М.Є. Нехаєв¹, канд. техн. наук, директор, e-mail: dpm@dneprofsmash.com

Т.В. Балаханова², канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2493-218X>

Г.В. Левченко², д-р техн. наук, проф., зав. лаб., <https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>

¹Науково-виробниче об'єднання «Дніпрофмаш» (Кам'янське, Україна)

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Досвід виробництва шестигранних труб для зберігання та транспортування відпрацьованого ядерного палива

На сьогодні відпрацьоване ядерне паливо транспортують і зберігають у спеціальних сховищах, основою яких є матриця з шестигранних труб зі сталі з вмістом бору 1,3–1,8 %. Основним матеріалом для виробництва цілісних шестигранних труб є сталь, легована бором ЧС82 (04Х14ТЗР1Ф). Однак коефіцієнт витрат металу, під час виробництва від трубної заготовки до готового шестикутника, становить понад 400 %. Це пов'язано з великою кількістю боридів в структурі сталі, тому вона має високу міцність і твердість, але низький рівень пластичності як при кімнатній, так і при підвищених температурах.

Нині в Україні практично відсутнє виробництво таких пеналів-труб, основна частина закуповується за кордоном. Тому в даній роботі випробувано кінцевий етап виробництва стелажів для зберігання ядерного палива – профілювання і калібрування на прокатному стані шестигранних труб зі сталі 04Х14ТЗР1Ф вітчизняного виробництва.

Встановлено, що в передільних гарячекатаних трубах кількість, розподіл і розмір боридів нерівномірні. Для поліпшення пластичних властивостей перед холодною деформацією труб, було проведено відпал бористої сталі. Проведення рекомендованого ТУ-14-3-1680 відпалу при 670 °С не призвело до видимої зміни структури, форма та розміри боридів залишилися в колишньому діапазоні. Загальний рівень механічних властивостей також залишився практично незмінним. Проведення відпалу при температурах 650–1000 °С в середньому по всіх зразках трохи підвищило пластичність, при цьому розкид значень виявився занадто високим. Дослідження властивостей труб за двома заготовками в межах однієї плавки показав, що зразки труб, що виготовлені з головної частини зливка, мають пластичні властивості значно вищі, ніж від донної. При цьому міцність зразків залишалася практично на одному рівні і від місця відбору металу не залежала.

Результати роботи дозволили визначити необхідні режими термообробки та успішно провести дослідну прокатку шестигранної труби 257х7 мм з круглої труби Ø 288х7 мм зі сталі 04Х14ТЗР1Ф на трубопрокатному стані 400 Науково-виробничого об'єднання «Дніпрофмаш» в чотирьохвалковому і двовалковому калібрах.

Ключові слова: шестигранні труби, профілювання, бориди, високохромиста сталь, механічні властивості.

На сьогодні на атомних електростанціях (АЕС) з ВВЭР-1000 конструкція стелажів басейнів витримки відпрацьованого палива являє собою дистанційовані між собою і розміщені в трикутній решітці з інтервалом 30 см шестигранні труби зі сталі з вмістом бору 1,3–1,8 %.

Шестигранні труби-заготовки є матрицею для надійної фіксації поглиначів нейтронів (ізотоп бору-10) і являють собою комбіновану «пастку» нейтронів, в якій відбувається уповільнення швидких нейтронів в зазорі між бористими трубами з подальшим їх поглинанням в безпосередній близькості від тепловідляючих збірок (ТВЗ).

Основним матеріалом для виробництва шестигранних труб є бориста сталь ЧС82 (04Х14ТЗР1Ф). Ця сталь отримала широке застосування в атомному машинобудуванні. При цьому до недавнього часу витратний коефіцієнт металу, від трубної заготовки до готового шестигранника, становив понад 400 %. Це пов'язано з великою кількістю боридів в структурі сталі – вона має високу міцність і твердість, але низький рівень пластичності як при кімнатній, так і при підвищених температурах [1, 2].

Для розв'язання проблеми витрати металу присвячено велику кількість зарубіжних досліджень гарячої деформації боровмісних сталей [3, 4]. Однак засто-

а

б

Рис. 1. Неоднорідність структури металу гарячекатаної труби по товщині, сталь ЧС82: а – зовнішня сторона; б – внутрішня сторона

сування цих рішень не дозволяє знизити витратний коефіцієнт нижче 3,403 [5].

Також були випробувані наступні технологічні рішення:

- використання заготовок, отриманих методами відцентрового лиття (з метою усунення свердління і прошивки заготовки) [6, 7];
- застосування порошкової металургії [8];
- використання біметалевих злитків [9, 10];
- використання нових сплавів (найбільш поширений сплав на основі гадолінію та алюмінію) [11–13];
- нові конструкції чохлів контейнера для транспортування та зберігання відпрацьованого ядерного палива (застосування листових заготовок замість прокату) або застосування труб з конструкційних сталей зі вставками нейтронно-захисного матеріалу [14, 15].

