

Низьковуглецеві сталі для інструменту гарячої деформації металу (огляд)

С. В. Бобирь, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, svboby07@gmail.com

Г. В. Левченко, доктор технічних наук, професор, завідувач лабораторією, isi@ukr.net

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро

Наведено результати досліджень, що підтверджують доцільність застосування низьковуглецевих сталей для виготовлення інструменту гарячої деформації металу. Ці сталі мають високу термостійкість в умовах термоциклування з різким охолодженням. Вибір легування сталі залежить від типу інструменту та його умов роботи. Розроблені режими термічної обробки дозволяють значно підвищити стійкість інструменту з низьковуглецевих легованих сталей в робочих умовах.

Ключові слова: *сталь, твердість, термічна обробка, стійкість, легування, гаряча деформація.*

Проблема стійкості формоутворюючого оснащення гарячого деформування є комплексним і багатоплановим завданням. Вирішення цієї проблеми вимагає синтезу металургійних, технологічних, конструктивних і експлуатаційних розробок.

Інструмент гарячої деформації, що працює за підвищених температур в умовах змінного багаторазового нагрівання і охолодження робочого шару, динамічних навантажень, часто виходить з ладу через утворення і розвиток термічних тріщин. Сталі для його виготовлення повинні мати високу теплостійкість, твердість, достатню в'язкість і стійкість щодо розгару [1]. Зазвичай для штамів гарячого деформування застосовуються леговані сталі типу 3Х2В8Ф, 4ХВ2С, 4Х5В2ФС, 5ХНМ, 6ХВГ тощо [2, 3]. Однак їх використання не завжди забезпечує високу стійкість інструменту гарячої деформації. Відомо, що в умовах гарячої деформації з наступним інтенсивним охолодженням набагато більшу стійкість проти розгару мають сталі зі зниженим вмістом вуглецю [1].

Актуальним завданням є розробка хімічного складу низьковуглецевих сталей для виготовлення інструменту гарячої деформації металу і режимів їх термічної обробки з метою забезпечення підвищеного рівня стійкості при заданому рівні твердості.

Низьколеговані штампові сталі для гарячої деформації

На ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» для виготовлення штамів раніше застосовувалася сталь 30, що забезпечувала стійкість пресового інструменту 10000 т пресу 300 – 400 шт.

Встановлено [4, 5], що застосування сталей 20ХФ і 15ХСТ для виготовлення штампів гарячого деформування в умовах наступного інтенсивного охолодження сприяє підвищенню стійкості і є економічно доцільним.

Методами регресійного аналізу встановлено зв'язок між вмістом легуючих елементів, твердістю і стійкістю штампів з низьколегованих сталей, випробуваних в промислових умовах (20 складів сталей 30, 20ХФ і 15ХСТ) [5]. Коефіцієнти множинної кореляції при цьому склали $R = 0,95$ і $R = 0,94$ для твердості і стійкості відповідно:

$$\text{Твердість, НВ} = 93,9 + 239,5C + 71,4Si + 19,6Ni + 266,8V - 357,8Ti, \quad (1)$$

$$\text{Стійкість (шт.)} = 450,4 - 101,0C - 114,8Si + 129,3Mn + 416,2Cr + 36,1Ni - 312,6V + 410,2Ti. \quad (2)$$

Результати експериментів показали, що сталі з високою твердістю мають знижену стійкість. Отже, сталі для роботи в умовах інтенсивного охолодження повинні мати знижений вміст вуглецю і відносно невисоку твердість (~ 160 НВ) [4, 5].

Виконані дослідження дозволили виявити позитивний вплив малих добавок хрому і титану на стійкість штампів [5 – 7]. Оскільки титан позитивно впливає на стійкість сталі, він додатково був введений до складу сталі 20ХФА. У сталі 15ХСТ збільшено вміст хрому і титану, що також позитивно впливає на стійкість штампового інструменту. Рекомендований хімічний склад низьколегованих сталей для виготовлення штампів гарячого деформування наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Рекомендований хімічний склад низьколегованих сталей для виготовлення штампів гарячого деформування

