

**В. М. Ажажа¹, Б. В. Борц¹, І. М. Бутенко¹, П. М. В'югов¹,
В. М. Воєводін¹, С. Д. Лавриненко¹, І. М. Неклюдов¹, М. М. Пилипенко¹,
В. С. Вахрушева², Т. М. Буряк², Г. Д. Сухомлин², В. О. Благова²,
К. А. Ліндт³, В. І. Попов³, С. В. Ладохін⁴, В. Б. Чернявський⁴**

¹Національний науковий центр ХФТІ НАН України, Харків

²Державне підприємство "Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я. Ю. Осади", Дніпропетровськ

³Державне науково-виробниче підприємство "Цирконій", Дніпродзержинськ

⁴Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

ВИРОБНИЦТВО ПАРТІЇ ТРУБНИХ ЗАГОТОВОК ТРЕКС-ТРУБ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВОЇ ПАРТІЇ ТВЕЛЬНИХ ТРУБ ЗІ СПЛАВУ $Zr1Nb$ ІЗ ВІТЧИЗНЯНОЇ СИРОВИНИ

Анотація: Описано процес виготовлення дослідно-промислових партій заготовок трекс- та твельних труб для реакторів типу ВВЕР із зливків сплаву $Zr1Nb$, виплавлених з вітчизняної сировини на основі потрійної шихти – сплаву кальцієтермічного цирконію з 1 % ніобію (КТЦ-110), йодидного цирконію та відходів виробництва труб з того ж самого матеріалу – методами дугової та електронно-променевої плавок з електромагнітним перемішуванням. Проведено дослідження якості партії трекс-труб, виготовлених із сплаву $Zr1Nb$ способом холодної деформації в промислових умовах. Розроблені схеми та температурно-деформаційні режими пресування, уточнено хімічний склад захисних покриттів для зливків при високотемпературній деформації.

Ключові слова: сплав $Zr1Nb$, труба, холодна та гаряча деформація, механічні властивості, структура, якість.

1. ВСТУП

Реактори великої потужності ВВЕР-1000 складають основу енергетичної системи України. На даний час на АЕС України працює 13 таких блоків. Всього в активній зоні серійного реактора ВВЕР-1000 наявні 163 тепловиділяючі зборки (ТВЗ), кожна з яких включає 312 твелів. Україна має розвинену промислово-сировинну та науково-технічну бази, що дає можливість організувати виробництво комплектуючих вузлів та деталей твелів та

ТВЗ для реакторів ВВЕР-1000. При освоєнні виробництва твелів планується широке використання вітчизняних матеріалів і устаткування (кальцієтермічного цирконію, прокатного і зварювального устаткування та ін.), що дасть змогу розв'язати проблему створення нових робочих місць у різних галузях промисловості.

В даній роботі описується процес виробництва дослідно-промислової партії твельних труб для реакторів типу ВВЕР із зливків сплаву $Zr1Nb$, отриманих на основі потрійної ших-

© В.М. Ажажа, Б.В. Борц, І.М. Бутенко, П.М. В'югов, В.М. Воєводін, С.Д. Лавриненко, І.М. Неклюдов, М.М. Пилипенко, В.С. Вахрушева, Т.М. Буряк, Г.Д. Сухомлин, В.О. Благова, К.А. Ліндт, В.І. Попов, С.В. Ладохін, В.Б. Чернявський. 2006



Рис. 1. Загальна схема отримання цирконію та зливків зі сплаву Zr1Nb для трубних заготовок, яку передбачається запровадити на ДНВП "Цирконій"

ти із вітчизняної сировини методами дугової та електронно-променевої плавки з електромагнітним перемішуванням. Було проведено дослідження якості вихідних литих зливків для виробництва трубних заготовок, розроблені технологічні схеми та температурно-деформаційні режими пресування, уточнено хімічний склад захисних покриттів для зливків при проведенні високотемпературної деформації. Показано принципову можливість отримання гарячепресованих заготовок для виготовлення трекс-труб. В промислових умовах на діючому обладнанні дослідного заводу Державного підприємства "Науково-дослідний трубний інститут" (ДП "НДТІ") була виготовлена партія трекс-труб зі сплаву Zr1Nb

Табл. 1. Хімічний склад зливків зі сплаву Zr1Nb після двох ВДП

№ пор.	Місце відбору проби	Вміст домішок, мас. %													
		O ₂	N ₂	C	Hf	F	Nb	Si	Fe	Ni	Al	Cu	Ca	Ti	Cr
1	край	0,095	0,004	0,005	0,008	0,003	1,0	0,005	0,012	0,003	<0,001	0,0004	<0,001	<0,002	0,001
	середина	0,095	0,005	0,005	0,008	0,003	1,0	0,0044	0,012	0,003	<0,001	0,0004	<0,001	<0,002	0,001
	центр	-	0,005	0,006	-	-	1,0	0,004	0,013	0,004	<0,001	0,0004	<0,001	<0,002	0,001
2	край	0,095	0,004	0,006	0,008	0,003	1,0	0,0044	0,011	0,002	<0,001	0,0004	<0,001	<0,002	0,001
	середина	0,09	0,005	0,005	0,008	0,003	1,0	0,004	0,014	0,002	0,001	0,0004	<0,001	<0,002	0,001
	центр	0,08	0,0045	0,006	0,008	0,003	1,0	0,004	0,014	0,003	<0,001	0,0004	<0,001	<0,002	0,002
ТУ 95.166-98 на Е-110		0,1	0,006	0,02	0,05	0,003	0,9-1,1	0,02	0,05	0,02	0,008	0,005	0,03	0,005	0,02

