

# ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НИОБИЯ НА СТРУКТУРУ, СВОЙСТВА И ПАРАМЕТРЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ТРУБ ИЗ СПЛАВОВ ЦИРКОНИЯ С НИОБИЕМ

*В.С. Вахрушева, Г.Д. Сухомлин, О.А. Коленкова*

*Государственный трубный институт (ГТИ), г. Днепропетровск, Украина*

Исследовано влияние содержания ниобия и температурно-деформационных условий горячего прессования на структуру, механические свойства и параметры акустической эмиссии труб из циркониевого сплава КТЦ-НР. Показано, что метод акустической эмиссии является более чувствительным по сравнению с традиционными методами механических испытаний и может успешно применяться при изучении структурно-напряженного состояния труб из сплавов циркония с ниобием.

## ВВЕДЕНИЕ

К циркониевым сплавам, применяемым для ответственных изделий в атомной энергетике и химической промышленности, предъявляется специфический комплекс требований, определяющих успешную работу в жестких условиях длительной эксплуатации.

Химический состав является одним из факторов, определяющим коррозионную стойкость, необходимые механические свойства и другие эксплуатационные характеристики материала [1]. Однако на свойства готовых изделий наряду с химическим составом существенное влияние оказывает технология их изготовления. Важной задачей при этом является исследование влияния технологических параметров на свойства металла в процессе изготовления холоднодеформированных труб из циркониевых сплавов.

Наряду с традиционными методами исследований в последнее время применяется метод акустической эмиссии (АЭ). Он зарекомендовал себя не только как метод контроля за состоянием конструкций в процессе эксплуатации, но и как инструмент изучения структуры и свойств материалов [2]. Литературные данные свидетельствуют о том, что АЭ более чувствительна к изменению структуры и свойств материала, чем методы механических испытаний [3].

Использование метода АЭ дает возможность не только оценивать влияние различных структурных факторов на физико-механические характеристики, но и следить за развитием процессов пластического течения, трещинообразования и разрушения металла в процессе деформации. Это открывает новые возможности для использования метода АЭ при разработке технологических схем производства труб из циркониевых сплавов.

Целью настоящей работы является изучение влияния содержания ниобия и температурных параметров горячего прессования на структуру, механические свойства и параметры акустической эмиссии труб из циркониевого сплава КТЦ-НР.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Трубную заготовку  $\varnothing 57 \times 9$  мм получали прессо-

ванием слитков из сплава КТЦ-НР, нагретых в индукторе до температур 850...980°C, коэффициент вытяжки был общим для всех слитков ( $\mu = 13$ ). Содержание ниобия варьировалось от 0,05 до 1,1%. Трубы изготавливали многократной холодной прокаткой по маршруту  $\varnothing 57 \times 9 \rightarrow 43 \times 6 \rightarrow 26 \times 3 \rightarrow 19 \times 1,5$  мм с промежуточными умягчающими термообработками.

Исследовали структуру, механические свойства и параметры акустической эмиссии (АЭ) холоднодеформированных и термообработанных труб после каждого прохода.

Для исследования АЭ использовали патрубки длиной 150...250 мм (в зависимости от диаметра труб) со специальной площадкой для крепления датчика. АЭ-сигналы регистрировали при сплющивании патрубков. Испытания проводили на универсальной испытательной машине ZD-10 при комнатной температуре с постоянной скоростью перемещения опор пресса (3 мм/мин.). Такая схема нагружения позволила наиболее полно имитировать в лабораторных условиях процессы, происходящие в очаге деформации, и оценить упруго-напряженное состояние и остаточный ресурс пластичности материала. В процессе испытаний синхронно регистрировали АЭ и перемещение опор пресса ( $\Delta D$ ). В качестве исследуемых акустических параметров выбрали активность АЭ, интенсивность АЭ и суммарную амплитуду регистрируемых сигналов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что основное влияние на структуру и свойства трубной заготовки и передельных труб оказывают содержание ниобия и температура нагрева под прессование. Снижение содержания ниобия в сплаве повышает температуру фазового превращения, что приводит к существенным различиям в структуре трубной заготовки. Это обуславливает различную технологическую пластичность при последующем холодном переделе труб.