Марка сталі	Вміст елементів, % мас.								
	C	Mn	Si	Cr	V	Al	Ni	Cu	Ti
20ХФА	0,13- 0,17	0,45- 0,65	0,17- 0,37	0,50- 0,70	0,04- 0,07	0,02- 0,04	≤0,20	≤0,20	0,010- 0,030
15ХСТ	0,12- 0,17	0,50- 0,80	0,30- 0,50	0,65- 0,85	-	0,02- 0,05	≤0,30	≤0,30	0,015- 0,040

Було встановлено, що мікроструктура низьколегованих сталей із середнім розміром зерен фериту в поверхневих шарах порядку 40,0 – 50,0 мкм є оптимальною для забезпечення підвищеної стійкості штампів гарячого деформування. Це досягається шляхом нормалізації заготовок штампів з подальшим відпуском [8, 9]. Резервом для підвищення якості цих сталей може бути вдосконалення режимів позапічної обробки і оптимізація їх хімічного складу [10].

В результаті проведених заходів по підвищенню стійкості пропонованих сталей 20ХФА і 15ХСТ (вакуумування сталі, модифікування

Сталь

силікокальцієм і мікролегування титаном) вони набули більш високих механічних властивостей і стійкості порівняно зі сталлю 20ХФ (таблиця 2).

Таблиця 2

Механічні властивості і стійкість зразків штампів преса 10000 т з низьковуглецевих сталей

Сталь	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ , %	ψ , %	Твердість, НВ	КСУ, Дж/см ²	Стійкість, шт.
20ХФ	300	465	13	24	140	77	550
20ХФА	260	480	27	55	155	110	740
15ХСТ	375	495	30	72	150	83	750

Низьковуглецеві леговані сталі для інструменту гарячої деформації металу

Раніше на ПАТ «Інтерпайп НТЗ», для виготовлення голівок преспуансону преса 2000 т застосовувалися леговані сталі 3ХВ2С і 25Х2М1Ф за ГОСТ 4543. Значно вищу стійкість в умовах гарячої деформації з наступним інтенсивним охолодженням мають хромисті сталі зі зниженим вмістом вуглецю і мікролеговані ванадієм і титаном [11].

Встановлено, що твердість таких сталей в литому стані корелює з параметром щільності дендритної структури. Сталь 15Х5М, мікролегована титаном, має високу щільність дендритної структури і твердість більшу, ніж у сталі 25Х2М1Ф [11]. На базі даної системи легування запропоновано нову марку сталі для інструменту гарячої деформації – 12Х5МА.

На відміну від базової сталі 15Х5М, ця сталь допускає підвищений вміст таких елементів, як ванадій і титан і більш широкі межі легування по хрому. На основі сталі 15Х5М, розроблено також сталь з підвищеним вмістом вуглецю і ванадію 17Х5МА. Збільшення вмісту вуглецю і ванадію у складі цієї сталі сприяє підвищенню її жароміцності порівняно зі сталлю 12Х5МА, при деякому зниженні термостійкості.

Сталі розробленого складу були випробувані на ПАТ «Інтерпайп НТЗ» для виготовлення інструменту гарячої деформації – голівок преспуансону пресу 2000 т і оправок преса 10000 т. Встановлено, що для виготовлення оправок пресу 10000 т більш придатною є сталь 12Х5МА, яка має найбільшу стійкість в умовах термоцикування з інтенсивним охолодженням водою і помірних силових навантаженнях. Для виготовлення головок преспуансона пресу 2000 т кращі показники має сталь 17Х5МА, яка є більш жароміцною. Виявлено, що інструмент гарячої деформації з розроблених сталей має властивості не нижче властивостей інструменту, виготовленого зі сталі 25Х2М1Ф (таблиця 3).

Стійкість інструменту гарячої деформації зі сталі 17Х5МА, визначена на голівках преспуансону преса 2000 т, перевищувала стійкість інструменту зі сталі 25Х2М1Ф на 65 %.

Для підвищення довговічності деталей, що зазнають вплив циклічних теплових навантажень (оправок преса 10000 т і деталей преспуансону преса

Таблиця 3

Порівняльні властивості сталей

Сталь	Межа плинності, МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Стійкість, шт.
25X2M1Ф	960	25	443
12X5МА	1100	81	589
17X5МА	1210	65	730

2000 т), великого значення набуває вибір режиму термічної обробки [12 – 15].