В даний час в Україні практично відсутнє виробництво чохлових труб, основна частина закуповується за кордоном. Так, наприклад, на Хмельницькій АЕС використовуються стелажі ущільненого зберігання палива (СУЗП) виробництва ПО «Іжорські заводи» і СУЗП виробництва концерну «Шкода».

Шестигранні труби-заготовки зі сталі з вмістом бору від 1,3 до 1,8 % для тепловідільних збірок (ТВЗ) використовуються з 90-х років [16]. Постійне вдосконалення паливних циклів і самих ТВЗ призводить до необхідності вдосконалення засобів обігу палива, в першу чергу СУЗП в басейнах витримки [17–20]. Тому, українським дослідникам слід йти не тільки шляхом пере-

гляду нормативної документації з метою зниження в ній «надлишково-консервативних вимог» за нормами безпеки [21], а й шукати можливості виробництва цієї відповідальної продукції вітчизняними виробниками. Враховуючи той факт, що і без того крихкі труби під дією нейтронного опромінення втрачають свою пластичність і додатково окрихчуються у зв'язку з утворенням радіаційних дефектів [22], слід шукати шляхи підвищення якості вихідної заготовки, враховуючи світовий досвід [23, 24]. В Україні раніше проводилися роботи з виробництва та обробки високобористих сталей, тому відродження виробництва сталі і прокату для атомної енергетики дозволить не тільки досягти імпортозаміщення дорогої продукції, але і налагодити роботу вітчизняних металургійних підприємств.

Метою даної роботи було випробування кінцевого етапу виробництва стелажів для зберігання ядерного палива, а саме профілювання і калібрування шестигранних труб на прокатному стані.

Матеріалом дослідження служили зразки гарячекатаних труб зі сталі ЧС82 (04X14ТЗР1Ф). Слід зазначити, що виплавка і подальше виробництво як вихідної кованої заготовки, так і гарячекатаних труб, відбувалося на вітчизняних підприємствах, і представлені сертифікати якості відповідають ISO 9001:2008.

У роботі досліджено 4 плавки (1 плавка = 1 злиток = 2 трубні заготовки), всього з яких прокатано 8 труб. Від кожної труби відібрано зразки для проведення

Хімічний склад досліджуваних зразків труб зі сталі ЧС82

Номер плавки	Хімічний склад, %мас.													
	C	Cr	Ti	B	Mn	Si	Ni	W	V	Mo	Cu	Al	S	P
1	0,03	14,57	3,25	1,8	0,12	0,24	0,1	0,08	0,23	0,02	0,05	0,39	0,003	0,008
2	0,03	14,54	3,25	1,8	0,12	0,22	0,1	0,08	0,23	0,02	0,05	0,37	0,004	0,008
3	0,03	14,33	3,06	1,55	0,11	0,25	0,1	0,08	0,24	0,02	0,05	0,44	0,004	0,006
4	0,03	14,26	3,05	1,65	0,11	0,18	0,1	0,08	0,23	0,02	0,05	0,43	0,004	0,006

а

б

Рис. 2. Мікроструктура зразка гарячекатаної труби зі сталі ЧС82, центральна частина: а – вихідний стан, косопадаюче світло; б – після проведення відпалу при 670 °С, витримка 90 хв.

досліджень як мікроструктури, так і механічних властивостей після різних режимів термічної обробки. Хімічний склад сталі представлено в таблиці.

Методами металографічного аналізу визначали розподіл, тип і вміст боридів у заготовках.

Мікроструктура представлених для аналізу гарячекатаних труб складається з великих і дрібних боридів різної форми, нерівномірно розподілених у феритній матриці. Встановлено, що кількість, розподіл і розмір боридів навіть у межах одного зразка не однакові (рис. 1). Така неоднорідність щодо фазового складу може суттєво вплинути на функціональні властивості сталі [25].

Бори́ди мають сферичну форму, їх розмір лежить в широких межах (від 2,5 до 45 мкм), середній розмір становить 5,0 мкм. Морфологічні ознаки вказують на переважний вміст $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$, бори́ди титану (включення, близькі за формою до шестикутника) спостерігаються в значно меншій кількості.

Груба будова боридної складової вказує на можливий перегрів металу на початкових етапах обробки. Феритна матриця сильно фрагментована, можливо, в результаті дисперсійного твердіння (рис. 2, а).

Для поліпшення пластичних властивостей був проведений відпал, рекомендований ТУ-14-3-1680 перед холодною деформацією труб з бористої сталі. Про-

ведення відпалу повинно сприяти зняттю внутрішніх напружень і підвищенню технологічності заготовки.

Відпал зроблений при температурі 670 °С з різним часом витримки (30, 60 і 90 хв.). Результати аналізу показали, що зміни структури не відбулося, форма, розміри боридів залишилися в колишньому діапазоні, середній розмір також не змінився, проте при максимальному часі витримки дещо знижується фрагментованість феритної матриці, що проявляється в зниженні кількості ямок травлення і загального забарвлення, малюнок травлення фериту стає вкрай нерівномірним (рис. 2, б).

