

**АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ТИТАНА***П.И. Стоев, И.И. Папиров, В.И. Мощенок**Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
г. Харьков, Украина; E-mail: stoev@kipt.kharkov.ua*

Изучено влияние состояния поверхностного слоя на акустическую эмиссию титана ВТ1-0. Показано, что акустические параметры существенно зависят от напряженного состояния поверхностного слоя. Установлено, что максимум активности акустической эмиссии увеличивается по мере снятия деформированного поверхностного слоя и не совпадает с пределом текучести материала, что связано с началом процессов пластической деформации при напряжениях значительно ниже предела текучести. Высказаны предположения о вероятных механизмах деформации и источниках акустической эмиссии в титане.

**ВВЕДЕНИЕ**

Метод акустической эмиссии широко применяется для изучения процессов пластической деформации и разрушения металлов [1-3]. Особое внимание при этом уделяется изучению влияния структурных факторов и условий испытаний на акустико-эмиссионные характеристики материалов. Одним из таких факторов является состояние поверхности материала.

Исследованиями кинетики пластического течения на начальной стадии деформирования и природы поверхностных источников сдвигообразования было установлено, что начальные акты пластического течения, как правило, связаны с поверхностными слоями материала. Для изучения этих процессов привлекаются различные структурно-чувствительные методы, одним из которых является акустическая эмиссия (АЭ). Проведенные ранее исследования показали, что состояние поверхности и приповерхностного слоя оказывает существенное влияние на АЭ при пластической деформации материалов [4]. В работах [5-8] с помощью метода АЭ изучены особенности поведения поверхностных слоев ряда металлов и сплавов в процессе макро- и микродеформирования, а также влияние состояния поверхности на формирование сигналов АЭ. Следует отметить, что экспериментальные данные о влиянии состояния поверхности материала на АЭ титана отсутствуют, а для других металлов их количество крайне ограничено.

Целью данной работы является изучение АЭ титана при растяжении в зависимости от состояния поверхностного слоя материала.

**ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА**

Образцы для испытаний вырезались из листового технического титана ВТ1-0 толщиной 2 мм механическим способом. Длина рабочей части и площадь сечения исходных образцов равны 20 мм и 6 мм<sup>2</sup> соответственно. Для учета сигналов АЭ, которые могут возникнуть из-за деформации материала в области силовых контактов образец-захват испытательной машины, изготавливали образцы с различной формой головки (с отверстием для

крепления с помощью шпилек и без отверстия - для крепления на плечиках образца).

Для регистрации сигналов АЭ использовали разработанный в Институте проблем машиностроения АН Украины многоканальный акустический комплекс М400, позволяющий регистрировать импульсы различной амплитуды [9]. Пьезопреобразователь из керамики ЦТС-19 (резонансная частота 180 кГц) через слой смазки, которая улучшает акустический контакт образец-датчик, прижимали с постоянным усилием к поверхности образца специальным держателем. Образцы исследовали в исходном состоянии (заводской прокатанный лист) после термической обработки при 630 и 850 °С и после снятия поверхностных слоев различной толщины. Снятие поверхностного слоя образцов осуществляли травлением в водном растворе смеси фтористоводородной и азотной кислот.

Механические испытания на растяжение проводили на универсальной испытательной машине 1958-У10-1 по стандартной методике со скоростью  $2 \cdot 10^{-4}$  с<sup>-1</sup> при комнатной температуре. При испытании образцов через определенный интервал времени (от 1 до 5 с) синхронно регистрировали параметры деформирования (приложенная нагрузка, перемещение захвата) и количество импульсов АЭ, которое поступало на каждый из восьми амплитудных счетчиков-дискриминаторов акустического комплекса. Сбор, обработку и анализ экспериментальных результатов проводили с помощью ЭВМ.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

На рис.1 показана зависимость активности акустической эмиссии ( $\dot{N}$ ) от величины перемещения захватов испытательной машины ( $\Delta l$ ) образцов титана в исходном состоянии (кривая 1) после снятия поверхностного слоя (кривая 2), а также кривая деформации (кривая 3). Видно, что снятие поверхностного слоя приводит к увеличению активности АЭ (рост максимума на графике) на начальной стадии деформирования образцов титана и величины активности АЭ в области непосредственно перед разрушением образца. Сигналы АЭ появляются сразу же после начала нагружения, растут до достижения максимума при напряжениях, которые соответ-

ствуют микропластической области на кривой деформации. При приближении к макроскопическому пределу текучести на зависимости  $\dot{N}(\Delta l)$  наблюдается резкий спад активности АЭ. Дальнейшее деформирование (от предела текучести до напряжений начала разупрочнения образца) приводит практически к полному прекращению регистрации сигналов АЭ. Активность АЭ заметно возрастает в области разрушения образца.

