

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТВЭЛЬНЫХ ТРУБ ИЗ СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Zr1%Nb С ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

*П.И. Стоев¹, В.А. Белоус¹, В.Н. Воеводин^{1,2}, А.С. Куприн¹, С.А. Леонов¹,
В.Д. Овчаренко¹, М.А. Тихоновский¹, В.М. Хороших¹*

¹*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина;*

²*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина
E-mail: stoev@kpt.kharkov.ua; тел. +38(057)335-60-32*

Приведены результаты исследования влияния различных покрытий, нанесенных ионно-плазменным методом, на механические свойства и акустические параметры образцов твэльных трубок из сплава Zr1%Nb. Кольцевые образцы испытывали при комнатной температуре на растяжение в радиальном направлении. Показано, что покрытия существенно влияют на прочностные и пластические характеристики образцов. Так, предел прочности образцов с покрытиями X18H10T, Cr/CrN, TiN увеличивается на 15...16,5%, а предел текучести – на 8...12,5%. Сохранение пластичности (или ее небольшой рост) обнаружено для покрытий CrAl, CrAl/CrN и ZrN. Наилучшим сочетанием механических свойств обладают образцы с покрытиями CrAl, CrAl/CrN и X18H10T. Заключение о функциональном состоянии нанесенного защитного покрытия в областях упругой и пластической деформаций сделано с помощью амплитудного анализа сигналов акустической эмиссии, зарегистрированных в процессе механических испытаний.

ВВЕДЕНИЕ

Циркониевые сплавы являются основным конструкционным материалом для изделий активной зоны атомных энергетических реакторов (оболочек твэлов, дистанцирующих решеток и т. д.) [1–2]. Наиболее ответственными составляющими твэлов являются оболочковые трубы. Оболочки твэлов работают в сложных условиях воздействия температуры, радиационного облучения, напряжения, коррозионных факторов и водородного насыщения. Кроме того, поверхность трубок может повреждаться как в момент установки сборок, так и в процессе эксплуатации. Все эти факторы существенным образом влияют на деградацию механических свойств материала и снижение продолжительности ресурса его эксплуатации [3–7].

Существуют два пути повышения ресурса циркониевых изделий:

– разработка новых сплавов с совершенной микроструктурой и высоким уровнем физико-механических свойств;

– разработка новых технологических процессов обработки изделий из существующих сплавов, прежде всего, основанных на модификации структурного состояния и свойств поверхности изделий и нанесения различных защитных покрытий.

Создание новых сплавов – это длительный и дорогостоящий процесс, который требует значительных финансовых затрат и времени на комплексные испытания и исследования. Поэтому экономически более целесообразным представляется второй путь, заключающийся в повышении эксплуатационных свойств циркониевых изделий и их защите от коррозии и наводороживания с помощью модификации поверхности или создания тонких поверхностных слоев, отличающихся по

составу, структуре и свойствам от основного сплава, из которого они изготовлены. Такие покрытия должны комплексно решить проблемы коррозии, наводороживания и увеличения механических характеристик циркониевых изделий.

Модификация поверхности осуществляется методами ионно-плазменного осаждения металлов и ионной имплантации [8, 9], обработкой плазмой, лазерными, электронными и ионными пучками [10].

Действие импульсных электронных пучков (ИЭП) позволяет кардинальным образом модифицировать приповерхностные слои толщиной в десятки микрометров, практически не изменяя структурно-фазового состояния основного объема изделия. Эффективность использования ИЭП для улучшения механических свойств (увеличения твердости, повышения коррозионной стойкости и износостойкости, уменьшения коэффициента трения) конструкционных материалов была показана в работах [8–10].

В ННЦ ХФТИ в течение последних 40 лет проводятся исследования по созданию высокопроизводительных и эффективных методов модификации поверхности различных конструкционных материалов, результативность и высокий уровень которых сохраняет Институту лидирующую роль в области вакуумно-дуговой технологии покрытий. Эти исследования позволили создать промышленный метод нанесения различных покрытий и разработать оборудование (с различными эксплуатационными характеристиками) для его реализации, которые широко применяются во многих отраслях промышленности различных стран мира для создания эффективных функциональных покрытий [11–13].

При разработке покрытий на твэльные трубки в первую очередь необходимо контролировать механические характеристики образцов с

покрытиями и механическое поведение (целостность) покрытий в области рабочих напряжений, т. е. ниже предела текучести. Информация о таком поведении может быть получена в результате исследования акустической эмиссии, возникающей в процессе деформации образцов.

Целью данной работы было изучение механических характеристик и акустических параметров при растяжении образцов твэльных трубок из сплава Zr1%Nb с различными покрытиями.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Специфика геометрии и размеров изделий из циркониевых сплавов, используемых в ядерных установках, в большинстве случаев не позволяет изготавливать стандартные образцы и применять методики, предусмотренные государственными стандартами для других отраслей промышленности. В связи с этим на практике широко применяют специальные методики механических испытаний, которые разрабатывались с учетом конкретных типоразмеров изделий и позволяли адекватно характеризовать механические характеристики материала.

В данной работе образцы для испытаний вырезали механическим способом из твэльных трубок, которые были изготовлены в Днепропетровске из сплава циркония Zr1%Nb украинского производства. Механические свойства тонкостенных труб в поперечном направлении обычно определяют в результате испытаний кольцевых образцов на разрыв при растяжении на полукруглых опорах. Проведенные расчеты параметров образцов для циркониевых материалов с учетом неравномерности торможения деформации на опорах позволили для испытаний в данной работе использовать образцы размером 13,1×0,65×2,8 мм. Внешний вид кольцевого образца и приспособления для его испытания показаны на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид кольцевого образца и приспособления для испытаний

Осаждение покрытий проводили вакуумно-дуговым методом на установке типа «Булат» с использованием катодов из Zr, Cr, Al, Ti, X18H10T [9]. На образцы наносили однослойные и

многослойные, однокомпонентные и трехкомпонентные покрытия. Многослойные покрытия выполняли на основе чередующихся слоев чистых металлов и их нитридов. Температура образцов в режиме конденсации составляла около 400 °С. Токи вакуумной дуги изменялись в пределах 80...100 А. Давление реакционного газа азота составляло 0,4...0,6 Па. Растяжение образцов в радиальном направлении проводили на универсальной испытательной машине 1958 У10-1 со скоростью деформации 0,17 мм/мин ($2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$) при комнатной температуре. Из полученных кривых растяжения определяли предел прочности, условный предел текучести и удлинение. Синхронно с механическими характеристиками с помощью акустического комплекса М400 регистрировали параметры акустической эмиссии (АЭ) (активность, общую сумму импульсов, среднюю амплитуду и др.), анализ которых позволял определять особенности деформации материала образца и покрытия на разных стадиях деформации, а амплитудным распределением акустических сигналов АЭ оценивали энергетику текущего момента деформации. В качестве датчика–регистратора АЭ использовали пьезо-керамический преобразователь из керамики ЦТС-19 с резонансной частотой 180 кГц. Датчик крепили к исследуемому образцу через специальный волновод, который служил одной из крепежных опор образца в приспособлении для испытания. Сбор, обработку и анализ результатов, включавших информацию об АЭ и параметрах деформирования, проводили с помощью ЭВМ и специально разработанных программ обработки данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механические характеристики испытанных образцов в исходном состоянии, т. е. без покрытий, и с нанесенными покрытиями различной толщины приведены в таблице.