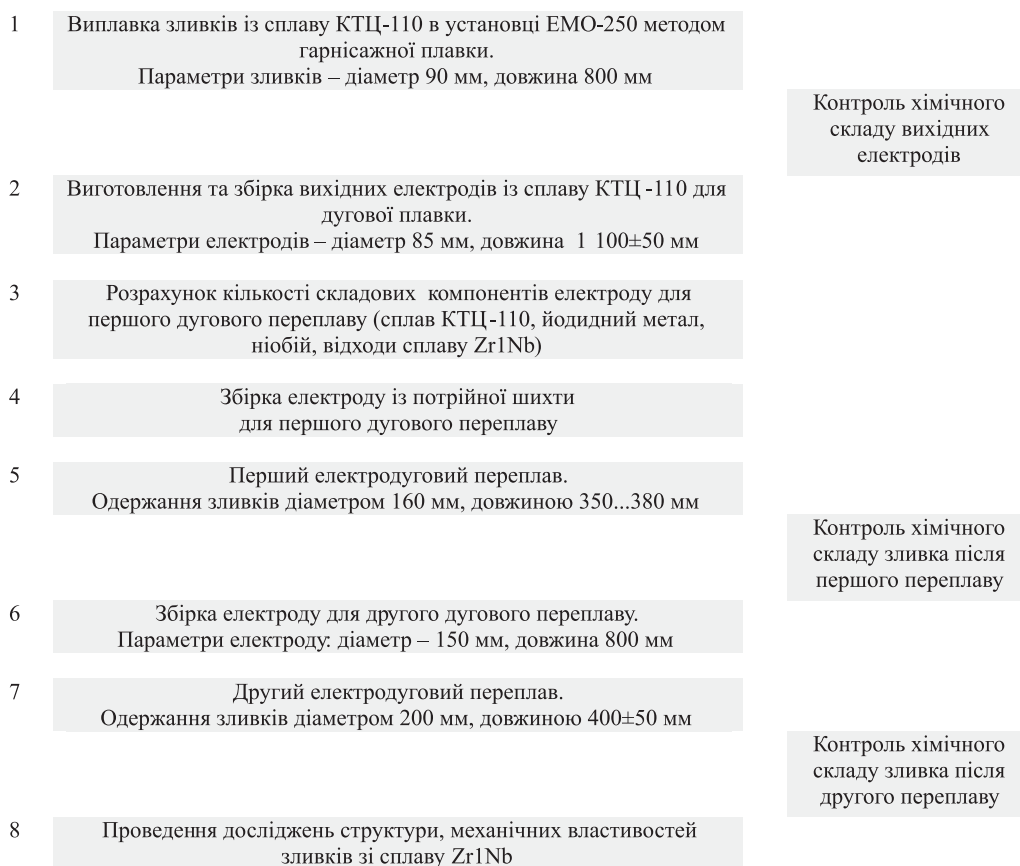


Рис. 2. Схема одержання зливків зі сплаву Zr1Nb методом подвійного ВДП

та дослідно-промислова партія твельних труб-оболонок діаметром 9,13 та товщиною стінки 0,7 мм, які за основними показниками якості відповідають вимогам технічних умов ТУ У 27.1-8-53-2001 і можуть використовуватися при виготовленні твельних зборок для реакторів ВВЕР-1000.

2. ВИГОТОВЛЕННЯ ПАРТІЇ ЗЛИВКІВ ЗІ СПЛАВУ Zr1Nb ТА ВИВЧЕННЯ ДЕЯКИХ ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Для виготовлення партії трекс-труб на ДП "НДТІ" використовувалися зливки зі сплаву Zr1Nb, отримані методами подвійного вакуумно-дугового переплаву (ВДП) та гарнісажної електронно-променевої плавки з кристаліза-

цією у виливницях при електромагнітному перемішуванні (ЕМП) за схемою, запропонованою в ННЦ "ХФТІ" НАНУ, ДНВП "Цирконій", ФТІМС НАНУ [1–4] (див. рис. 1.).
Схема одержання зливків методом подвійного



Рис. 3. Зливки зі сплаву Zr1Nb, отримані методом подвійного ВДП

ВДП, який було реалізовано в ННЦ ХФТІ, наведена на рис. 2.

Зовнішній вигляд зливок зі сплаву Zr1Nb, отриманих методом подвійного ВДП, представлений на рис. 3. Перед пресуванням зливки, отримані методом ВДП, були обточені до діаметра 169 мм, а зливки, отримані методом ЕМП – до діаметра 149 мм. У них були просвердлені отвори діаметром 45 мм. На одному із торців зовнішнього діаметра знімалась фаска радіусом закруглення 10 мм для кращого вирівнювання течії металу під час екструзії. На всіх зливках після обточки та розточки була проведена ультразвукова дефектоскопія згідно з методикою РМИ 24-7-2001, розробле-

ною в ДП "НДТІ". Ультразвуковий контроль (УЗК) показав відсутність будь-яких дефектів у зливках зі сплаву Zr1Nb.