Базовий режим термічної обробки інструменту з легованих сталей передбачав нагрівання і значну витримку (4 год) за умов високої температури (понад 960 °С), що суттєво підвищувало його вартість (рис. 1)

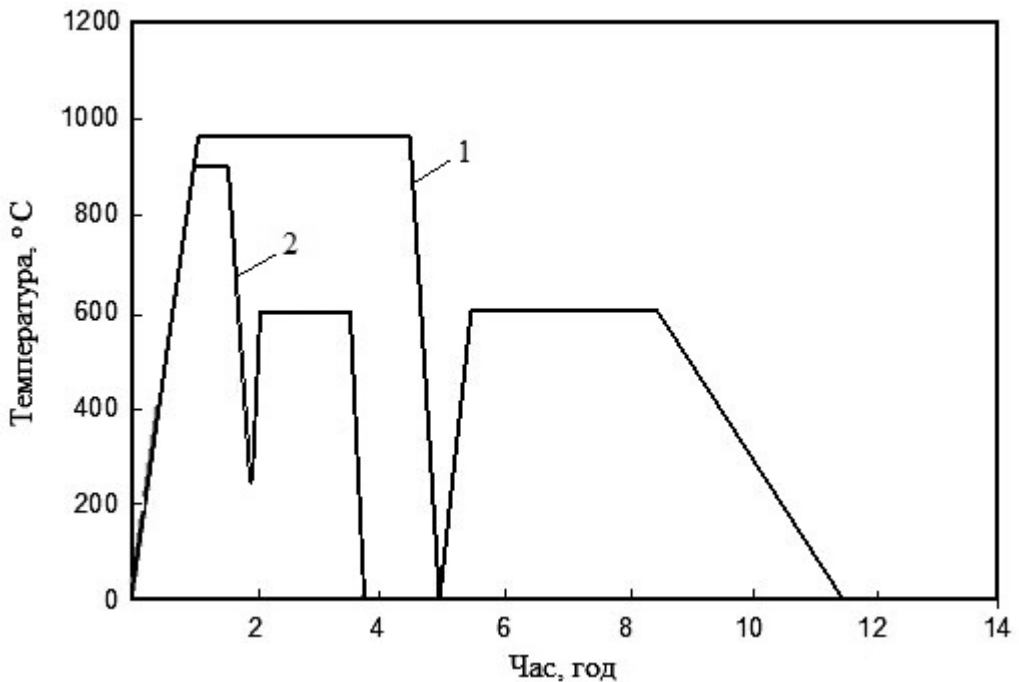


Рис. 1. Схеми базового (1) і нового (2) режимів термічної обробки.

В результаті тривалого високого відпуску при 600 °С відбувалося окрихчування сталі 17X5МА через виділення вторинних фаз по границям зерен (рис. 2 а) і зниження її стійкості. Це свідчить про необхідність скоротити тривалість відпуску при забезпеченні необхідної твердості голівок 280 – 320 НВ [12].

Новий ефективний режим термічної обробки зумовив значне скорочення тривалості технологічного процесу і енергоносіїв порівняно із стандартним режимом тривалої термічної обробки (рис. 1) [12, 15].

Було також визначено параметри термічної обробки голівок преспуансону залежно від їхньої маси та розміру, розроблено рекомендації заводу-виробнику [14, 15]. Середня стійкість головок преспуансону,

