

# ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ СТЕПЕНЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ-ОБОЛОЧЕК ТВЭЛ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

*В.С. Вахрушева, О.А. Коленкова*

*Научно-исследовательский трубный институт им. Я.Е. Осады  
(ГП НИТИ), Днепрпетровск*

Исследовано влияние особенностей структуры, созданной при высокотемпературном прессовании, на уровень пластичности горячепрессованных трубных заготовок (трекс-труб) из сплава Zr-1%Nb. Методом акустической эмиссии выполнена оценка остаточного ресурса пластичности металла холоднодеформированных труб с различными типами структуры.

## ВВЕДЕНИЕ

Технология производства труб-оболочек твэл для атомных реакторов из циркониевого сплава Zr-1%Nb, которая разрабатывается в Научно-исследовательском трубном институте (ГП НИТИ), содержит ряд особенностей [1], отличных от традиционных технологий, используемых в мировой практике, а именно:

- использование литой трубной заготовки;
- высокотемпературное (в  $\beta$ -области) прессование литых трубных заготовок;
- закалка с прокатного нагрева.

При изготовлении труб-оболочек твэл из циркониевых сплавов значительное влияние на поведение материала в процессе холодной деформации оказывает уровень его пластичности, который определяется структурным состоянием, полученным на стадии горячей деформации. В мировой практике при изготовлении труб из циркониевых сплавов из-за невысокого уровня технологической пластичности трубных заготовок на первой стадии холодной прокатки обычно применяют небольшие обжатия. Технология, разрабатываемая в ГП НИТИ, позволяет за один цикл горячего прессования получить трубные заготовки с однородной и мелкодисперсной структурой [2]. Это создает предпосылки для повышения степени деформации при прокатке труб на первом холодном переделе.

Для определения оптимальных параметров горячей и холодной деформаций при разработке технологии производства труб-оболочек твэл из сплава Zr-1%Nb необходимо оценить влияние особенностей структуры горячепрессованных труб на пластичность и повреждаемость металла. Анализ литературных данных показал, что для исследования развития деформации и накопления повреждений в циркониевых сплавах может быть успешно применен метод акустической эмиссии (АЭ) [3-5].

Целью работы является определение влияния особенностей структуры, созданной при высокотемпературном прессовании, на уровень пластичности горячепрессованных трубных заготовок (трекс-труб) из сплава Zr-1%Nb и оценка остаточного ресурса пластичности металла холоднодеформированных

труб с различными типами структуры методом акустической эмиссии.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ

Материалом исследования служили горячепрессованные и холоднодеформированные трубы сплава Zr-1%Nb, изготовленные из слитков  $\varnothing 170$  мм электронно-лучевого и вакуумно-дугового переплава. Содержание кислорода в заготовках составляло 0,1...0,11%. Прессование слитков проводили при температурах  $\beta$ -области с последующей закалкой горячепрессованных труб в воду непосредственно после прессования либо охлаждением на воздухе, а также в межкритическом интервале температур ( $\alpha+\beta$ ). Коэффициент вытяжки при прессовании составлял  $\mu = 13,6$ .

Из горячепрессованных труб были изготовлены опытные образцы холоднодеформированных труб со степенью деформации 42 и 60% по следующим маршрутам:

1.  $\varnothing 46 \times 6,5$  мм  $\rightarrow$   $\varnothing 35 \times 5$  мм; коэффициент вытяжки  $\mu = 1,71$ ;  $\epsilon = 42\%$ ;
2.  $\varnothing 46 \times 6,5$  мм  $\rightarrow$   $\varnothing 30 \times 4$  мм; коэффициент вытяжки  $\mu = 2,47$ ;  $\epsilon = 60\%$ .

Структуру горячепрессованных и холоднодеформированных труб изучали качественными и количественными методами с помощью светового микроскопа "Неофот 21" и автоматического анализатора структуры "Эпиквант".

Изучение акустоэмиссионных спектров горячепрессованных и холоднодеформированных труб из циркониевых сплавов проводили с помощью компьютеризированного исследовательского комплекса, созданного в ГП НИТИ.