Рассмотрим особенности поведения механических и акустических параметров при деформировании образцов из исходных трубок и трубок с различными покрытиями.

Исходные трубки и трубки с покрытиями TiN и ZrN. На рис. 2 приведены зависимости напряжения и активности АЭ от времени нагружения (т. е. фактически от величины деформации), а также амплитудное распределение для исходного (без покрытия) образца, вырезанного механическим способом из твэльной трубки. По оси Y гистограммы амплитудного распределения отложено количество сигналов АЭ (в относительных величинах), которые зарегистрировал каждый амплитудный счетчик, настроенный на определенный интервал амплитуд, в процессе испытания.

Механические характеристики образцов с различными покрытиями

Номер образца	Покрытие // толщина // термообработка	σ_B , МПа	σ_T , МПа	Удлинение, мм
1	Исходное состояние	434,2	372,6	2,00
2	TiN // 10,0 мкм	505,7	419,2	1,68
3	TiN // 13,0 мкм	466,0	386,0	1,50
4	ZrN // 2,5 мкм	462,7	379,8	1,76
5	ZrN // 2,5 мкм // вак. отжиг при 550 °С, 1 ч	417,5	339,5	2,05
6	ZrN // 6,0 мкм	444,30	375,0	1,60
7	ZrN // 6,0 мкм // вак. отжиг при 550 °С, 1 ч	430,3	354,3	1,82
8	ZrN // 11,0 мкм	474,2	405,4	1,82
9	Zr(ON) // 4,0 мкм	474,8	405,0	1,80
10	CrAl // 5,0 мкм	473,0	388,5	2,30
11	X18H10T // 10,0 мкм	496,4	409,2	1,90
12	CrAl/CrN // 8,5 мкм	479,5	410,0	2,03
13	Cr/CrN // 14,0 мкм	472,9	374,7	1,00
14	Cr/CrN // 14 мкм // вак. отжиг при 550 °С, 1 ч	505,4	402,7	1,15
15	ZrCr/Cr/CrN // 9,0 мкм	490,7	398,4	1,43

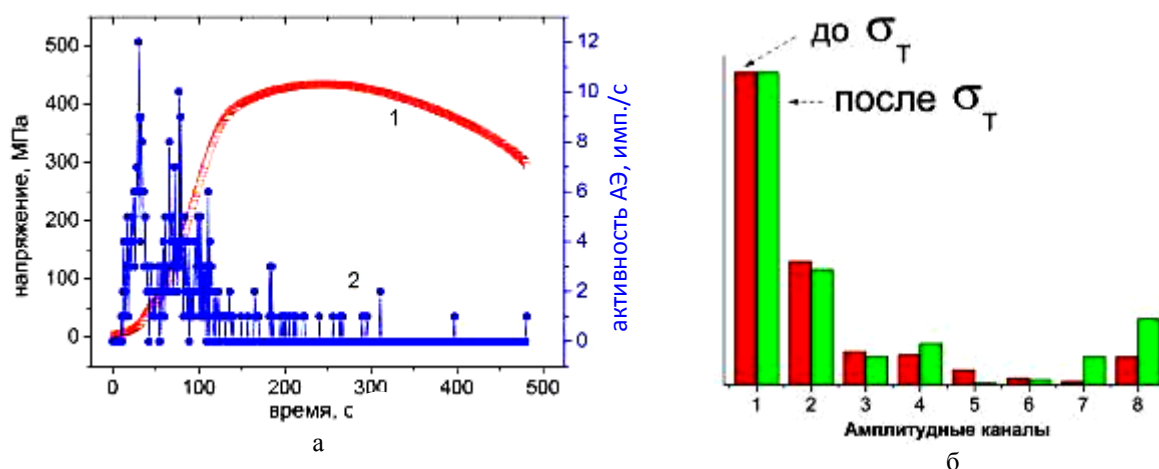


Рис. 2. Зависимости напряжения (1), активности АЭ (2) от времени нагружения у исходных образцов (а) и амплитудное распределение сигналов АЭ при деформации образцов в области напряжений до и после предела текучести (б)

Кривая «напряжение–время деформации» (см. кривая 1, рис. 2,а) представляет собой типичную кривую деформации пластичного образца. АЭ начинает регистрироваться сразу после начала деформирования образца (в области напряжений ниже предела текучести материала). Абсолютные значения активности АЭ в этой области невысокие (~ 10 имп./с), при дальнейшем нагружении в области пластической деформации АЭ практически исчезает (~ 1...2 имп./с). При этом максимум АЭ наблюдается при напряжениях, значительно меньших предела текучести. Предполагаем, что АЭ в этой области напряжений связана с процессами трения на границе «трубка–захваты». Подтверждением этого предположения служит практическое отсутствие АЭ при испытании образцов на сжатие.

Амплитудное распределение сигналов, генерируемых в области напряжений ниже (левый столбик) и выше предела текучести (правый столбик), практически одинаково больше сигналов высокой амплитуды (правые столбцы каналов 7 и 8) в области пластического течения. Вероятно, это

связано с зарождением и распространением трещин перед разрушением.

Одним из наиболее распространенных видов износостойких покрытий, представляющих значительный интерес для машиностроения, электроники и микроэлектроники, являются покрытия на основе нитрида титана. Широкое использование их в качестве твердых износостойких покрытий на стальных деталях машин, в том числе компрессорных, для режущего инструмента, диффузионных барьеров в электронике, декоративных и коррозионно-стойких покрытий и др. обусловлено тем, что нитрид титана обладает высокими: твердостью, износостойкостью и модулем упругости, а также химической стабильностью.

На рис. 3 и 4 приведены изменения механических и акустических параметров образцов с нанесенным ионно-плазменным методом покрытием нитрида титана (TiN) толщиной 10 и 13 мкм при деформировании.

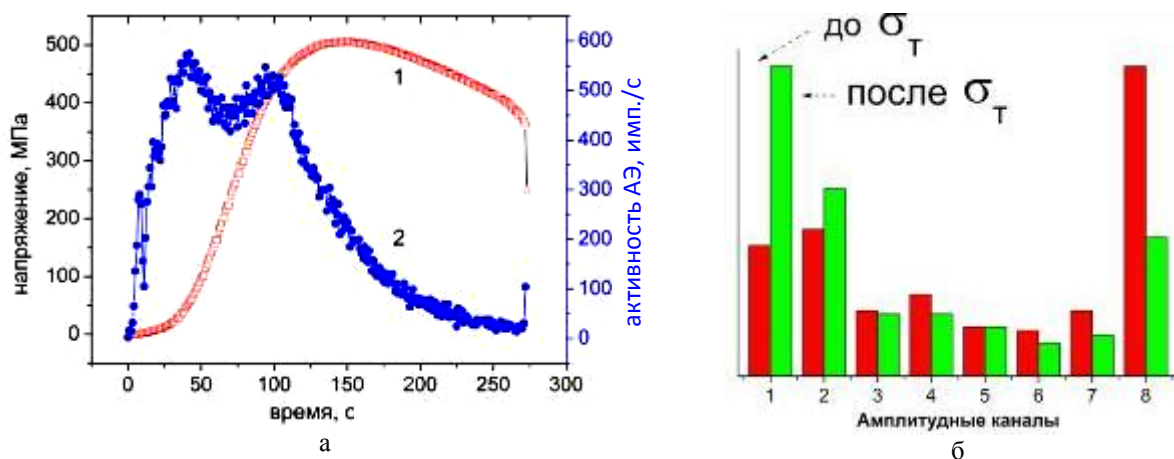


Рис. 3. Зависимости напряжения (1), активности АЭ (2) от времени нагружения для образцов с покрытием (внутренней и внешней поверхностей) TiN 10 мкм (а) и амплитудное распределение сигналов АЭ при деформации образца в области напряжений до и после предела текучести (б)

