± 5 °C з охолодженням в оливі в'язкість руйнування становила 75 Дж/см², а при охолодженні на повітрі – 30 Дж/см². Встановлено, що температурний інтервал відпускної крижкості дослідженої сталі складає 465 – 495 °C. Оптимізований температурний режим відпуску дослідженої сталі (590 ± 5 °C), дозволив підвищити ударну в'язкість у два рази (до 30 Дж/см²) в інтервалі температур 465 – 495 °C. Проведено дослідно-промислове випробування штампового інструменту виготовленого з дослідженої сталі. При гарячому пресуванні трубних заготовок алюмінієвого сплаву марки АК7ч ресурс експлуатації матриць з литої сталі 4X4H5M4Ф2 знаходився на рівні ресурсу експлуатації кованої сталі 4X5МФС з азотованим поверхневим шаром, яку використовували на підприємстві. Після експлуатації обох матриць (гарячого деформування) були вирізані зразки і випробувані на твердість та ударну в'язкість. Остання виявилася вищою у кованій сталі, проте, ресурс експлуатації матриць з обох сталей виявився на одному рівні.

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

Використання традиційної технології лиття при виготовленні матриць штамів гарячого деформування вимагає проведення енергоємних технологічних операцій, термо-деформаційної та хіміко-термічної обробки, необхідних для підвищення ресурсу їх експлуатації. Основний недолік литих сталей типу 4Х5МФ1С – низький опір крихкому руйнуванню. Використання технології електрошлакового переплаву дає можливість одержати більш пластичний матеріал та скоротити такі енерговитрати. Нагрів гартованої сталі нижче критичної точки A_1 при відпуску може призвести до виникнення відпускнуї крихкості. Відомо [1-10], що при відпуску сталі існують кілька стадій розпаду структурних складових. Стадія розпаду, коли зменшуються розміри фериту, відповідає температурному інтервалу відпуску 400-500 °С. У роботі [7] показано, що при низькому, або середньому відпуску сталі, легованої карбідоутворюючими елементами, спостерігається дисперсійне твердіння, яке призводить до максимальної вторинної твердості пов'язаної із затриманням процесів коагуляції карбідних фаз. Згідно [2] відпуску крихкість першого роду легованої сталі виникає в процесі охолодження при повільній коагуляції дисперсних частинок карбідної складової. Легування нікелем призводить до зменшення енергії взаємодії дислокацій з атомами та підвищує їх рухомість [7, 8]. Це пришвидшує релаксаційні процеси, що призводить до зниження критичної температури відпускнуї крихкості сталі.

Раніше сталь 4Х3Н5М3Ф була використана для виготовлення матриць гарячого пресування (температура 900-950 °С, вище критичної точки A_3) мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1. Дослідно-промислове випробування цієї литої сталі продемонструвало підвищення стійкості у три рази порівняно зі сталлю феритного класу 3Х3М3Ф [11-15]. Застосування цієї сталі за температур виникнення відпускнуї крихкості першого роду (450-500 °С) не проводилось. Вміст підвищеної кількості нікелю у сталі дає підстави очікувати підвищення її експлуатаційних властивостей у вищезазначеному інтервалі температур. Таким чином, метою роботи є встановлення можливості розширення інтервалу експлуатаційних температур дослідної сталі у область температур нижче критичної точки A_1 (α -Fe область).

До задач дослідження входило також проведення дослідно-промислового випробування литої сталі 4Х4Н5М4Ф2 при експлуатації нижче критичної точки A_3 порівняно з кованою сталлю 4Х5МФС, яка широко використовується на підприємствах.

Виплавку дослідної сталі здійснювали за технологією електрошлакового переплаву в корпорації Tiangong International Co. Одержували зливки масою 300 кг, розмірами: $\varnothing$ 180 – 220 мм, довжиною 1100 мм. Термічну обробку (відпал) за режимом [16-18] та механічну обробку заготовок для виготовлення матриць гарячого деформування проводили в компанії Futec Co. Хімічний склад сталі відповідає 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.

Раніше було встановлено оптимальні температури гартування (1100 ± 5 °С) і відпуску (600 ± 5 °С) сталі 4Х4Н5М4Ф2 [20], цим режимам відповідали підвищені міцність та теплостійкість порівняно зі стандартними сталями феритного класу 4Х5МФС та 3Х3М3Ф у вигляді сортового прокату.