Оскільки змін механічних властивостей до потрібного рівня не відбулося, було прийнято рішення дослідити структуру і властивості сталі при різних температурах відпалу (від 650 до 1000 °С включно з інтервалом 50 °С). Після посадки зразків у методичну електричну піч та після досягнення певної температури, здійснювалася витримка зразків 1 год. 45 хв. і подальше охолодження разом з піччю.

Нагрів 1050 °С і вище визнали недоцільним, оскільки в роботах [26, 27] показано, що при нагріванні сталі вище 1150 °С можливе підплавлення, утворення евтектики, а також зміна складу і структури боридів і ймовірне перетворення $(\text{Ti}, \text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ у більш схильні до руйнування $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$, що спричиняє втра-

а

б

Рис. 3. Розкид значень границі міцності (а) і відносного подовження (б) при різних температурах відпалу зразків сталі ЧС82

Рис. 4. Значення границі міцності (а) та відносного подовження (б) зразків сталі 4C82 залежно від вихідної частини зливка: ■ – зразки труб з головної частини зливка; ■ – зразки труб з донної частини зливка; — – вимоги нормативної документації до якості гарячекатаних труб зі сталі 4C82

ту властивостей сталі і міжзеренне руйнування при подальшій деформації.

Існує й інше уявлення про вплив нагріву на структуру боридної сталі. Показано [28], що при нагріванні поверхня злитка насичується киснем з повітря, який проникає між зерен і знижує пластичність металу, що надалі призводить до його руйнування при деформації. При цьому інтенсивне окислення зовнішньої поверхні заготовки починається при досягненні температури металу понад 700 °C. У проведених мікродослідженнях наявність окислення в місцях руйнування часто сприймається як «перепал» металу при температурах 1050–1090 °C.

Проведений аналіз механічних властивостей термооброблених зразків досліджуваної сталі показав значний розкид значень. Статистично значущої залежності зміни механічних характеристик від температури нагріву не виявлено (рис. 3).

Зміни видимої мікроструктури також не відбулося.

Однак виявлено досить цікавий факт. Аналіз досліджень властивостей труб за двома зливками в межах однієї плавки показав, що зразки труб, що виготовлені з головної частини зливка (непарні), мають пластичні властивості вищі, ніж від донної. При цьому міцність зразків залишалася практично на одному рівні і від місця відбору металу не залежала (рис. 4).

Така залежність викликана, швидше за все, характером розподілу боридів і пов'язана з технологією виплавки та природою сталі, яка має в складі велику кількість бору. Бориди, які містяться в сталі, мають різну температуру плавлення (вища у боридів на основі залізо-титан) [29–31], крім цього бор має схильність до ліквідації за висотою зливка [32].

Додатково було проведено випробування на вигин. Від вихідних проб труб Ø 288×8-12 мм від кожної плавки відбирали по два поздовжніх зразки. Половина зразків зазнавала вигину без додаткової термообробки, а зразки другої групи – в нагрітому до температури 350 °C стані.

Значна частина холоднодеформованих зразків зазнала різкого руйнування, без появи видимих тріщин, що характеризує низьку технологічність і пластичні властивості металу. Руйнування зразків відбувалося

в результаті розтріскування крихких боридних включень з подальшим поширенням тріщини по міжфазних границях борид-матриця [29, 33].

При вигині нагрітих до температури 350 °C зразків, спостерігалось значне поліпшення технологічності металу (див. рис. 3). Руйнування зазнали тільки зразки з видимими поверхневими дефектами. При такій температурі, ймовірно, відбувається динамічна рекристалізація і моментальне зняття напружень деформації [34], які можуть призвести до руйнування.

Таким чином, підтверджено, що спосіб холодного перепрофілювання труб з низькопластичних сталей не є економічно обґрунтованим і слід йти шляхом підприємств, що застосовують спосіб теплового перепрофілювання [35, 36].

За результатами роботи було успішно проведено дослідну прокатку шестигранної труби Ø 257×7 мм з круглої труби Ø 288×7 мм зі сталі 4C82 на трубопрофільному стані 400 Науково-виробничого об'єднання «Дніпрофмаш» у чотирьохвалковому та двовалковому калібрах. Однак слід зазначити, що низькі пластичні властивості і наявність поверхневих дефектів вихідних гарячекатаних труб Ø 288×9-12 мм зі сталі 4C82 навіть після термообробки і видалення поверхневих дефектів до розміру Ø 287×6 мм призводять до низького виходу придатних труб при подальшому перепрофілюванні їх на профіль шестигранного перерізу.

Висновки

Попри велику кількість робіт, присвячених вивченню структуроутворення у високобористій сталі і його зміні під час виробництва шестиграних чохлових труб, наявні дані настільки суперечливі, що питання підвищення технологічності цієї сталі залишається відкритим і вимагає досконалого вивчення.

Проведено дослідну прокатку шестигранної труби 257×7 мм з круглої труби Ø 288×7 мм зі сталі 4C82 на трубопрофільному стані 400 Науково-виробничого об'єднання «Дніпрофмаш» у чотирьохвалковому та двовалковому калібрах. Шестиграний профіль центральної частини труб на довжині 4000–4300 мм

відповідає номінальним розмірам і допускам на зовнішні розміри шестигранної труби 257х6 мм.