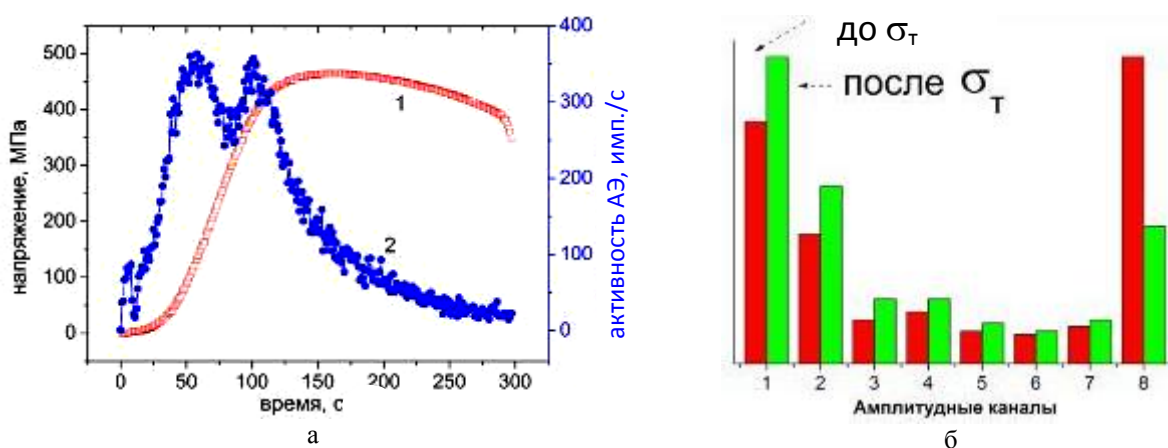


Рис. 4. Зависимости напряжения (1), активности АЭ (2) от времени нагружения для образцов с покрытием (внешней поверхности) TiN 13 мкм (а) и амплитудное распределение сигналов АЭ при деформации образца в области напряжений до и после предела текучести (б)

Из этих рисунков видно, что активность АЭ у образцов с покрытием TiN на порядок выше, чем у исходного образца. У образцов циркония с покрытием TiN АЭ начинается задолго до достижения напряжений, соответствующих их пределу текучести. Анализ амплитудного распределения показал, что при деформации в области напряжений до предела текучести в спектре сигналов АЭ преобладают сигналы высокой амплитуды. Их вклад в интегральную активность АЭ при дальнейшем деформировании уменьшается. По сравнению с исходным материалом образцы с покрытием имеют более высокие значения предела прочности и пластичности. Нанесение покрытия привело к снижению удлинения образцов (см. таблицу).

Покрытие толщиной 10 мкм было нанесено на внешнюю и внутреннюю поверхности трубчатого образца. Представляло интерес сравнить зависимости механических и акустических параметров при нанесении покрытия только на внешнюю поверхность. Были испытаны образцы с нанесенной пленкой TiN толщиной 13 мкм на

внешнюю поверхность. Характер изменения напряжения и активности АЭ у образцов с покрытием толщиной 10 и 13 мкм оказался подобным, но у образцов с покрытием на внешней стороне активность АЭ ниже, чем у образца с двухсторонним покрытием TiN. Из графика амплитудного распределения видно, что на начальном участке деформирования (до предела текучести) этого образца зарегистрировали несколько больше низкоамплитудных сигналов.

В течение многих лет в различных областях промышленности широко используется покрытие нитрида циркония (ZrN). Это покрытие обладает превосходной комбинацией эрозионной стойкости, коэффициента трения и пластичности. На рис. 5–7 приведены зависимости механических и акустических параметров образцов с нанесенным ионно-плазменным методом покрытием нитрида циркония толщиной 2,5; 3,0 и 6,0 мкм после нанесения покрытия и после отжига в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 ч.

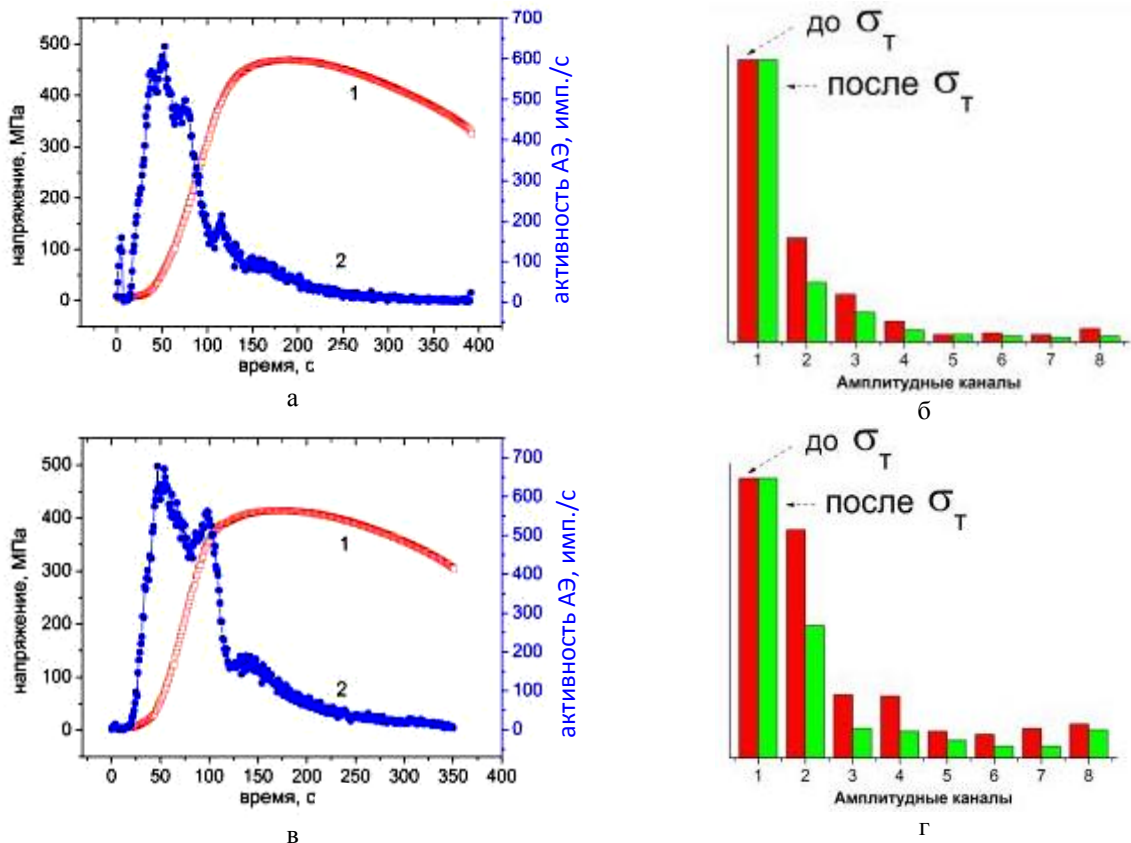


Рис. 5. Зависимости механических (1), акустических (2) параметров от времени нагружения (а, в) и амплитудное распределение сигналов АЭ (б, г) образцов с покрытием нитридом циркония толщиной 2,5 мкм после нанесения покрытия (а, б) и после отжига в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 ч (в, г)

