

Башков О.В., Панин С.В., Башкова Т.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ
И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Башков О.В., Панин С.В., Башкова Т.И.

O.V.Bashkov, S.V.Panin, T.I.Bashkova

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ
И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

**USING THE ACOUSTIC EMISSION METHOD FOR RESEARCH AND
IDENTIFICATION OF DEFORMATION AND DESTRUCTION MECHANISMS OF THE
SUS 3321 STEEL**

Башков Олег Викторович - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» E-mail: bashkov_ov@mail.ru

Oleg Bashkov - PhD, lecturer of Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Панин Сергей Викторович - заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИФПМ СО РАН)

Sergey Panin - head of laboratory Professor of The Institute of Strength Physics and Material Science, the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Башкова Татьяна Игоревна - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет». E-mail: telem01@mail.ru

Tatiana Bashkova - PhD, lecturer of Komsomolsk-on-Amur State Technical University

Аннотация: представлены результаты исследований деформации и разрушения при растяжении образцов стали 12Х18Н10Т с использованием метода акустической эмиссии. Исследовались образцы в состоянии поставки и в состоянии, упрочненном азотированием. Установлены критерии оценки механизмов пластической деформации и хрупкого разрушения на основе анализа сигналов АЭ.

Summary: The acoustic emission method for research of deformation and tensile fracture of SUS 3321 steel samples is presented. Samples in as-received condition and nitride hardened samples were investigated. Estimation's criteria of the mechanisms of plastic deformation and brittle fracture mechanisms were established on the basis of acoustic emission's signals analysis.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, источники, стадийность, пластическая деформация, хрупкое разрушение, трещина, упрочнение, азотирование, покрытие.

Keywords: acoustic emission, source, stage, plastic deformation, brittle failure, crack, nitride hardening, coating.

УДК 539.219.2: 539.5: 620.172: 621.793

Введение

Деформация материала является сложным многоуровневым многостадийным процессом, включающим различные механизмы пластического деформирования и разрушения [1 - 3]. Как известно из ряда работ, поверхность оказывает большое влияние на формирование процесса деформации. Дефектная структура, сформированная в материале до начала нагружения, в значительной мере определяет закономерности будущего поведения материала в процессе деформации. Однако расшифровка и предсказание поведения материала является

достаточно сложной задачей. Это связано с тем, что каждый элемент структуры в отдельности и все они в совокупности оказывают влияние на поведение деформируемого материала.

Акустическая эмиссия (АЭ) при деформации и разрушении материалов содержит значительный объем важной информации о физических процессах, изменениях структуры материала, а также о механизмах, энергии разрушения, скорости деформации и т.д. Деформация в материале развивается со сменой стадий, каждая из которых характеризуется определенным набором механизмов и их соответствующим вкладом в общий процесс. В литературе встречаются работы, посвященные анализу не только совокупности сигналов АЭ при испытании материалов, но и анализу единичных сигналов АЭ с целью их детальной расшифровки и идентификации. Однако сложность параметрического описания распространения акустических волн в ограниченной, дефектной, анизотропной среде пока не позволяет разработать единую теорию идентификации сигналов и источников АЭ. Ранее в литературе были представлены работы по использованию частотного анализа [4–7] и вейвлет-анализа [8] для оценки характера сигналов АЭ. Получение новых результатов исследований взаимосвязи сигналов АЭ с механизмами структурных изменений в материалах может стать одной из важных исследовательских практических задач современного материаловедения.

В настоящей работе произведен анализ особенностей разрушения некоторых конструкционных материалов с использованием метода АЭ с целью идентификации типов источников АЭ и соответствующих им механизмов разрушения.

Материалы и методика экспериментов

Испытания материалов проводились на разрывной машине INSTRON-5582 по методике испытаний на одноосное растяжение со скоростью нагружения 0,5 мм/мин. Образцы были изготовлены фрезерованием из листового материала толщиной 2 мм. Регистрация сигналов АЭ проводилась на лабораторном программно-аппаратном комплексе, созданном на базе ЭВМ со встроенным четырехканальным быстродействующим АЦП на частоте дискретизации 10 МГц при установленных параметрах регистрирующей аппаратуры: коэффициент усиления 60 дБ в диапазоне частот 50...800 кГц. Фильтры верхних и нижних частот обеспечивали подавление акустических шумов в диапазоне до 30 кГц и шумов аппаратуры свыше 1 МГц. Для регистрации акустических сигналов применялись широкополосные преобразователи GT301 фирмы GlobalTest с полосой пропускания 50...550 кГц. Анализ механизмов разрушения материалов осуществлялся по вновь разработанным параметрам, полученным на основе спектрального анализа и вейвлет-анализа сигналов АЭ [9, 10], а также традиционно используемому параметру – энергии сигналов АЭ. Регистрация сигналов производилась с использованием двух каналов АЭ с целью определения местоположения источников АЭ. Существует две причины применения локации в ходе испытания образцов. Первая – связана с устранением ложных сигналов АЭ не лежащих в рабочей зоне образца, а регистрируемых от захватов образца или имеющих иное происхождение. Вторая причина связана с выявлением мест изменения активности АЭ излучения и идентификации механизмов в данных местах.