Хімічний склад вихідних литих заготовок, отриманих методом подвійного ВДП, наведений в табл. 1 на основі результатів аналізів, проведених на ДНВП "Цирконій". Механічні властивості металу вихідних заготовок досліджувалися в поперечному напрямку при температурах 20 та 380 °С відповідно з вимогами ГОСТ 1497-84, а ударної в'язкості – з ГОСТ 9454-78. Результати механічних випробувань та значення твердості наведені в табл. 2 та 3. З даних таблиць випливає, що зливки зі сплаву Zr1Nb, отримані методами

Табл. 2. Механічні властивості вихідної заготовки

№ плавки	Поперечний напрямок								КСУ, кгс/см ² , T _{випр.} = 20 °С
	T _{випр.} = 20 °С				T _{випр.} = 380 °С				
	σ _B , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	φ, %	σ _B , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ ₅ , %	φ, %	
3	440... 450	385... 390	14,0... 15,0	50,0... 50,5	170... 175	130... 135	–	79,5	8,5...9,0
6	450	385... 395	15,0	49,0... 50,0	150	120	16,	70,0	9,0...9,7
2012	475	400... 410	12,0... 13,5	44,0... 46,0	165... 175	125... 135	23,5	69,5... 70,5	7,6...8,5
2014	440	370... 375	12,0... 12,5	49,0	16,5	120... 135	21,5 22,5	73,5... 74,0	8,7...10,2
2016	470... 475	400	–	49,5	170... 175	135	23,0... 24,0	74,0... 75,0	7,7...9,3

Табл. 3. Твердість по Брінелю (ГОСТ 90121-59)

№ плавки	Твердість по Брінелю НВ, МПа			
	Зовнішній шар	Середній шар	Центр	Середнє значення
3	1560...1610	1480...1610	1400...1740	1560
6	1520...1660	1480...1540	1600...1690	1580
2012	1680...1740	1450...1740	1610	1640
2014	1450...1480	1460...1520	1480...1610	1510
2015	1400...1750	1520...1630	1480...1630	1566
2016	1600...1580	1580...1610	1480...1600	1607
2017	1580...1820	1500...1660	1520...1580	1620

ВДП і ЕМП, мають близькі показники твердості, міцності та пластичності.

Аналіз даних з макротвердості по Брінелю (НВ) на зливках зі сплаву Zr1Nb діаметром 140 мм, виплавлених на заводі ДНВП "Цирконій" та двічі переплавлених методом ВДП в ННЦ ХФТІ, показав, що зливки однорідні як по діаметру, так і по висоті.

Дослідження макроструктури вихідних литих заготовок було проведено на поперечних дискових темплетях, відібраних від верхньої частини зливок. Макроструктура у верхній частині зливок після ВДП була достатньо однорідною та складалася з рівноважних β -зерен (діаметр зливок дорівнював приблизно 180 мм; середній розмір β -зерен – 5,5 мм). У структурі зливок після подвійного ВДП спостерігаються три чітко виражені зони різнозернистості: зовнішня вузька кільцева зона

із середнім розміром зерен 7 мм та дві зони, межа між якими проходить вздовж діаметра зливка. Середні розміри зерен у цих зонах складають 4,5 мм та 8,2 мм. На рис. 4 наведена мікроструктура зливка зі сплаву Zr1Nb після подвійного ВДП.

Макроструктура зливок, отриманих методом ЕМП, неоднорідна, проте у кожному конкретному випадку розташування зон різнозернистості відрізняється. При цьому не прослідковується закономірність у розташуванні кільцевих зон. Наприклад, в одній кільцевій смужі поряд з зоною дрібних рівноважних зерен може розташовуватись зона з більш великими витягнутими зернами. Можливо, це пов'язане з особливостями процесу кристалізації при накладанні електромагнітних полів різних напрямків та з різною величиною струму перемішування.

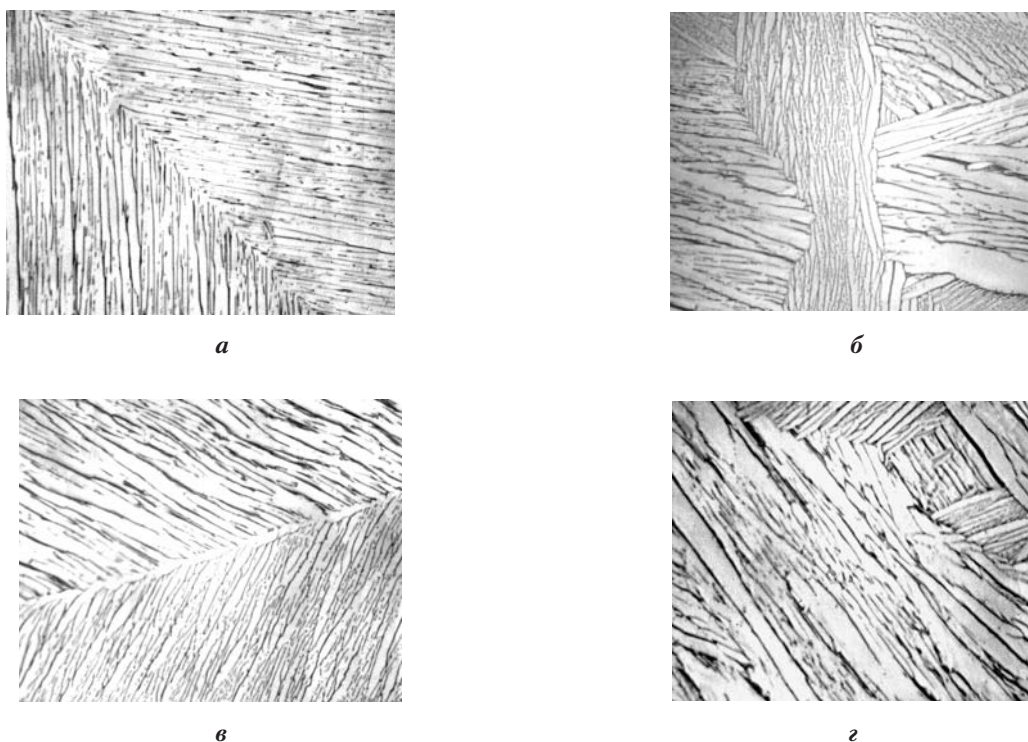


Рис. 4. Мікроструктура зливок, одержаних методом ВДП: а, б – зовнішній шар; в, г – середній шар; а, в – $\times 600$; б, г – $\times 1250$