Для сталі дослідженого класу важливим є режим охолодження після відпуску, але дослідження його впливу на фізико-механічні властивості сталі не проводились.

Термічна та хіміко-термічна обробка

Результати досліджень фізико-механічних властивостей литої сталі 4X4H5M4Ф2 після гартування $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ та відпуску за різних режимів охолодження наведені у таблиці. Для матриць, при роботі за умов переважно стискаючих напружень найбільш важливими є показники твердості та міцності. Виходячи з цього найкращими режимами охолодження сталі для таких інструментів є охолодження на повітрі від температури $600 \pm 5^\circ\text{C}$. При цьому теплостійкість сталі становить 48,5 HRC, що є оптимальним значенням для гарячого деформування [21, 22], механічні властивості досягають найвищого рівня ($\sigma_t - 1500$ МПа, $\sigma_b - 1600$ МПа). В'язкість руйнування становила 30 Дж/см².

Для інструменту у вигляді штампів при використанні яких має місце ударне навантаження, найкращим режимом охолодження за температури відпуску $600 \pm 5^\circ\text{C}$ є охолодження в маслі після подвійного гартування. Межа плинності та міцності знижується не суттєво (1380 МПа та 1530 МПа, відповідно), але в'язкість руйнування підвищується у 2,5 рази (75 Дж/см²) порівняні з в'язкістю руйнування сталі охолодженої на повітрі.

При виготовленні інструменту гарячого деформування кольорових сплавів повинна забезпечуватись твердість на рівні 46-49 HRC [23]. Зниження температури відпуску до $550 \pm 5^\circ\text{C}$ при всіх досліджених режимах охолодження, дозволяє одержати твердість 52,0-54,5 HRC.

Властивості литої сталі 4X4H5M4Ф2 після гартування $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ та відпуску при різних режимах охолодження

Температура відпуску, $^\circ\text{C}$	Властивості	Охолодження сталі			
		На повітрі	В печі	В оливі	В оливі*
550	Твердість, HRC	53,5	54,5	52	52,5
	Ударна в'язкість, Дж/см ²	30	35	25	35
	Межа плинності, МПа	1760	-	1730	1660
	Межа міцності, МПа	1860	-	1810	1760
600	Твердість, HRC	48,5	49,5	49,5	48
	Ударна в'язкість, Дж/см ²	30	35	60	75
	Межа плинності, МПа	1500	1360	1440	1380
	Межа міцності, МПа	1600	1500	1580	1530
Примітка: * - подвійне гартування $1100 \pm 5^\circ\text{C}$					

Ударна в'язкість досліджуваної литої сталі за температури гартування $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ при збільшенні температури відпуску від 580 до 620°C підвищилась від 29 до 31 Дж/см².

На рис. 1, показані залежності властивостей сталі 4X4H5M4Ф2 від температури відпуску за температури в інтервалі $190 \div 660^\circ\text{C}$, гартування $1100 \pm 10^\circ\text{C}$. Встановлено, що зі зміною температури відпуску значення властивостей змінюється

Термічна та хіміко-термічна обробка

нелінійно. На одержаній кривій залежності ударної в'язкості від температури відпуску при охолодженні на повітрі спостерігаються декілька аномальних знижень її величини. Перше зниження відповідає температурі відпуску 280 ± 10 °С (при цьому ударна в'язкість знижується майже у два рази – від 45 до 26 Дж/см²), а питома електрична провідність, твердість та поріг міцності сталі знижується не суттєво (рис. 1). Це пояснюється тим, що у тетрагональному мартенситі атоми вуглецю виходять з кристалічної ґратки і утворюють ϵ -карбід ($\text{Fe}_{2,4}\text{C}$) [9, 10]. При підвищенні температури відпуску від 275 °С, ударна в'язкість інтенсивно збільшується і досягає 50 Дж/см². Друге зниження ударної в'язкості до 30 Дж/см² відбувається в інтервалі температур від 350 до 450 °С. Після чого відбувається підвищення її значень приблизно на 10 одиниць з подальшим різким зниженням до 12,5 Дж/см². Аномальне зниження ударної в'язкості відповідає відпуску сталі за температур 475 ± 10 °С, яке, ймовірно, пов'язане з проявами відпускнуї крихкості першого роду. Аномально низька величина ударної в'язкості відповідає температурі суттєвих змін порога міцності (1180 МПа), твердості (56,5 HRC) та питомої електропровідності ($0,144 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$).