На первом этапе обработки данных вейвлет-анализ был применен для более точного определения местоположения источников АЭ. Как известно, сложность в методике локации источников АЭ связана с отсутствием стабильности в форме, времени нарастания фронта сигналов АЭ. Выделение узкой полосы коэффициентов вейвлет-разложения позволило увеличить точность определения местоположения источников АЭ и уменьшить число «отбракованных» сигналов АЭ.

Вторая область применения вейвлет-анализа касалась его использования для разработки нового критерия «расшифровки» сигналов АЭ и их идентификации. Ранее полученные данные позволяют утверждать, что на формирование сигнала АЭ оказывают влияние такие параметры источника деформации, как энергия, выделяющаяся при деформации, и величина деформации. Величина, скорость и механизмы деформации косвенно связаны с частотой и энергией упругой акустической волны, возникающей в процессе деформации. Так, энергия

возбуждаемой волны зависит от скорости движения микродефектов. По данным [4] скольжение в локальных областях происходит со скоростью до 500 м/с, а скорость образования несплошностей (микротрещин) составляет около 1500 м/с. В дальней зоне, на расстоянии много большем длины волны излучения, частота колебаний может быть косвенно определена как $f \approx \frac{V^2}{c_{l,t} \cdot L}$, где V – скорость движущихся участков или дефектов; $c_{l,t}$ – групповая скорость звука в материале [11]; L – их характерный размер.

На этом основании можно сделать вывод о том, что одними из основных критериев, но не единственными, определяющими тип источника деформации, и, как следствие, тип источника АЭ, являются энергия и частота акустического излучения. Спектр излучения акустических волн, представляющих собой сигналы АЭ, достаточно широк. Поэтому прямое использование спектра Фурье является не совсем корректным. С другой стороны, спектр Фурье наиболее полно и достоверно описывает лишь гармонические сигналы. Однако сигналы АЭ априори являются стохастическими. Поэтому применение спектрального Фурье-анализа для оценки частоты сигналов АЭ не всегда оправдано. В связи с этим частотный вейвлет-анализ может дать возможность получения дополнительной информации о сложных процессах, протекающих в процессе деформации материалов и находящихся свое отражение в акустических образах сигналов АЭ. Зарегистрированные в процессе деформации сигналы АЭ были проанализированы с применением разложения вейвлетом Добеши 2-го порядка с центральной частотой 0,667, что позволило перекрыть весь полезный спектр исследуемых сигналов. На основе детализирующих вейвлет коэффициентов был рассчитан идентификационный параметр, названный частотным коэффициентом K_f , определяющий величину вклада отдельных частотных компонентов спектра в сигнал АЭ в целом. Частотный коэффициент K_f был рассчитан по формулам (1, 2):

$$stdFQ_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_j)^2}, \quad (1)$$

$$K_f = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (stdFQ_j \cdot (m+1-j)), \quad (2)$$

где $stdFQ_j$ – среднеквадратическое отклонение j -го коэффициента вейвлет-разложения сигнала АЭ, n – число отсчетов дискретизации сигнала АЭ, m – число коэффициентов вейвлет-разложения, x_{ji} – численное значение i -го отсчета j -го вейвлет-коэффициента, \bar{x}_j – среднее значение ряда из n отсчетов j -го вейвлет-коэффициента.

Физический смысл частотного коэффициента K_f можно определить как вклад частотных компонент спектра в сигнал АЭ в целом. При этом энергетическая составляющая каждой из частотных компонент определена с учетом момента времени ее возбуждения (учитывался фазовый сдвиг частотной компоненты по технологии вейвлет-анализа). В упрощенном виде: значение частотного коэффициента K_f будет тем больше, чем больше энергетический вклад в акустический сигнал высокочастотных компонент и меньше разность фаз между частотными компонентами.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Для исследования механизмов деформации материалов с упрочненным слоем был поставлен эксперимент по оценке влияния хрупкого поверхностного слоя на кинетику деформации и разрушения материала стали 12Х18Н10Т и особенности проявления АЭ на различных стадиях. Испытанию подвергались образцы в состоянии поставки и образцы с газовым азотированием поверхности, проводимым в течение различного времени. В результате химико-термической обработки на поверхностях образцов был получен азотированный слой повышенной твердости толщиной 10 мкм. Толщина покрытия могла меняться при изменении времени и температуры выдержки материала. Обработанные материалы подвергались испытанию на одноосное растяжение с одновременной регистрацией сигналов АЭ и оптического изображения отдельных участков поверхности.

