

УДК 534.2:534.6

## ОСОБЕННОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ГАФНИЯ

**П.И. Стоев, А.А. Васильев, К.В. Ковтун**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт*

*61108, Харьков, ул.в Академическая 1*

*e-mail: [kkovtun@kipt.kharkov.ua](mailto:kkovtun@kipt.kharkov.ua)*

*Received September 2, 2013*

Исследована акустическая эмиссия (АЭ) прокатанного гафния ГФЭ-1 при деформации растяжением в зависимости от направления вырезки образцов и режимов термообработки. Для неотожженных образцов с разным направлением вырезки АЭ гафния регистрируется только на стадиях, предшествующих разрушению. Ориентационный эффект на кривых активности АЭ проявляется только в различии величины деформации до начала резкого изменения активности. Ориентационный эффект у отожженных образцов проявляется в различной величине регистрируемых импульсов АЭ (после отжига при 1123К) и различной средней амплитуде импульса (после отжига при 1373К). После рекристаллизационных отжигов в материале сохраняется анизотропия механических свойств, характерная для гексагональных металлов, подвергнутых деформации, которая коррелирует с особенностями структуры материала и параметрами АЭ.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** акустическая эмиссия, гафний, механические свойства, термообработка

### THE FEATURES ACOUSTIC EMISSION DURING PLASTIC DEFORMATION OF HAFNIUM

**P.I. Stoev, A.A. Vasiliev, K.V. Kovtun**

*National Science center "KIPT"*

*Akademicheskaya Str. 1, 61108, Kharkov, Ukraine*

The dependence of the acoustic emission (AE) rolled hafnium HPE-1 under tensile strain on the direction investigated of cutting the samples and heat treatment. For unannealed samples with different directions clippings AE hafnium registered only at stages preceding the destruction. Orientation effect on the curves of the AE activity occurs only in the difference between the amount of deformation before the abrupt change in activity. Orientation effect in the annealed samples at high temperatures is shown in a different magnitude of pulses registered AE (after annealing at 1123K) and different average pulse amplitude (after annealing at 1373K). After recrystallization annealing of the material stored anisotropy of mechanical properties, typical of hexagonal metals subjected to strain, which correlates with the features formed by the material structure and the parameters of the active element.

**KEYWORDS:** acoustic emission, hafnium, mechanical properties, heat treatment

### ОСОБЛИВОСТІ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ГАФНІЮ

**П.І. Стоєв, А.О. Васильєв, К.В. Ковтун**

*Національний Науковий Центр «ХФТІ»*

*61108, Академічна 1, Харків, Україна*

Досліджено залежність акустичної емісії (АЕ) прокатаного гафнію ГФЕ-1 при деформації розтягом в залежності від напрямку вирізки зразків і режимів термообробки. Для невідпалених зразків з різним напрямом вирізки АЕ гафнію реєструється тільки на стадіях, передуючих руйнуванню. Орієнтаційний ефект на кривих активності АЕ проявляється тільки в розходженні величини деформації до початку різкої зміни активності. Орієнтаційний ефект у відпалених при високих температурах зразках проявляється в різній величині реєстрованих імпульсів АЕ (після відпалу при 1123К) і різної середньої амплітуди імпульсу (після відпалу при 1373К). Після рекристалізаційних відпалів в матеріалі зберігається анізотропія механічних властивостей, характерна для гексагональних металів, підданих деформації, яка корелює з особливостями структури матеріалу і параметрами АЕ.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** акустична емісія, гафній, механічні властивості, термообробка

Благодаря уникальному сочетанию физико-механических свойств - высокой прочности, коррозионной стойкости, высокому поперечному сечению захвата нейтронов, хорошей пластичности гафний является перспективным конструкционным материалом ядерной энергетики [1,2]. Жесткие условия эксплуатации гафния в устройствах атомной техники предъявляют высокие требования к уровню его механических свойств. Одним из основных способов их повышения является формирование в материале определенного структурного состояния, которое создается различными методами механико-термической обработки [3]. В процессе этих обработок в материале возникает геометрическая направленность зерен и субзерен и ориентированные микронапряжения, которые в значительной мере определяют особенности пластической деформации и механические свойства металла. Для оптимизации процессов получения заготовок и изделий необходимо понимание механизмов пластической деформации и разрушения. Одним из перспективных методов анализа пластической деформации является метод акустической эмиссии [4-6]. В настоящее время для многих конструкционных материалов изучено влияния структурных факторов и условий испытаний на особенности пластической деформации с использованием метода акустики эмиссии. Однако для металлов с ГПУ кристаллографической решеткой, к которым относится гафний, и в которых при деформации развивается текстура, количество исследований

акустической эмиссии в процессе деформирования ограничено. Влияние ориентационных эффектов на акустическую эмиссию при деформации циркония приведено в работе [7], а для образцов из листов коммерческих магниевых сплавов в [8]. Влияние механизмов пластической деформации на акустическую эмиссию цинка описано в [9], а пластическая деформация титана и сплава Ti-6Al-4V изучена с помощью акустической эмиссии в работах [10-12]. Впервые данные по акустической эмиссии гафния при деформации растяжением представлены авторами в [13], а данная работа является развитием этих исследований.