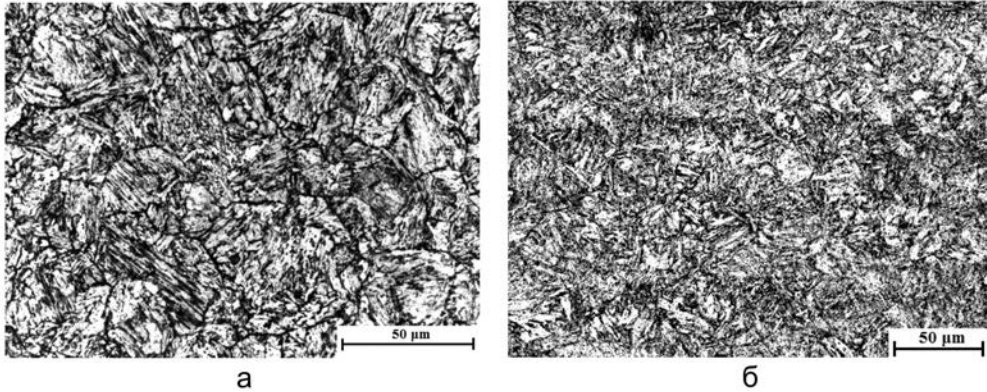


Рис. 2. Структура оправок зі сталі 17Х5МА, термічно оброблених за базовим (а) та новим (б) режимами.

термооброблених за новим режимом, становила 563 шт., тобто майже в 2,5 рази перевищувала їх стійкість при термічній обробці за базовим режимом – 229 шт.

Леговані сталі для прошивних оправок трубопрокатного стану

Для виготовлення прошивних оправок трубопрокатного стану широко застосовується сталь 20ХН4ФА за ГОСТ 4543. Встановлено, що міцність і стійкість прошивних оправок визначається не гартівними структурами, а структурами відпуску і наявністю дисперсних карбідів в їх структурі. Це зумовлює необхідність застосування для їх виготовлення нових матеріалів і режимів термічної обробки [16].

Базовий режим термічної обробки, а саме окислювальний відпал інструменту з цієї сталі, включав нагрів і витримку при високій температурі – понад 960 °С. В результаті тривалого високого відпалу відбувалося утворення значної кількості крихкої жаровини на поверхні оправки. Мікроструктура оправок з цієї сталі зі зниженою стійкістю характеризується значною неоднорідністю і грубими виділеннями фериту (рис. 3 а).

При розробці ефективного режиму термічної обробки оправок було введено додаткову операцію відпуску при 550 °С. Це дозволило скоротити час перебування оправок при температурі відпалу 960 °С з 4,0 годин до

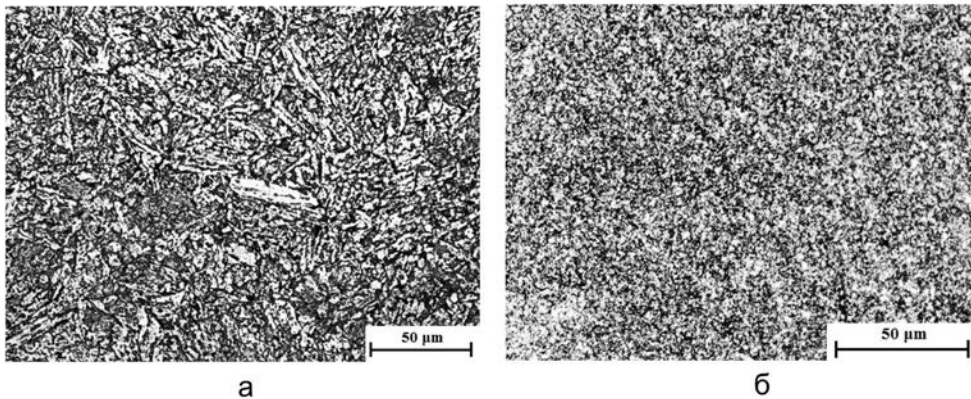


Рис. 3. Мікроструктура оправок зі сталі 20ХН4ФА зі стійкістю 25 (а), і 320 (б) проходів.

1,5 години. Стійкість оправок визначали при прошивці довгої трубної заготовки зі сталей 20, 35, 45, 40X і 17Г2Ф. Новий режим термічної обробки забезпечив підвищення стійкості оправок зі сталі 20ХН4ФА на 95 % (198 проходів) порівняно із середнім значенням стійкості по базовим оправками діаметром 64 мм (102 проходи). Структура відпрацьованої оправки підвищеної стійкості складалася з однорідної ферито-карбідної суміші з великою кількістю дисперсних карбідів, що визначають її підвищені властивості при високій температурі (рис. 3 б).