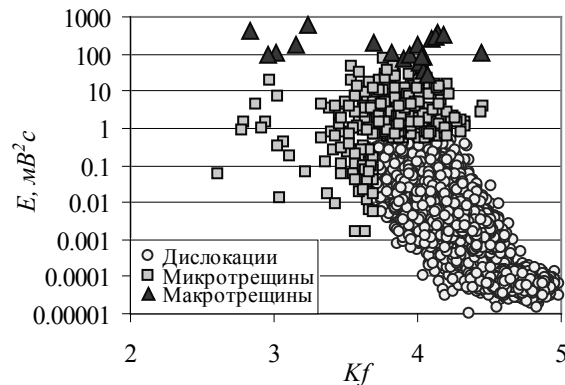


Рис. 1. Двухпараметрическое распределение сигналов АЭ при деформации образца стали 12X18H10T в состоянии поставки

Образец стали 12X18H10T в состоянии поставки

Ниже представлены результаты исследований образца стали 12X18H10T в состоянии поставки при испытании на одноосное растяжение со скоростью 0,5 мм/мин. На рис. 1 приведено двухпараметрическое распределение сигналов АЭ в координатах: энергия АЭ $E_{АЭ}$ – частотный коэффициент K_f . Численное значение энергии $E_{АЭ}$ находится в диапазоне 0,00001...600 мВ²с, параметры частотного коэффициента K_f – в диапазоне 2,5...5. При этом большинству сигналов со значением параметра $K_f > 3,7$ соответствует значение $E_{АЭ} \leq 0,5$ мВ²с. Анализ параметров АЭ для пластичных материалов, таких как медь, олово, свинец и сплавы на их основе, показал, что большинство сигналов АЭ, излучаемых в период активной пластической деформации, имеет параметры, находящиеся в следующем диапазоне: энергия сигналов АЭ $E_{АЭ} \leq 0,5$ мВ²с, параметр $K_f > 3,7$. Данные сигналы АЭ были отнесены к сигналам дислокационного типа, регистрируемых во время генерации и движения дислокаций при активной пластической деформации материалов. Принадлежность сигналов к дислокационным механизмам неоднократно подтверждалась различными косвенными методами, в числе которых проявление эффекта Кайзера – явления невоспроизводимости АЭ при повторных нагружениях материала нагрузкой, не превышающей первоначальную. Метод заключался в том, что образцы после механического нагружения подвергались обработке короткими импульсами электрического тока. Приобретенная в процессе электроимпульсного воздействия подвижность дислокаций приводила к их перераспределению и уменьшению напряжений в локальных областях. При повторном нагружении эффект Кайзера не проявлялся, а источники АЭ, генерируемые в результате скольжения при пластической деформации, носили преимущественно дислокационный характер. Образование трещин и микронесплошностей на данной стадии не регистрировалось, или их число в значительной мере уменьшалось в связи с тем, что электрические импульсы оказывают воздействие только на атомарные и дислокационные структуры, перераспределяя их за счет повышения энергии и подвижности. «Залечивания» образовавшихся при первичном цикле нагружения трещин и несплошностей не происходит.

Хрупкое разрушение, характеризуемое образованием трещин размером более 2...5 мкм в материалах с модулем Юнга $E > 200$ ГПа, регистрировалось при испытаниях закаленной углеродистой стали с объемной и поверхностной закалкой, прутков вольфрама, молибдена. Этот вид хрупкого разрушения был отнесен к образованию макротрещин ввиду того, что зарождаемые, как правило, на поверхности материала трещины могли быть зафиксированы с помощью оптической микроскопии при увеличении до 500 крат. Излучаемые при этом упругие волны имели следующие параметры АЭ: энергия АЭ $E_{АЭ} > 50$ мВ²с, параметр $K_f = 3,0...4,6$.