Целью работы является изучение АЭ в процессе деформирования растяжением образцов листового гафния, вырезанных в различных направлениях относительно направления прокатки, в исходном состоянии и после отжига при температурах 973-1373 К.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала для исследований использовали гафний ГФЭ-1, полученный методом кальцийтермического восстановления. Первоначальные слитки металла получали электроннолучевой плавкой, которые затем подвергали горячей ковке и прокатке в полосу. Прокатанную полосу толщиной 5 мм отжигали в вакууме, а затем повторно прокатывали при температуре 673 К до получения листа толщиной 2,2 мм (общая деформация при этом составляла 54 %). Методом электроискровой резки из листа вырезали образцы для испытаний на растяжение. Образцы в рабочей части имели сечение 2,2×4 мм, длину 27 мм и были вырезаны продольно, перпендикулярно и под углом 45° к направлению прокатки. Для получения различного структурного состояния образцы отжигали в вакууме (10<sup>-5</sup> мм.рт.ст.) при температуре 973 К – 1 час, 1123 К – 1 час и 1373 К – 5 часов. Макроструктуру и текстуру образцов деформированного и отожженного гафния контролировали оптическими и рентгеновскими методами.

Испытания образцов гафния на растяжение проводили при комнатной температуре на универсальной испытательной машине 1958 У10-1 по стандартной методике со скоростью деформации 1×10<sup>-3</sup>сек<sup>-1</sup>. При растяжении образцов синхронно регистрировали параметры деформирования и акустической эмиссии. Для регистрации акустической эмиссии использовали многоканальный акустический комплекс М 400, который позволял разделять записываемые сигналы АЭ по 8 амплитудным уровням (каналам). В качестве датчика АЭ использовали пьезокерамический преобразователь из керамики ЦТС-19 с резонансной частотой 180 кГц. Для обеспечения надежного акустического и механического контакта, датчик крепился к исследуемому образцу через слой смазки специальным держателем, который обеспечивал одинаковое усилие прижатия. Сбор, обработка, анализ результатов, включающих информацию об акустической эмиссии и информацию о параметрах деформирования, проводили с помощью ЭВМ.

Для оценки среднего энергетического вклада одного сигнала в любой момент времени испытания рассчитывали среднюю амплитуду импульса АЭ. Методика расчета этого параметра приведена в работе [11].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1-7 приведены зависимости активности АЭ, общей суммы зарегистрированных импульсов и средней амплитуды импульса АЭ от деформации для образцов гафния, вырезанных вдоль, поперек и под углом 45° к направлению прокатки, в деформированном состоянии и после отжига при температурах 1123 и 1373 К. В таблице представлены значения механических характеристик для образцов гафния вырезанных вдоль, поперек и под углом 45° к направлению прокатки в деформированном и отожженном (рекристаллизованном) состояниях. Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что как в деформированном, так и в отожженном состоянии для образцов гафния характерна анизотропия механических свойств. Так, все испытанные образцы гафния имели более высокую прочность на разрыв в продольном направлении по сравнению с поперечными и, вырезанными под углом 45°, образцами. Предел текучести выше у образцов, вырезанных поперек направления прокатки. С увеличением температуры отжига разница в абсолютных значениях предела прочности уменьшается, а у предела текучести – растет. Удлинение в исходном и отожженном состоянии всегда выше у продольных образцов. Аналогичный характер анизотропии механических свойств гафния наблюдали и ранее [14].

Рассмотрим особенности механических и акустических характеристик гафния в исходном состоянии и после термообработок. В исходном состоянии образцы гафния с различной ориентацией вырезки относительно направления прокатки обладают высокой прочностью и небольшим относительным удлинением (максимальное удлинение ~ 8 % у образцов, вырезанных вдоль направления прокатки). Активность АЭ в течение всего процесса растяжения этих образцов очень низкая и начинает увеличиваться только на стадии разрушения образца, вероятно из-за образования и распространения трещин (рис.1). Также в процессе деформации не отожженных образцов изменяется и общая сумма регистрируемых импульсов АЭ (рис.2).

Отжиг при 973 К в течение 1 часа приводит к снижению пределов прочности и текучести испытанных образцов гафния и росту их удлинения. Зависимость активности АЭ от деформации у отожженных при 973 К образцов гафния с различной ориентацией вырезки имеет такой же вид, как и у образцов исходного прокатанного материала: низкие абсолютные значения активности АЭ в течение всего процесса растяжения и резкий ее рост в области предразрушающих нагрузок. Ориентационный эффект на кривых активности АЭ у исходных и отожженных при 973 К образцов гафния с различной ориентацией вырезки проявляется только в различии

величины деформации до начала резкого изменения активности.