Сигналы АЭ регистрировали в процессе нагружения образцов-сегментов, изготовленных из исследуемых труб. Нагружение образцов проводили одноосным растяжением со скоростью  $1 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> при комнатной температуре. Регистрацию АЭ сигналов осуществляли с помощью закрепленного на образце широкополосного пьезоэлектрического датчика. Далее через предусилитель сигналы поступали на вход прибора АФ-15, где происходила их первичная обработка. В процессе растяжения образцов синхронно регистрировали усилие, перемещение и па-

параметры АЭ: активность, скорость счета, суммарную амплитуду сигналов. Запись и окончательную обработку АЭ параметров и данных, поступающих с датчиков усилия и перемещения, производили с помощью разработанных для этой цели компьютерных программ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведен сравнительный анализ структуры, АЭ распределений и деформационных кривых, полученных при одноосном растяжении образцов, изготовленных из горячепрессованных труб с различными типами структуры: мартенситного типа (см. рис. 1,а), бейнитного типа (см. рис. 1,б) и с не-

полностью перекристаллизованной структурой (см. рис. 1,в).

На рис. 2 представлены кривые активности и скорости счета, а также деформационные кривые, записанные в процессе нагружения образцов. Из этого рисунка видно, что акустоэмиссионные зависимости, полученные при нагружении горячепрессованных труб с различными типами структуры, существенно отличаются.

Структура деформированных образцов горячепрессованных труб в зоне разрушения показана на рис. 3.

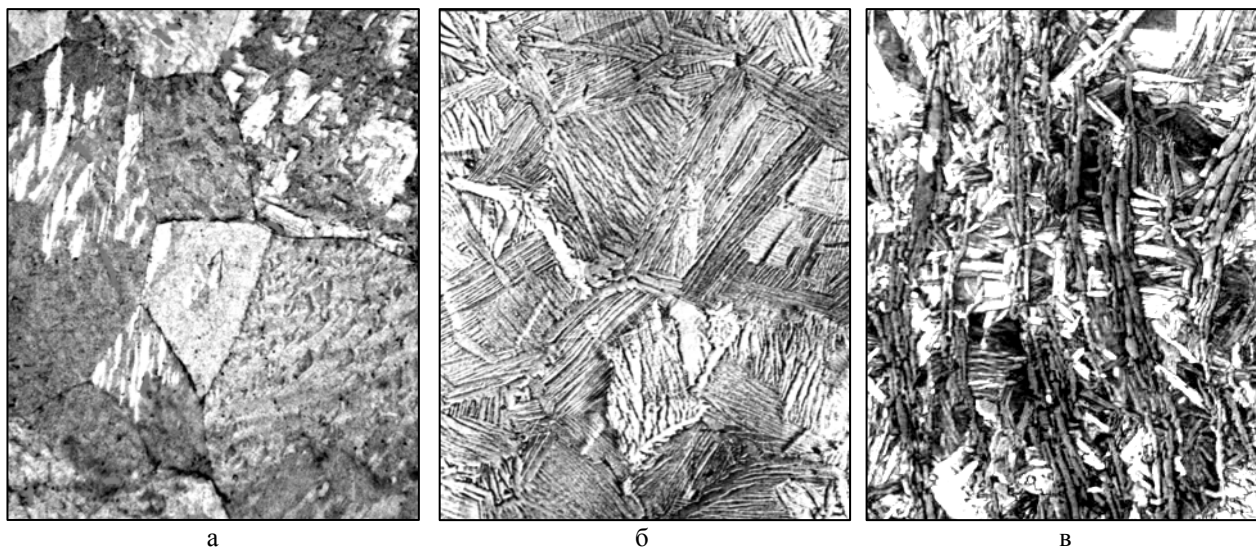


Рис. 1. Структура горячепрессованных труб, полученных по различным режимам прессования и охлаждения,  $\times 400$ : а – структура мартенситного типа; б – структура бейнитного типа; в – полностью перекристаллизованная структура