На підставі результатів дослідної прокатки можна стверджувати, що зниження властивостей сталі пов'язано не тільки з якістю злитків, але і з режимами

гарячої деформації на етапах виробництва кованої заготовки і гарячекатаних труб.

ЛІТЕРАТУРА

1. Губенко С.И., Беспалько В.Н., Жиленкова Е.В., Синицына Ю.П. Влияние боридов на технологические свойства высокохромистой стали. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Стародубовские чтения*. 2011. № 58. С. 207–210.
2. Пятакова Л.Л., Виноградов В.Е., Пчелинцев В.А. Влияние бора на механические свойства и тонкую структуру среднеуглеродистой стали. *Металловедение и термическая обработка*. 1978. Т. 20. № 10. С. 848–850.
3. Пат. RU 2412770, МПК B21 C23/08 C21 D7/13. Способ изготовления трубной заготовки с однородной структурой / Ефимов В.М., Лебедев А.Г., Левков Л.Я., Свитенко И.А., Ульянов М.В., Корнеев А.Е., Гуденко А.С., № 2009134665/02; заявл. 17.09.2009; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6.
4. Пат. RU 2618687. Шестигранная труба-заготовка из стали с содержанием бора от 1,3 до 3,0 % и способ ее изготовления / Сафьянов А.В., № 2016110316; заявл. 22.03.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 13.
5. Никитин К.Н., Осадчий В.Я., Сафьянов А.В., Коликов А.П., Бубнов К.Э. Совершенствование технологии производства бесшовных шестигранных труб из борсодержащих сталей. *Черные металлы*. 2016. № 10. С. 39–43.
6. Лях А.П., Гладков Д.А., Сафьянов А.В., Маковецкий А.Н., Ананян В.В., Соловьев В.Н. Перспективы использования центробежнолитой заготовки для производства труб из труднодеформируемых сталей. *Труды XXII Международной научно-практической конференции. Сб. Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (Трубы–2016)*, 2016. С. 94–96.
7. Никитин К.Н., Осадчий В.Я. и др. Разработка технологии и производство опытных партий шестигранных труб-заготовок «под ключ» из центробежнолитых заготовок стали 04х14ТЗР1Ф (ЧС82) для узлов АЭС. *Сталь*. 2016. № 3. С. 24–31.
8. Чуканов А.П., Сафронов Б.В., Миняйло Б.Ф., Иванов С.И., Потапенко М.М., Глебов А.В. Исследования по технологии изготовления высокобористой аустенитной стали для элементов нейтронной защиты. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*. 2013. № 2. С. 67–80.
9. Комаров А.И., Никитин К.Н., Сафьянов А.В., Осадчий В.Я., Коликов А.П. Совершенствование технологии производства бесшовных биметаллических труб для трубопроводов атомных энергетических установок. *Черные металлы*. 2017. № 9. С. 68–73.
10. Пат. RU 2547363. Способ производства передельных труб размером 284×11 мм из сплошных слитков-заготовок для изготовления шестигранных труб-заготовок размером «под ключ» 252,6×5,0+1,5/–1,0×4300+80/–30 мм для уплотненного хранения и транспортировки отработанного ядерного топлива / Никитин К.Н., Федоров А.А., Сафьянов А.В., Тазетдинов В.И., № 2013154622/02; заявл. 09.12.2013; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10.
11. Косников Г.А. и др. Сплавы с повышенными нейтронно-поглощающими свойствами. *Литейщик России*. 2017. № 7. С. 6–10.
12. Пат. RU 2683168. Нейтронно-поглощающая сталь / Дегтярев А.Ф., Скоробогатых В.Н., Муханов Е.Л., Мирзоян Г.С., Орлов А.С., № 2018117930; заявл. от 15.05.2018; опубл. 26.03.2019, Бюл. № 9.
13. Пат. RU 2483132 C2. Сплав для поглощения тепловых нейтронов на основе титана / Сериков С.С., Сериков С.С., Попов В.С., Тулин А.Н., № 2011115599/02; заявл. 21.04.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. № 15.
14. Пат. RU 2686476. Чехол контейнера для транспортировки и хранения отработанного ядерного топлива / Капилевич А.Н., Шегельман И.Р., Богданов Д.М., Васильев А.С., № 2018120856; заявл. 05.06.2018; опубл. 29.04.2019, Бюл. № 13.
15. Хованов Н.Н. и др. Разработка актуальных деформационных технологий и инструментов для изготовления нейтронно-поглощающих чехловых шестигранных труб для хранения (утилизации) ОЯТ. *Технология легких сплавов*. 2017. № 4. С. 81–86.
16. Егоров М.Ю., Степашкина А.С. Хранение и транспортирование отработанного ядерного топлива *Сборник докладов Научной сессии ГУАП. Сб. Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем*. 2019. С. 96–99.
17. Пат. RU 2519064 C1. Коррозионностойкая легированная нейтронно-поглощающая сталь для изготовления шестигранных чехловых труб для уплотненного хранения в бассейнах выдержки и транспортировки ядерного топлива / Дубровский В.А., Ефанов В.Ю., Руссков Э.В., Русецкий В.С., Сафьянов А.В., Матюшин А.Ю., № 2013102758/02; заявл. 22.01.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл. № 16.
18. Пат. RU 2669261. Коррозионностойкий материал с повышенным содержанием бора / Чурюмов А.Ю., Поздняков А.В., № 2017136328; заявл. 16.10.2017; опубл. 09.10.2018, Бюл. № 28.
19. Брылева В.А., Войтецкая Е.Ф., Нарейко Л.М. Совершенствование средств обращения топлива реакторов ВВЭР. ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси. Инф. бюл. Атомная энергетика. 2011. № 8.
URL: http://sosny.bas-net.by/wp-content/uploads/2012/09/bul_2011_8 (дата звернення: 19.03.2020).