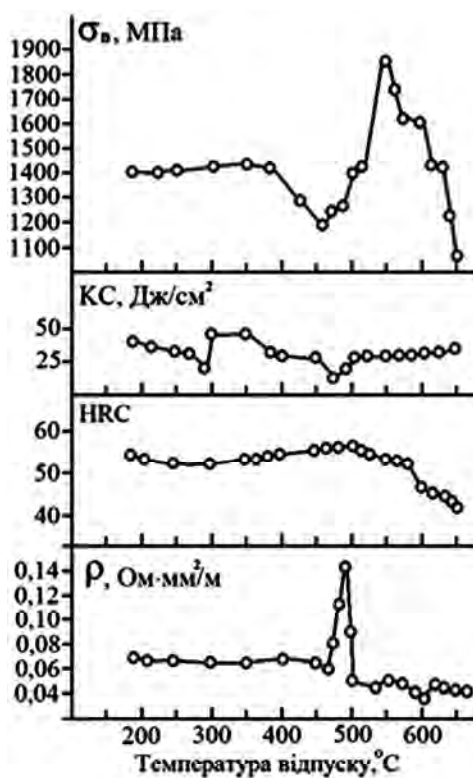


Рис. 1. Залежності порогу міцності (σ_b), ударної в'язкості (КС), твердості (HRC) та питомої електропровідності (ρ) від температури відпуску сталі.

Встановлено також, що при відпуску за температур 550 °С, 570 °С та 610 °С з наступним повторним нагрівом, ударна в'язкість знаходиться на низькому рівні (рис. 2). Оптимальним є проведення відпуску сталі за температури 590 °С та повторного нагріву в інтервалі температур від 465 до 495 °С. При цьому ударна в'язкість підвищується у два рази до 30 Дж/см². Такий температурний режим відпуску дослідженої сталі 4X4H5M4Ф2, дозволяє працювати матрицям гарячого

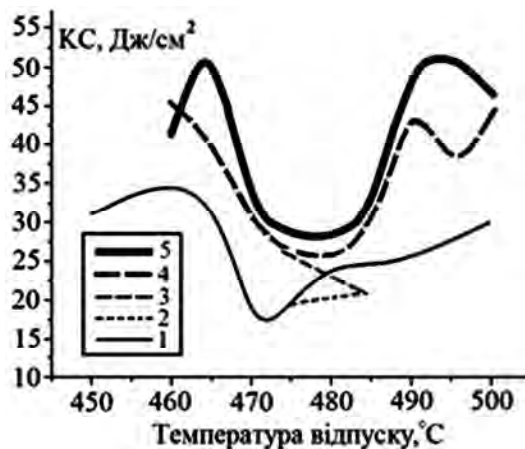


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості литої сталі 4X4H5M4Ф гартованої за температури 1100 ± 10 °C та відпущеної за різних температур від температури повторного нагріву: 1 – відпуск 450-500 °C; 2 – відпуск 550 ± 1 °C; 3 – відпуск 570 ± 1 °C, 4 – відпуск 610 ± 1 °C; 5 – відпуск 590 ± 1 °C.

деформування алюмінієвих сплавів в інтервалі температур відпускнуї крихкості першого роду.

Матриці з литої сталі 4X4H5M4Ф2 (рис. 3) були використані для дослідно-промислового випробування, а саме гарячого деформування (температура експлуатації 450 – 500 °C) алюмінієвого сплаву АК7ч (корпорації New material technology Co., Ltd).

Встановлено, що ресурс експлуатації і характеристики структури (рис. 4) литої дослідної сталі 4X4H5M4Ф2 відповідають рівню кованої та азотованої сталі 4X5MФ1С. При виготовленні трубних заготовок масою шість тон з алюмінієвого сплаву АК7ч.