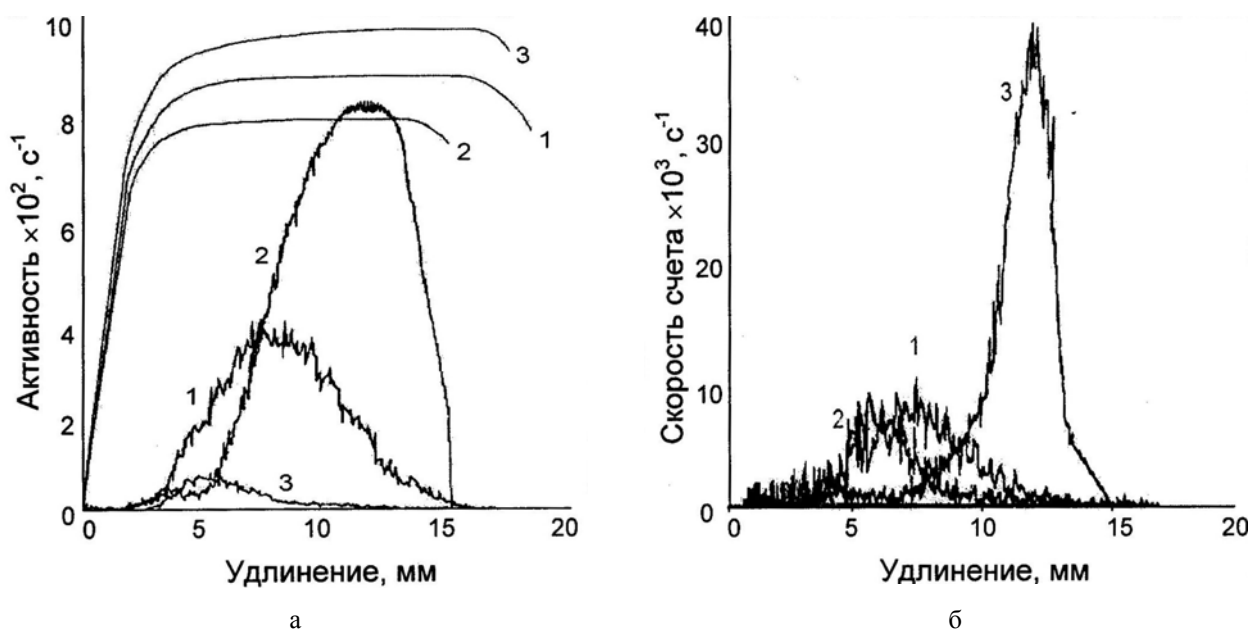


Рис. 2. Деформационные кривые, кривые активности (а) и скорости счета АЭ (б), полученные при растяжении образцов горячепрессованных труб с различными типами структуры: 1 – структура мартенситного типа; 2 – структура бейнитного типа; 3 – полностью перекристаллизованная структура