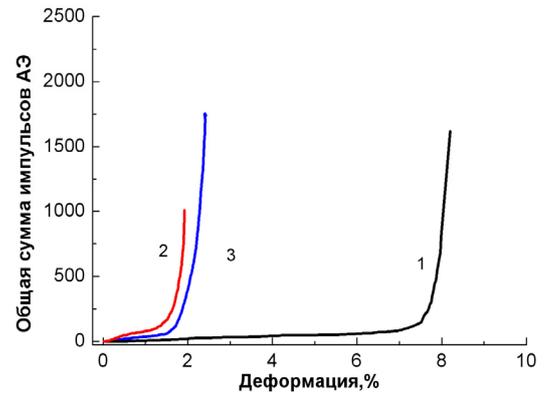
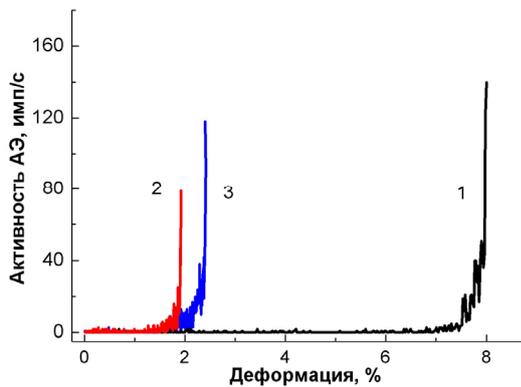


Рис. 1. Зависимость активности АЭ от деформации для образцов гафния в исходном состоянии для различного направления вырезки относительно направления прокатки: 1 - для образца, вырезанного вдоль направления прокатки; 2 - перпендикулярно направлению; 3 - под углом 45° к направлению прокатки

Рис. 2. Зависимость общей суммы импульсов АЭ от деформации для образцов гафния в исходном состоянии для различного направления вырезки относительно направления прокатки: 1 - для образца, вырезанного вдоль направления прокатки; 2 - перпендикулярно направлению; 3 - под углом 45° к направлению прокатки

Таблица

Механические свойства образцов листового гафния, с различной ориентацией вырезки после прокатки и отжигов при температурах 973 К, 1123 К и 1373 К

Направление вырезки образцов	$\sigma_b$ , МПа				$\sigma_T$ , МПа				$\epsilon$ , %			
	прокат исход.	отж 973К	отж 1123К	отж 1373К	прокат исход.	отж 973К	отж 1123К	отж 1373К	прокат исход.	отж 973К	отж 1123К	отж 1373К
Вдоль направления прокатки	767,0	640,6	561,4	509,5	679,0	498,0	235,3	154,8	7,95	19,0	35,18	9,26
Поперек направления прокатки	758,0	637,4	553,6	484,0	708,0	538,4	345,0	271,0	1,85	5,0	13,7	4,82
Под углом 45° к направлению прокатки	731,5	---	537,8	327,7	687,0	---	291,5	245,7	2,4	---	25,5	2,03

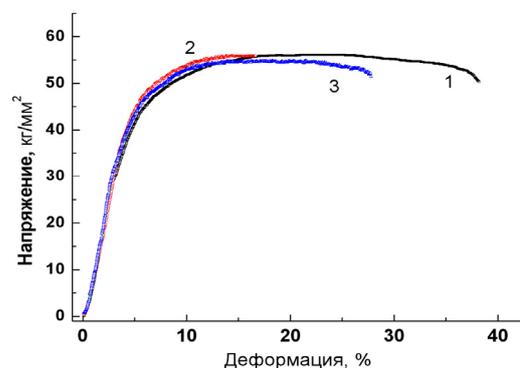
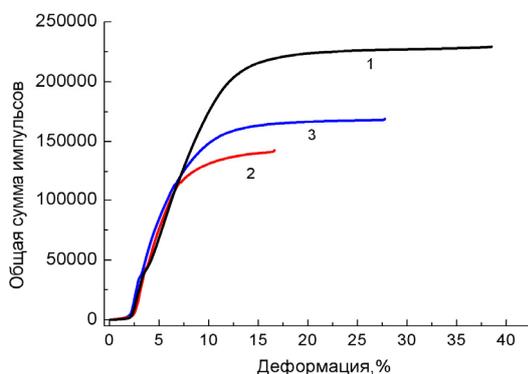


Рис. 3. Зависимость общей суммы импульсов АЭ от деформации для образцов гафния, отожженных при температуре 1123 К в течение 1 часа с различной ориентацией вырезки относительно направления прокатки: 1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2-перпендикулярно направлению; 3- под углом 45° к направлению прокатки

Рис. 4. Кривые деформации для образцов гафния, отожженных при температуре 1123 К в течение 1 часа с различной ориентацией вырезки относительно направления прокатки: 1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2-перпендикулярно направлению; 3- под углом 45° к направлению прокатки

Низкие абсолютные значения активности АЭ у исходных и отожженных при 973К образцов гафния и ее рост при высоких значениях приложенных напряжений (в области разрушения), по нашему мнению, связан с особенностью структуры, которая формируется в листах гафния в процессе предварительной механико-термической обработки и последующих отжигах, и проявлением эффекта Кайзера (отсутствие генерации сигналов АЭ до момента достижения повторной нагрузки максимального значения первого нагружения) [15]. В нашем случае эффект Кайзера связан с тем, что первичное нагружение в материале создается при деформации в процессе прокатки гафния. Поэтому отсутствие сигналов АЭ у исходных образцов гафния при растяжении свидетельствует о том, что в течение всего процесса растяжения абсолютные значения внешней нагрузки, которая прикладывается к материалу, не превосходит уровень нагрузки, заданный прокаткой. Наблюдаемое увеличение активности АЭ перед разрушением, по нашему мнению, вызвано появлением новых источников генерации сигналов АЭ в материале, которые связаны с началом процессов трещинообразования и распространения трещин.