Промежуточную область между дислокационными механизмами деформации и разрушением с образованием макротрещин занимает образование микронесплошностей. Энер-

гия образования единичных микронесплошностей (микротрещин) может быть соизмерима с энергией движения групп дислокаций при скольжении, однако скорость образования дефектов более высокая, чем при дислокационном процессе. Поэтому данный вид разрушения сопровождается излучением сигналов, имеющих следующие параметры: для сигналов с $E_{AЭ} < 0,5 \text{ мВ}^2\text{с}$ параметр $K_f < 3,7$, для сигналов с $E_{AЭ} > 0,5 \text{ мВ}^2\text{с}$ значение параметра $K_f = 2,5 \dots 4,5$. Таким образом, результаты анализа двухпараметрического распределения показали возможность разделения сигналов АЭ на три типа: излучаемые в процессе пластической деформации скольжением (при движении дислокаций), при образовании и развитии микротрещин и при разрушении с образованием макротрещин.

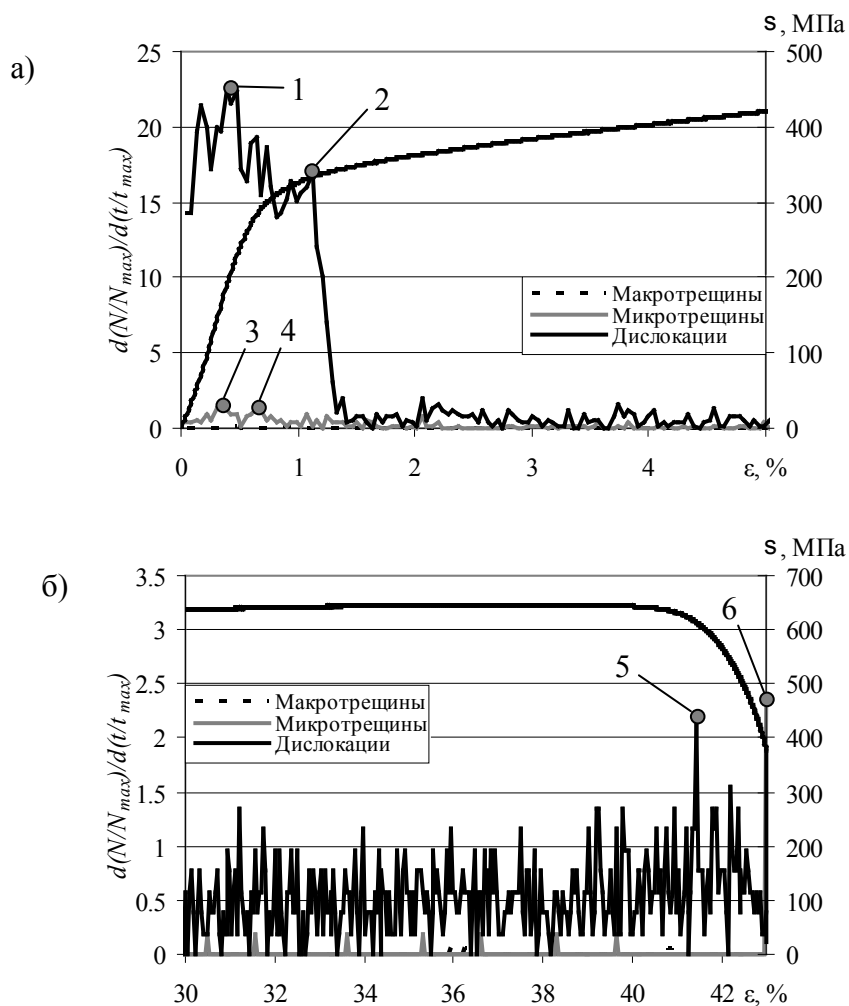


Рис. 2. Диаграмма нагружения и активность сигналов АЭ при деформации образца стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки

Моменты роста активности сигналов при деформации образцов стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки можно оценить по графикам на рис. 2, где представлены: начальная (см. рис. 2, а) и конечная (см. рис. 2, б) области диаграммы нагружения образца и активность трех типов сигналов АЭ во времени. На графиках видно (см. рис. 2, а), что активность образования микротрещин мала в сравнении с дислокационным механизмом и заметна лишь на этапе нагружения, соответствующем стадии упругости и начальной пластической деформации (точки 3 и 4, см. рис. 2, а). Дальнейшая деформация на стадии легкого скольжения и начала деформационного упрочнения сопровождается локальными пластическими сдвигами, в основе которых лежат дислокационные механизмы пластической деформации.