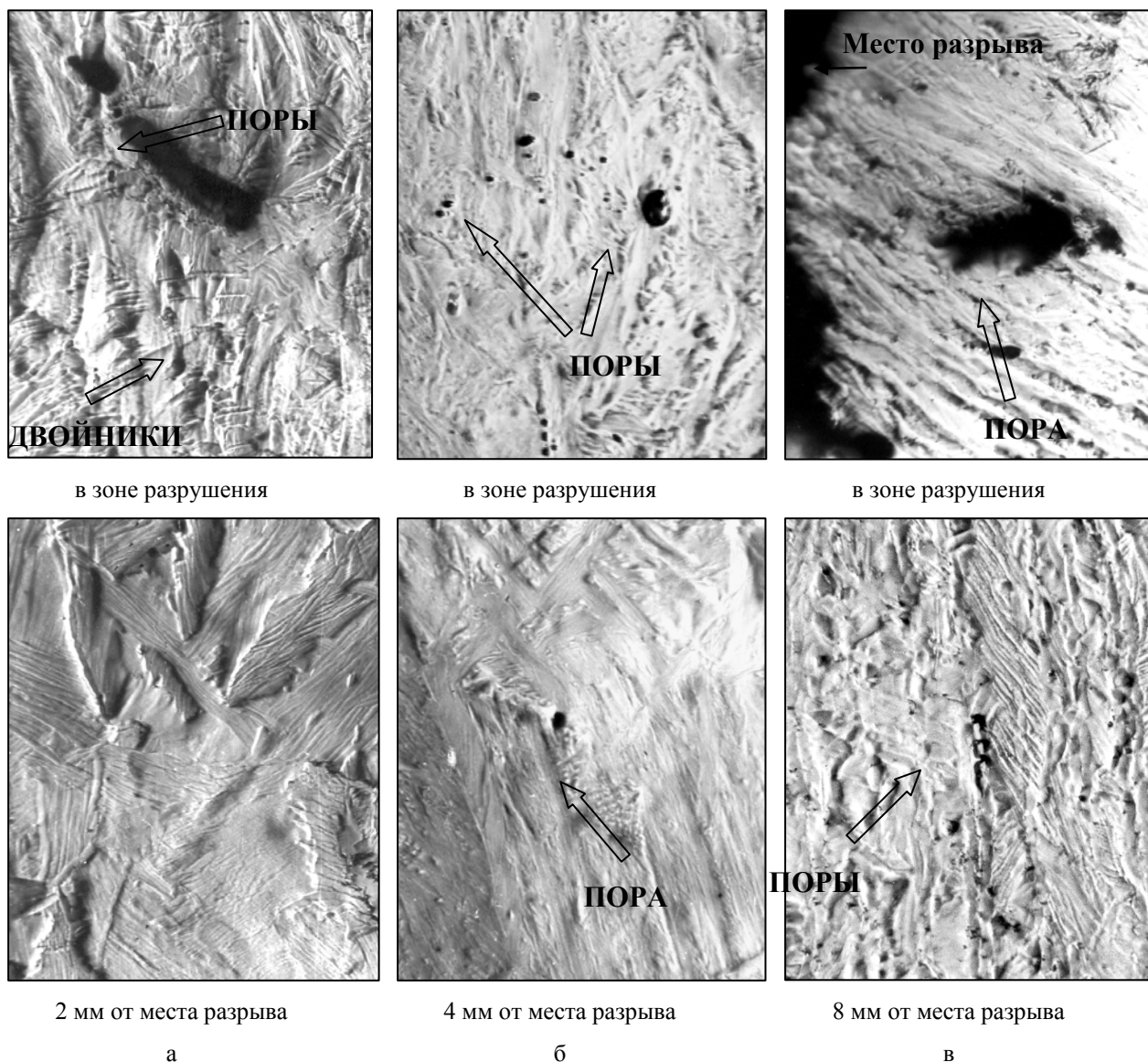


Рис. 3. Структура деформированных образцов горячепрессованных труб на различном удалении от места разрыва,  $\times 400$ : а – структура мартенситного типа; б – структура бейнитного типа; в – полностью перекристаллизованная структура

На рис. 4 приведен график изменения количества пор в разрушенных образцах по мере удаления от места разрыва. Из рисунков видно, что в металле разрушенных образцов со структурой бейнитного типа количество пор очень незначительно даже вблизи места разрыва. В то же время для образцов со структурой мартенситного типа характерно наличие большого количества мелких пор в зоне разрушения – до  $25 \times 10^3$  единиц на  $\text{мм}^3$  и монотонное снижение их концентрации до нуля на расстоянии 4...5 мм от места разрыва.

В образцах труб с полностью перекристаллизованной структурой количество пор невелико, но глубина их распространения примерно вдвое больше, чем в образцах со структурой мартенситного типа.

Кроме того, в образцах труб со структурой бейнитного типа в зоне, прилегающей к месту разрушения, содержится большое количество деформационных двойников (см. рис. 3,а). Однако по мере удаления от места разрыва их количество резко уменьша-

ется, и на расстоянии около 2 мм двойники уже не встречаются. В образцах с мартенситной структурой двойники встречаются редко, даже вблизи зоны разрушения (см. рис. 3,б). В образцах с полностью перекристаллизованной структурой методом световой микроскопии двойники не обнаружены (см. рис. 3,в).

Анализ АЭ распределений и структуры разрушенных образцов показал, что наиболее высокий уровень технологической пластичности при пониженной склонности к образованию необратимых дефектов структуры в процессе деформации имеет металл со структурой мартенситного типа. Металл со структурой бейнитного типа обладает значительно большей склонностью к упрочнению и накоплению необратимых дефектов в процессе деформации.