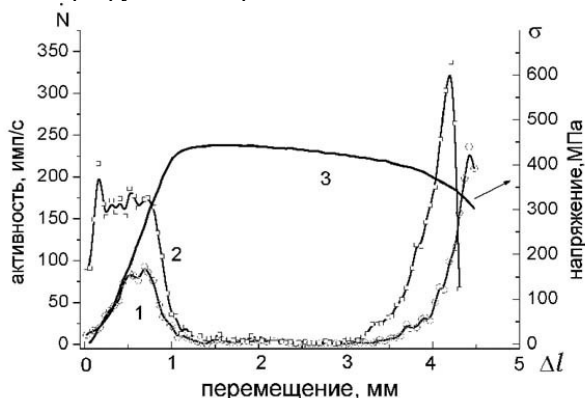


Рис. 1. Зависимость активности АЭ и нагружающего напряжения от величины перемещения захватов: 1- для образцов в состоянии заводской поставки; 2 - после снятия слоя; 3 – нагружающее напряжение растяжения

Рассмотрим, как влияет толщина снятого поверхностного слоя на зависимость  $\dot{N}(\Delta l)$ . На рис.2 приведен график зависимости активности акустической эмиссии ( $\dot{N}$ ) от величины перемещения захватов испытательной машины ( $\Delta l$ ) исходных (состояние листа заводской поставки) образцов титана с различной толщиной снятого слоя. Из рисунка видно, что при увеличении толщины снятого слоя до 0,08 мм активность акустической эмиссии на начальной и конечной стадии деформирования увеличивается (кривые 1, 2 и 3), а после снятия слоя толщиной 0,11...0,12мм наблюдается снижение активности АЭ (кривая 4). Ход зависимостей  $\dot{N}(\Delta l)$  в процессе деформирования образцов титана с различной толщиной снятого слоя подобен. Это хорошо иллюстрирует рис.3, на котором приведена зависимость суммарного количества зарегистрированных импульсов АЭ от перемещения захватов для тех же образцов. Кривые отличаются только величиной суммы регистрируемых импульсов АЭ на начальной стадии деформации, а при увеличении деформации характер их изменения практически одинаков. После достижения напряжений, превышающих предел текучести титана, активность АЭ резко уменьшается и остается в процессе дальнейшей деформации низкой практически до начала процесса разрушения. Это отображается постоянством величины суммы импульсов АЭ (кривые графиков параллельны оси X) в этой области деформирования (см. рис.3).

Анализ кривых деформации испытанных образцов с различной толщиной снятого слоя показал, что обработка существенно не изменяет их механические характеристики (предел прочности и текуче-

сти), но приводит к уменьшению удлинения образцов при деформировании по сравнению с исходными. Термическая обработка образцов титана (отжиг в вакууме при температурах 630 и 850°C в течение часа) меняет вид кривых деформации материала и зависимостей АЭ в процессе деформирования.

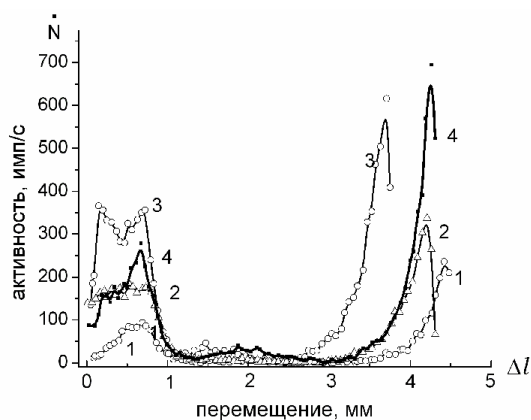


Рис. 2. Зависимость активности АЭ образцов титана с различной толщиной снятого слоя от величины перемещения захватов. Толщина слоя: 1 – 0; 2 – 0,02; 3 – 0,08; 4 – 0,12 мм

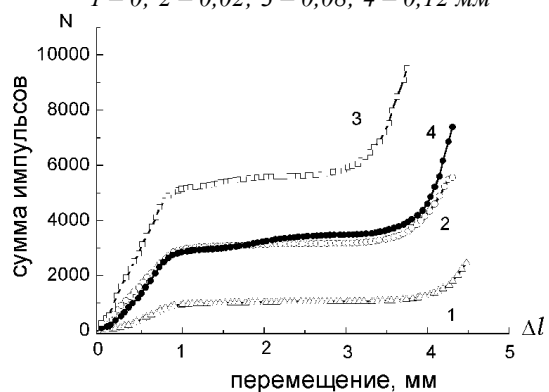


Рис. 3. Зависимость общей суммы импульсов АЭ образцов титана с различной толщиной снятого слоя от величины перемещения захватов. Толщина слоя: 1 – 0; 2 – 0,02; 3 – 0,08; 4 – 0,12 мм

На рис.4 приведена зависимость  $\dot{N}(\Delta l)$  для отожженных при 630 °С образцов титана от толщины снятого поверхностного слоя. Данные рис.2 и 4 показывают, что термическая обработка приводит к существенному изменению характера зависимости активности АЭ титана. Хорошо видно, что первый максимум зависимости  $\dot{N}(\Delta l)$  термообработанных образцов находится в области макроскопического предела текучести, и снятие слоя практически не влияет на его величину (хотя тенденция небольшого роста активности АЭ проявляется). Существенным образом у отожженных образцов изменяется зависимость  $\dot{N}(\Delta l)$  в области деформационного упрочнения. В этой области возникает второй максимум с достаточно высокими абсолютными значениями активности АЭ. По мере снятия поверхностного слоя активность АЭ падает и абсолютная величина этого максимума уменьшается. Из этих рисунков также следует, что по мере снятия поверхностного слоя количество импульсов при деформировании у нео-

тожденных образцов растет, а у термообработанных – падает.