Образование микротрещин, или данный механизм еще можно назвать механизмом образования несплошностей на микроуровне, начинает активно проявляться в начальный период нагружения, т. е. в области упругих деформаций. На данной стадии имеют место микроразрушения в локальных объемах, некоторая доля которых связана с образованием микротрещин (микронесплошностей). Появление значительной активности АЭ дислокационного типа на стадии упругой деформации происходит, по всей видимости, за счет зернограничных смещений (точка 1, см. рис. 2, а). В работе [12] данная стадия названа «областью микротекучести». Большая плотность дефектов и химическая неоднородность по границам зерен способствует образованию в них локальных напряжений. При воздействии внешней нагрузки и сложении ее с внутренними напряжениями происходит активное движение дислокаций в отдельных областях, плотность которых по границам зерен выше, чем внутри зерен, что приводит к образованию несплошностей и подтверждается регистрацией сигналов АЭ, отнесенных к типу микротрещин. В работах [12, 13] показано, что пик активности АЭ, соответствующий стадии микротекучести, связан с коллективным движением и размножением дислокаций в области границ зерен преимущественно поверхностного слоя, а также с их выходом на поверхность. Кроме того, как свидетельствуют результаты эксперимента, стадия микротекучести сопровождается активным образованием микронесплошностей в зернограничных областях.

Стадия деформации, обозначенная точкой 2 на рис. 2, а, соответствует максимальной активности источников АЭ в момент достижения физического предела текучести материала. Регистрируемые сигналы АЭ свидетельствуют об активной генерации и движении дислокаций в процессе легкого скольжения при пластической деформации. На этой стадии происходит увеличение плотности дислокаций с их выходом на границы зерен и поверхность материала. Образование микротрещин на данной стадии, как было отмечено в работе И.А. Одингга и Ю.П. Либерова [13], происходит преимущественно на поверхности металла. Однако их число и активность значительно меньше, чем на стадии упругости в области микротекучести, что подтверждается регистрацией отдельных типов сигналов АЭ. Постепенное дальнейшее снижение активности АЭ происходит в результате образования скоплений дислокаций (леса дислокаций), сокращения длины их свободного пробега и уменьшения числа подвижных дислокаций. Материал при этом вступает в стадию деформационного упрочнения. Последняя стадия нагружения протекает с уменьшением деформируемого объема и локализацией зоны деформации: происходит образование шейки. Данная стадия сопровождается небольшим ростом активности АЭ при сокращающемся объеме материала, участвующего в деформации (точка 5, см. рис. 2, б). Это может быть связано с увеличением скорости истинной деформации нагружаемого материала после локализации деформации при сохранении скорости нагружения испытательной машины. Данный эффект приводит к запаздыванию протекающего механизма релаксации напряжений, увеличению скорости движения дефектов и, как следствие, увеличению энергии порождаемых ими упругих волн АЭ. Активность образования микротрещин возрастает лишь на завершающей стадии предразрушения (точка 6, см. рис. 2, б).

Образец стали 12Х18Н10Т с азотированным слоем 10 мкм

Ниже приведены результаты исследования образца стали 12Х18Н10Т с упрочненным слоем 10 мкм, полученным в результате поверхностного азотирования в течение 0,5 ч. Механические испытания на одноосное растяжение проводились при скорости 0,5 мм/мин. На рис. 3 приведено двухпараметрическое распределение сигналов АЭ в координатах: энергия АЭ $E_{AЭ}$ – частотный коэффициент K_f . Численное значение энергии сигналов АЭ $E_{AЭ}$ находится в диапазоне 0,0005...800 мВ²с, параметры частотного коэффициента K_f – в диапазоне 2,5...4,8.

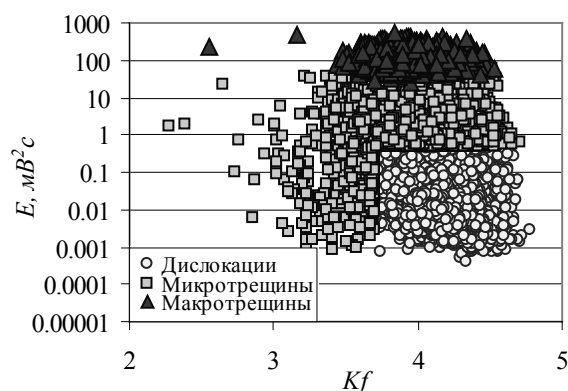


Рис. 3. Двухпараметрическое распределение сигналов АЭ при деформации образца стали 12Х18Н10Т с азотированным поверхностным слоем 10 мкм (время азотирования 0,5 ч)

Распределение включает в себя три типа сигналов АЭ: излучаемые при генерации и движении дислокаций, при образовании микротрещин и при образовании макротрещин. Общая активность сигналов АЭ в процессе деформации материала с наличием двухфазной или композиционной структуры, как правило, велика. Это связано с различием механических свойств составляющих материал фаз. В данном случае наличие пластичной фазовой составляющей (подложки) сдерживает процесс разрушения материала в целом и обеспечивает протекание пластической деформации по несколько иному механизму, чем в материале без поверхностного упрочнения. Уже на стадии упругой деформации в поверхностных слоях происходит рост напряжений в местах их наибольшей концентрации.