Таким чином, за хімічним складом, структурою та параметрами твердості отримані методами ВДП та ЕМП зливки зі сплаву Zr1Nb відповідають вимогам українських нормативів ТУ001.257-95, ТУ У27.4-14312223-003:2004 (дослідна партія) та російських ТУ95.166-98 до сплаву Е-110 і можуть використовуватися для виготовлення твельних труб.

3. ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ ВИРОБНИЦТВА ТРУБ-ОБОЛОНОК ДЛЯ ТВЕЛІВ ІЗ СПЛАВУ Zr1Nb

На підставі виконаного аналізу сучасних світових тенденцій виготовлення цирконієвих твельних труб-оболонок і розробок, виконаних раніше в ДП "НДТІ", була запропо-

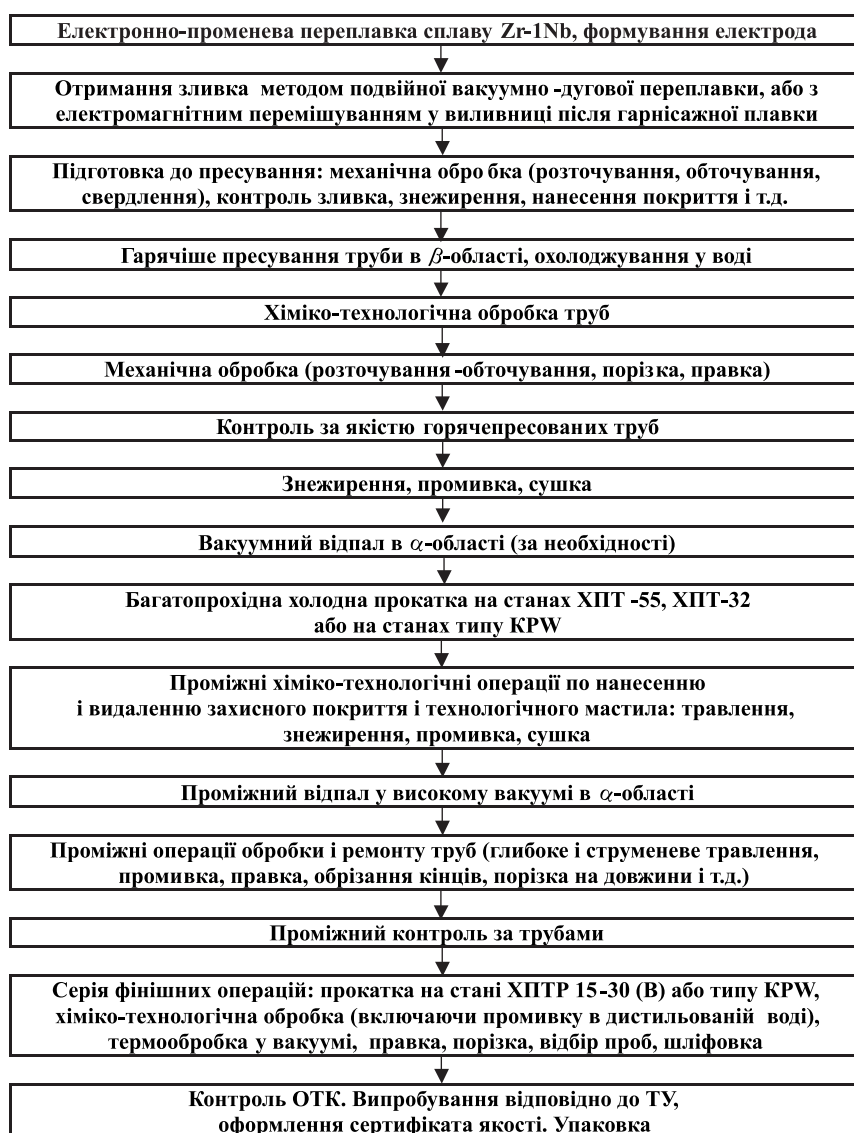


Рис. 5. Принципова схема виготовлення в Україні труб-оболонок для твелів зі сплаву Zr1Nb

нована схема виготовлення труб, спрямована на використання вітчизняної сировини і технологій виготовлення зливків зі сплаву Zr1Nb різними методами (рис. 5). Особливістю такої схеми є скорочення числа циклів виробництва за рахунок інтенсифікації температурно-деформаційних параметрів при виготовленні труб. Для одержання партії переробних гарячедеформованих труб із заготовок, виплавлених різними способами, була вибрана схема високотемпературної деформації зливків у β -області з наступним охолодженням відпресованих труб водою (β -загартування). Для виготовлення гарячедеформованих труб діаметром 60 і товщиною стінки 10,5 мм (діаметром 60×10,5 мм) використовувалися порожнисті трубні заготовки діаметрами 149 та 169 мм. Розрахунок зовнішнього діаметра за-

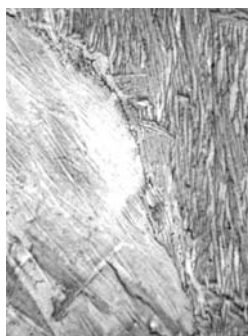
готовок проводили з урахуванням штатного розміру робочої втулки контейнера (діаметри 155 та 175 мм), коефіцієнта лінійного розширення цирконію при температурах пресування, шару шлікерного покриття між робочою втулкою контейнера та заготовкою, покриттю шлікером та скломастилом.