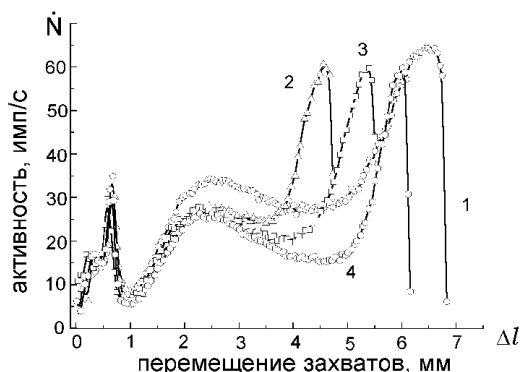


Рис. 4. Зависимость активности АЭ отожженных при 630 °С образцов титана с различной толщиной снятого слоя от величины перемещения захватов: 1 – исходное состояние; толщина снятого слоя: 2 – 0,44; 3 – 0,32; 4 – 0,29 мм

Аналогичные зависимости активности АЭ и общей суммы регистрируемых импульсов наблюдаются и для образцов титана, которые были отожжены при температуре 850 °С. Также было установлено, что способ крепления образца в захватах испытательной машины (различная форма головки) не влияет на характер установленных зависимостей.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных экспериментальных данных позволил установить следующее:

- снятие поверхностного слоя у исходных образцов титана приводит к росту активности АЭ в области микропластичности и к увеличению суммарного количества регистрируемых импульсов АЭ;
- снятие поверхностного слоя у термообработанных образцов титана не вызывает существенного изменения величины максимума на графике зависимости  $\dot{N}(\Delta l)$  в области макроскопического предела текучести и приводит к уменьшению общего количества регистрируемых импульсов АЭ в процессе деформирования;
- на стадии стационарного пластического течения активность АЭ у исходных образцов титана крайне мала;
- термообработка приводит к существенному изменению зависимости активности АЭ в процессе деформирования в области стационарного пластического течения, что проявляется в образовании второго максимума и высоких значениях активности;
- максимум на графике зависимости  $\dot{N}(\Delta l)$  для нетермообработанных образцов не совпадает с пределом текучести;
- после снятия поверхностного слоя наблюдается уменьшение величины удлинения образцов.

При изготовлении листов титана процессы прокатки приводят к неоднородности деформации материала по толщине. Кроме того, некоторое дополнительное напряжение вносится в поверхностный слой при механической обработке в процессе приготовления образцов. Таким образом, у исходных образ-

цов поверхностный слой представляет собой область с более высоким уровнем напряжений, чем остальной объем образца. Смещение атомов решетки при образовании дислокаций приводит к появлению поля упругих напряжений вокруг дислокации. Поэтому движущуюся дислокацию или ансамбль дислокаций можно рассматривать как перемещающееся в объеме образца поле упругих напряжений. При выходе дислокаций на поверхность происходит взаимодействие полей напряжений дислокаций и поверхностного слоя. Это приводит к изменению динамики движения дислокации.

В работах [10,11] показано, что если источником АЭ при деформации является движение дислокаций, то регистрируемая активность импульсов АЭ сильно зависит от скорости, с которой дислокация выходит на поверхность образца. Снятие деформированного поверхностного слоя образца приводит к уменьшению величины поля упругих напряжений поверхностного слоя, и, следовательно, к росту скорости выходящих дислокаций.

Конструктивной особенностью аппаратуры АЭ является наличие амплитудного порогового уровня начала регистрации: сигналы с амплитудой ниже пороговой не регистрируются. Этот факт необходимо учитывать при анализе экспериментальных результатов особенно, если в спектре излучения АЭ большую часть составляют низкоамплитудные сигналы.

Увеличение скорости выхода дислокаций на поверхность образца приводит к росту амплитуды сигнала. Поэтому за счет регистрации тех сигналов АЭ, амплитуда которых возросла (в результате снятия слоя) и превысила пороговый уровень, активность АЭ возрастает.

Чем больше величина деформации при прокатке металла, тем выше уровень поверхностных напряжений и сильнее влияние на динамику движения дислокаций в приповерхностных слоях материала. Поэтому при постепенном увеличении степени деформации материала активность АЭ должна уменьшаться. В данной работе исследовались образцы, изготовленные из исходного титанового листа, который был дополнительно прокатан при комнатной температуре толщиной от 2 до 1 мм. При испытаниях этих образцов АЭ практически отсутствовала, и ее активность не изменялась даже при удалении поверхностных слоев большой толщины (до 0,5 мм). Последнее, скорее всего, связано с тем, что дополнительная механическая обработка привела к сильному наклепу всего объема тонкого образца. АЭ у этих образцов появлялась только после дополнительной термической обработки.