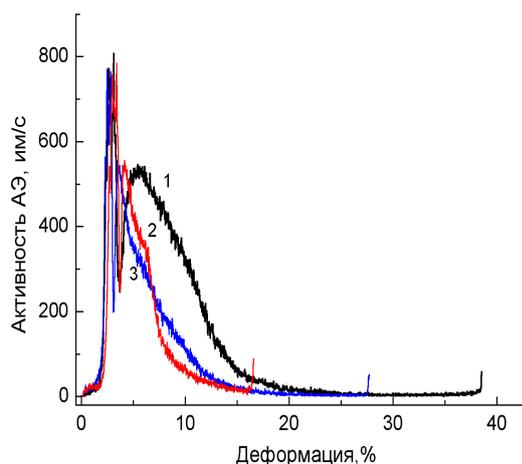


Рис. 5. Зависимость активности АЭ от деформации для образцов гафния отожженных при температуре 1123 К в течение 1 часа с различной ориентацией вырезки относительно направления прокатки листа  
1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2 - перпендикулярно направлению; 3- под углом 45° к направлению прокатки

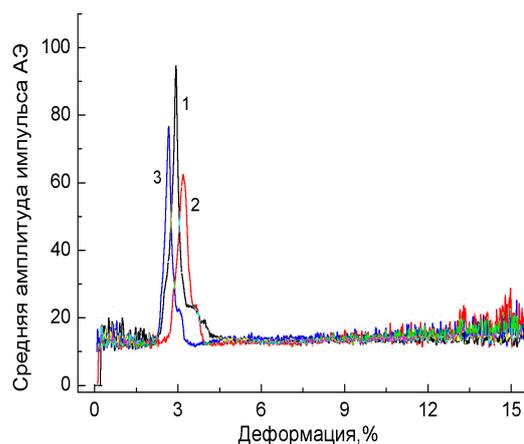


Рис. 6. Зависимость средней амплитуды импульса АЭ от деформации для образцов гафния, отожженных при температуре 1123 К в течение 1 часа с различной ориентацией вырезки относительно направления прокатки листа  
1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2 - перпендикулярно направлению; 3- под углом 45° к направлению прокатки

Выполненные ранее исследования структуры [13] показали, что для образцов гафния в состоянии после прокатки характерна структура, состоящая из сплетенных дислокаций, плотность которых составляет  $1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Отжиг деформированного гафния при 973К приводит к образованию ячеистой структуры с размером ячеек  $\sim 0,3 \text{ мкм}$ , при этом плотность дислокаций уменьшается. Из анализа электронограмм и полюсных фигур, установлено, что угловая разориентировка между возникающими блоками очень мала (несколько градусов) и ориентация плоскости базиса ГПУ решетки гафния близка к плоскости прокатки листа. Пластическая деформация, при растяжении таких образцов, осуществляется за счет скольжения внутри сформировавшихся ячеек ( $\sim 300\text{-}500 \text{ нм}$ ). Малые пути скольжения не приводят к большим смещениям в кристаллической решетке и не сопровождаются существенной АЭ. В этом случае, деформация материала сопровождается генерацией сигналов АЭ низкой амплитуды, которая ниже порога чувствительности регистрирующей аппаратуры. Подобное явление наблюдается в материалах с мелкозернистой структурой при исследовании процессов сверхпластической деформации [16].

Отжиг предварительно прокатанного гафния при температурах выше 1023 К приводит к собирательной рекристаллизации. Размер зерен у образцов гафния увеличивается с повышением температуры отжига. Так, после отжига при 1123 К в течение 1 часа и 1373 К 5 часов средний размер зерен составляет  $\sim 11 \text{ мкм}$  и  $35 \text{ мкм}$  соответственно. Структура рекристаллизованных образцов гафния характеризуется низкой плотностью дислокаций внутри зерен  $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$  и наличием выделений по границам и внутри зерен.

Особенность кривых активности АЭ для образцов различной ориентации отожженных при температуре 1123 и 1375 К (рис. 5 и рис. 7) проявляется в том, что акустические сигналы начинают регистрироваться уже на стадии упругой деформации. В области напряжений до предела текучести скорость нарастания активности АЭ более высокая у продольных образцов, чуть меньше у поперечных и еще ниже у образцов, вырезанных под углом 45°. Это свидетельствует о том, что в изучаемом материале процессы пластической деформации начинаются при напряжениях ниже предела текучести. В материале имеются зерна, наиболее благоприятно ориентированные для процесса скольжения дислокаций, и деформация в них начинается при более низких напряжениях, чем предел

текучести всего поликристаллического объема. Подобные процессы наблюдаются и в других металлах со сформированной структурой зерен [12].