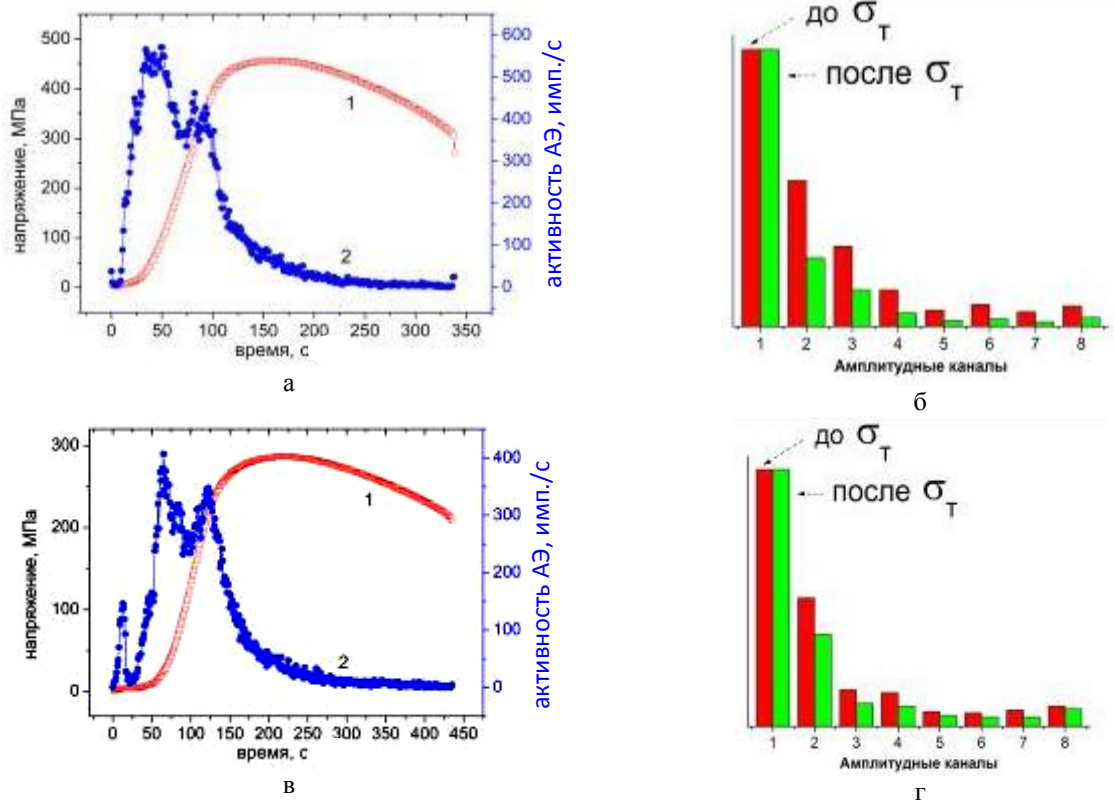


Рис. 6. Зависимости механических (1), акустических (2) параметров от времени нагружения (а, в) и амплитудное распределение сигналов АЭ (б, г) образцов с покрытием нитридом циркония толщиной 3,0 мкм после нанесения покрытия (а, б) и после отжига в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 ч (в, г)

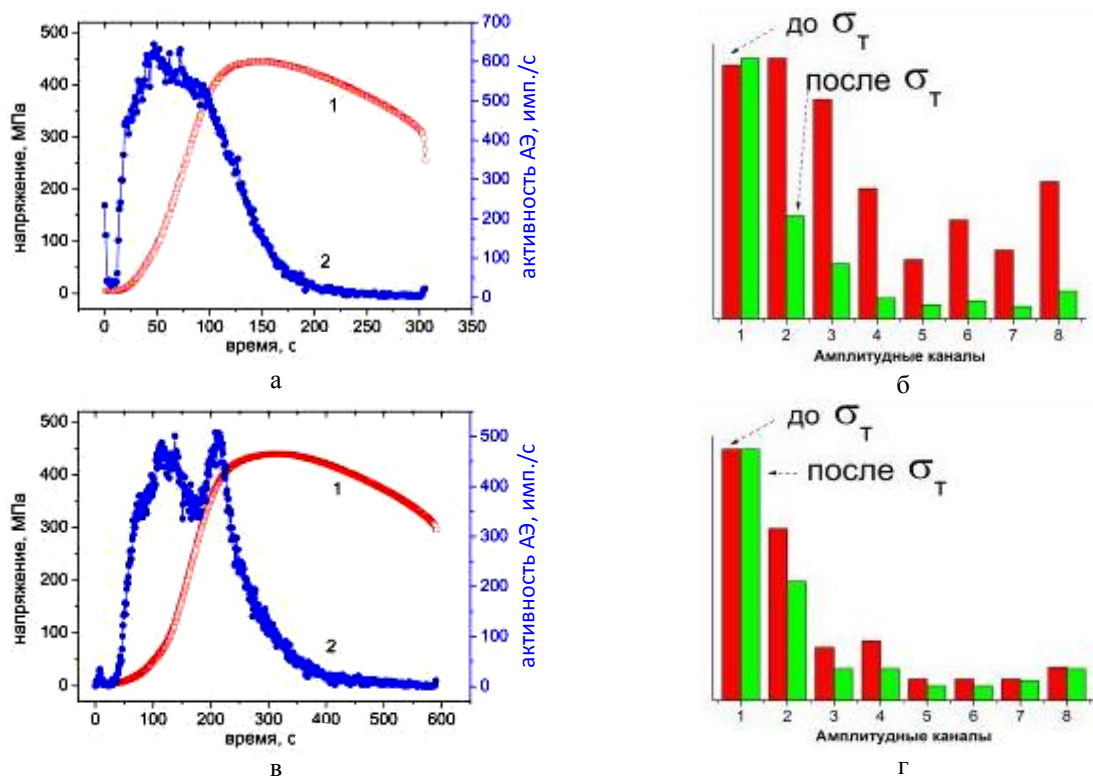


Рис. 7. Зависимости механических (1), акустических (2) параметров от времени нагружения (а, в) и амплитудное распределение сигналов АЭ (б, г) образцов с покрытием нитридом циркония толщиной 6,0 мкм после нанесения покрытия (а, б) и после отжига в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 ч (в, г)

Из анализа данных таблицы следует, что с ростом толщины покрытия ZrN уменьшается предел прочности, предел текучести практически не изменяется, падает удлинение образца. Следует обратить внимание, что покрытие ZrN, так же как и покрытие TiN, уменьшает удлинение образца по сравнению с состоянием образца без покрытия. Отжиг при 550 °С уменьшает пределы прочности и текучести и увеличивает удлинение образца до значений, близких к удлинению образцов в исходном состоянии.

Из рис. 5–7 видно, что по сравнению с исходным состоянием у образцов с покрытием активность АЭ увеличивается. Абсолютные величины активности АЭ приблизительно такие же, как и у образцов с покрытием TiN. Регистрация сигналов АЭ начинается сразу же после начала деформирования, и все пики на кривой активности приходятся на область напряжений ниже предела текучести. Следует обратить внимание на следующие особенности зависимости активности АЭ:

- первый пик кривой активности АЭ наблюдается приблизительно при одном и том же напряжении ниже предела текучести ($\sim 0,25 \sigma_T$), а при напряжениях, равных пределу текучести, абсолютные значения активности растут с увеличением толщины покрытия (задний фронт кривой активности АЭ сдвигается вправо с ростом толщины покрытия);

- отжиги при 550 °С в течение часа также смещают задний фронт кривой активности в область более высоких напряжений и приводят к более

четкому проявлению второго пика на кривой активности АЭ.