Встановлено також, що сталь 25Х2М1Ф має більш високий рівень міцності при підвищеній температурі ніж сталь 20ХН4ФА і значить, може служити більш ефективним матеріалом для виготовлення прошивних оправок трубопрокатного стану [16]. Твердість і стійкість оправок зі сталі 25Х2М1Ф в цілому була вищою за твердість і стійкість оправок зі сталі 20ХН4ФА, що пов'язано з її легуванням молібденом і ванадієм і виділенням карбідів ванадію в процесі відпуску сталі.

Мікроструктура оправки зі сталі 25Х2М1Ф, обробленої за новим режимом, була більш дисперсною і однорідною, ніж обробленої за базовим режимом (рис. 4).

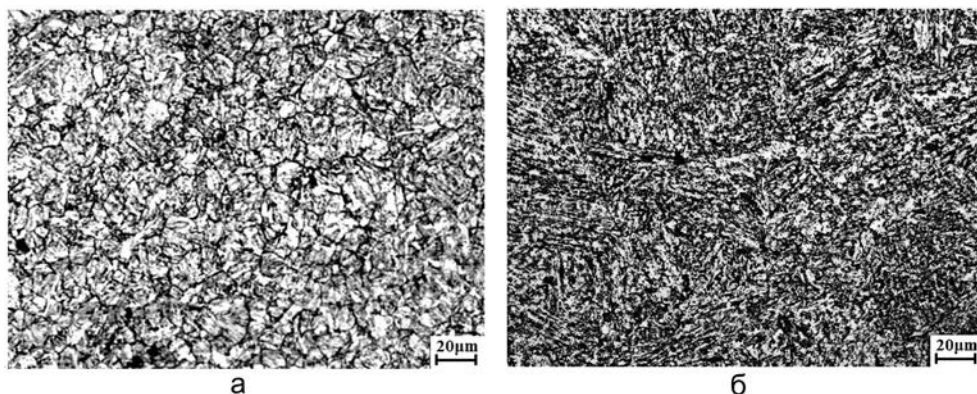


Рис. 4. Мікроструктура оправок зі сталі 25Х2М1Ф, оброблених за базовим (а) і новим (б) режимом термічної обробки.

Застосування сталі 25Х2М1Ф і нового режиму термічної обробки забезпечило підвищення стійкості оправок на 116 % (220 проходів).

Таким чином, наведені в огляді результати досліджень, підтверджують доцільність застосування низьковуглецевих сталей для виготовлення інструменту гарячої деформації металу. Ці сталі мають високу термостійкість в умовах термоцикування з різким охолодженням водою. Вибір легування сталі залежить від типу інструменту та його умов його експлуатації. Розроблені режими термічної обробки дозволяють суттєво підвищити стійкість сталей в робочих умовах.

Література

1. Тылкин М.А., Васильев Д.И., Рогалев А.М. Штампы для горячего деформирования металлов. – М.: Высшая школа, 1977. – 496 с.