Уменьшение суммарной АЭ при снятии поверхностного слоя у отожженных образцов, не содержащих напряженных поверхностей, по нашему мнению, связано с известным фактом уменьшения АЭ при изменении объема рабочей части образца. В работе [2] показано, что суммарная эмиссия удовлетворительно описывается уравнением  $N = aV_d$ , где  $V_d$  – объем рабочей части образца, а – постоянная, которая зависит от параметров регистрирующей аппаратуры (уровень дискриминации сигналов). Таким об-

разом, при химическом травлении образцов с напряженным поверхностным слоем идут два процесса, которые по-разному влияют на акустические параметры: снятие наклепанного слоя приводит к росту активности и общей суммы импульсов, а уменьшение объема образца - к их снижению.

Максимум интенсивности АЭ у исходных образцов титана (см. рис. 1,2,5) не совпадает с пределом текучести: сигналы АЭ начинают регистрироваться при напряжениях ниже предела текучести, т.е. для большинства металлов максимум активности и общей суммы регистрируемых сигналов АЭ совпадает с пределом текучести, что позволило разработать методики по измерению предела текучести по параметрам АЭ [12]. Однако имеются экспериментальные данные о том, что такое соответствие может нарушаться. В работах [6,13-15] исследовали особенности поведения акустических параметров при деформации сталей, алюминиевых сплавов, циркония и др. Было установлено, что максимальная активность у этих материалов наблюдается в области микропластичности. Авторы работ [13,14] детально проанализировали совмещенные диаграммы деформации и параметров АЭ ряда алюминиевых сплавов (АК4-1, АМГ-6, 1201) и сталей (12Х18Н10Т, 15Х2НМФА). Выбирались три опорных точки (максимум амплитуды, максимум активности и предел текучести), по которым проводился анализ. Было установлено, что для исследованных материалов пики максимальной амплитуды и активности АЭ предшествуют достижению предела текучести. Авторы объясняют этот факт неоднородностью протекания процесса деформации по длине образца.

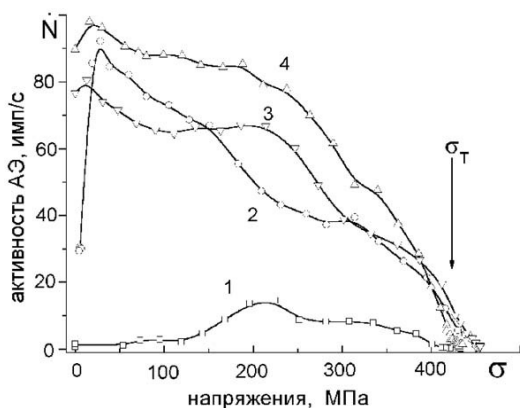


Рис. 5. Зависимость активности АЭ образцов титана с различной толщиной снятого слоя от величины приложенного напряжения.  
1 – исходное состояние; толщина снятого слоя:  
2 – 0,02; 3 – 0,08; 4 – 0,12 мм

В работе [14] изучалась АЭ стали 15Х2НМФА из разных участков (наружный приповерхностный, средний и внутренний приповерхностный) толсто-стенных оболочек сосудов давления. Несмотря на существенные различия результатов для образцов из различных зон, сигналы АЭ появляются сразу же с началом нагружения и достигают максимума на участке микропластичности. В этом случае на не-

совпадение максимума активности АЭ и предела текучести, за исключением фактора неоднородности деформации по длине, авторы указывают на влияние структурной неоднородности материала. В работе [15] объясняет это и тем, что при нагружении образца и его растяжении деформация идет в материале неравномерно и может локализоваться в меньшем объеме, где действующие эффективные напряжения могут значительно превышать средние по сечению образца.

АЭ при деформации циркония при комнатной температуре изучена в работе [6]. Исследовались образцы с шлифованной и не шлифованной поверхностью. Более быстрое нарастание активности АЭ для нешлифованных образцов авторы относят за счет облегченного пластического течения металла в приповерхностных зонах.

Изучение роли поверхности в процессе пластической деформации материалов начато еще в работах А.Ф.Июффе, П.А. Ребиндера и А.В. Степанова. Исследованиями кинетики пластического течения на начальной стадии деформирования и природы поверхностных источников сдвигообразования было установлено, что начальные акты пластического течения, как правило, связаны с поверхностными слоями материала.

А.Н. Давиденков [16], анализируя результаты исследований зависимости параметра кристаллической решетки от величины прикладываемого напряжения, выдвинул гипотезу о том, что поверхностные зерна поликристаллических материалов пластически деформируются раньше, чем внутренние объемы материала. Эта гипотеза экспериментально подтверждена многочисленными исследованиями, в том числе и с применением акустической эмиссии.

По нашему мнению, несовпадение максимума активности АЭ и предела текучести у образцов исходного титана связано с особенностью протекания процесса микропластической деформации. Ранее нами было показано, что у бериллия микропластическая деформация начинается задолго до предела текучести при напряжениях 6...10 МПа и во многом определяет дальнейший характер макропластической деформации [17]. Установлено, что механизмы деформации в этих областях существенно отличаются. Данные о поведении титана в области микродеформации отсутствуют, поэтому проведение этих исследований представляет значительный интерес и может пролить свет на эффекты, наблюдаемые в данной работе.

