

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ ПЛАСТИЧНОСТЬ ГОРЯЧЕПРЕССОВАННЫХ ТРУБ ИЗ СПЛАВА Zr1Nb

В.С. Вахрушева, О.А. Коленкова

Научно-исследовательский трубный институт (ГП «НИТИ»),
г. Днепропетровск

Введение. Технология производства труб-оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для атомных реакторов из циркониевого сплава Zr1Nb, которая разрабатывается ГП «НИТИ», предусматривает использование вместо традиционнойковки высокотемпературного прессования литых трубных заготовок с высокими степенями деформации для получения заготовок под холодный передел [1].

Установлено, что наиболее высокие характеристики пластичности имеют горячепрессованные трубные заготовки со структурой мартенситного типа [2; 3]. Такую структуру получают путем закалки горячепрессованных труб непосредственно после деформации при температурах β -области циркония, используя теплоту нагрева под прессование. Несмотря на достаточно высокий уровень пластичности, искажение кристаллической решетки циркония в процессе закалки горячепрессованных труб приводит к повышению уровня внутренних напряжений в металле за счет образования пересыщенного твердого раствора ниобия в цирконии и некоторому снижению пластических свойств циркониевой матрицы [4].

Формирование требуемого уровня качества и эксплуатационных свойств труб для атомной энергетики из сплава Zr1Nb в процессе производства во многом зависит от уровня его технологической пластичности, особенно на начальных стадиях холодного передела. Поэтому большинство фирм-изготовителей применяет рекристаллизационный отжиг или отпуск для повышения пластичности горячедеформированных трубных заготовок [5].

Целью работы было установление возможности применения и выбор режимов термической обработки для повышения технологической пластичности горячепрессованных труб из сплава Zr1Nb на холодном переделе.

Одним из методов, применяемых в последние годы для исследования деформационных процессов и накопления повреждений, а также для оценки пластичности циркониевых сплавов, является метод акустической эмиссии (АЭ) [6]. Поэтому в работе оценку уровня технологической пластичности горячепрессованных и термообработанных труб проводили методом АЭ.

Материал и методика. Материалом для исследования служили горячедеформированные трубы $\varnothing 48 \times$ ст. 8,5 мм из сплава Zr1Nb с содержанием кислорода 0,1% со структурой мартенситного типа. Для оценки влияния разупрочняющей обработки на структуру и свойства металла проводили отжиг горячепрессованных труб при температурах α -области. Для этого после снятия стеклопокрытия и последующей обточкой и расточки на размер $\varnothing 46 \times$ ст. 6,5 мм горячепрессованные трубы подвергали обезжириванию в щелочном растворе и химическому травлению в азотно-плавиковом растворе. После этого трубы нагревали в вакуумной печи ОКБ 1371-А до температур 580°C и 650°C с последующей выдержкой в течение 1 часа. Уровень вакуума в печи составлял не менее 0,0133 Па. Во избежание деформации труб в процессе остывания охлаждение муфеля до 100°C проводили с печью. После падения температуры садки ниже 100°C печь откатывали. Дальнейшее охлаждение труб до комнатной температуры проводили без доступа воздуха в муфель.

Структуру горячепрессованных и термообработанных труб изучали на световом микроскопе "Неофот 21".

Изучение акустоэмиссионных спектров труб из сплава Zr1Nb проводили на компьютеризированном исследовательском комплексе. Сигналы АЭ регистрировали в процессе нагружения сегментов длиной 200 мм, вырезанных из горячепрессованных и термообработанных труб. Нагружение образцов проводили путем одноосного растяжения при комнатной температуре со скоростью $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. В процессе растяжения образцов синхронно регистрировали усилие, перемещение, а также параметры АЭ: активность, скорость счета и суммарную амплитуду импульсов.

Результаты исследования. На рисунке 1 представлена микроструктура горячепрессованных труб из сплава Zr1Nb со структурой мартенситного типа в исходном состоянии (рис. 1а) и после термической обработки в течение 1 часа при температурах 580°C и 650°C. Из рисунка видно, что в результате термообработки при температуре 580°C в горячепрессованных трубах происходит распад пересыщенного твердого раствора ниобия в α -цирконии с выделением ниобия в виде мелких глобулярных частиц (рис. 1б).