С увеличением толщины покрытия ZrN не очень сильно изменяется зависимость средней амплитуды импульсов АЭ от перемещения захватов. Прослеживается тенденция роста суммы импульсов АЭ с увеличением толщины покрытия. Анализ распределения импульсов АЭ по амплитудам показал, что увеличение количества импульсов происходит приблизительно одинаково по всем каналам. Несколько отличается амплитудное распределение сигналов АЭ у образцов с покрытием толщиной 6 мкм.

Интересный, по нашему мнению, является результат, приведенный на рис. 8, который относится к образцу с покрытием ZrN толщиной 11 мкм. Это покрытие наносилось на другой установке, но с близкими параметрами проведения процесса нанесения покрытия на первой установке. Из рис. 5–8 видно, что основные особенности кривых механических и акустических параметров сохраняются. Сравнивая амплитудные распределения рис. 5, 6 и рис. 7, 8, можно предположить, что существует граничная толщина пленки, ниже которой имеем экспоненциальное уменьшение количества сигналов с ростом амплитуды (распределение амплитуд, соответствующее вязкому разрушению). Выше этой границы вид распределения существенно меняется, и происходит усиление различия в амплитудном распределении сигналов АЭ при деформации в области напряжений до и после предела текучести.

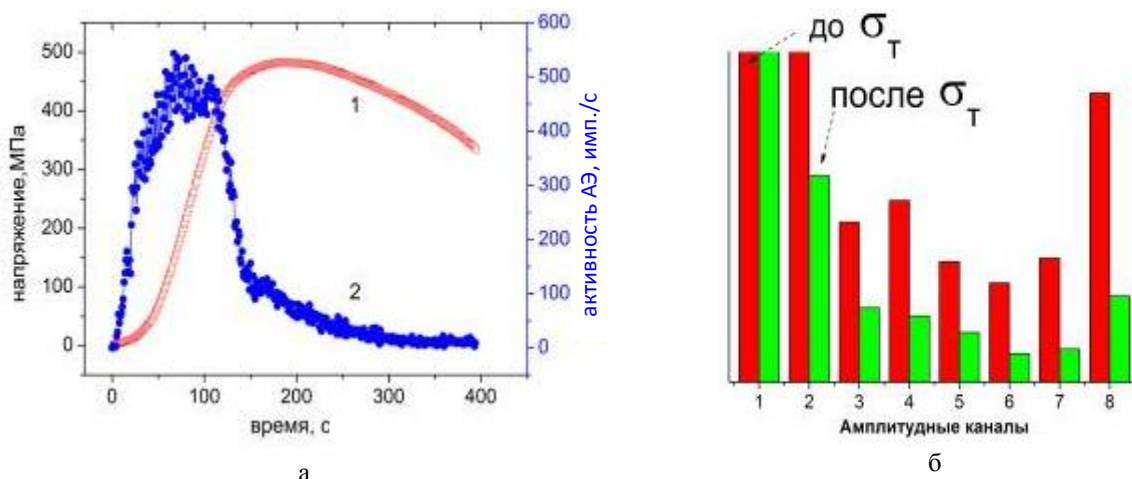


Рис. 8. Зависимости механических (1), акустических (2) параметров от времени нагружения (а) и амплитудное распределение сигналов АЭ (б) образцов с покрытием нитридом циркония толщиной 11,0 мкм

Покрытие ZrON. В промышленности данное покрытие используется для эрозионной и коррозионной защиты изделий. На рис. 9 приведены зависимости напряжения и активности АЭ для

образцов с покрытием ZrON толщиной 4 мкм (с внешней стороны) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням при деформировании в области напряжений до предела текучести и после.

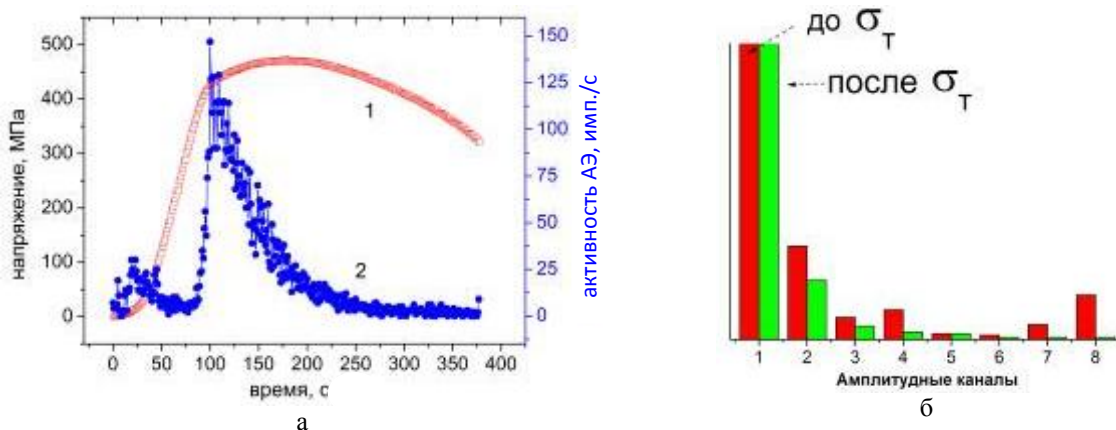


Рис. 9. Зависимости механических (1), акустических (2) параметров от времени нагружения (а) и амплитудное распределение сигналов АЭ (б) образцов с покрытием ZrON толщиной 4 мкм

Нанесение покрытия ZrON толщиной 4 мкм приводит к увеличению пределов прочности и текучести, а также к уменьшению удлинения образца по сравнению с исходным состоянием. Из рис. 9 видно, что сигналов АЭ на начальной стадии нагружения мало, и резкий рост активности начинается при приближении к пределу текучести. Пик кривой активности АЭ находится в области предела текучести. Анализ амплитудного распределения показал, что в спектре сигналов АЭ (особенно в области напряжений, выше предела текучести) преобладают низкоамплитудные сигналы, т. е. деформация образца осуществляется низкоэнергетичными процессами, вероятнее всего, дислокационными. А вид амплитудного распределения сигналов АЭ аналогичен распределению при вязком разрушении материала.

приведены зависимости напряжения и активности АЭ от времени нагружения для образцов с покрытием CrAl толщиной 5 мкм (с внешней стороны) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням при деформировании в области напряжений до предела текучести и после.

Покрытие из сплава CrAl. Покрытие CrAl, как и покрытие ZrON, приводит к увеличению износостойкости инструмента и изделий, на которые оно наносится. Кроме того, покрытие CrAl увеличивает термостойкость изделий. На рис. 10

На это покрытие необходимо обратить внимание, потому что нанесение его на образец приводит к небольшому росту пределов прочности, текучести и заметному увеличению удлинения (по сравнению с образцами без покрытия). Из рис. 10 видно, что АЭ начинает регистрироваться на начальной стадии деформирования и нарастает пропорционально прикладываемому напряжению. Пик кривой активности АЭ находится в области предела текучести. Снижение абсолютных значений активности АЭ происходит в зоне пластического течения. Наблюдается существенное отличие в амплитудном распределении сигналов АЭ при деформировании образца в упругой и пластической зонах.