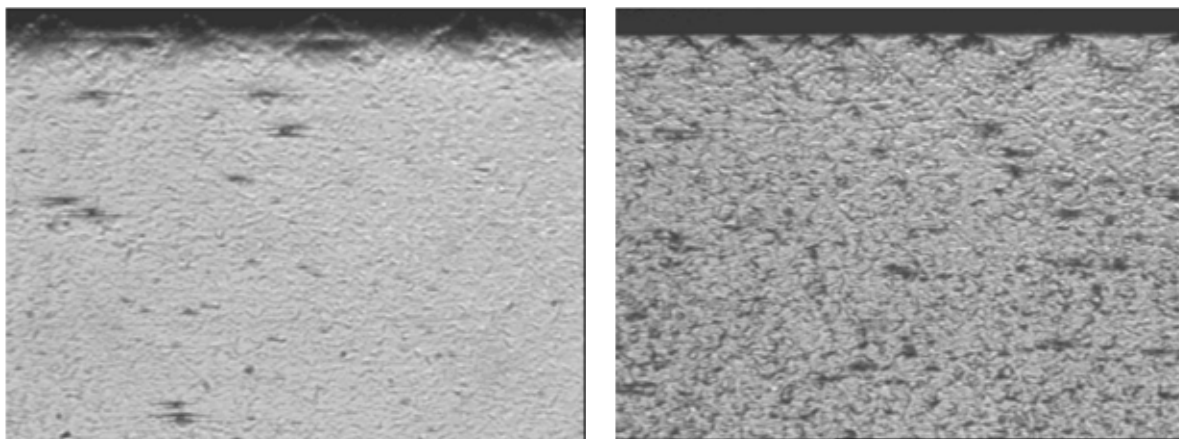


Рис. 4. Фотографии поверхности образца стали 12Х18Н10Т с азотированным поверхностным слоем на различных стадиях деформации: а) 1,5 %; б) 5 %; размер изображения 700х500 мкм

Данный процесс вызывает активное стекание дислокаций и образование сетки микротрещин, распределенных по всей поверхности упрочненного материала (см. рис. 4). Поверхность образцов начинает фрагментироваться с самого начала пластической деформации с образованием на боковых гранях, где азотированный слой был предварительно сошлифован, полос локализованного сдвига. Увеличение степени деформации приводит к образованию в местах пересечения деформационных полос конусообразных вихрей. Описанию практических исследований и физики локализации пластической деформации посвящено много работ по физической мезомеханике [14, 15, 16]. Диаграмма нагружения и графики активности сигналов АЭ при деформации и разрушении образца стали 12Х18Н10Т с азотированным покрытием приведены на рис. 5. Пики активности АЭ, обозначенные точками 1, 2 для сигналов

дислокационного типа и микротрещинообразования соответственно, зарегистрированы на стадии упругой деформации. На данном этапе деформации действует механизм микротекучести, описанный ранее. Значения деформации, соответствующие максимальной активности АЭ на стадии микротекучести, совпадают для образцов с покрытием и без него и составляют 0,3 ... 0,5 %. На этой же стадии появляются и первые макротрещины, разрушающие поверхностный слой, что подтверждается регистрацией сигналов АЭ соответствующего типа (точка 3, см. рис. 5).