Структурная неоднородность в металле с полностью перекристаллизованной структурой приводит к образованию неустраняемых дефектов при меньших степенях деформации.

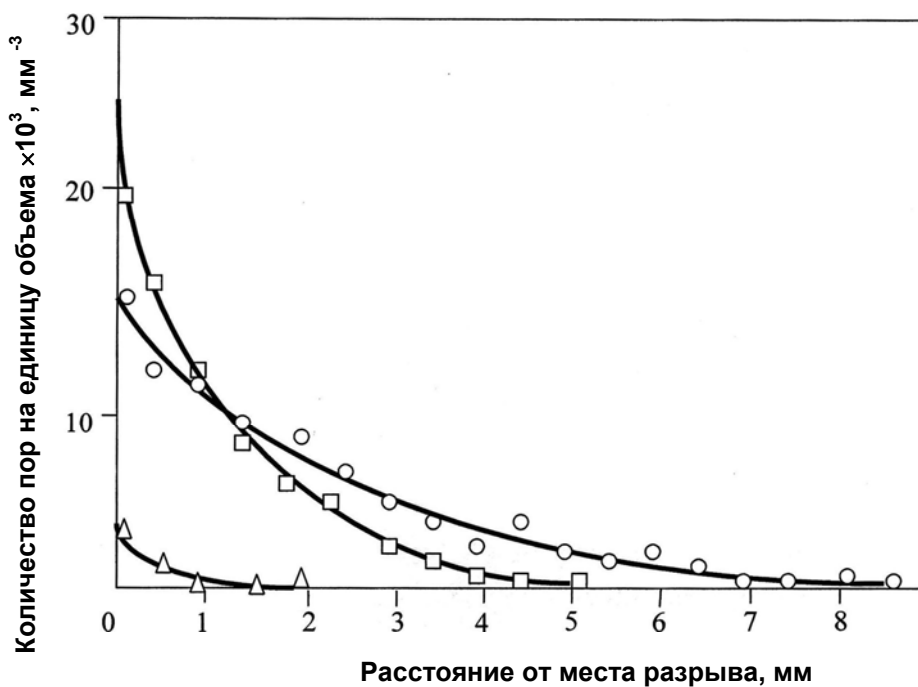


Рис. 4. Распределение пор в структуре разрушенных образцов горячедеформированных труб с различным типом структуры:  
 □ – структура мартенситного типа; △ – структура бейнитного типа;  
 ○ – неполностью перекристаллизованная структура

На рис. 5 показаны кривые активности и скорости счета, записанные при одноосном растяжении образцов холоднореформированных труб, изготовленных из горячепрессованных трубных заготовок со структурой мартенситного, бейнитного типов и неполностью перекристаллизованной структурой.

Как видно из рисунка, в образцах труб со структурой **бейнитного и мартенситного типов**, прокатанных со степенью деформации 42%, сохраняется достаточно высокий уровень параметров АЭ. Это указывает на то, что ресурс пластичности металла ещё не полностью исчерпан и имеется возможность для повышения степени деформации.

В трубах с **неполностью перекристаллизованной структурой** наблюдается низкий уровень активности АЭ в сочетании с довольно высокими значениями скорости счета. Это говорит о том, что процессы множественного скольжения дислокаций в металле затруднены, и ресурс пластичности находится на достаточно низком уровне. Дальнейшее повышение степени деформации может привести к возникновению дефектов структуры, неустраняемых последующей термообработкой.

Повышение степени деформации до 60% привело к значительному снижению уровня параметров АЭ при деформации образцов труб со структурой **мартенситного типа**. Однако количество сигналов и вид АЭ распределений указывает на то, что в металле сохраняется некоторый остаточный ресурс пластичности и такая деформация не приводит к образованию необратимых дефектов структуры.

Низкий уровень активности АЭ импульсов в сочетании с довольно высокими значениями скорости счета в образцах труб со структурой **бейнитного типа** указывает на высокий уровень энергии излучаемых сигналов. Подобный характер АЭ распределений говорит о том, что остаточный ресурс пластичности металла находится на низком уровне. Повышение степени деформации при прокатке до 60% может привести к зарождению необратимых повреждений структуры.