Для вибору режимів нагрівання під пресування були проведені лабораторні дослідження по визначенню температур повної $\alpha \rightarrow \beta$ -перекристалізації в металі зливків, одержаних різними способами виплавки. На рис. 6 наведена мікроструктура зразків металу зливків, виплавлених методом ВДП після нагрівання до різних температур. За експериментальними даними, одержаними при нагріванні зливків зі сплаву Zr1Nb, встановлено, що при витримці протягом 5 хв температура повної $\alpha \rightarrow \beta$ -перекристалізації для зливків, виплавлених методом ВДП, складає 1 000 °С, для зливків, виплавлених методом ЕМП, – 950 °С.

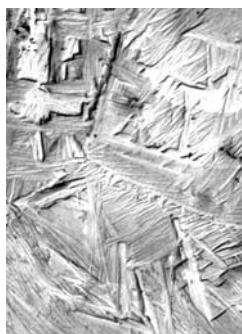
На основі проведених досліджень та з врахуванням неможливості тривалої витримки в індукторі зразків для вирівнювання температури в їх об'ємі було вирішено для досягнення повної $\alpha \rightarrow \beta$ -перекристалізації температуру нагрівання під пресування зливків, виплавлених методом ВДП, підвищити до 1 100 °С. Для зливків, виплавлених методом ЕМП, температура пресування була 1 050 °С.

3.1. Вибір покриттів та мастильних матеріалів¹

Для запобігання поглинання газів поверхню металу під час нагрівання в індукторі перед пресуванням на поверхню зливків наносилося захисне покриття. Враховуючи необхідність підвищення температури пресування до 1 100 °С для зливків, виплавлених методом ВДП, шлікер виготовляли на основі теоретичних розрахунків необхідного рівня в'яз-



a



б



в

Рис. 6. Мікроструктура експериментальних зразків зливків, виготовлених методом ВДП, після нагрівання до різних температур: *a* – 1000, *б* – 950; *в* – 900 °С; ×600

¹У виконанні цієї частини роботи брала участь Карасик Т. Л.

Табл. 4. Механічні властивості металу гарячепресованих труб зі сплаву Zr1Nb

Спосіб виплавки	Температура пресування, °С	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %
ВДП	1 100	565–590	480–510	21–22
ЕМП	1 050	582–610	500–520	19–21

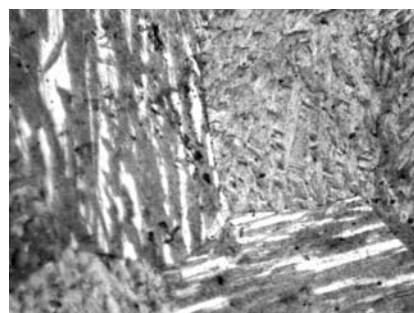
кості при заданих температурах. Зважаючи на те, що цирконієві сплави добре змочуються та мають високу міцність зчеплення зі склоподібними матеріалами, для покриття були вибрані скломатеріали. Розроблене покриття виконувало роль захисту від поглинання газів під час нагрівання і мастила під час деформації. Якість поверхні гарячепресованих труб значною мірою залежить від підбору технологічних мастил з оптимальним рівнем в'язкості при температурах пресування.

3.2. Виготовлення дослідної партії переробних гарячедеформованих труб²

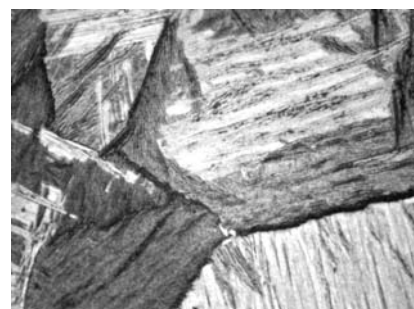
Труби виготовляли пресуванням порожнистих зливок після нагрівання їх до температур β -області цирконію з наступним зануренням відпресованих труб у воду (β -загартування). Нагрівання заготовок під пресування проводили у вертикальному індукторі при обмеженні потужності до 30 кВт. Завдяки уповільненню нагрівання поліпшувалася теплопередача у внутрішні шари зливка. Для кращого перерозподілу тепла по діаметру зливка проводили витримки шляхом періодичного відключення індуктора на декілька хвилини: для заготовок, виплавлених методом ЕМП при температурах 950–1 050 °С; для заготовок, виплавлених ВДП-методом – 1 000–1 100 °С.