Термообработка горячепрессованных труб при температуре 650°C в течение 1 часа приводит к началу $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения в металле и формированию после отжига неоднородной структуры (рис. 1в).

В таблице 1 приведены механические свойства горячепрессованных труб в исходном состоянии и после термической обработки при температурах 580 и 650°C.

Таблица 1

Механические свойства горячепрессованных труб в исходном состоянии и после термической обработки

Температура отжига, °C	Тисп = 20°C			
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	φ , %
Горячедеформированное состояние	570-576	612-625	20,5-22,0	52,2-55,0
580	525-545	570-590	21,3-22,5	55,1-57,5
650	580-595	650-675	20,0-20,5	47,5-48,9

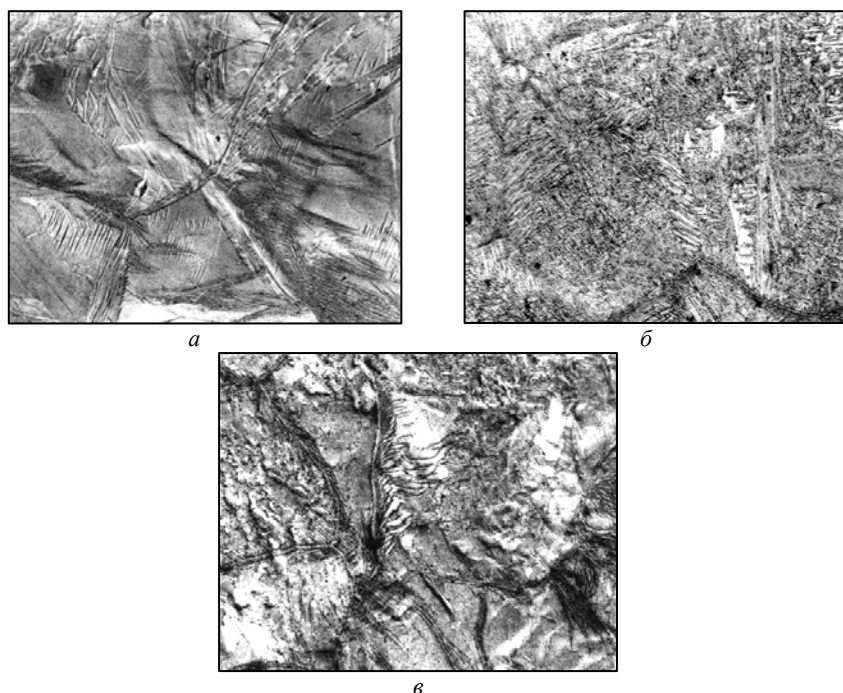


Рис.1. Влияние термической обработки на структуру горячепрессованных труб из сплава Zr1Nb, $\times 600$:
a – горячепрессованное состояние;
б – нагрев при 580°C с выдержкой 1 час;
в – нагрев при 650°C с выдержкой 1 час.

По данным анализа механических свойств, термическая обработка в α -области при температуре 580°C в течение 1 часа приводит к некоторому повышению пластических и снижению прочностных свойств труб. При этом за счет выделения ниобиевой фазы снижается уровень искажения кристаллической решетки циркония и, следовательно, уровень внутренних напряжений. Такие структурные перестройки способствуют более свободному перемещению дислокаций и повышению уровня пластичности сплава.

Термическая обработка при температуре 650°C в течение 1 часа приводит к снижению пластических и повышению прочностных свойств сплава, что может стать причиной резкого снижения уровня технологической пластичности металла на холодном переделе.