Так, для сплава с содержанием ниобия 1,1...0,7% нагрев под прессование до 980°C приводит к почти полной фазовой перекристаллизации в процессе прессования, что обусловлено снижением темпера-

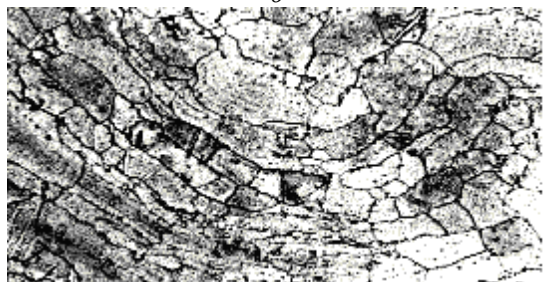
туры  $\alpha$ - $\beta$ - перехода с увеличением содержания ниобия, и образованию в горячепрессованных заготовках бейнитоподобных продуктов распада высокотемпературной  $\beta$ -фазы (рис. 1а).



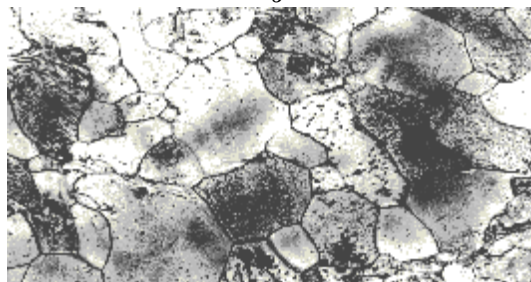
а



б



в



г

Рис.1. Микроструктура горячепрессованных труб из сплава КТЦ-НР с различным содержанием ниобия: 1,1...0,7% (а); 0,7...0,4 % (б); 0,4...0,15 % (в); менее 0,15 % (г)

При содержании ниобия 0,7...0,4% и такой же температуре прессования происходит частичная перекристаллизация  $\alpha$ - $\beta$ - $\alpha$  и в структуре присутствует значительное количество деформированных  $\alpha$ -пластин неперекристаллизовавшегося циркония (рис.1,б).

В сплаве с малым содержанием ниобия

(0,4...0,15%) при температурах 850...880°C фазовая перекристаллизация не происходит и в структуре наблюдаются горячедеформированные частично рекристаллизованные, а также фрагментированные кристаллы  $\alpha$ -циркония с искривлением исходных пластин литой структуры, характерным для деформационного течения металла (рис.1в).

Последующая холодная деформация и отжиг не всегда приводят к исправлению горячедеформированной слоистой структуры в сплавах с более высоким содержанием ниобия (0,7...0,4%), поскольку следы исходных пластин структуры слитка декорируются частицами ниобийсодержащей фазы. В сплавах с более низким содержанием ниобия (0,4...0,15%) в процессе холодной деформации и промежуточных отжигов частицы второй фазы распределяются равномерно. При содержании ниобия менее 0,15% в горячепрессованных трубных заготовках наблюдается полностью рекристаллизованная структура из равновесных зерен  $\alpha$ -циркония (рис.1г).

Различия в структуре трубной заготовки с различным содержанием ниобия существенно влияют на механические свойства металла на холодном переделе и характер АЭ сигнала. В таблице приведены механические свойства горячепрессованных и передельных труб с различным содержанием ниобия.

Из таблицы видно, что снижение содержания ниобия в сплаве приводит к снижению прочностных характеристик и повышению пластичности, как горячепрессованной трубной заготовки, так и передельных труб. Однако для сплава, содержащего 0,7...0,4% ниобия, на холодном переделе характерен рост прочности на 10-15% по сравнению со сплавом, содержащим около 1,1...0,7%, что можно объяснить влиянием не полностью перекристаллизованной структуры.

Методом АЭ исследовали влияние структурного фактора на технологическую пластичность труб из сплавов циркония непосредственно в процессе деформации. На рис.2 приведены временные зависимости активности и амплитуды акустических импульсов от образцов, отобранных от термообработанных образцов  $\varnothing$  19x1,5 мм с различным содержанием ниобия.

Видно, что снижение содержания ниобия приводит к росту активности, т.е. с уменьшением содержания ниобия снижается доля хрупкой составляющей, и для сплава с содержанием ниобия менее 0,15% можно наблюдать практически чистую пластическую деформацию (полное сплющивание образцов не приводит к появлению видимых нарушений сплошности металла).

Результаты АЭ исследований подтверждают также данные механических испытаний об увеличении прочности сплавов с содержанием ниобия 0,7...0,4% по сравнению со сплавом с 1,1...0,7% ниобия.