Пресування труб здійснювали на горизонтальному трубопрофільному пресі. Огляд труб після пресування показав, що якість зовнішньої та внутрішньої поверхонь задовіль-

на, дефектів не виявлено. Були виявлені неглибокі складки, характерні для пресування. Результати дослідження механічних властивостей металу труб гарячого пресування, проведених на сегментах шириною 10 мм при кімнатній температурі відповідно до вимог ГОСТ 10006-80, наведені в табл. 4. Дослідження мікроструктури показали, що після пресування та загартування у воду гарячедеформовані трубні заготовки з металу ВДП-виплавки мають однорідну, повністю перекристалізовану структуру мартенситного типу (рис. 7).



а)



б)

Рис. 7. Мікроструктура гарячепресованих (а) і загартованих (б) труб, отриманих із зливка, виплавленого методом подвійного ВДП, $\times 600$

²У виконанні цієї частини роботи брав участь Медведєв М. І.

Середні розміри зерен β -фази складають близько 55 мкм для зливків, отриманих методом ВДП, і 60–70 мкм для зливків, виплавлених методом ЕМП.

4. РОЗРОБКА РЕЖИМІВ І МАРШРУТІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ-ОБОЛОНОК ДЛЯ ТВЕЛІВ ЗІ СПЛАВУ Zr1Nb

Широкий спектр і високий рівень вимог до поверхні, структурно-текстурного стану, механічних властивостей цирконієвих труб-оболонок для твелів, які повинні бути однорідними

по всій довжині ($l \sim 4,5$ м), висока реакційна здібність матеріалу зі схильністю до насичення газом і окислення у сукупності зі складністю і високою вартістю технології їх виготовлення в цілому вимагають удосконалення маршрутів холодної прокатки труб.

В ці задачі входять розрахунок оптимальних параметрів робочого інструмента, визначення альтернативних маршрутів виробництва труб, що розробляються за різними критеріями з урахуванням якості продукції, включаючи в обов'язковому порядку такий критерій, як вартісні витрати. Необхідно вибрати оптимальні схеми і склад устаткування



Рис. 8. Принципова схема операцій при виготовленні холоднодеформованих труб діаметром 9,13×0,7 мм зі сплаву Zr1Nb

для реалізації цих схем, оптимальний режим деформації на трубопрокатних агрегатах з оперативним обліком значень ряду факторів, що мають місце в реальній виробничій ситуації, та визначити задачі комплексної оптимізації режимів деформації і розкрою металу.

Як переробна заготовка використовувалася гарячепресована труба після розточки і обточення поверхні, котра після підрахунку була порізана на мірну (або кратну) довжину і пройшла операцію правки, де криволінійність не повинна перевищувати ± 1 мм на 1 м.

Відомо, що виробництво труб відповідального призначення зі спеціальними вимогами із високолегованих корозійностійких сталей та жароміцних сплавів, сплавів на основі титану та цирконію супроводжуються зростанням коефіцієнта витрат металу (іноді $K_{\text{внтр}}$ досягає 4–5), що призводить до високої собівартості труб, а отже і цін на них. Повністю запобігти витратам металу не можна, проте важливим напрямком досліджень по вдосконаленню виробництва повинно бути зменшення $K_{\text{внтр}}$. Надзвичайно важливими в технологічному плані (а з точки зору забезпечення службових властивостей оболонки для твелів основоположними) є задачі забезпечення якості поверхні і тангенціальної орієнтації гідридів після штучного насичення воднем. Останнє проводиться, як відомо, за рахунок заданого відношення деформації по товщині стінки до деформації по діаметру, або Q -фактора (≥ 3) при холодній прокатці [8].

Виготовлення труб здійснювалося по розроблених маршрутах у відповідності до технологічних карт з дотриманням вимог технічних умов ТУ У 27.1-8-53-2001.

Принципова схема операцій при виготовленні холоднодеформованих труб діаметром 9,13 і товщиною стінки 0,7 мм (діаметром 9,13×0,7 мм) зі сплаву Zr1Nb наведена на рис. 8. Схема виготовлення цирконієвих труб потребує окремого виробництва, тобто не допускається виробництво цирконієвих труб

поруч із трубами з інших матеріалів (сталей, титану та ін.), що обумовлено високою реакційною здібністю цирконієвих сплавів. Особливо це поширюється на операції хімічної обробки, які можуть як покращити, так і погіршити якість металу. Хімічна обробка труб здійснюється при кожній операції гарячої та холодної переробки та складається з таких операцій: усунення скломастила після гарячого пресування; усунення мастильно-охолоджувальної рідини (МОР) після розточки та обточки; усунення складних мастил і МОР після холодної переробки; усунення залишків мастил та окисних плівок. Після кожної холодної переробки труби двічі піддають хімічній обробці.

Спочатку труби обробляють у лужному розчині з наступною кислотною обробкою, потім їх піддають кислотній обробці, до якої входить: висвітлення після термообробки у вакуумі, правка та ремонт; глибоке травлення та струйне травлення з метою виділення пошкодженого шару металу. Уся кислотна обробка цирконієвих труб відбувається в азотно-плавиковому розчині (концентрація розчину залежить від типу обробки). Перед холодною переробкою на труби наносять оксидне покриття перед нанесенням суміші мастил.

4.1. Розробка режимів термічної обробки труб

Після кожної прокатки холоднодеформовані труби зі сплаву цирконію необхідно обробляти високою температурою у вакуумі з метою відновлення пластичних властивостей металу і отримання необхідного комплексу металофізичних, механічних та антикорозійних властивостей. Були розроблені режими вакуумотермічної обробки переробних і готових труб шляхом проведення термічної обробки зразків холоднодеформованих труб у вакуумі ($\sim 1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.) при температурах від 550 до 700 °С з витримкою 2–6 год.