С увеличением деформации активность АЭ у образцов гафния различной ориентации резко возрастает и достигает наибольшего значения в области напряжений соответствующих пределу текучести и точки излома на кривой растяжения (рис. 9).

Необходимо отметить очень важную особенность, которая наблюдается в момент достижения напряжений, соответствующих пределу текучести: необычно высокий темп роста активности сигналов АЭ всех амплитуд. Дальнейшая деформация образцов приводит к резкому снижению активности АЭ в области пластической деформации из-за уменьшения источников генерации сигналов АЭ (плотности подвижных дислокаций) (рис. 5). У образцов гафния отожженных при 1123 К течение 1 часа значения активности АЭ в пластической области остаются достаточно низкими вплоть до разрушения образца.

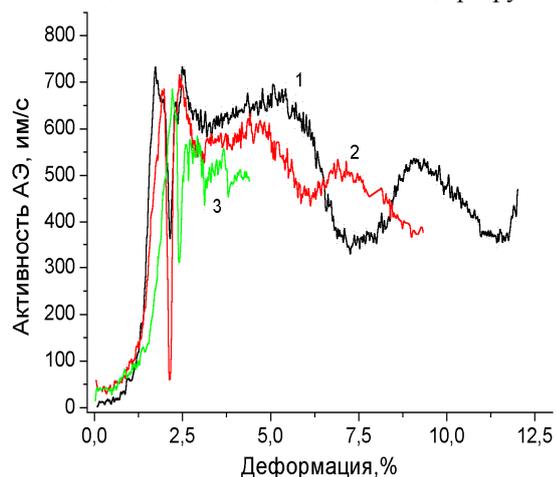


Рис. 7. Зависимость активности АЭ от деформации для образцов гафния, отожженных при температуре 1373 К в течение 5 часов с различной ориентацией относительно направления прокатки листа 1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2-перпендикулярно направлению; 3- под углом 45° к оси прокатки.

АЭ от степени деформации (рис. 6,10).

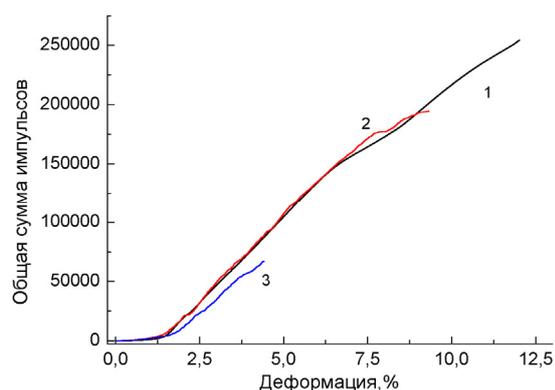


Рис. 8. Зависимость общей суммы зарегистрированных импульсов АЭ от деформации для отожженных при температуре 1373 К течение 5 часов образцов гафния с различной ориентацией относительно направления прокатки

1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2 - перпендикулярно направлению; 3- под углом 45° к направлению прокатки

Так, рис. 3 хорошо иллюстрирует существенное различие в динамике накопления суммы импульсов АЭ в области пластического деформирования у образцов с различной ориентацией вырезки относительно направления прокатки, отожженных при температуре 1123 К.

На стадии пластического деформирования характер изменения и абсолютные значения  $A_{cp}$  у продольных и

После отжигов при 1373 К на зависимости активности АЭ от деформации появляется максимум в области 10, 5 и 3 % деформации для продольных, поперечных и вырезанных под углом 45° образцов, соответственно (рис. 7). Появление такого максимума, может быть связано либо с началом процесса скольжения дислокаций по вторичным системам скольжения (базисным), либо с тем, что имеющиеся в материале атомы примесей закрепляют некоторую часть дислокаций. При достижении определенного уровня напряжений, дислокации отрываются от точек закрепления, увеличивая при этом количество подвижных дислокаций и, соответственно, число регистрируемых сигналов АЭ. Также следует отметить, что абсолютные величины активности вторых пиков АЭ приблизительно одинаковы для образцов всех ориентаций. На заключительной стадии деформирования (перед разрушением) у рекристаллизованных образцов гафния не наблюдается резкого увеличения активности АЭ, в отличие от неотожженных образцов (рис. 1).

Для образцов гафния, испытанных после высокотемпературных отжигов, влияние ориентационного фактора проявляется и на зависимостях общей суммы импульсов АЭ (рис. 3, 8) и средней амплитуды импульса

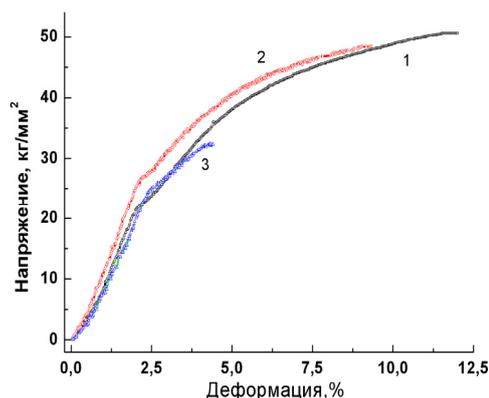


Рис. 9. Кривые деформации для отожженных при температуре 1373 К течение 5 часов образцов гафния с различной ориентацией относительно направления прокатки