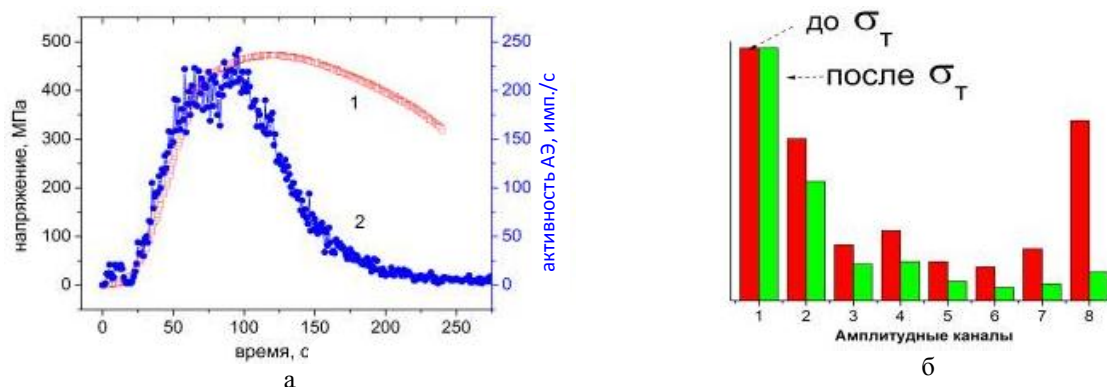


Рис. 10. Зависимости напряжения (1) и активности (2) АЭ от времени нагружения для образцов с покрытием CrAl (с внешней стороны) толщиной 5 мкм (а) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням при деформировании в области напряжений до и после предела текучести (б)

Покрытие из нержавеющей стали. Такие покрытия обычно используют для коррозионной защиты конструкций. На рис. 11 приведены зависимости напряжения и активности АЭ для

образцов с покрытием из нержавеющей стали толщиной 10 мкм (с внешней стороны) от времени деформирования.

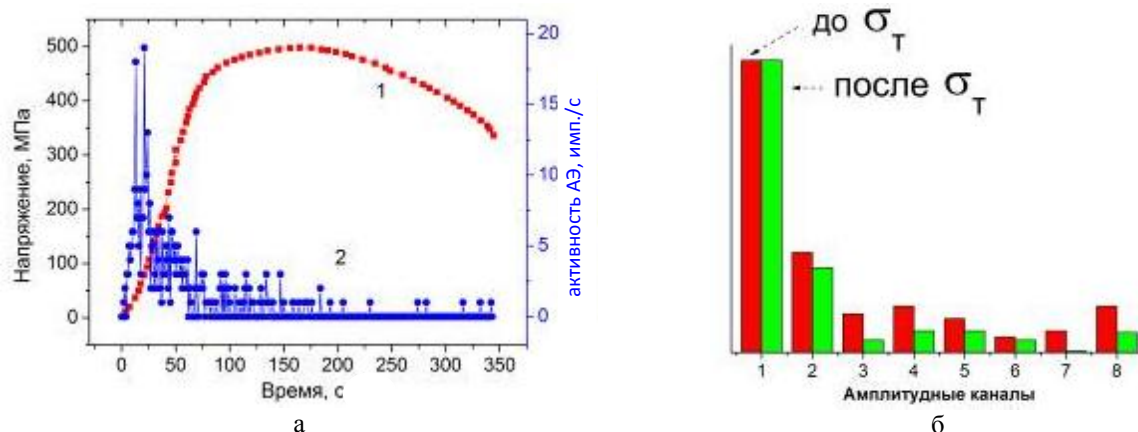


Рис. 11. Зависимости напряжения (1) и активности АЭ (2) от времени деформирования для образцов с покрытием из нержавеющей стали толщиной 10 мкм (а) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням при деформировании в области напряжений до и после предела текучести (б)

Из рис. 11 видно, что активность АЭ имеет небольшое абсолютное значение. Характер зависимости активности АЭ при деформировании образца с покрытием из нержавеющей стали подобен кривой активности АЭ исходного образца без покрытия. Однако следует отметить, что процесс нанесения этого покрытия приводит к упрочнению материала, увеличению его предела текучести и небольшому снижению удлинения (по сравнению с исходным состоянием).

Многослойные покрытия. Для повышения эффективности наносимых на различные материалы покрытий в последнее время все шире применяется технология нанесения многослойных и многокомпонентных покрытий. Принцип создания многослойных покрытий заключается в том, что каждый слой должен выполнять свою функцию. Например, первый слой защищает изделие от наводороживания и повышает его коррозионную стойкость, второй – улучшает его механические

характеристики, третий – выполняет дополнительные технологические функции: выравнивание температурных коэффициентов линейного расширения материала подложки и покрытия, а также смежных слоев; снижение внутренних напряжений в покрытии; повышение адгезии и т. д., или осуществляет защиту внутренних слоев. Эффективность каждого слоя покрытия определяется строгим выбором сорта наносимых материалов, их количеством и напыляемой толщиной слоя.

Рассмотрим экспериментальные данные испытаний образцов сплава циркония с двухкомпонентными двухслойными и трехслойными покрытиями: Cr/CrN, CrAl/CrN, ZrCr/Cr/CrN. На рис. 12 приведены зависимости напряжения и активности АЭ для образцов с двухслойным двухкомпонентным покрытием Cr/CrN толщиной 14 мкм от времени нагружения и амплитудное распределение сигналов АЭ.

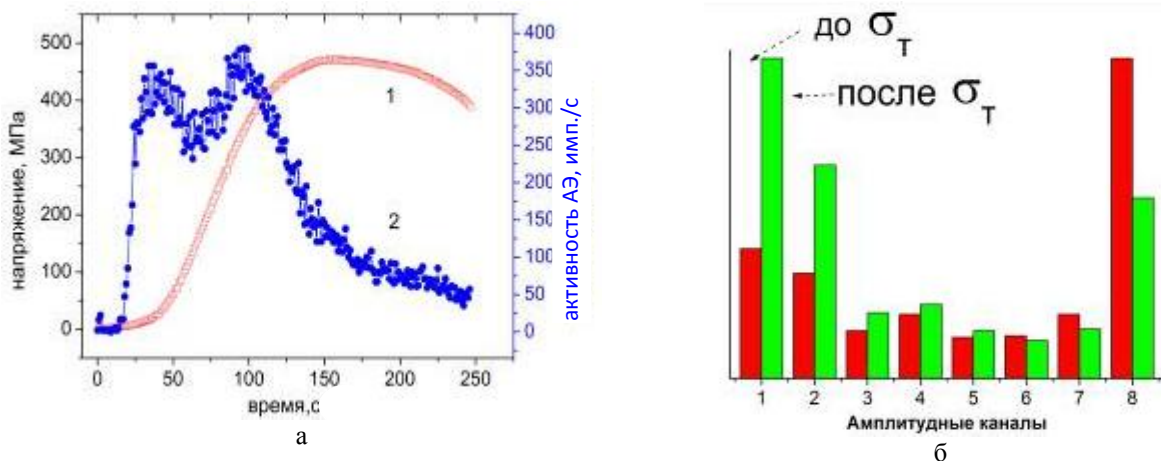


Рис. 12. Зависимости напряжения (1) и активности (2) АЭ для образцов с двухслойным двухкомпонентным покрытием Cr/CrN толщиной 14 мкм (с внешней стороны) от времени нагружения (а) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням при деформировании в области напряжений до и после предела текучести (б)

Из этого рисунка видно, что АЭ начинает регистрироваться на начальной стадии деформирования и резко возрастает уже при напряжениях, равных десятой части предела текучести. Кривая активности АЭ для этого покрытия имеет два пика. Второй пик кривой активности АЭ находится в области предела текучести. При деформировании образцов в области напряжений до и после предела текучести наблюдаются существенные различия в амплитудном распределении сигналов АЭ. Если на начальной стадии в спектре преобладают сигналы

высокой амплитуды, то при напряжениях, выше предела текучести, начинают интенсивно работать низкоамплитудные источники. Покрытие Cr/CrN толщиной 14 мкм приводит к упрочнению материала и существенному уменьшению удлинения. Отжиг при температуре 550 °С в течение 1 ч в вакууме не приводит к изменениям вида зависимости активности АЭ и амплитудного распределения сигналов АЭ (рис. 13). Наблюдается небольшое увеличение удлинения образца (см. таблицу).