Проведение термической обработки труб перед холодной прокаткой и связанных с ней технологических операций (обезжиривание, травление) связано с дополнительными энергетическими и материальными затратами. При этом повышается риск газонасыщения поверхности труб. В то же время дополнительное повышение технологической пластичности горячепрессованных труб может дать возможность увеличения степени деформации на первом холодном переделе. Это приведет к уменьшению количества циклов холодной деформации и, следовательно, к уменьшению количества операций термообработки. Поэтому для определения целесообразности включения операции термической обработки горячепрессованных труб в технологический процесс изготовления труб-оболочек твэл из сплава Zr1Nb необходимо оценить, как влияет разупрочняющая обработка на технологическую пластичность металла.

Для этого был проведен сравнительный анализ АЭ распределений, полученных при нагружении образцов труб со структурой мартенситного типа, в горячепрессованном состоянии и после термообработки при 580°C.

На рисунке 2 приведены кривые активности и скорости счета АЭ, записанные при нагружении образцов горячепрессованных и термообработанных труб.

По данным механических испытаний (см. табл. 1) после термической обработки при 580°C с выдержкой 1 час наблюдается незначительное снижение прочностных и повышение пластических характеристик металла горячепрессованных труб – не более 10%. В то же время, как видно из рисунка 2, при нагружении образцов термообработанных труб происходит увеличение уровня активности и скорости счета сигналов примерно на 30% по сравнению с горячедеформированным состоянием. Это указывает на рост подвижности дислокаций. Следовательно, структурные перестройки, происходящие в металле труб при отжиге, способствуют значительному повышению уровня пластичности за счет облегчения процессов множественного скольжения дислокаций.

Таким образом, проведенные АЭ исследования показали, что термическая обработка при температуре 580°C с выдержкой 1 час приводит к повышению уровня пластичности горячепрессованных труб. Поэтому разупрочняющая обработка по такому режиму может быть рекомендована для повышения технологической пластичности горячепрессованных труб из сплава Zr1Nb. Это позволило выдать рекомендации относительно корректировки обжатий на первом холодном переделе в сторону повышения степени деформации на 30%.

На основании полученных результатов были изменены маршруты деформации на первом холодном переделе – увеличена разовая степень деформации с 42% до 60%. Экспериментальные образцы труб, полученные с большей степенью деформации из термообработанных трубных заготовок, были прокатаны до готового размера. Исследования свойств показали, что они удовлетворяют требованиям, предъявляемым к данному виду продукции.