В то же время в образцах труб с **неполностью перекристаллизованной структурой**, прокатанных со степенью деформации 60%, очень низкий уровень АЭ сигналов в процессе нагружения, и резкий скачок активности и скорости счета АЭ в момент разрушения свидетельствует о полном исчерпании ресурса пластичности металла и хрупком характере разрушения.

Проведенные исследования показали, что металл горячепрессованных труб со структурой мартенситного типа обладает наиболее высоким уровнем технологической пластичности. Это позволяет значительно повысить степень деформации при холодной прокатке и уменьшить цикличность производства.

Исследования подтвердили также, что метод АЭ может быть успешно применен для оценки остаточного ресурса пластичности металла горячепрессованных и холоднореформированных труб, а также для определения допустимых обжатий при холодной прокатке.

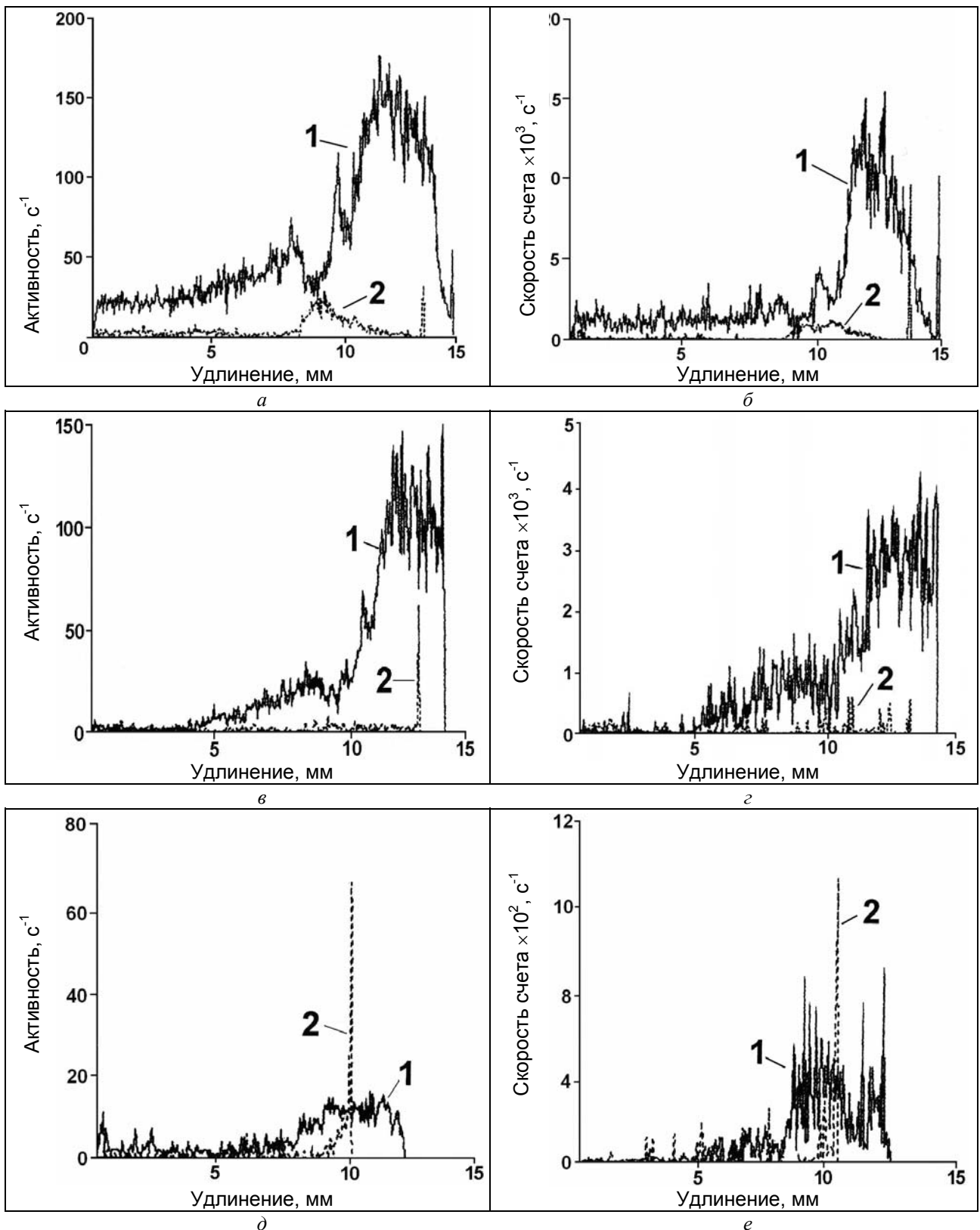


Рис. 5. Кривые активности и скорости счета АЭ, записанные в процессе нагружения образцов холоднотемпературно деформированных труб из сплава Zr-1%Nb, прокатанных из горячепрессованных трубных заготовок со структурой:

а, б – мартенситного типа; в, г – бейнитного типа; д, е – с неполностью перекристаллизованной структурой; степень деформации – 42 (1) и 60% (2)

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность использования метода акустической эмиссии для оценки технологической пластичности металла труб из сплава Zr-1%Nb.

Выполнена оценка влияния различного типа структур, формирующихся на стадии горячей деформации в трекс-трубах (мартенситной, бейнитной и неполностью перекристаллизованной), на ресурс

пластичности металла при последующей холодной прокатке.

Установлено, что горячепрессованные трубы со структурой мартенситного типа обладают наиболее высоким уровнем технологической пластичности.

Показано, что метод акустической эмиссии может быть успешно применен для оценки остаточного ресурса пластичности металла горячепрессованных и холоднодеформированных труб, а также для определения допустимых обжатий при холодной прокатке.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В.С. Вахрушева, Ю.М. Правдин, Т.А. Дергач, Г.Д. Сухомлин. Разработка технологических схем и изготовление опытных партий труб-оболочек твэл из сплава ZrNb в Украине // *Труды Международной конференции «Атомная энергетика на пороге XXI века»*, г. Электросталь, Россия, 8-10 июня 2000 г.