Рассмотрим область первого максимума АЭ, а также участок предразрушения образца. Амплитудное распределение сигналов в спектре АЭ в этих областях для исходного и химически полированного титана приведено на рис.6.

Известно [18], что характер амплитудного распределения зависит от типа деформации и разрушения. При вязком разрушении источники АЭ распределены равномерно по всему объему и работают случайным образом, поэтому вероятность появления импульсов АЭ с большими амплитудами значительно ниже, чем с малыми. Поэтому такому разрушению соответствует амплитудное распределение, ко-

торое описывается зависимостью, близкой к экспоненциальной. Такой вид амплитудного распределения мы наблюдаем в области предразрушения исследованных образцов титана.

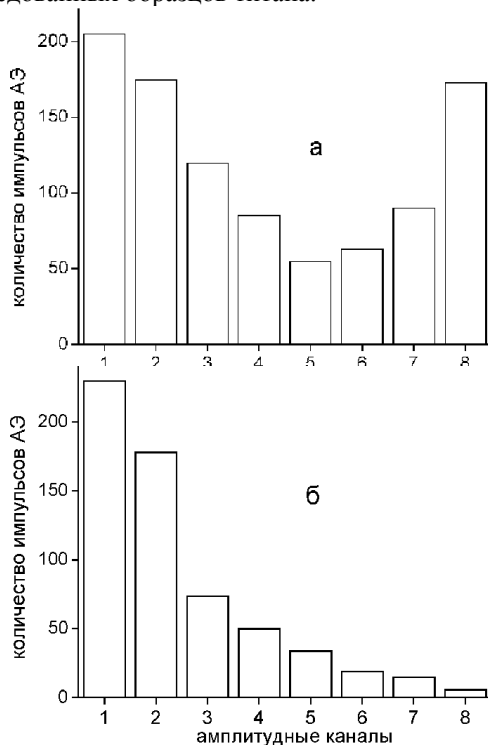


Рис. 6. Амплитудное распределение сигналов АЭ на различных участках деформирования: а - область микропластичности; б - область предразрушения и разрушения

Амплитудное распределение сигналов АЭ для микропластической области деформирования имеет другой характер: это распределение с минимумом в области средних амплитуд, что вызвано существенным возрастанием количества высокоамплитудных сигналов в спектре АЭ.

Анализ амплитудных распределений сигналов АЭ и данных с амплитудных счетчиков показывает, что высокоамплитудные источники сигналов АЭ очень активно начинают работать с самого начала деформирования, достаточно быстро завершают свою работу (до предела текучести) и только на стадии предразрушения образцов вновь наблюдаются высокоамплитудные сигналы, но их активность значительно ниже, чем на начальной стадии деформирования.

Рассмотрим, как изменяется средняя амплитуда импульса АЭ ( $A_{cp}$ ) у исходных и обработанных образцов в процессе деформирования (рис 7). Среднюю амплитуду импульса АЭ рассчитывали по формуле:

$$A_{cp} = \left( \sum_1^8 k_i N_i \right) / \left( \sum_1^8 N_i \right),$$

где  $k$  – амплитудный уровень счетчика;  $N$  – число импульсов АЭ, которые приходят в счетчик за выбранный интервал времени;  $I$  – порядковый номер счетчика сигналов АЭ (комплекс М400 имеет 8 амплитудных счетчиков).

Видно, что у исследованных образцов характер изменения  $A_{cp}$  практически одинаков. С начального момента деформирования средняя амплитуда импульса АЭ начинает уменьшаться и до напряжений, соответствующих пределу текучести, средняя амплитуда изменяется не очень сильно. В области упрочнения материала величина  $A_{cp}$  сильно уменьшается (приблизительно в 2 раза) и некоторое время остается постоянной. Следует обратить внимание на то, что на этих участках деформирования характер изменения средней амплитуды не коррелирует с изменением механических и акустических параметров. Затем на зависимости  $A_{cp}(\Delta l)$  наблюдается увеличение средней амплитуды, которое совпадает с началом роста кривой активности АЭ и началом разупрочнения образца.

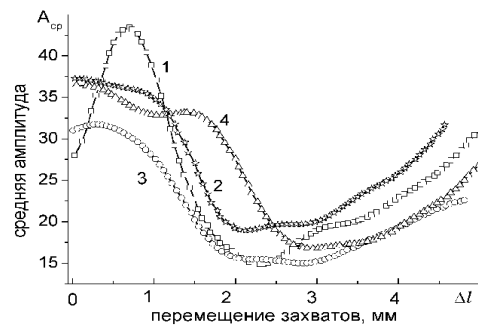


Рис. 7. Зависимость средней амплитуды импульса АЭ от перемещения захватов для образцов с различной величиной снятого поверхностного слоя: 1 – исходное состояние; толщина снятого слоя: 2 - 0,02; 3- 0,12; 4 - 0,2 мм

Отсутствие существенных различий в характере изменения зависимости  $A_{cp}(\Delta l)$ , вероятно, связано с тем, что снятие поверхностного слоя не приводит к изменению самого механизма деформации и работающих источников АЭ. Не наблюдается заметных различий в зависимостях  $A_{cp}(\Delta l)$  у исходных и химически обработанных образцов после отжига при температуре 630 °С в течение часа, хотя отжиг заметно меняет вид зависимости и приводит к росту абсолютных величин  $A_{cp}$  приблизительно в 1,5 раза.