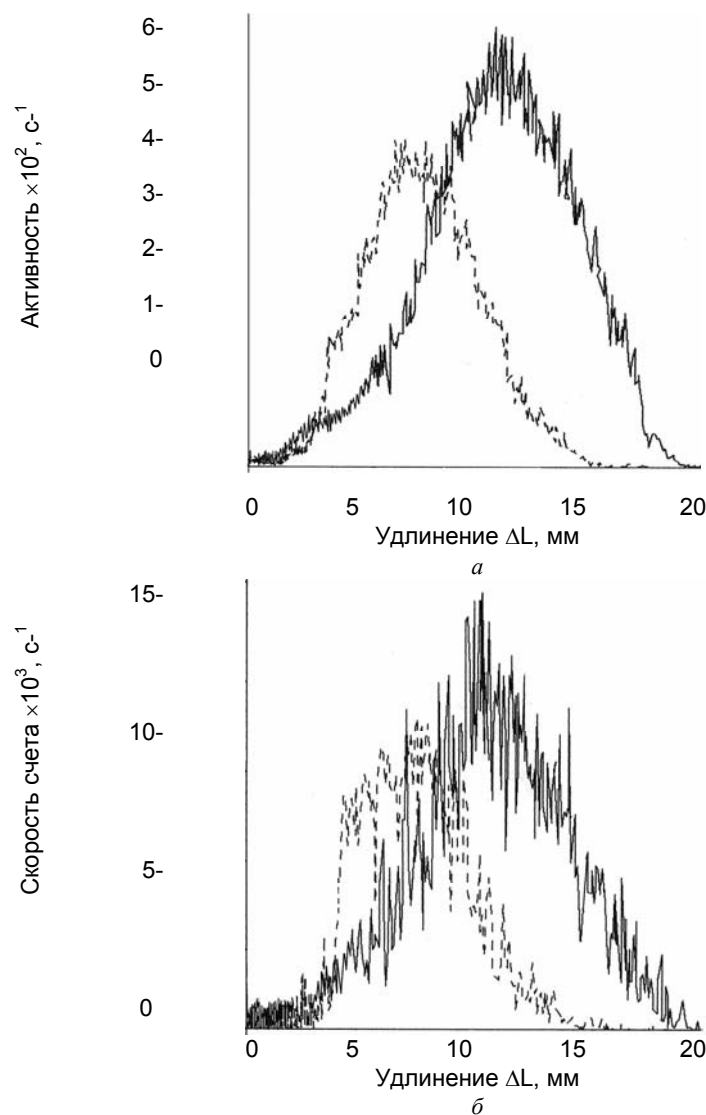


Рис. 2. Влияние отжига на активность (а) и скорость счета (б) акустической эмиссии горячепрессованных труб со структурой мартенситного типа.

----- – горячепрессованное состояние;
 ————— – после отжига.

ВЫВОДЫ

1. Исследовано влияние термической обработки на структуру и свойства горячепрессованных труб из сплава Zr1Nb.
2. Установлено, что нагрев при температуре 580°C в течение 1 часа приводит к распаду твердого раствора ниобия в α -цирконии, к незначительному снижению прочностных и повышению пластических характеристик труб. Повышение температуры нагрева до 650°C сопровождается началом $\alpha \rightarrow \beta$ -превращения, что связано с формированием неоднородной структуры и повышением уровня прочности металла.
3. Методом акустической эмиссии установлено, что термическая обработка при 580°C способствует значительному повышению уровня пластичности за счет облегчения процессов множественного скольжения дислокаций.
4. На основе проведенных исследований выбран оптимальный режим разупрочняющей обработки горячепрессованных труб: нагрев в вакууме при 580°C в течение 1 часа.
5. Проведенные исследования позволили выдать рекомендации по увеличению степени деформации при прокатке отожженных горячепрессованных труб на первом холодном переделе на 30%. Экспериментальные образцы труб, прокатанные с увеличением разовой степени деформации на первом холодном переделе до 60%, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к данному виду продукции.

Литература

1. Вахрушева В.С., Правдин Ю.М., Дергач Т.А., Сухомлин Г.Д. Разработка технологических схем и изготовление опытных партий труб-оболочек твэл из сплава Zr1Nb в Украине. // Труды Международной конференции «Атомная энергетика на пороге XXI века». - г. Электросталь, Россия, 8-10 июня 2000 г.
2. Вахрушева В.С., Коленкова О.А. Вплив структури на пластичність та параметри акустичної емісії в процесі деформування труб // Металознавство та термічна обробка металів. - Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. - Дн-ськ. - 2005. - № 1. - С. 39-44.
3. Вахрушева В.С., Сухомлин Г.Д., Коленкова О.А. Особенности процессов структурообразования в сплавах циркония с ниобием в литом и горячедеформированном состояниях // Металознавство та термічна обробка металів. - Придніпровська державна академія будівництва та архітектури. - Дн-ськ. - 2002. - №2-3. - С. 11-18.

4. Атлас структур циркониевых сплавов/ *Т.П. Черняева, В.С. Красноруцкий, В.М. Грицина* и др. / Труды XV международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. – Алушта, 10-15 июня 2002. – С. 144.
5. *Заводчиков С.Ю., Котрехов В.А., Кузьменко Н.В., Лосицкий А.Ф.* и др. Исследование влияния процессов горячей обработки Zr-х сплавов на качество труб для оболочек твэлов // Тезисы докл. V межотрасл. конф. по реакторному материаловедению. - Димитровград, НИИАР. - Россия, 1997. - 101 с.
6. *Никулин С.А., Ханжин В.Г., Рожнов А.Б., Бабукин А.В. Белов В.А.* Методы анализа процессов деформации и разрушения тонкостенных изделий из сплавов с низкой прочностью// *Металловедение и термическая обработка металлов.*– Москва: «Машиностроение» - № 5 - 2005. - С. 43-50.