Анализ кривых показал, что такой параметр АЭ как амплитуда является менее показательным, чем

Содержание ниобия %	Температура прессования °С	Горячепрессованные трубы Ø 57x9 мм.				Термообработанные трубы Ø19x1,5 мм.		
		$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\varphi$ , %	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %
1,1...0,7	980°С	560	588	20,7	55,0	378	545	22,3
0,7...0,4	980°С	516	572	20,3	48,5	455	595	25,2
0,4...0,15	880°С	490	555	25,6	42,0	345	520	25,0
< 0,15	850°С	480	545	27,5	36,2	322	505	34,5

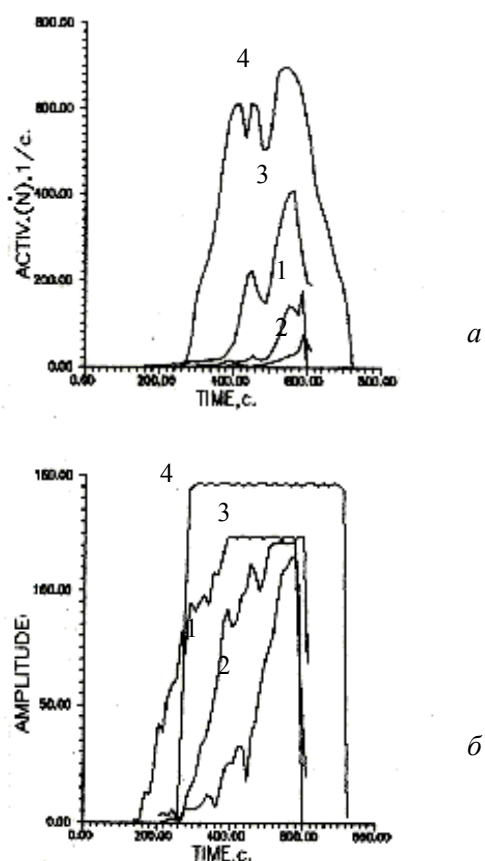


Рис.2. Влияние содержания ниобия на активность (а) и амплитуду (б) акустической эмиссии термообработанных труб из сплава КТЦ-НР Ø 19x1,5 мм 1 - 1,1...0,7 % Nb; 2 - 0,7...0,4 % Nb; 3 - 0,4...0,15 % Nb; 4 - менее 0,15 % Nb

активность или интенсивность сигналов применительно к цирконию. Известно, что цирконий, как и другие металлы с решеткой ГПУ, деформируется не только скольжением дислокаций, но и двойникованием, которое сопровождается АЭ-импульсами высокой амплитуды [1]. Поэтому довольно сложно разделить процессы деформации и роста трещины, особенно в термообработанном металле.

На рис.3 представлены параметры АЭ-сигналов холоднодеформированных образцов от труб Ø 43x6 мм и кривые перемещения ( $\Delta D(t)$ ), регистрировавшие изменение диаметра образцов в ходе эксперимента.

Как видно из рис.3, образцы с содержанием ниобия менее 0,15% имеют высокую активность и ам-

плитуду импульсов уже на ранних стадиях деформирования. В то же время, образцы с содержанием ниобия 1,1...0,7% характеризуются низкими значениями активности АЭ сигналов до разрушения образца, когда наблюдается резкий скачок активности. При рассмотрении кривых перемещения видно, что форма и угол наклона кривой к оси X зависят от содержания ниобия - со снижением содержания ниобия угол наклона уменьшается, что соответствует более высокому уровню пластичности металла.

Сопоставление акустических параметров и кривых перемещения при сплющивании образцов холоднодеформированных труб показали, что трубы из сплавов с пониженным содержанием ниобия имеют остаточный ресурс пластичности, достаточный для корректировки схемы деформации в сторону увеличения обжатий. В то же время ресурс пластичности металла труб с повышенным содержанием ниобия при интенсивной схеме деформации ( $\epsilon = 60-65\%$ ) практически исчерпывается, что создает предпосылки для образования деформационных дефектов, не устранимых последующей термообработкой. Совместное рассмотрение результатов механических испытаний и данных АЭ подтверждает тот факт, что АЭ-метод более чувствителен к изменению структурных и технологических факторов при изучении циркониевых сплавов.

Таким образом, по результатам настоящей работы можно сделать следующие выводы:

1. Изучены структура, механические характеристики и параметры АЭ-циркониевого сплава КТЦ-НР с различным содержанием ниобия.
2. Установлено, что основное влияние на структуру и свойства трубной заготовки и готовых труб оказывают содержание ниобия и температура нагрева под прессование.
3. Показано, что уменьшение содержания ниобия приводит к повышению пластичности и некоторому снижению прочности труб из сплава КТЦ-НР как в холоднодеформированном, так и в термообработанном состоянии.
4. Найдено, что метод АЭ является более чувствительным по сравнению с традиционными методами механических испытаний при изучении структурно-напряженного состояния труб из сплавов циркония с ниобием.