1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2 - перпендикулярно направлению; 3- под углом 45° к направлению прокатки

поперечных образцов аналогичен, а у образцов, вырезанных под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки, на этой стадии абсолютные величины приблизительно в 1,5 раза выше. Для определения доминирующего механизма деформации при растяжении образцов гафния с различной структурой и ориентацией, дополнительно к анализу полученных зависимостей средней амплитуды импульса АЭ в процессе испытаний, был проведен анализ амплитудного распределения сигналов АЭ. Комплекс АЭ М400 дает возможность получать амплитудное распределение в любой момент проведения испытания или в течение выбранного интервала времени. Амплитудный анализ позволяет установить вклад сигналов различной амплитуды в спектр АЭ и характер их изменения на всех этапах деформирования материала.

Из рис. 6 видно, что для образцов гафния, отожженных при температуре 1123 К, зависимость средней амплитуды импульсов  $A_{cp}$  от деформации практически одинакова для всех направлений вырезки на всех стадиях деформирования материала. Это может быть свидетельством того, что механизмы, которые контролируют деформацию материала, в данном структурном состоянии, по различным направлениям относительно направления прокатки одни и те же. У образцов гафния отожженных при температуре 1373 К (рис. 10) характер изменения средней амплитуды импульса АЭ в области напряжений ниже предела текучести у образцов различной ориентацией имеет одинаковую тенденцию.

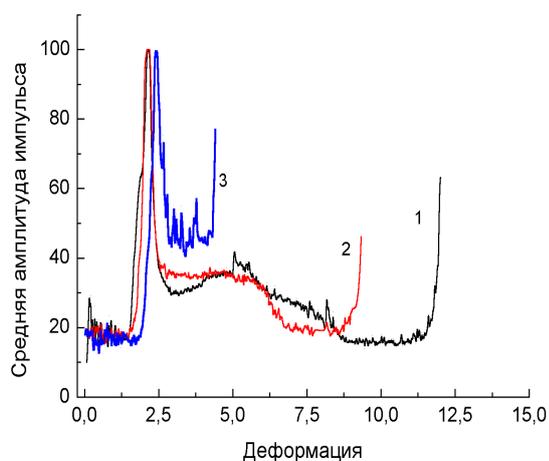


Рис. 10. Зависимость средней амплитуды импульса АЭ от деформации для отожженных при температуре 1373 К в течение 5 часов образцов гафния с различной ориентацией вырезки относительно направления прокатки: 1 - для образца вырезанного вдоль направления прокатки; 2-перпендикулярно направлению; 3- под углом  $45^\circ$  к направлению прокатки

показал, что в общей сумме регистрируемой АЭ доминируют сигналы низких амплитуд и активность низкоамплитудных источников сигналов АЭ практически не изменилась в процессе растяжения по сравнению с образцами, которые отжигались при 1123 К (рис. 11а,б,в). Однако, следует отметить, что количество высокоамплитудных сигналов в спектре АЭ у образцов отожженных при температуре 1373 К заметно увеличилось: у продольных и поперечных в 5-7 раз, у образцов с ориентацией  $45^\circ$  в 10-15 раз. Тенденция регистрации большего числа высокоамплитудных сигналов АЭ в образцах с ориентацией  $45^\circ$  к направлению прокатки после отжига 1123 К сохраняется и для образцов отожженных при 1373 К.

Поэтому, можно предположить, что в деформации материала в данном структурном состоянии в отличии от исходных образцов, вероятно, принимают участие два механизма: дислокационное скольжение и двойникование. Доминирующим механизмом является дислокационное скольжение, которое и дает больший вклад в общую сумму регистрируемых импульсов АЭ. В тоже время увеличение количества высокоамплитудных сигналов в спектре регистрируемых сигналов АЭ может быть вызвано увеличением размера зерен в процессе высокотемпературной обработки (рекристаллизационного отжига).

Все особенности изменения кривых зависимостей активности АЭ в процессе растяжения образцов гафния различной ориентации относительно направления прокатки листа взаимосвязаны с параметрами скольжения (количеством работающих систем скольжения, числом благоприятно ориентированных кристаллов, субструктурой материала), которые определяют сопротивление деформированию.