20. Осадчий А.И. Ядерная безопасность при хранении топлива в бассейнах выдержки на АЭС с ВВЭР-1000 – физические основы и конструктивные решения. *Атомная энергия*. 2011. Т. 110, Вып. 1. С. 3–6.
21. Кравец В.Ю., Сорока А.В. Анализ ядерной безопасности отработавшего топлива в бассейнах выдержки Хмельницкой атомной электростанции. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2013. № 3 (34). С. 83–89.
22. Козлов Д.В., Рисованый В.Д. Возможности применения бористых сталей в существующих и перспективных ядерных реакторах. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. № 14. С. 966–970.
23. Левков Л.Я., Киссельман М.А., Шурыгин Д.А., Орлов С.В., Гарченко А.А., Явтушенко П.М. Особенности процесса циклического электрошлакового переплава стали ЧС-82 (04Х14ТЗР1Ф). *Металлург*. 2018. № 2. С. 35–41.
24. Шурыгин Д.А., Левков Л.Я., Киссельман М.А., Терехин Д.К., Ульянов М.В., Матыцина Г.И., Клочай В.В., Корзун Е.Л. Новые технологические возможности эшп при производстве материалов для атомного машиностроения. *ПРОСТ 2018. Сборник трудов IX-ой Евразийской научно-практической конференции. Прочность неоднородных структур*, 2018. С. 168.
25. Солонин М.И., Иолтуховский А.Г., Бибилашвили Ю.К. и др. Проблемы создания и модификации нержавеющей сталей для деталей активных зон ядерных реакторов на быстрых нейтронах и термоядерного синтеза. *Физика и химия обработки материалов*. 2001. № 5. С. 5–13.
26. Чурюмов А.Ю., Хомутов М.Г., Поздняков А.В., Муханов Е.Л. Исследование структуры и механических свойств при высоких температурах стали с повышенным содержанием бора. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2014. № 6 (708). С. 53–55.
27. Беспалько В.Н., Губенко С.И., Жиленкова Е.В., Балева А.Е. Влияние боридных фаз на механические характеристики высокохромистой стали с бором, предназначенной для атомной энергетики. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 7. С. 243–246.
28. Губенко С.И., Беспалько В.Н. Трансформация боридных включений при производстве труб для атомной энергетики. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Стародубовские чтения*, 2018. С. 107–112.
29. Пат. RU 0002318623. Способ производства передельных труб из слитков эшп низкопластичных сталей с содержанием бора более 1,3 % / Головинов В.А., Ненахов С.В., Сафьянов А.В., № 219.016.fc3a; заявл. 10.03.2008; опубл. 04.04.2019. URL: <https://findpatent.ru/patent/231/2318623.html> (дата звернения: 15.05.2020).
30. Губенко С.И., Беспалько В.Н., Жиленкова Е.В. Влияние различных способов выплавки на качество трубных заготовок из высокохромистых сталей с бором. *Сучасні проблеми металургії. Пластична деформація металів. Теорія і виробництво труб. Сб. наук. праць НМетАУ*. Дніпропетровськ: НМетАУ. 2008. Т. 11. С. 78–83.
31. Губенко С.И., Беспалько В.Н., Жиленкова Е.В. Особенности пластического поведения боридных фаз при производстве труб для атомной энергетики. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2011. № 7. С. 70–74.
32. Хлебников С.В., Воронков А.А., Сафонов М.В., Тренкин В.А., Явшиц С.Г., Кузьмин В.В., Булкин С.В. Измерительный комплекс для контроля распределения бора в материале чехловых труб методами нейтронной радиографии. «Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина», 2011. Т. 15. URL: http://khlopin.ru/wp-content/uploads/2016/12/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B4%D1%8B-%D0%A0%D0%98_%D1%82%D0%BE%D0%BC-15.pdf (дата звернения: 19.03.2020).
33. Чурюмов А.Ю., Хомутов М.Г., Царьков А.А., Поздняков А.В., Солонин А.Н., Ефимов В.М., Муханов Е.Л. Исследование структуры и механических свойств при повышенных температурах коррозионностойкой стали с высоким содержанием бора. *Физика металлов и металловедение*. 2014. Т. 115. № 8. С. 862.
34. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. Москва: «МИСиС», 2005. 432 с.
35. Пат. RU 2541212 C2. Способ производства шестигранных труб-заготовок из низкопластичной стали с содержанием бора от 1,3 до 3,5 % / Дубровский В.А., Ефанов В.Ю., Руссков Э.В., Русецкий В.С., № 2013102757/02; заявл. 22.01.2013; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 4.
36. Кадач М.В., Гамин Ю.В., Солонин А.Н., Поздняков А.В. Профилирование трубы круглого сечения в шестигранную из стали с повышенным содержанием бора. *Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия*. 2014. № 57 (11). С. 11–14.