Аналіз результатів механічних випробувань зразків труб після вакуумотермічної обробки показав, що повне відновлення пластичних властивостей переробних труб зі сплаву Zr1Nb після холодної деформації забезпечується відпалом при температурі 600 °С. При подальшому підвищенні температури міцність та пластичність виробів змінюються несуттєво. Збільшення часу витримки при вакуумотермічній обробці труб готового розміру сприяє підвищенню їх пластичних властивостей при кімнатній та підвищеній температурах. На основі отриманих результатів (в тому числі і даних дослідження мікроструктури металу), після вакуумотермічної обробки зразків труб були прийняті режими термічної обробки в промислових умовах в печі ОКБ 1371-А.

Кінцева обробка труб-оболонок для твелів готового розміру складалася з таких операцій: правка, шліфівка, хімічне травлення, промивка та каскадна промивка у дистильованій воді. Після візуального огляду зовнішньої і внутрішньої поверхонь кожної труби була проведена оцінка якості виготовленої дослідної партії з дотриманням вимог технічних умов щодо маркування кожної труби (електроолівцем) для забезпечення достовірної інформації за проконтрольованими параметрами якості. Контроль за зовнішнім та внутрішнім діаметрами кожної труби з виготовленої дослідної партії труб здійснювали за допомогою УЗК.

Аналіз мікроструктури труб діаметром 9,13×0,70 мм показав, що в процесі технологічного циклу – холодної деформації та термічної обробки – відбувається трансформація структури зерен. На готовому розмірі труб отримано цілком перекристалізовану структуру з середньою величиною зерна 7–12 мкм.

4.2. Дослідження характеристик труб діаметром 9,13 та товщиною стінки 0,70 мм
Технічними умовами передбачено випробування труб на конструкційну міцність, яка деякою мірою характеризує їх якість. Високі

механічні властивості труб визначають надійність їх експлуатації. Найбільш важливі показники механічних властивостей такі: межа плинності, тимчасовий опір, відносне подовження при випробуванні розтягуванням як при кімнатній температурі, так і при температурі 380 °С. Визначення коефіцієнта анізотропії як співвідношення межі плинності при випробуваннях у поперечному напрямку до межі плинності в подовжньому напрямку при температурі 380 °С.

Відомо, що для забезпечення якості труб-оболонок для твелів зі сплавів цирконію необхідно зменшувати коефіцієнт анізотропії та знижувати остаточні напруження. Наявність остаточних напружень в металі зазвичай погіршує його фізико-механічні властивості [15].

У процесі проведення роботи були отримані задовільні результати механічних властивостей труб українського виробництва зі сплаву Zr1Nb на основі кальцієтермічного цирконію, які на готовому розмірі відповідають вимогам ТУ У 27.1-8-53-2001.

Аналіз результатів механічних випробувань труб-оболонок готового розміру свідчить, що при розробці процесу їх виготовлення маршрути деформації з урахуванням відповідної величини Q-фактора та режими термічної обробки металу були розраховані вірно. Потребує додаткової комплексної оцінки якості виготовлених труб з точки зору їх корозійної стійкості, малоциклічної втомлюваності, повзучості та радіаційної стійкості.

5. ВИСНОВКИ

Дослідження властивостей вихідних заготовок, одержаних різними методами лиття, показали, що за хімічним складом, структурою та параметрами твердості зливки зі сплаву Zr1Nb, виготовлені із вітчизняної сировини, відповідають вимогам ТУ до сплаву Е-110 і можуть бути використані для виготовлення твельних труб. Більш однорідна і дисперсна

структура у зливків, виготовлених методом ВДП, що важливо як для поліпшення якості гарячепресованої заготовки (трекс), так і для техніко-економічної ефективності циклу виготовлення труб в цілому.

Розроблена і апробована у заводських умовах принципова схема виготовлення цирконієвих труб для твелів переробних і готових розмірів.

Вибрані температурно-деформаційні параметри пресування та відповідні захисні покриття спеціального складу, що дало можливість виготовити дослідну партію трекс-труб діаметром 60×10,5 мм із цілком перекристалізованою структурою металу мартенситного типу.