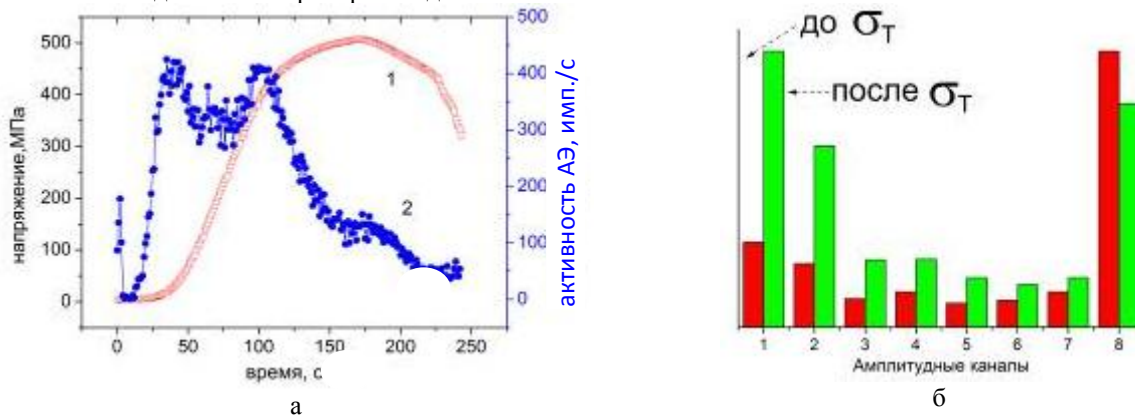


Рис. 13. Зависимости напряжения (1) и активности (2) АЭ от времени нагружения (а) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням (б) при деформации в области напряжений до и после предела текучести для образцов с двухслойным двухкомпонентным покрытием Cr/CrN толщиной 14 мкм (с внешней стороны) после отжига в вакууме при температуре 550 °С в течение 1 ч

Известно, что добавление Al в покрытия повышает их твердость, износостойкость и термостойкость при сохранении защитных свойств покрытия, что связано с формированием на поверхности плотного и очень прочного слоя Al_2O_3 . На рис. 14 приведены зависимости напряжения и активности АЭ от времени нагружения для образцов с двухслойным покрытием CrAl/CrN толщиной 8,5 мкм (с внешней стороны) и амплитудное распределение сигналов АЭ.

Из рис. 14 видно, что АЭ начинает регистрироваться на начальной стадии

деформирования и растет пропорционально с увеличением прикладываемого напряжения. Пик кривой активности АЭ находится в области напряжений, равных пределу текучести. При деформировании образцов в области напряжений до и после предела текучести наблюдается отличие в амплитудном распределении сигналов АЭ. Увеличение высокоамплитудных сигналов в области пластического течения, вероятно, связано с процессами зарождения и распространения трещин.

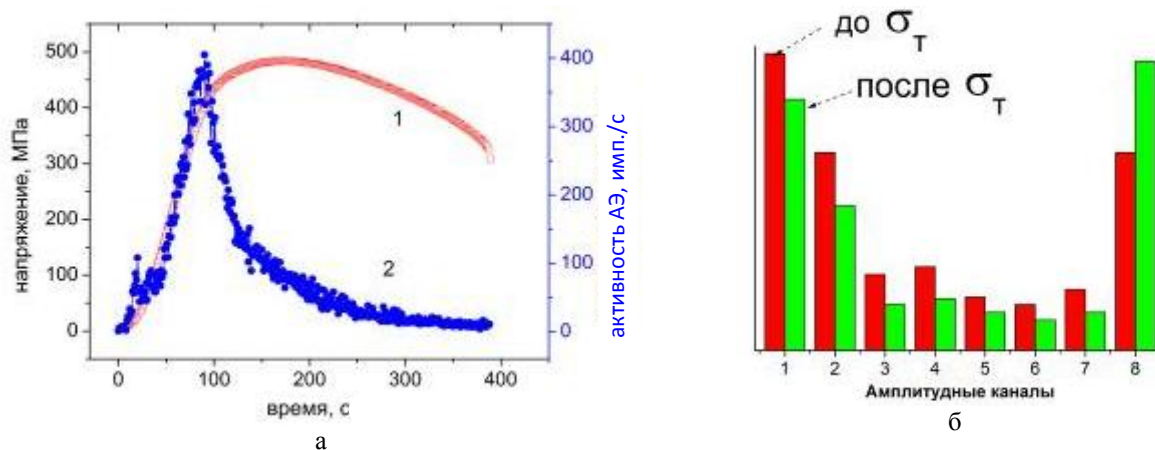


Рис. 14. Зависимости напряжения (1) и активности (2) АЭ от времени нагружения для образцов с двухслойным двухкомпонентным покрытием CrAl/CrN толщиной 8,5 мкм (с внешней стороны) (а) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням при деформировании в области напряжений до предела текучести и после (б)

Нанесение этого покрытия приводит к росту пределов прочности и текучести материала, но при этом не уменьшает удлинение образца. Покрытия, в которых есть Cr и Al (см. таблицу), заметно упрочняют материал и при этом еще обеспечивают высокие значения удлинений образцов.

На рис. 15 приведены зависимости напряжения и активности АЭ от времени нагружения для образцов с трехслойным покрытием ZrCr/Cr/CrN толщиной 9 мкм (с внешней стороны).

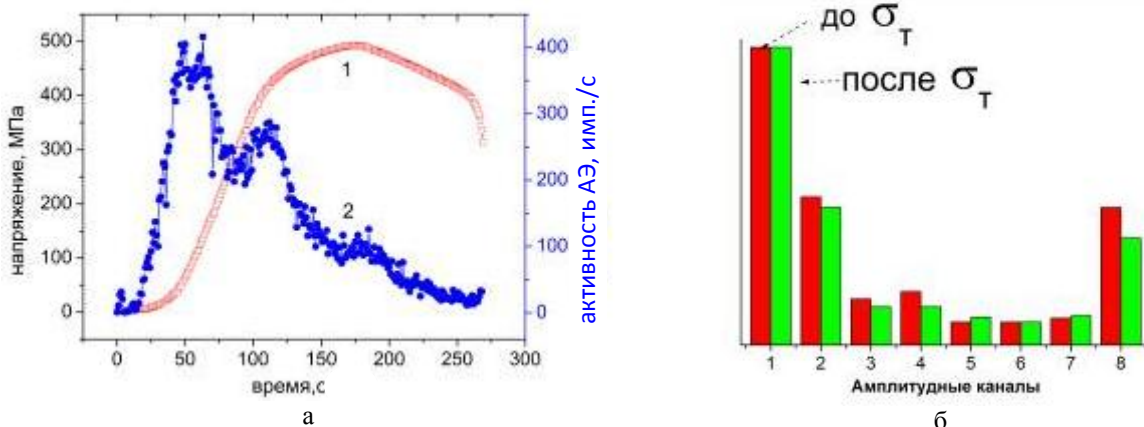


Рис. 15. Зависимости напряжения (1) и активности (2) АЭ от времени нагружения для образцов с покрытием ZrCr/Cr/CrN толщиной 9 мкм (с внешней стороны) (а) и распределение сигналов АЭ по амплитудным уровням при деформировании в области напряжений до и после предела текучести (б)