Надійшла 28.09.2020

REFERENCES

1. Gubenko, S.I., Bespal'ko, V.N., Zhilenkova, E.V., Sinitsyna, Yu.P. (2011). Influence of borides on the technological properties of high-chromium steel. *Construction, materials science, mechanical engineering. Proceedings in memory of Starodubov*, no. 58, pp. 207–210 [in Russian].
2. Pyatakova, L.L., Vinogradov, V.E., Pchelintsev, V.A. (1978). Influence of boron on mechanical properties and fine structure of medium carbon steel. *Metal Science and Heat Treatment*, vol. 20, no. 10, pp. 848–850 [in Russian].

3. Pat. RU 2412770, IPC B21 C23/08 C21 D7/13. Method of producing tubular billet with uniform structure, Efimov, V.M., Lebedev, A.G., Levkov, L.Ya., Svitenko, I.A., Ul'yanov, M.V., Korneev, A.E., Gudenko, A.S., no. 2009134665/02, zayavl. 17.09.2009, opubl. 27.02.2011, biul. no. 6 [in Russian].
4. Pat. RU 2618687. Hexagon steel pipe-billet with boron content of 1.3 to 3.0 % and method of its manufacture, Saf'yanov, A.V., no. 2016110316, zayavl. 22.03.2016, opubl. 10.05.2017, biul. no. 13 [in Russian].
5. Nikitin, K.N., Osadchiy, V.Ya., Saf'yanov, A.V., Kolikov, A.P., Bubnov, K.E. (2016). Improvement of the production technology for seamless hexagonal tubes made of boron-containing steels. *Ferrous Metals*, no. 10, pp. 39–43 [in Russian].
6. Lyakh, A.P., Gladkov, D.A., Saf'yanov, A.V., Makovetskiy, A.N., Ananyan, V.V., Solov'ev, V.N. (2016). Prospects for the use of centrifugal cast billet for the production of pipes from hard-to-form steels. *Trudy XXII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sb. Innovatsii i importozameshchenie v trubnoy promyshlennosti (Truby–2016)*, pp. 94–96 [in Russian].
7. Nikitin, K.N., Osadchiy, V.Ya. et al. (2016). Development of the Techniques and Production of Trial Lots of Hexahedral “Turn-Key” Pipe Billets from Centrifugal Castings of the Steel Grade 04X14T3P10 (4C 82) for Units of Nuclear Power Stations. *Steel*, no. 3, pp. 24–31 [in Russian].
8. Chukanov, A.P., Safronov, B.V., Minyaylo, B.F., Ivanov, S.I., Potapenko, M.M., Glebov, A.V. (2013). Study of the technology used for the production of high-boron austenitic steel for neutron protection elements. *Questions of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials*, no. 2, pp. 67–80 [in Russian].
9. Komarov, A.I., Nikitin, K.N., Saf'yanov, A.V., Osadchiy, V.Ya., Kolikov, A.P. (2017). Improvement of the technology of bimetallic seamless tube production for pipelines of nuclear energy plants. *Ferrous Metals*, no. 9, pp. 68–73 [in Russian].
10. Pat. RU 2547363. Method of process pipes production of size 284×11 mm out of solid blank ingots to manufacture hex blank pipes with turnkey size 252,6×5,0+1,5/-1,0×4300+80/-30 mm for tight storage and transportation of spent nuclear fuel, Nikitin, K.N., Fedorov, A.A., Saf'yanov, A.V., Tazetdinov, V.I., no. 2013154622/02, zaiavl. 09.12.2013, opubl. 10.04.2015, biul. no. 10 [in Russian].
11. Kosnikov, G.A. et al. (2017). Alloys with increased neutronabsorbing properties. *Liteyshchik Rossii*, no. 7, pp. 6–10 [in Russian].
12. Pat. RU 2683168. Neutron-irrigate steel, Degtyarev, A.F., Skorobogatykh, V.N., Mukhanov, E.L., Mirzoyan, G.S., Orlov, A.S., no. 2018117930, zayavl. ot 15.05.2018, opubl. 26.03.2019, biul. no. 9 [in Russian].
13. Pat. RU 2483132 C2. Titanium-based alloy for absorption of heat neutrons. Serikov, S.S., Serikov, S.S., Popov, V.S., Tulin, A.N., no. 2011115599/02, zayavl. 21.04.2011, opubl. 27.05.2013, biul. no. 15 [in Russian].