Найкращим режимом охолодження після відпуску за температури 600 ± 5 °C є охолодження на повітрі. Змінюючи режим охолодження після відпуску можна досягти ударної в'язкості до 75 Дж/см². Встановлено, що відпускуна крихкість

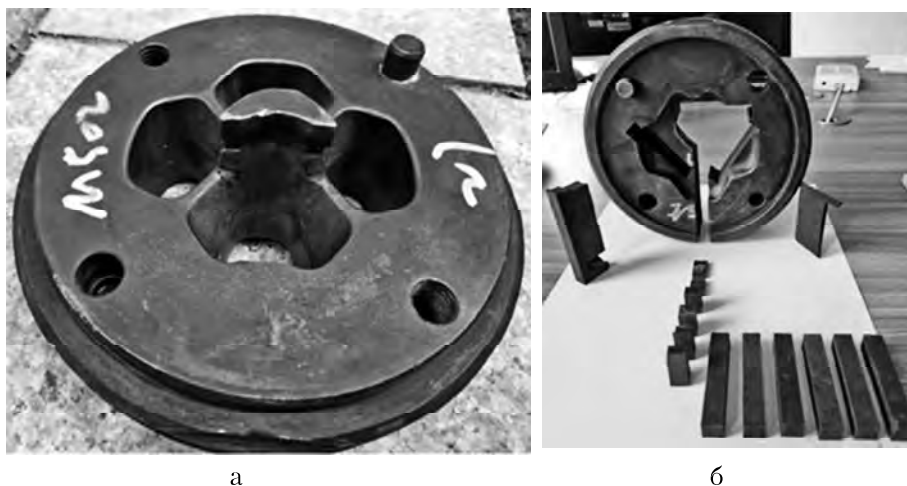


Рис. 3. Матриця з дослідної сталі після експлуатації при гарячому деформуванні (екструзії) за робочих температур 450 – 500 °C алюмінієвого сплаву марки АК7ч; а – загальний вигляд матриці у вихідному стані, б – механічна обробка матриці після експлуатації та зразки для випробувань вирізані з неї.

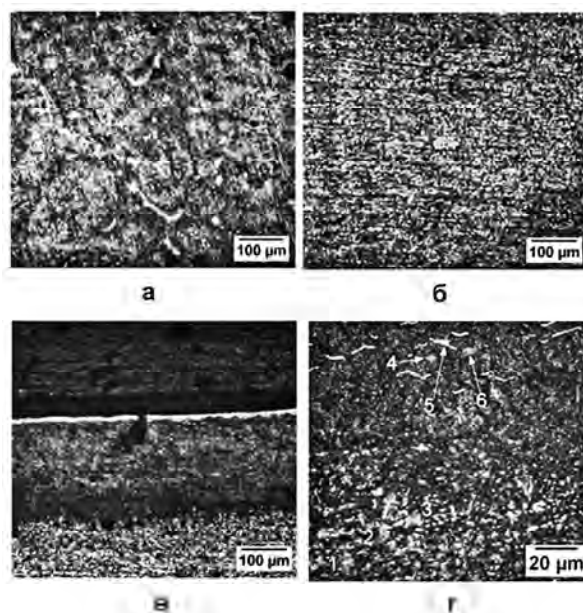


Рис. 4. Мікроструктури сталей після експлуатації штампового інструменту: а – лита сталь 4X4H5M4Φ2, б – кована сталь 4X5MΦ1C, в, г – кована та азотована сталь 4X5MΦ1C (на зображенні г – цифрами відмічені відбитки мікротвердості HV: 1-303; 2-328; 3-424; 4-496; 5-448; 6-436).

першого роду дослідженої сталі 4X4H5M4Φ2 знаходиться в інтервалі температур 450-500 °С, якій відповідає температурі деформування алюмінієвого сплаву АК7ч. Вибором оптимального режиму відпуску сталі можна зменшити прояви відпускнуї крихкості першого роду для цієї сталі.