Внешний вид зависимости активности АЭ образца с трехслойным покрытием ZrCr/Cr/CrN подобен зависимости активности АЭ для двухкомпонентного покрытия ZrN толщиной 3 мкм (хотя абсолютные значения активности у последнего выше приблизительно в два раза). Из рис. 15 видно, что АЭ начинает регистрироваться на начальной стадии деформирования и растет с увеличением прикладываемого напряжения, достигая первого максимума при напряжениях, равных половине предела текучести. Второй пик на кривой активности АЭ находится в области предела текучести. Амплитудное распределение сигналов АЭ практически одинаково при всех напряжениях деформирования. Это покрытие существенно упрочняет материал и снижает удлинение образца.

ВЫВОДЫ

1. Определены механические свойства и акустические параметры при растяжении кольцевых

образцов сплава Zr1%Nb, изготовленных из твэльных труб после нанесения различных покрытий.

2. Показано, что нанесенные покрытия существенно влияют на прочностные и пластические характеристики образца. Сравнительный анализ механических характеристик позволил установить, что предел прочности увеличивается на 15,5...16,5%, а предел текучести – на 8...12,5% для образцов с покрытиями X18H10T, Cr/CrN, TiN. Сохранение пластичности (или ее небольшой рост) обнаружено для покрытий CrAl, CrAl/CrN (см. таблицу, образец №12) и ZrN (толщина 3 мкм).

3. Наилучшим сочетанием измеренных механических свойств обладают образцы с покрытиями CrAl, CrAl/CrN и X18H10T.

4. Анализ распределения амплитуды в спектре сигналов АЭ (особенно высокоамплитудной составляющей), зарегистрированных в процессе

испытания образцов, позволяет сделать заключение о функциональном состоянии нанесенного защитного покрытия в областях упругой и пластической деформаций. Появление большого числа высокоамплитудных сигналов в области упругой деформации образцов может означать интенсивное растрескивание покрытия. Для подтверждения этого предположения и анализа механизмов деформации образцов с покрытиями необходимо проведение микроструктурных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.С. Займовский, А.В. Никулина, Н.Г. Решетников. *Циркониевые сплавы в атомной энергетике*. М.: «Энергоиздат», 1981, 232 с.
2. Д.Л. Дуглас. *Металловедение циркония*: Пер. с англ. / Под ред. А.С. Займовского. М.: «Энергоатомиздат», 1975, 360 с.
3. П.П. Маркелов, А.А. Никулина, М.М. Перегут, Н.Г. Решетников. *Ползучесть оболочек твэлов из циркониевых сплавов*: Препринт. М.: ВНИИНМ, 1978, с. 135.
4. С.А. Никулин, А.Б. Рожнов, А.В. Бабукин. Структура и сопротивление разрушению циркониевых сплавов для атомной энергетике // *МиТОМ*. 2005, №5, с. 8-17.
5. Н.М. Власов, И.И. Федик. Водородное охрупчивание сплавов циркония // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2003, №8, с. 48-51.
6. S.V. Ivanova. Effect of hydrogen on serviceability of zirconium items VVER and RBMK-type reactors fuel assemblies // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2002, v. 27, N 7-8, p. 819-824.
7. С.А. Никулин, А.Б. Рожнов. Коррозионное растрескивание циркониевых оболочечных труб // *МиТОМ*. 2005, №2, с. 31-39.
8. И.И. Аксенов, А.А. Андреев, В.А. Белоус. *Вакуумная дуга – источник плазмы, осаждение покрытий, поверхностное модифицирование*. Киев: «Наукова думка», 2012.
9. И.И. Аксенов, В.А. Белоус. *Хроника «Булата»*. Харьков: Изд-во «Форт», 2013, 110 с.
10. И.И. Аксенов, Д.С. Аксенов, В.А. Белоус. *Техника осаждения вакуумно-дуговых покрытий*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2014, 280 с.
11. N.G. Thompson, B.D. Lichter. Applications of ion implantation to improvement of surface properties of metals and alloys // *Rev. Coating and Corros.* 1981, v. 4, N 2, p. 156-193.
12. М.И. Гусева. Ионная имплантация в металлы // *Поверхность. Физика, химия, механика*. 1982, №4, с. 27-50.
13. В.В. Титов. *Ионная имплантация, перспективы и альтернативы*: Препринт 6067/11. М.: ЦНИИатоминформ, 1991, 39 с.

Статья поступила в редакцию 02.09.2015 г.

МЕХАНИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА АКУСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТВЕЛЬНИХ ТРУБ ЗІ СПЛАВУ ЦИРКОНІО Zr1%Nb ІЗ ЗАХИСНИМИ ПОКРИТТЯМИ

П.І. Стоєв, В.А. Білоус, В.М. Воєводін, О.С. Купрін, С.О. Леонов, В.Д. Овчаренко, М.А. Тихоновський, В.М. Хороших

Наведено результати дослідження впливу різних покриттів, нанесених іонно-плазмовим методом, на механічні властивості і акустичні параметри зразків твельних трубок зі сплаву Zr1%Nb. Кільцеві зразки випробували при кімнатній температурі на розтяг у радіальному напрямку. Показано, що покриття суттєво впливають на міцності і пластичні характеристики зразків. Так, межа міцності зразків з покриттями X18H10T, Cr/CrN, TiN збільшується на 15,5...16,5%, а межа плинності – на 8...12,5%. Збереження пластичності (або її невелике зростання) виявлено для покриттів CrAl, CrAl/CrN і ZrN. Найкраще поєднання механічних властивостей мають зразки з покриттями CrAl, CrAl/CrN і X18H10T. Висновок про функціональний стан нанесеного захисного покриття в областях пружної і пластичної деформації зроблено за допомогою амплітудного аналізу сигналів АЕ, які були зареєстровані в процесі випробування зразків.

MECHANICAL PROPERTIES AND ACOUSTIC PARAMETERS TUBES OF ZIRCONIUM ALLOY Zr1%Nb WITH A PROTECTIVE COATINGS

P.I. Stoev, V.A. Belous, V.N. Voyevodin, A.S. Kuprin, S.A. Leonov, V.D. Ovcharenko, M.A. Tikhonovsky, V.M. Khoroshih

The results of studies of the ion-plasma coatings effect on the mechanical properties and acoustic parameters of the samples cut from tubes of fuel from zirconium alloy Zr1% Nb are given. Ring samples were tension tested at room temperature in radial direction. It is shown that the deposited coating substantially affect on the strength and plastic properties of the samples. It is found that the ultimate strength increases from 15.5 to 16.5%, and the yield strength from 8 to 12.5% for the coated samples 18Cr10NiTi, Cr/CrN, TiN. CrAl; CrAl/CrN and ZrN coatings retain plasticity (or giving a slight increase it). CrAl, CrAl/CrN and 18Cr10NiTi coatings have the best combination of mechanical properties. The functional state of protective coatings in the field of elastic and plastic deformation using amplitude analysis recorded during the test AE signals was done.