2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
3. Гогаєв К.О., Сидорчук О.М., Радченко О.К. Інструментальні штампові сталі для гарячого деформування (огляд) // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів», 2016. – № 3 – С. 18 – 24.
4. Левченко Г.В., Бобырь С.В., Дёмина Е.Г. Влияние микролегирования на структуру и термодинамическую стойкость низколегированных штамповых сталей // МтОМ: Наук. та інф. Бюл. ПДАБГА. – № 1. – 2008. – С. 51 – 57.
5. Бобырь С.В., Левченко Г.В., Дёмина Е.Г., Плюта В.Л. Перспективы применения низкоуглеродистых микролегированных сталей для изготовления штампов горячего деформирования // Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології»: тези доповіді, 6 – 8 червня 2012 р., – Маріуполь, 2012. – С. 60 – 62.
6. Левченко Г.В., Бобырь С.В., Дёмина Е.Г. Влияние комплексного легирования на структуру и стойкость низколегированных штамповых сталей // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2010. – Вип. 22. – С. 213 – 220.
7. Левченко Г. В., Бобырь С. В., Дёмина Е. Г. Оптимизация химического состава и микролегирования низкоуглеродистых сталей для изготовления штампов горячего деформирования // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні, 2012, – № 1. – Вип. 13. – С. 160 – 167.
8. Бобырь С. В., Дёмина Е. Г., Липатов И. Ю. Влияние термической обработки на структуру и свойства низколегированных штамповых сталей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2012. – № 4. – С. 69 – 73.
9. Бобырь С.В., Левченко Г.В., Дёмина Е.Г. Особенности фазово-структурных превращений при отпуске низколегированных сталей для штампов горячего деформирования // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2012. – Вип. 26. – С. 209 – 217.
10. Бобырь С. В., Дёмина Е. Г., Беседнов С. В., Стрижко О. Д. Влияние химического состава, твёрдости и типа поверхностных дефектов на стойкость штампов пресса 10000 тонн из низколегированных сталей // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 1. – С. 65 – 69.
11. Бобырь С.В., Левченко Г.В., Нефедьева Е.Е., Плюта В.Л. Применение низкоуглеродистых хромистых сталей для изготовления инструмента горячей деформации // Міжнародна науково-практична конференція «Матеріали і покриття в екстремальних умовах: дослідження, застосування, екологічно чисті технології виробництва і утилізації виробів»: тези доповідей, 22 – 26 вересня 2014 р. – Київ, 2014. – С. 29.
12. Бобырь С.В., Плюта В.Л., Дёмина Е.Г., Нефедьева Е.Е. Разработка и внедрение энергосберегающего режима термической обработки оправок пресса 10000 тонн // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2014. – Вип. 28. – С. 241 – 246.
13. Бобырь С.В., Нефедьева Е.Е., Евсюков М.Ф. Особенности фазово-структурных превращений при охлаждении хромистых сталей для инструмента горячей деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2014. – Вип. 29. – С. 221 – 228.
14. Бобырь С.В., Нефедьева Е.Е., Лошкарев Д.В. Моделирование и оптимизация процесса отпуска стали 17Х5МА для инструмента горячей деформации // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2015. – Вип. 30. – С. 324 – 331.

15. Бобырь С.В., Левченко Г.В., Дёмина Е.Г. Разработка эффективного режима термической обработки инструмента горячей деформации из стали 17Х5МА // Международная научно-техническая конференция «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии»: тезисы докладов, 26 – 27 апреля 2018 г., Могилев, – С. 22 – 23.
16. Бобырь С.В., Левченко Г.В., Богдан Д.А., Донской И.В. Повышение стойкости прошивных оправок трубопрокатного стана // XVI Всеукраїнська науково-практична конференція «спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра»: тези доповіді, 17 квітня 2018 р. – Київ, 2018. – С. 369 – 373.

References

1. Tyilkin M.A., Vasilev D.I., Rogalev A.M. *Shtampyi dlya goryachego deformirovaniya metallov* (Stamps for hot deformation of metals), Moskva: Vysshaya shkola, 1977, 496 p. [in Russian].
2. Geller Yu.A. *Instrumentalnye stali* (Tool steel). – Moskva: Metallurgiya, 1975, 584 p. [in Russian].
3. Gogaev K.O., Sidorchuk O.M., Radchenko O.K., *Naukovo-tekhnichnyy zhurnal «Metaloznavstvo ta obrobka metaliv»*, 2016, No 3, pp. 18 – 24 [in Ukrainian].
4. Levchenko G.V., Bobyir S.V., Dyomina E.G., *MtOM: Nauk. ta Inf. Byul. PDABtA*, No 1, 2008, pp. 51–57 [in Russian].
5. Bobyir S.V., Levchenko G.V., Dyomina E.G., Plyuta V.L., *Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Innovatsiyini resursozberezhni materialy ta zmitsnyuvalni tekhnolohiyi»* (Internationally practical scientific conference “Innovative Resource-saving Materials and Main Technology”), Abstract of Papers, June 6-8, 2012, Mariupol, 2012, pp. 60 – 62 [in Russian].
6. Levchenko G.V., Bobyir S.V., Dyomina E.G., *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii: Sbornik nauchnykh trudov* (Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of scientific papers), Dni propetrovsk: IChM NANU, 2010, Issue. 22, pp. 213 – 220 [in Russian].
7. Levchenko H.V., Bobyir S.V., Dyomina E.H., *Resursozberihayuchi tekhnolohiyi vyrobnytstva ta obrobka leshchata*, 2012, No 1, Vol. 13, pp. 160 – 167 [in Russian].
8. Bobyir S.V., Dyomina E.G., Lipatov I.Yu., *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 2012, No 4, pp. 69 – 73 [in Russian].
9. Bobyir S.V., Levchenko G.V., Dyomina E.G., *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii: Sbornik nauchnykh trudov* (Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, Collection of scientific papers), Dni propetrovsk: IChM NANU, 2012, Issue. 26, pp. 206 – 217 [in Russian].
10. Bobyir S.V., Dyomina E.G., Besednov S.V., Strizhko O.D. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 2014, No 1, pp. 65 – 69 [in Russian].
11. Bobyir S.V., Levchenko G.V., Nefedeva E.E., Plyuta V.L., *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Materialy i pokrytiya v ekstremalnykh usloviyakh: issledovaniya, primeneniye, ekologicheski chistyie tekhnologii proizvodstva i utilizatsii izdeliy»* (International scientific and practical conference “Materials and coatings in extreme conditions: research, application, ecologically clean technologies of production and utilization of products”), Abstracts of Papers, September 22-26, 2014, Kyiv, 2014, pp. 29 [in Russian].
12. Bobyir S.V., Plyuta V.L., Demina E.G., Nefedeva E.E., *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii, Sbornik nauchnykh trudov* (Fundamental