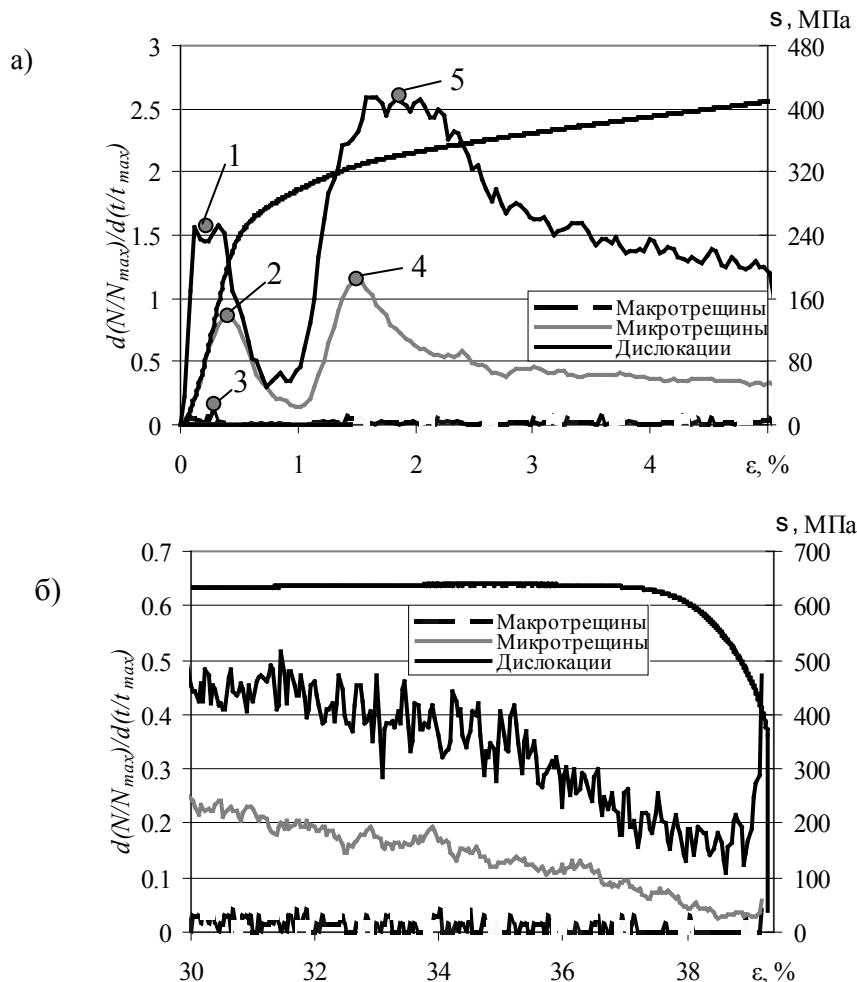


Рис. 5. Диаграмма нагружения и активность АЭ при деформации образцов сплава 12X18N10T с азотированным поверхностным слоем 10 мкм (время азотирования 0,5 ч)

Последующий рост активности АЭ от образующихся микротрещин наблюдается на стадии начала пластической деформации (~ 1 %) в зонах, прилегающих к местам разрушения поверхностного слоя, и достигает максимума при деформации 1,5 % (точка 4, см. рис. 5). Активность пластической деформации в местах возникновения трещин можно наблюдать по образующимся мезополосам локальных пластических сдвигов, расходящимся от вершин трещин под углами 45° к поверхности (см. рис. 4). При достижении деформации ~ 1,5 % наблюдается максимум активности сигналов АЭ дислокационного типа (точка 5), который продолжается до степени деформации ~ 2,5 %, что свидетельствует о достижении материалом физического предела текучести. Дальнейший процесс деформации протекает со спадом активности обоих процессов. На стадии деформации, соответствующей ~ 10 %, происходит

Башков О.В., Панин С.В., Башкова Т.И.

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ
И РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ 12Х18Н10Т МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

монотонный спад активности сигналов АЭ дислокационного типа. Спада активности генерации сигналов АЭ, идентифицируемых как образование микро- и макротрещин, не наблюдается вплоть до последней стадии деформации образца. Это связано с накоплением повреждений, образующихся главным образом за счет продвижения вглубь материала новых дефектов, зарождающихся на границах трещин. При деформации образца с азотированным покрытием было зарегистрировано 48 000 сигналов АЭ дислокационного типа и 12 000 сигналов АЭ, идентифицируемых как микротрещинообразование, что превышает в 16 и 40 раз число соответствующих сигналов АЭ, генерируемых при деформации образца без упрочненного поверхностного слоя. Механические свойства стали изменились незначительно: предел прочности образца с азотированным слоем в сравнении с образцом необработанного материала уменьшился с 640 МПа до 620 МПа, относительное удлинение при разрыве уменьшилось с 43 % до 39 % соответственно. Механические свойства образцов находятся в пределах статистического отклонения. Различие в числе зарегистрированных сигналов АЭ, по мнению авторов, заключается в следующем:

- 1) Происходит локализация большого числа мезообъемов в приповерхностных слоях, прилегающих к фрагментированному в результате растрескивания упрочненному поверхностному слою. Локализованные объемы испытывают значительную ротационно-сдвиговую деформацию в местах их «закрепления» в районе образовавшихся поверхностных трещин.
- 2) Локализованная деформация, в сравнении с равномерно распределенной по объему, протекает при больших скоростях в локальных зонах. В результате чего возрастает энергия упругого излучения.
- 3) Образование микротрещин происходит как на хрупкой фазе, так и на вновь образованных поверхностях растущих трещин.
- 4) Увеличение концентрации напряжений и коэффициента интенсивности напряжений приводит к увеличению числа зарегистрированных сигналов АЭ [7, 17].