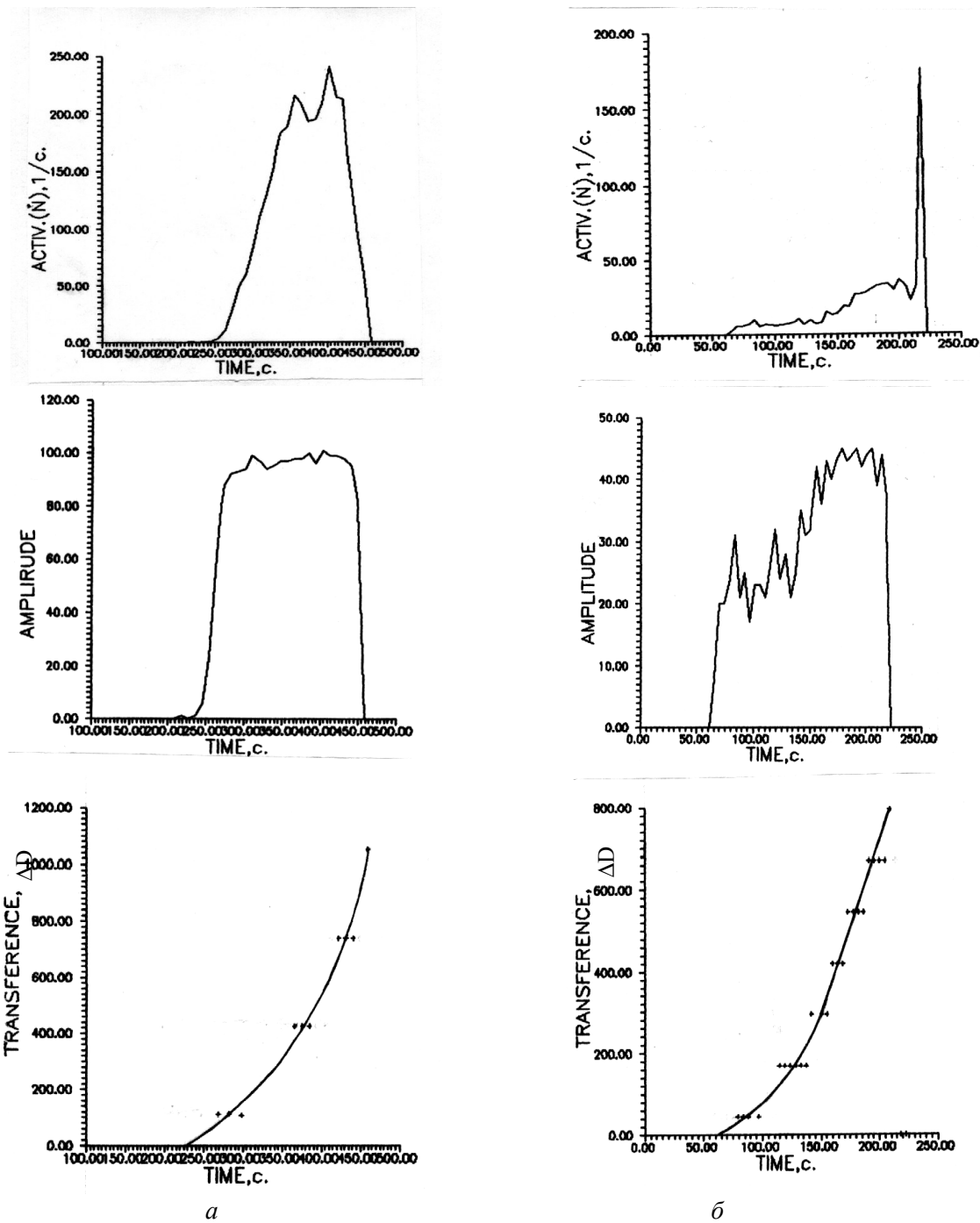


Рис.3. Влияние содержания ниобия на акустические параметры и пластичность холоднодеформированных труб из сплава КТЦ-НР  $\varnothing 43 \times 6$  мм с содержанием ниобия менее 0,15% (а) и 1,1...0,7% (б)

## ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергоиздат, 1981.
2. В.И. Иванов, В.М. Белов. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1991.
3. П.И. Стоев. Исследование акустических спектров циркония в процессе деформации // ВАИТ. Сер.: ФРИП и РМ. 1997, вып.1(65), 2(66), с.135-139.