Виготовлено дослідно-промислому партію труб-оболонки для твелів діаметром 9,13×0,7 мм. Отримані труби за основними показниками відповідають вимогам технічних умов України ТУ У 27.1-8-53-2001 (дослідна партія) і технічних умов Росії до труб-оболонки для твелів.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Ажажа В. М., Болков А. Ф., Борц Б. В. и др.** Вакуумно-дуговой способ получения трубной заготовки из сплава Zr1%Nb. // Труды XVI Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта (АРК), 6–11 сентября 2004. – С. 200–201.
2. **Ажажа В. М., Болков А. Ф., Борц Б. В.** Вакуумно-дуговой способ получения трубной заготовки из сплава Zr1%Nb. // ВАНТ, 2005. – № 5 (88). – Сер.: ФРП РМ. – С. 110–114.
3. **Ажажа В. М., Болков А. Ф., Борц Б. В. и др.** Циркониевый сплав для атомной энергетики Украины. // Международная конференция "Современное материаловедение: достижения и проблемы" (тезисы докладов). – Киев, 26–30 сентября 2005 г. – С. 387–388.
4. **Ажажа В. М., Борц Б. В., Бутенко І. М. та ін.** Звіт "Виробництво промислової партії зливків сплаву Zr1Nb з вітчизняної сировини для виготовлення твелівних труб, стрічки та інших виробів для реакторів ВВЕР-1000". – Харків: Держреєстраційний № 0104U004885, 2004. – С. 148.
5. **Шиков А. К., Никулин А. Д., Никулина А. В. и др.** Современное состояние и перспективы развития производства циркония и его сплавов и изделий из них. // Физика и химия обработки материалов. – 2001. – № 6. – С. 5–14.
6. **Безумов В. Н., Дунаев А. И., Титов Г. Н.** Исследование и разработка электролитической технологии получения циркония с низким (<0,01 %) содержанием гафния. // ВАНТ, 1999. – № 2 (77). – С. 14–19.
7. **Красноруцкий В. С., Лавриненко С. Д., Грицина В. М. та ін.** Звіт "Дослідження властивостей матеріалів і комплектуючих ТВЗ зі сплаву Zr1Nb українського виробництва на основі кальцієвмісного цирконію". – Харків: Держреєстраційний № 01004U0006582, 2005. – С. 71.
8. **Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г.** Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. // Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1994 г. – 256 с.
9. **Дуглас Д.** Металловедение циркония. / Под ред. А. С. Займовского. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 360.
10. Розробка технології та виготовлення дослідної партії труб із цирконієвого сплаву Zr1Nb для комплектуючих ТВЗ. Звіт про НДР (закл.) / ДТІ-58-99. // Дніпропетровськ: Держреєстраційний № 0199U001529.
11. Разработка технологии и изготовление опытно-промышленной партии труб из сплава КТЦ-110 для ТВЭЛ (отчет о НИР закл.) / ГТИ-91-96. // Дніпропетровськ: ГР № 01979002254, 1997. – 96 с.
12. **Шевакин Ю. Ф.** Калибровка и усилие при холодной прокатке труб. – М.: Металлургиздат, 1963. – 270 с.
13. **Семёнов О. А., Фролов В. Ф., Скоробогатская Л. Н. и др.** О совершенствовании калибровок прокатного инструмента станов холодной прокатки труб. / Обзорная инф-ция: сер. "Трубное производство". – М.: Черметинформация, 1981. – Вып. 2. – 36 с.
14. **Доль В.** Калибровка инструмента нового типа фирмы Маннесманн-Мэер. / Матер. симпозиума по холодной пильгерной прокатке. – Мюнхен-ладбах, 1969. – С. 22–34.
15. **Правдин Ю. М., Вахрушева В. С., Вольфович Г. В. и др.** Оптимизация технологических процессов холодной прокатки труб из сплавов циркония с помощью математического моделирования. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8–9. – С. 347–350.

В. М. Ажажа, Б. В. Борц, И. Н. Бутенко, П. Н. Вьюгов, В. Н. Воеводин, С. Д. Лавриненко, И. М. Неклюдов, Н. Н. Пилипенко, В. С. Вахрушева, Т. Н. Буряк, В. О. Благова, Г. Д. Сухомлин, К. А. Линдт, В. И. Попов, С. В. Ладохин, В. Б. Чернявский. ПРОИЗВОДСТВО ПАРТИИ ТРУБНЫХ ЗАГОТОВОК, ТРЕКС-ТРУБ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЙ ПАРТИИ ТВЭЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ СПЛАВА Zr1Nb ИЗ ОТЕЧЕСТВЕННОГО СЫРЬЯ.

Аннотация: Описан процесс изготовления опытно-промышленной партии трекс- и твельных труб для реакторов типа ВВЭР из слитков сплава Zr1Nb, выплавленных из отечественного сырья на основе тройной шихты – из сплава кальциетермического циркония с 1 % ниобия (КТЦ-110), йодидного циркония и отходов производства труб из того же материала – методами дуговой и электронно-лучевой плавки с электромагнитным перемешиванием. Проведено исследование качества партии трекс-труб, изготовленных из сплава Zr1Nb способом холодной деформации в промышленных условиях. Разработаны схемы и температурно-деформационные режимы прессования; уточнен химический состав защитных покрытий для слитков при высокотемпературной деформации.

Ключевые слова: сплав Zr1Nb, труба, холодная и горячая деформация, механические свойства, структура, качество.

V. M. Azhazha, B. V. Bortz, I. M. Butenko, P. M. V'ugov, V. M. Voevodin, S. D. Lavrinenko, I. M. Nekluydov, M. M. Pylypenko, V. S. Vakhrusheva, T. M. Buryak, G. D. Sukhomlin, V. O. Blagova, K. A. Lindt, V. I. Popov, S. V. Ladokhin, V. B. Chernyavsky. PRODUCTION OF THE PARTY OF ROUND BILLETS FOR TREX-PIPES AND MAKING OF THE EXPERIMENTAL-INDUSTRIAL PARTY OF PIPES FROM Zr1Nb ALLOY FROM DOMESTIC RAW MATERIALS.

Abstract: The process of manufacture of the experimental-industrial party of trex-pipes and pipes of fuel assemblies for VVER-type reactors from ingots of Zr1Nb alloy which were obtained from domestic raw materials by vacuum arc melting and electron beam melting has been described. The quality of the initial poured bars for production of round billets has been investigated. Technological charts and temperature-deformation modes of pressing have been developed. The chemical composition of sheeting for bars during conducting of high temperature deformation has been specified. The previous researches have shown principle possibility of making of hot-pressing round billets.

Keywords: alloy Zr1Nb, pipe, cold and hot deformation, mechanical properties, structure, quality.

Надійшла до редакції 20.03.06