При снятии поверхностного слоя у образцов титана активность АЭ возрастает.

Рассмотрим вклад импульсов различной амплитуды в увеличение общей активности АЭ. На рис 8, а, б, в показаны зависимости изменения активности низко-, средне- и высокоамплитудных сигналов АЭ в процессе деформирования для образцов с различной величиной снятого поверхностного слоя. Видно, что по мере снятия поверхностного слоя вклад в увеличение активности дают сигналы всех амплитуд, но наибольший – низкоамплитудные сигналы. Также видно, что основное увеличение активности АЭ в результате снятия слоя происходит у всех образцов на начальной стадии деформирования.

Это хорошо согласуется с особенностями спектров амплитудного распределения сигналов АЭ (см.

рис.6) и может быть проиллюстрировано рис.9 и 10, на которых представлены трехмерные графики изменения амплитудного распределения сигналов АЭ в процессе деформирования исходного образца и со снятым поверхностным слоем.

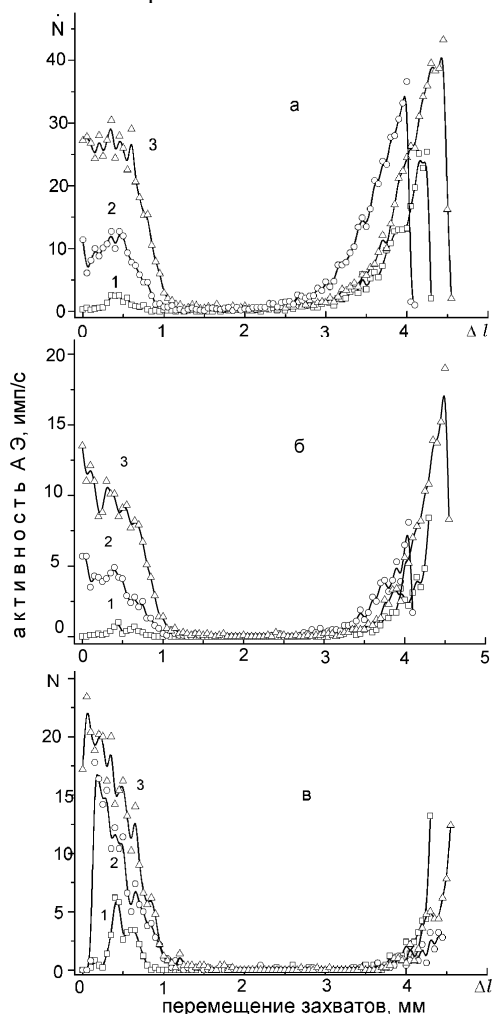


Рис. 8. Зависимость изменения активности сигналов АЭ различной амплитуда для образцов с разной толщиной снятого слоя: 1 - 0; 2 - 0,02; 3 - 0,12мм; а - сигналы низкой амплитуда; б - средней амплитуды; в - высокой амплитуды

На оси X на графике отложена величина амплитуды сигналов АЭ, измеряемых с помощью акустического комплекса М400. По оси Y отложено текущее время испытания, по оси Z – активность сигналов АЭ. В данной работе использовали 8 амплитудных счетчиков, настроенных на следующие амплитуды (приведенные ко входу усилителя): 1 от 10 до 20; 2 – 20...30; 3 - 30...40; 4 – 40...50; 5 – 50...60; 6 – 60...70; 7 – 70...80; 8 – 80 мВ и выше. Любое сечение графика по оси Y показывает количество импульсов, которое регистрирует каждый амплитудный счетчик за интервал времени, т. е. мгновенное амплитудное распределение импульсов. Хорошо видно, что у исходного образца в начальной области деформирования число импульсов, приходящих в каждый счетчик, мало и приблизительно одинаково. У образцов после снятия поверхностного слоя в этой же области наблюдается рост активности им-

пульсов АЭ всех амплитуд и особенно низкоамплитудных сигналов АЭ. Таким образом, по мере снятия поверхностного слоя у образцов титана основной вклад в увеличение активности АЭ вносят низкоамплитудные сигналы АЭ.

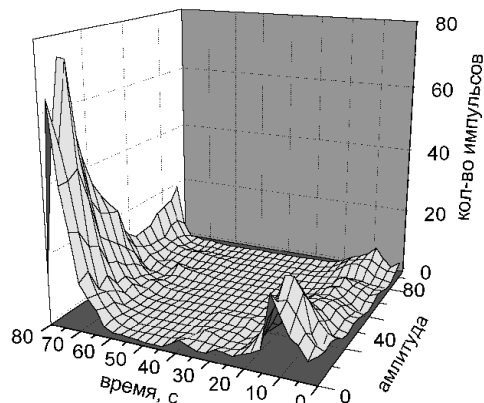


Рис. 9. Амплитудное распределение сигналов АЭ при деформировании у исходных образцов