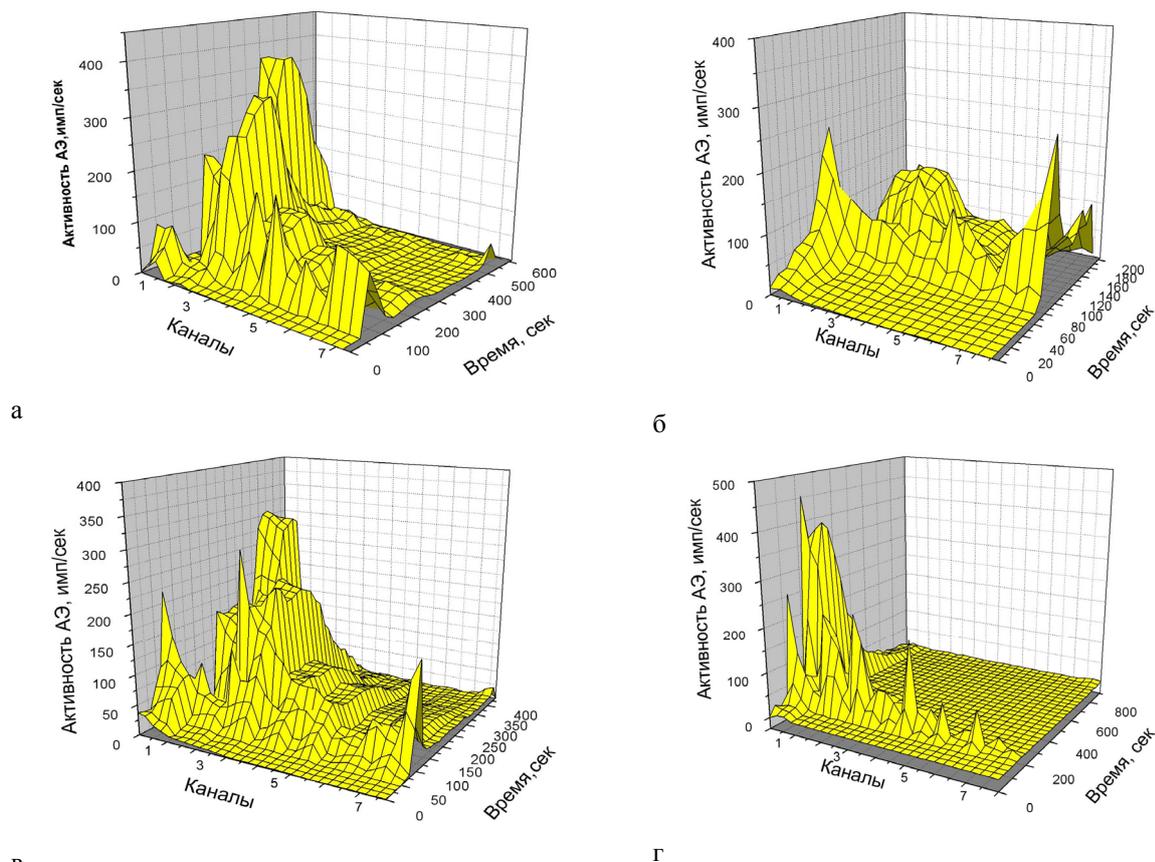
Как показали результаты исследований механических, структурных и акустических параметров отжига при различной температуре и разной продолжительности привели к существенному изменению макро- и микроструктуры материала, уменьшению внутренних микронапряжений, ослаблению деформационной текстуры. Однако примененной термообработкой полностью устранить влияние кристаллографической текстуры не удалось. Так, рекристаллизованные при температуре 1373К в течение 5 часов образцы гафния при испытаниях на

На рис. 11 приведены трехмерные графики «активность АЭ - амплитудный канал - время деформирования». Анализ этих графиков позволяет проследить изменение во времени активности АЭ для импульсов каждого из восьми регистрируемых амплитудных уровней. По доминирующему вкладу амплитуды сигнала АЭ в интегральной величине сигнала АЭ можно высказать предположения о механизме пластической деформации материала. При растяжении образцов гафния в области напряжений выше предела текучести постоянно регистрируется небольшое количество высокоамплитудных сигналов АЭ (3-5 импульсов в секунду). По абсолютному количеству высокоамплитудных сигналов АЭ их несколько больше наблюдается в образцах с ориентацией  $45^\circ$  к направлению прокатки.

В спектре амплитудного распределения сигналов АЭ деформируемых образцов в этих состояниях существенно преобладают сигналы АЭ низких амплитуд, которые и дают основной вклад в спектр сигналов АЭ (рис. 11г).

Анализ амплитудного распределения сигналов АЭ образцов гафния, которые были отожжены при 1373К

растяжение продолжали показывать анизотропию прочностных и пластических характеристик.



а

б

в

г

Рис. 11. Зависимость активности и амплитуды по каналам АЭ от времени деформирования для образцов с различной ориентацией, отожженных при температуре 1123 и 1373К

а) - вдоль направления прокатки,  $T_{отж} - 1373K$ , б) - под углом  $45^\circ$ ,  $T_{отж} - 1373K$ , в) - поперек направления прокатки,  $T_{отж} - 1373K$ , г) - поперек направления прокатки,  $T_{отж} - 1123K$

## ВЫВОДЫ

1. Изучена акустическая эмиссия прокатанного гафния ГФЭ-1 в процессе механических испытаний на растяжение в зависимости от структурного состояния материала и направления вырезки образцов относительно направления прокатки.

2. У образцов гафния с нерекристаллизованной структурой при деформировании растяжением практически отсутствует генерация сигналов АЭ, поэтому активность АЭ и общая сумма регистрируемых импульсов имеют низкие абсолютные значения. Ориентационный эффект на кривых активности АЭ для исходных образцов гафния с различной ориентацией вырезки проявляется только в различии величин деформации до начала резкого изменения активности.