- and applied problems of ferrous metallurgy, Collection of scientific papers), Dni propetrovsk: IChM NANU, 2014, Issue. 28, pp. 241 – 246 [in Russian].
13. Bobyir S.V., Nefedeva E.E., Evsyukov M.F., *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii, Sbornik nauchnykh trudov* (Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, Collection of scientific papers), Dni propetrovsk: IChM NANU, 2014, Issue. 29, pp. 221 – 228 [in Russian].
14. Bobyir S.V., Nefedeva E.E., Loshkarev D.V., *Fundamentalnyie i prikladnyie problemyi chernoy metallurgii, Sbornik nauchnykh trudov* (Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Collection of scientific papers), Dni propetrovsk: IChM NANU, 2015, Issue. 30, pp. 324 – 331 [in Russian].
15. Bobyr S.V., Levchenko G.V., Demina E.G. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Materialy, oborudovaniye i resursosberegayushchiye tekhnologii»* (International Scientific and Technical Conference “Materials, equipment and resource-saving technologies”), Abstracts of Papers, April 26-27, 2018, Mogilyov, pp. 22 – 23 [in Russian].
16. Bobyr SV, Levchenko G.V., Bogdan D.A., Donskoy I.V., *XVI Vseukrayinska naukoivo-praktychna konferentsiya «spetsialna metalurhiya: vchora, sohodni, zavtra»* (XVI Ukrainian scientific and practical conference “Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow”), Abstracts of Papers, April 17, 2018, Kyiv, 2018, pp. 369 – 373 [in Russian].

Одержано 21.02.19

С. В. Бобырь, Г. В. Левченко

Низкоуглеродистые стали для инструмента горячей деформации металла (обзор)

Резюме

Приведены результаты исследований, подтверждающие целесообразность применения низкоуглеродистых сталей для изготовления инструмента горячей деформации металла. Эти стали обладают высокой термостойкостью в условиях термоциклирования с режимом охлаждением водой. Выбор легирования стали зависит от типа инструмента и его условий работы. Разработанные режимы термической обработки позволяют существенно повысить стойкость инструмента из низкоуглеродистых легированных сталей в рабочих условиях.

Ключевые слова: сталь, твердость, термическая обработка, стойкость, легирование, горячая деформация.

S. V. Bobyr, G. V. Levchenko

Low carbon steel for hot metal deformation tools (review)

Summary

The results of studies confirming the feasibility of using low-carbon steels for the manufacture of hot deformation tools of the metal are given. These steels have high heat resistance under thermal cycling conditions with water rapid cooling. The efficiency of alloying of steel depends on the type of tool and its working conditions. The developed heat treatment significantly increase the tool life of low-carbon alloyed steels under working conditions.

Keywords: steel, hardness, heat treatment, resistance, alloying, hot deformation.