14. Pat. RU 2686476. Container cover for spent nuclear fuel transportation and storage, Kapilevich, A.N., Shegel'man, I.R., Bogdanov, D.M., Vasil'ev, A.S., zayavl. 05.06.2018, opubl. 29.04.2019, biul. no. 13 [in Russian].
15. Khovanov, N.N. et al. (2017). Development of up-to-date metal working processes and tools for production of hexagonal shroud neutron-absorbing tubes for storage/disposal of nuclear wastes. *Technology of light alloys*, no. 4, pp. 81–86 [in Russian].
16. Egorov, M.Yu., Stepashkina, A.S. (2019). Storage and transportation of spent nuclear fuel. *Sbornik dokladov Nauchnoy sessii GUAP. Sb. Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh system*, pp. 96–99 [in Russian].
17. Pat. RU 2519064 C1. Rustresisting alloyed neutron-absorbing steel for production of hexagonal shell pipes for sealed storage of nuclear fuel in pumped pools and its transportation, Dubrovskiy, V.A., Efanov, V.Yu., Russkov, E.V., Rusetskiy, V.S., Saf'yanov, A.V., Matyushin, A.Yu., no. 2013102758/02, zayavl. 22.01.2013, opubl. 10.06.2014, biul. no. 16 [in Russian].
18. Pat. RU 2669261. Corrosive-resistant material with high boron content, Churyumov, A.Yu., Pozdnyakov, A.V., no. 2017136328, zayavl. 16.10.2017, opubl. 09.10.2018, biul. no. 28 [in Russian].
19. Bryleva, V.A., Voytetskaya, E.F., Nareyko, L.M. (2011). Improvement of fuel circulation facilities of pressurized water reactor reactors. GNU “OIEYaI–Sosny” NAN Belarusi. *Inf. byul. Atomnaya energetika*, no. 8. URL: http://sosny.bas-net.by/wp-content/uploads/2012/09/bul_2011_8 (last accessed 19.03.2020) [in Russian].
20. Osadchiy, A.I. (2011). Nuclear safety of spent fuel pool storage at nuclear power plants with VVER-1000: physical principles and structural solutions. *Atomic Energy*, vol. 110, no. 1, pp. 3–6 [in Russian].
21. Kravets, V.Yu., Soroka, A.V. (2013). Nuclear safety analysis of spent fuel in the Khmel'nitskiy nuclear power plant water storage pools. *Energy: Economics, Technology, Ecology*, no. 3 (34), pp. 83–89 [in Russian].
22. Kozlov, D.V., Risovanny, V.D. (2012). Boron steel application for the operating and future nuclear reactor. *News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, no. 14, pp. 966–970 [in Russian].
23. Levkov, L.Ya., Kissel'man, M.A., Shurygin, D.A., Orlov, S.V., Garchenko, A.A., Yavtushenko, P.M. (2018). Features of cyclic electroslog remelting process of steel ChS-82 (04Cr14Ti3BIV). *Metallurg*, no. 2, pp. 35–41 [in Russian].
24. Shurygin, D.A., Levkov, L.Ya., Kissel'man, M.A., Terekhin, D.K., Ul'yanov, M.V., Matytsina, G.I., Klochay, V.V., Korzun, E.L. (2018). New technological capabilities of ESP in the production of materials for nuclear engineering. *PROST 2018. Sbornik trudov IX-oy Evraziyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Prochnost' neodnorodnykh struktur*, p. 168 [in Russian].
25. Solonin, M.I., Ioltukhovskiy, A.G., Bibilashvili, Yu.K. (2001). The problems of development and modification of stainless steels for core components of fast nuclear and fusion reactors. *Physics and chemistry of materials treatment*, no. 5, pp. 5–13 [in Russian].
26. Churyumov, A.Yu., Khomutov, M.G., Pozdnyakov, A.V., Mukhanov, E.L. (2014). A study of the structure and high-temperature mechanical properties of a steel with elevated content of boron. *Metal Science and Heat Treatment*, no. 6 (708), pp. 53–55 [in Russian].
27. Bespal'ko, V.N., Gubenko, S.I., Zhilenkova, E.V., Balev, A.E. (2012). Influence of boride phases on the mechanical characteristics of high-chromium steel with boron intended for nuclear power. *Metallurgical and mining industry*, no. 7, pp. 243–246 [in Russian].