Література

1. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
2. Завьялов А. С. К теории легирования и термической обработки стали. – НКТП СССР ЦНИИ, 1943. – 132 с.
3. Д. К. Чернов и наука о металлах. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 563 с.
4. Курдюмов Г. В. Явления закалки и отпуска. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 64 с.
5. Бокштейн С. З. Структура и механические свойства легированной стали. – М.: Metallurgizdat, 1954. 279 с.
6. Специальные стали в 2-х т. Т. 1 / Э. Гудремон; под ред. А. С. Займовского, М. Л. Бернштейна; пер. с нем. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 952 с.
7. Меськин В. С. Основы легирования стали. – М.: Metallurgizdat, 1959. – 688с.
8. Спектор Я. И., Саррак В. И., Энтин Р. И. Склонность стали к хрупкому разрушению и тонкая структура стали // Физика металлов и металловедение. – 1964. – Т. 18, № 6. – С. 915-920.
9. Лысак Л. И., Николин Б. И. Физические основы термической обработки стали. – К.: Техника, 1975. – 304 с.
10. Касилов А. Н., Касилов О. А. Зависимость физических структурно-чувствительных свойств и твердости легированных сталей от состава и режима термической обработки // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. – Т. 9, № 2. – С. 171-182.

11. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Сидорчук О. М., Лук'янчук В. В. Технологія виготовлення штампової сталі 40ХЗН5МЗФ 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.
12. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Карпець М. В., Пятачук С. Г. Структура та властивості загартованої сталі 40ХЗН5МЗФ, одержаної електрошлаковим перетопленням за високих температур / / Металофізика та новітні технології. – 2015. – Т. 37, № 12. – С. 1653-1661.
13. 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.
14. Гогаєв К. О., Сидорчук О. М., Радченко О. К., Лук'янчук В. В., Орел Г. Г. Дослідження режимів термічної обробки штампової сталі 4ХЗН5МЗФ / / 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.
15. Гогаєв К. О., Ласконов 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.
16. Сидорчук О. М. Фазово-структурний стан сталі 40ХЗН5МЗФ в процесі пере-кристалізації / / 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.
17. 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.
18. Патент № 94746 Україна, МПК С21 / D8 / 00. Спосіб термічної обробки сталі для гарячого пресування / О. М. Сидорчук, О. К. Радченко, В. В. Лук'янчук, К. О. Гогаєв. – № u201407076; заявл. 23.06.2014; опубл. 25.11.2014. – Бюл. № 22 / 2014, 4 с.
19. Панченко Е. В. Скаков Ю. А., Кример Б. И., Арсентьев П. П., Попов К. В., Цвилинг М. Я. Лаборатория металлографии. – М.: Металлургия, 1965. – 440 с.
20. 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.
21. Кучерявый В. И., Арзамасов Б. Н., Брострем В. А. Штамповые стали для горячего деформирования. Конструкционные материалы: справочник. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
22. Позняк Л. А. Инструментальные стали. – К.: Наук. Думка, 1996. – 488 с.

References

1. Kurdiumov G. V., Utevskiy L. M., Entin R. I. *Prevrashcheniia v zheleze i stali* (The transformation in iron and steel), Moscow, Nauka, 1977, 236 p. [in Russian].