2. В.С. Вахрушева, Г.Д. Сухомлин, О.А. Коленкова. Влияние скоростного индукционного нагрева на формирование структуры горячедеформированных труб из сплава Zr-1%Nb // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов*. В. 36, ч.1. Днепропетровск: ПГАСА, 2006, с. 143-150.

3. А.А. Юдин, В.И. Иванов. Связь сигнала акустической эмиссии с пластической деформацией металла // *Проблемы прочности*. 1986, № 6, с. 103-105.

4. В.А. Стрельченко, В.В. Данилин, Л.П. Бердник, С.Н. Пичков. Описание процесса деформирования и построение шкалы повреждаемости материалов по сигналам акустической эмиссии // *ТД и НК*. 1991, №1, с. 87-93.

5. S.A. Nikulin, V.G. Khanzhin, A.B. Rojnov. Application of an Acoustic Emission Method for SCC Testing of Zirconium Cladding Tubes // *CORROSION/2002, 57th Annual Conference and Exposition, 7-12 April 2002, Denver, USA*, p. 02437.

*Статья поступила в редакцию 05.09.2008 г.*

### ОЦІНКА ДОПУСТИМИХ СТУПЕНІВ ДЕФОРМАЦІЇ ПРИ БУДУВАННІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ-ОБОЛОНОК ТВЕЛ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

*В.С. Вахрушева, О.О. Коленкова*

Досліджено вплив особливостей структури, створеної при високотемпературному пресуванні на рівень пластичності гарячопресованих трубних заготовель (трекс-труб) із сплаву Zr-1%Nb. Методом акустичної емісії виконано оцінку залишкового ресурсу пластичності металу холоднодеформованих труб з різними типами структури.

### ACOUSTIC EMISSION ESTIMATION OF ADMISSIBLE DEFORMATION RATIOS AT CONSTRUCTING TECHNOLOGICAL PROCESSES OF FUEL CLADDING TUBE COLD ROLLING

*V.S. Vakhruslieva, O.A. Kolenkova*

The influence of special features of high-temperature-pressed structure on the ductility level of hot-pressed Zr-1%Nb tubing stock has been investigated. The acoustic emission technique has been used to estimate the residual ductility resource of the metal of cold-worked tubes having different types of the structure.