28. Gubenko, S.I., Bespal'ko, V.N. (2018). Transformation of borid inclusions under producing of pipes for nuclear power. *Construction, materials science, mechanical engineering. Proceedings in memory of Starodubov*, pp. 107–112 [in Russian].
29. Pat. RU 0002318623. Method for the production of pig pipes from ESP ingots of low-plastic steels with boron content of more than 1.3 %, Golovinov, V.A., Nenakhov, S.V., Saf'yanov, A.V., no. 219.016.fc3a, zayavl. 10.03.2008, opubl. 04.04.2019. URL: <https://findpatent.ru/patent/231/2318623.html> (last accessed 15.05.2020) [in Russian].
30. Gubenko, S.I., Bespal'ko, V.N., Zhilenkova, E.V. (2008). Influence of various methods of smelting on the quality of billets from high chromium steel with boron. *Suchasni problemy metalurgii. Plastic deformation of metals. Theory and manufacture of pipes*. Dnipropetrovs'k: NmetAU, vol. 11, pp. 78–83 [in Russian].
31. Gubenko, S.I., Bespal'ko, V.N., Zhilenkova, E.V. (2011). Features of the plastic behavior of boride phases in the production of pipes for nuclear power. *Metallurgical and mining industry*, no. 7, pp. 70–74 [in Russian].
32. Khlebnikov, S.V., Voronkov, A.A., Safonenko, M.V., Trenkin, V.A., Yavshits, S.G., Kuz'min, V.V., Bulkin, S.V. (2011). Neutron Scanning Facility for the Critical Evaluation of Boron Distribution in Boronized Steel Containers for Nuclear Spent Fuel Storage. "Trudy Radiyevogo instituta im. V.G. Khlopina", vol. 15. URL: http://khlopina.ru/wp-content/uploads/2016/12/%D0%A2%D1%80%D1%83%D0%B4%D1%8B-%D0%A0%D0%98_%D1%82%D0%BE%D0%BC-15.pdf (last accessed 19.03.2020) [in Russian].
33. Churyumov, A.Yu., Khomutov, M.G., Tsar'kov, A.A., Pozdnyakov, A.V., Solonin, A.N., Efimov, V.M., Mukhanov, E.L. (2014). Study of the structure and mechanical properties of corrosion-resistant steel with a high concentration of boron at elevated temperatures. *Physics of metals and metallography*, vol. 115, no. 8, p. 862 [in Russian].
34. Gorelik, S.S., Dobatkin, S.V., Kaputkina, L.M. (2005). Recrystallization of metals and alloys. 3rd edition. Moscow: MISIS, 432 p. [in Russian].
35. Pat. RU 2541212 C2. Production of hexagonal pipe billets for compact storage and transportation of used nuclear fuel from low-ductile steel with boron content of 1.3–3.5 %, Dubrovskiy, V.A., Efanov, V.Yu., Russkov, E.V., Rusetskiy, V.S., no. 2013102757/02, zayavl. 22.01.2013, opubl. 10.02.2015, biul. no. 4 [in Russian].
36. Kadach, M.V., Gamin, Yu.V., Solonin, A.N., Pozdnyakov, A.V. (2014). Profiling the round tube into the hexagon from high boron content steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, no. 57 (11), pp. 11–14 [in Russian].

Received 28.09.2020

Summary

M.Ye. Nekhaiev¹, PhD (Engin.), Director, e-mail: dpm@dneprofsmash.com
T.V. Balakhanova², PhD (Engin.), Senior Researcher,
 e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2493-218X>
H.V. Levchenko², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Laboratory,
<https://orcid.org/0000-0003-1173-5320>

¹Scientific and Production Association "Dneprofsmash" (Kamianske, Ukraine)

²Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Production history of hexagonal tubes for nuclear waste sealed storage and transportation

At present time nuclear waste is transported and stored at NPPs in special storage facilities, which are based on a hexagonal tubes matrix made of steel with a boron content of 1.3–1.8 %. Boron steel ChS82 (04Kh14T3R1F) is the main material for the production of solid hexagonal tubes. However, the metal consumption rate from the tubing stock to the finished hexagon was more than 400 %. This is due to the large amount of borides in the steel structure, it has good strength and hardness, but a low level of ductility both at room and at elevated temperatures.

Presently there is practically no production of canister-tubes in Ukraine, the main part is purchased abroad. For these reasons in the present work the final stage of production of racks for nuclear fuel storing, rolling mill dressing and grooving of domestic hexagonal tubes made of 04Kh14T3R1F steel was tested.

It has been established that in the stock hot-rolled tubes the quantity, distribution and size of borides is uneven. Annealing was carried out before cold deformation of boron steel tubes to improve paste forming properties. Carrying out the recommended TU-14-3-1680 annealing at 670 °C did not lead to a visible change in the structure, the borides shape and size remained in the same range. Mechanical properties level remained unchanged. Annealing for all samples at average temperatures of 650–1000 °C slightly increased the plasticity, while the range of values turned out to be high. Investigation of the tubes properties for two ingots within the same melting operation showed that samples of tubes made from the ingot head have plastic properties significantly higher than from the ingot bottom. Therein, the strength of the samples remained practically at the same level and did not depend on the place of metal sampling.

The results of the present work made it possible to successfully carry out experimental rolling of a hexagonal tube with a diameter of 257x7 mm from the 04Kh14T3R1F steel round tube with a diameter of 288x7 mm on a pipe-forming mill 400 of the Scientific and Production Association "Dneprofsmash" in four-roll and two-roll passes.

Keywords

Hexagonal tubes, dressing, borides, high-chromium steel, mechanical properties.