2. Zavialov A. S. K teorii legirovaniia i termicheskoi obrabotki stali (To the theory of alloying and heat treatment of steel), NKTP-SSSR TsNII, 1943, 132 p. [in Russian].
3. Gudtsov N. T. (Eds.). D. K. *Chernov i nauka o metallah* (D. K. Chernov and the science of metals), Moscow, Metallurgizdat, 1950, 563 p. [in Russian].
4. Kurdiumov G. V. *Yavleniia zakalki i otpuska* (Hardening and tempering phenomena), Moscow, Metallurgizdat, 1960, 64 p. [in Russian].
5. Bokshstein S. Z. *Struktura i mehanicheskie svoistva legirovannoi stali* (The structure and mechanical properties of alloy steel), Moscow, Metallurgizdat, 1954, 279 p. [in Russian].
6. Hudremont E., Zaimovskiy A. S., Bernshtein M. L. (Eds.). *Spetsialnyie stali* (Special steels), Trans from Ger, Moscow, Metallurgizdat, 1959, 952 p. [in Russian].
7. Meskin, V. S. *Osnovy legirovaniia stali* (The steel alloying basics), Moscow, Metallurgizdat, 1959, 688p. [in Russian].
8. Spektor Ya. I., Sarraf V. I., Entin R. I. *Fizika metallov I metallovedeniie*, 1964, Vol.18, No. 6, pp. 915-920 [in Russian].
9. Lysak L. I., Nikolin B. I. *Fizicheskie osnovy termicheskoi obrabotki stali* (Physical fundamentals of heat treatment of steel), Kyiv, Tekhnika, 1975, 304 p. [in Russian].
10. Kasylov A. N., Kasylov O. A. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavkoi morskoi akademii*, 2013, Vol. 9, No. 2, pp. 171-182 [in Russian].
11. Hohaiev K. O., Radchenko O. K., Sydorchuk O. M., Lukianchuk V. V. *Tekhnolohiia vyhotovlennia shtampovoi stali 40KH3N5M3F dlia hariachoho deformuvannia, Tsilova kompleksna prohrama NAN Ukrainy «Problemy resursu i bezpeky ekspluatatsii konstruktiv, sporud ta mashyn» Instytut elektrozvaruvannia 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].
12. Hohaiev K.O., Sydorchuk 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].
13. Hohaiev K. O., Sydorchuk O. M., Radchenko O. K. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2016, No. 3, pp. 18-24 [in Ukrainian].
14. 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 tekhnohii poroshkovykh materialiv"*, 2016, Vol. 25, pp. 105-108 [in Ukrainian].
15. 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].
16. Sydorchuk O. M., *Suchasni problem fizychnoho materialoznavstva. Pratsi instytutu problem materialoznavstva im. I. M. Frantsevycha NAN Ukrainy. Seriya "Fizyko-himichni osnovy tekhnohii poroshkovykh materialiv"* Kyiv, 2013, Vol 22, pp. 186-188 [in Ukrainian].
17. Hohaiev K. O., Sydorchuk O. M., Radchenko O. K., Mamonova A. A., *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, 2014, No. 1, pp. 40-44 [in Ukrainian].
18. Patent No. 94746 Ukraine. MPK C21 / D8 / 00. *Sposib termichnoyi obrobky stali dlia haryachoho presuvannia* [Method for heat treatment of hot pressing

- steel], Hohaiev K. O., Sydorchuk 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].
19. 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].
20. 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].
21. Kucheriavyi, V. I., Arzamasov, B. N., Brostrem, V. A. *Shtampovye stali dlia goriachego deformirovaniia. Konstruktsionnyie materialy: spravochnik* (Die steel for hot deformation. Construction materials: Handbook), Moscow, Mashinostroeniie, 1990, 688p. [in Russian].
22. Pozniak, L. A. *Instrumental'nye stali* (Instrument steels), Kiev: Naukova Dumka, 1996, 488p. [in Ukrainian].

Одержано 24.04.20

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

Heat treatment of the increased stability die steel

Summary

In the work, the heat treatment conditions of 4H4N5M4F2 die steel for hot deformation are investigated. The physico-mechanical properties of the investigated ingot steel were determined after quenching $1100 \pm 5^\circ\text{C}$ and tempering. Given the importance of cooling regimes after tempering, various cooling regimes (in oil, in a furnace, in air) were investigated. Physical-mechanical properties of cast steel 4X4H5M4F2 after tempering at $550 \pm 5^\circ\text{C}$ and $600 \pm 5^\circ\text{C}$ were determined. The optimal tempering regime for steel at $550 \pm 5^\circ\text{C}$ with air cooling was established: the ultimate strength of 1860 MPa and the yield strength of 1760 MPa. The optimal tempering regime for steel at $600 \pm 5^\circ\text{C}$ with air cooling has been established: the ultimate strength is 1600 MPa, the yield strength is 1500 MPa, and the heat resistance is 48.5 HRC. It was established that twofold hardening and tempering of steel at $600 \pm 5^\circ\text{C}$ temperature with oil cooling leads to an increase in its fracture toughness (75 J/cm^2) compared with the fracture toughness after air cooling (30 J/cm^2). It is established that the temperature range of tempering brittleness of the studied steel is $465 - 495^\circ\text{C}$. The optimized temperature regime of tempering of the investigated steel ($590 \pm 5^\circ\text{C}$) made it possible to increase the impact strength by a factor of two (up to 30 J/cm^2) in the temperature range $465 - 495^\circ\text{C}$. A pilot test of the punch tool made from the investigated steel was carried out. During hot pressing of the AK7ch aluminum alloy, the life of the dies was at the level of forged steel 4Kh5MF1S with a nitrided surface layer, which was used at the factory. After the operation of both matrices (hot deformation), samples were cut and tested for hardness and toughness. The latter turned out to be higher for the forged steel, however, the service life of the matrices from both steels was at the same level.

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