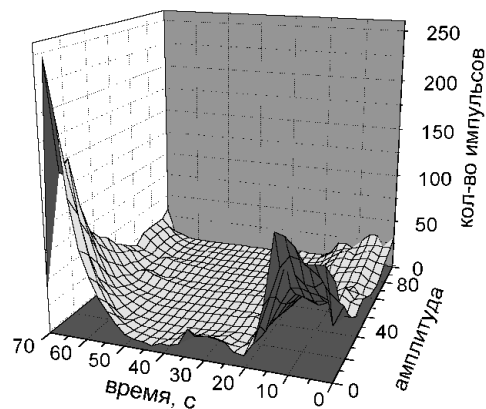


Рис. 10. Амплитудное распределение сигналов АЭ при деформировании у образцов со снятым поверхностным слоем

Наблюдаемое уменьшение удлинения образцов титана после снятия поверхностных слоев, вероятно, связано с тем, что в поверхностных слоях находится наибольшее количество подвижных дислокаций, которые обеспечивают начало пластической деформации при малых нагрузках.

Стравливание поверхностного слоя приводит к уменьшению количества подвижных дислокаций в оставшемся объеме образца. Вероятно, что оставшиеся дислокации сильнее закреплены, поэтому процессы деформации начинаются и проходят при более высоких нагрузках, что приводит к более быстрому достижению разрушающих напряжений материала, т.е. при постоянной скорости растяжения уменьшается время нагружения (удлинение) до разрушения.

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет высказать предположения об источниках АЭ при деформировании титана с различным состоянием поверхности.

Рассмотрим зависимость  $\dot{N}(\Delta l)$  для исследованных образцов титана. Условно эту зависимость можно разделить на 5 участков:

1-й – начало регистрации сигналов АЭ. На этом участке АЭ начинается сразу же после приложения нагрузки (в микропластической деформации);

2-й – достижение максимальной активности АЭ. При увеличении нагрузки в микропластической деформации число регистрируемых сигналов АЭ увеличивается и достигает максимума (абсолютная величина которого зависит от толщины снятого слоя);

3-й – сильное уменьшение активности АЭ в области стационарного течения. При напряжениях немного выше предела текучести, активность АЭ начинает сильно уменьшаться и при напряжениях, соответствующих пределу текучести, ее величина приближается к нескольким импульсам в секунду.

4-й – сохранение низкого уровня активности АЭ. В интервале напряжений выше предела текучести и до напряжений начала разрушения образца активность АЭ слабо изменяется и достаточно мала;

5-й – рост активности АЭ в области пред – и разрушения образца.

Будем считать, что деформацию титана обеспечивает чисто дислокационный механизм. Излучение волн АЭ в этом случае происходит при резком увеличении числа подвижных дислокаций и изменении их скорости движения. Можно предположить, что на участке 1 источником акустических импульсов является отрыв дислокаций от примесных точек закрепления (заводской титан марки ВТ1-0 имеет в своем составе до 0,7% примесей – кремния, железа и др.).

Как показано в работе [19], движение дислокации с большими скоростями ( $v > 10^3$  см/с) возможно уже при очень низком уровне приложенного напряжения ( $\tau = 0,3$  МПа), т.е. в области микродеформаций. Высокие скорости наблюдаются только на начальном этапе движения дислокации, т.е. на участке неустановившегося (нестационарного) движения, которое, согласно теоретическим представлениям [20], и является наиболее подходящим источником излучения звуковых волн.

Амплитуда и активность сигналов АЭ зависят от прочности закрепления и числа оторвавшихся дислокаций. В случае титана большая активность АЭ вызвана, вероятно, тем, что в работу одновременно вовлекается большое количество дислокационных источников, напряжение срабатывания которых является не очень высокими (они достигаются уже на начальной стадии нагружения). При увеличении нагрузки активность АЭ растет, достигает максимума (участок 2) и затем начинает быстро уменьшаться (участок 3), что связано с уменьшением плотности подвижных дислокаций (обеднением дислокационных источников) и их стационарным течением с постоянной скоростью. В области стационарного течения (участок 4) низкий уровень АЭ, вероятно, связан с изменением условий (уменьшением) генерации упругих волн движущимися в стационарном режиме (без резких изменения скорости) дислокациями.

Мы считаем, что более точное описание процессов, которые происходят при деформировании титана, можно предложить только после того, как будет достигнуто понимание особенностей дислокационного движения в областях микропластической деформации титана.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рост активности и общего количества импульсов АЭ по мере снятия поверхностного слоя у исходных образцов титана при их испытании на растяжение вызван уменьшением уровня поверхностных напряжений, которые определяют динамику движения приповерхностных дислокаций.

2. Уменьшение общего количества импульсов при снятии поверхностного слоя у отожженных образцов связано с уменьшением объема рабочей части образца.

3. Дополнительная механическая обработка поверхности образцов титана (прокатка при комнатной температуре образцов от 2 до 1мм) приводит к исчезновению АЭ в процессе последующих испытаний даже после снятия поверхностного слоя значительной толщины.

4. Отжиги образцов титана при температуре 630 и 850 °С радикально меняют характер изменения активности АЭ: появляется второй максимум в области упрочнения, а первый – смещается в область предела текучести.