3. Ориентационный эффект у отожженных при высоких температурах образцов проявляется в различной величине регистрируемых импульсов АЭ (после отжига при 1123К) и различной средней амплитуде импульса (после отжига при 1373К) на стадии их пластического деформирования, а также в различии величины деформации до разрушения.

4. У образцов гафния со сформированной структурой зерен в результате отжига для всех ориентаций генерация сигналов АЭ начинается в упругой области. При достижении напряжений, соответствующих пределу текучести у всех образцов наблюдается необычно высокий темп роста активности АЭ и увеличивается доля сигналов высокой амплитуды в суммарном спектре регистрируемой АЭ.

5. Проведенные термообработки приводят к существенному изменению макро- и микроструктуры материала, уменьшению внутренних микронапряжений, ослаблению деформационной текстуры, но при этом анизотропия механических свойств у листов гафния не исчезает из-за сохранения кристаллографической текстуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Azhazha V.M., Kovtun K.V., Starolat M.P. Gafnii v atomnoi energetike: Obzor. - Khar'kov: NNTs KhFTI, 2004. - 70s.
2. Neklyudov I.M., Azhazha V.M., Kovtun K.V., Vasil'ev A.A., Azhazha R.V., Starolat M.P., Stetsenko S.P., Lindt K.A., Bolkov A.F., Popov V.I., Mochalov Yu.V. Podgotovka proizvodstva konstruktsionnykh materialov iz gafniya // Nauka ta innovatsii. -

2009. - T. 5, № 2. - S. 23–31.
3. Cerreta E., Yablinsky C.A., Gray G.T., Vogel S.C., Brown D.W. The influence of grain size and texture on the mechanical response of high purity hafnium // *Materials Science and Engineering*. – 2007. – Vol. A456. – R. 243–251.
  4. Yudin A.A., Ivanov V.I. Akusticheskaya emissiya pri plasticheskoi deformatsii metallov (obzor) // *Problemy prochnosti*. – 1985. - №6. – S.92-107.
  5. Skal'skii V.R., Andreikiv O.C., Sergienko O.M. Doslidzhennya plastichnogo deformatsii materialiv metodom akustichnoi emisii. (Oglyad) // *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv*. – 2003. - №1. – S.77-94.
  6. Perspektivnye materialy. Struktura i metody issledovaniya. Glava 12. Primenenie metoda akusticheskoi emisii v fizicheskom materialovedenii // S.417-456. Ucheb. Posobie. Pod red.Mersona D.L. TGU, MISiS, 2006. – 536s.
  7. Stoev P.I., Papirov I.I. Issledovaniya akusticheskikh spektrov tsirkoniya // *VANT. Seriya «Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie»*. – 1997. – Vyp.1–2 (65–66). – S. 135–139.
  8. Bohlen J. et al. Orientation effects on acoustic emission during tensile deformation of hot rolled magnesium alloy AZ31 // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2004. – Vol.378. – R. 207–213.
  9. Melekhin V.P., Mints R.I., Krugler A.M. Vliyanie mekhanizmov plasticheskoi deformatsii tsinka na akusticheskuyu emissiyu // *Izvestiya vuzov. Tsvetnye metally*. – 1971. - № 1. – S.128-131
  10. Tanaka H., Horiuchi R. Acoustic emission due to deformation twinning in titanium and Ti-6Al-4V alloy // *Scripta Metallurgica*. - 1975. – Vol.9. – P. 777-780.
  11. Stoev P.I., Papirov I.I. Akusticheskaya emissiya titana v protsesse deformatsii // *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. “Vakuum, chistye materialy, sverkhprovodniki”*. – 2007. - №4. – S. 184-191.
  12. Stoev P.I., Papirov I.I. Vliyanie uslovii termicheskoi obrabotki na akusticheskuyu emissiyu listovogo titana // *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki, Seriya: Vakuum, chistye materialy, sverkhprovodniki*. – 2007. - № 4. – S.119 - 127.
  13. Stoev P.I., Starolat M.P., Vasil'ev A.A., Khovrich S.V., Kovtun K.V. Akusticheskaya emissiya gafniya pri deformatsii rastyazheniem // *Problemy prochnosti*. – 2011. - №2. – S.160-168.
  14. Starolat M.P., Vasil'ev A.A., Stetsenko S.P., Azhazha R.V., Kovtun K.V. Vliyanie otzhiga na svoistva i strukturu deformirovannogo gafniya // *The Journal of Kharkiv National University, physical series “Nuclei, Particles, Fields”*. – 2010. - №899. – Iss.2(46). - S.83-86.
  15. Keiser J. Untersuchung uber das Auftreten Gerauscher beim Zugversuch, Ph.D Thesis. Munich, Germany: Technische Hochschule Munchen. – 1950, 123 p.
  16. Papirov I.I., Karpov E.S., Palatnik M.I., Mileshekin M.B. Ischeznovenie akusticheskoi emisii pri sverkhplasticheskoi deformatsii Zn-0,4%Al i Sn-38%Pb // *Fizika metallov i metallovedenie*. – 1982. – T.54, Vyp.3. – S.581-586.