Данные настоящей работы подтверждают неоднородность деформации образцов титана по объему образца и начало микропластического течения ниже физического предела текучести, а также и значительное влияние на эти процессы характера распределения поверхностных напряжений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.А. Стрижало, Ю.В. Добровольский, В.А. Стрельченко. *Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций*. Киев: «Наукова думка», 1990, 232 с.
2. В.А. Грешников, Ю.Б. Дробот. *Акустическая эмиссия*. М.: Изд-во стандартов, 1976, 272 с.
3. Н.А. Бунина. *Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии*. Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1990, 155 с.
4. H.L. Dunegan, A.T. Green. Factors affecting acoustic emission response from materials // *Mater. Res. and Stand.* 1971, v.11, N.3, p.21-24.
5. В.В. Корчевский, Ю.П. Сурков. Роль поверхности в формировании сигналов акустической эмиссии // *Тезисы докладов 1 Всесоюзной конференции акустической эмиссии материалов и конструкций (Ростов, 11-13 сентября, 1984)*. Ростов: Изд-во РГУ, 1984, с.192.
6. В.Н. Глыгало, В.В. Кирсанов, Л.С. Кравцова. Акустическая эмиссия циркония // *Дефектоскопия*. 1975, №3, с.140-142.

7. З.И. Бирик, В.Д. Нацик. Акустическая эмиссия при пластической деформации поликристаллов алюминия высокой чистоты // *Металлофизика*. 1982, в.4, №4, с.92-93.
8. L.C. Duke, R.A. Kline. The influence of the Surface Layer on Acoustic Emission // *Scripta Met.* 1975, v.9, p. 2008-2010.
9. *Теоретическое и экспериментальное моделирование физико-механических процессов в материалах, прочностной анализ и оптимизация конструкций в машиностроении. Создание аппаратуры для диагностики работоспособности элементов конструкций: Отчет НИР ИПМаш АН УССР, № ГР 79005541. Харьков, 1981, 81 с.*
10. В.Д. Нацик. Излучение звука дислокаций, выходящей на поверхность кристалла // *Письма в ЖЭТФ*. 1968, в.8, №6, с.324-328.
11. В.С. Бойко, В.Д. Нацик. *Элементарные процессы пластической деформации кристаллов*, Киев: «Наукова думка», 1978, с.178.
12. В.П. Ченцов. *Разработка и исследование метода и аппаратуры для измерения предела текучести конструкционных материалов с использованием акустической эмиссии*. М.: «Наука», 1974, 236 с.
13. С.И. Лихатцкий, Ю.В. Добровольский. *Применение метода акустической эмиссии для исследования прочности и пластичности материалов в условиях низких температур. Механические испытания конструкционных сплавов при криогенных температурах*. Киев: «Наукова думка», 1982, с.85 -101.
14. Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. *Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии*. Киев: «Наукова думка», 1976, 415 с.
15. Ю.Б. Дробот, В.В. Корчевский. Исследование связи акустической эмиссии с образованием полос скольжения при пластическом деформировании аустенитной стали // *Дефектоскопия*. 1980, №5, с. 27-29.
16. Н.Н. Давиденков. Изучение пластической деформации посредством рентгеноанализа // *ЖТФ*. 1944, в.14, №9, с. 507-514.
17. И.И. Папилов, В.И. Иванцов. Микропластичность и размерная стабильность бериллия // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедение»*. 1998, в.6(72), с. 121-125.
18. О.В. Гусев. *Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов*. М: «Наука», 1982, 107 с.
19. В.Н. Schofield. Research on the sources and characteristics of acoustic emission // *Acoustic emission ASTM STP 505*. Baltimore, 1972, p.11-19.
20. К.А. Чишко. *Дислокационные механизмы акустической эмиссии пластически деформируемых кристаллов*: Препринт ФТИНТ АН УССР. Харьков, 1977, 22 с.

## АКУСТИЧНА ЕМІСІЯ ТИТАНУ

*П.І. Стоєв, І.І. Папіров, В.І. Моценок*

Вивчено вплив стану поверхневого шару на акустичну емісію титану VT1-0. Показано, що акустичні параметри істотно залежать від напруженого стану поверхневого шару. Установлено, що максимум активності акустичної емісії титану збільшується в міру зняття деформованого поверхневого шару і не збігається з межею текучості матеріалу, що зв'язано з початком процесів пластичної деформації при напругах значно, нижчих ніж межа текучості. Висловлено припущення про ймовірні механізми деформації і джерела акустичної емісії у титані.

## ACOUSTIC EMISSION OF THE TITANIUM

*P.I. Stoev, I.I. Papirov, V.I. Moschenok*

The influence of surface layer condition on acoustic emission of titanium VT1-0 alloy was studied. It is shown that acoustic parameters essentially depend on stress condition of the surface layer. It was decided that the maximum of activity of acoustic emission increases with removal of the deformed surface layer and does not accord to yield stress of a material that is concerned with beginning of processes of plastic deformation at stresses that are much lower than yield stress. Probable mechanisms of deformation and sources of acoustic emission in the titanium are suggested.