Выводы

В работе показан характер деформации образцов стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки и с поверхностно упрочненным слоем, полученным путем газового азотирования. На основании ранее полученных данных при деформации широкого круга материалов была разработана методика классификации сигналов АЭ с целью идентификации источников АЭ. Для ряда материалов были выделены три типа сигналов АЭ: сигналы, излучаемые при движении дислокаций (дислокационный механизм) и сигналы, излучаемые при образовании микро- и макротрещин. Для исследуемой стали 12Х18Н10Т по результатам анализа сигналов АЭ было установлено:

- 1) наличие стадийности процесса деформации материала: стадии микропластичности, текучести, упрочнения, трещинообразования;
- 2) стадийность деформации на микро- и мезоуровнях образцов с однородной структурой и образцов с двухфазной композиционной структурой, полученной в результате поверхностного упрочнения, различна;
- 3) на стадии упругой деформации действуют механизмы микропластичности и микротрещинообразования;
- 4) образование магистральной трещины и разрушение пластичного материала происходит по механизму пластической деформации в вершине трещины;
- 5) активность АЭ при деформации материалов с наличием двухфазной или композиционной структуры значительно выше, чем при деформации однофазных материалов.

Дальнейшие перспективы развития данной работы направлены на совершенствование методики идентификации сигналов АЭ и создание программно-аппаратного комплекса для регистрации и экспресс-анализа в реальном времени структурных процессов в материалах при их диагностике и исследовании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука. – 1995. – Т. 1. – 298 с., Т. 2. – 320 с.
2. Панин В.Е. Основы физической мезомеханики / В.Е. Панин // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1. – № 1. – С. 2-22.
3. Семашко Н.А. Влияние степени деформации на эволюцию дефектности структуры титанового сплава ОТ4 / Н.А. Семашко, О.В. Башков, Т.И. Башкова // Перспективные материалы. – 2000. – № 1. – С. 25-29.
4. Муравин Г.Б. Идентификация механизма разрушения материалов методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии / Г.Б. Муравин, Я.В. Симкин, А.И. Мерман // Дефектоскопия. – 1989. – № 4. – С. 9–15.
5. Брагинский А.П. Распознавание дефектов по спектральным характеристикам акустической эмиссии / А.П. Брагинский // Дефектоскопия. – 1984. – № 1. – С. 47–55.
6. Брагинский А.П. Амплитудно-частотная методика локализации источников акустической эмиссии / А.П. Брагинский, Б.М. Медведев, А.И. Платков // Дефектоскопия. – 1988. – № 8. – С. 58–65.
7. Лысак Н.В. О методологии АЭ-диагностирования трещинообразования / Н.В. Лысак, В.Р. Скальский, О.Н. Сергиенко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1991. – № 3. – С. 9–14.
8. Hamstad M. A., Gallagher A. O. and Gary J. Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals: Part 1. Source Identification// J. Acoustic Emission. – 2002. – V. 20. – P. 39-61.
9. Башков О.В. Применение вейвлет-анализа для идентификации источников акустической эмиссии при деформации и разрушении поликристаллических материалов / О.В. Башков, Д.А. Шпак, И.М. Голлобова // Материалы VIII российско-китайского симпозиума «Modern materials and technologies 2007». – г. Хабаровск. – 17-18 октября 2007. – Ч. 2. – С. 83–87.
10. Bashkov O.V. Identification of acoustic emission sources at scale levels of plastic deformation / O.V. Bashkov, D.A. Shpak // 2008 Joint China-Russia Symposium on Advanced Materials and Processing Technology. – Harbin, China, June 16 – June 20, 2008. – P. 365 – 370.
11. Красильников В.А. Введение в физическую акустику / В.А. Красильников, В.В. Крылов. – М.: Наука. – 1984. – 403 с.
12. Пенкин А.Г. Оценка степени повреждаемости конструкционной стали 19Г при статистическом и циклическом деформировании с использованием акустической эмиссии / А.Г. Пенкин, В.Ф. Терентьев // Металлы. – 2004. – № 3. – С. 78–85.
13. Одинг И.А. Накопление дефектов и образование субмикроскопических трещин при статическом деформировании армко-железа / И.А. Одинг, Ю.П. Либеров // Изв. АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо, горное дело. – 1964. – № 1. – С. 113–119.
14. Панин С.В. Закономерности пластической деформации и разрушения на мезоуровне материалов с покрытиями и поверхностным упрочнением / С.В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – Ч. 1. – С. 109-112.
15. Панин В.Е. Полевая теория многоуровневого пластического течения в шейке деформируемого твердого тела / В.Е. Панин, Ю.В. Гриняев, А.В. Панин // Физическая мезомеханика. – 2007. – Т. 10. – № 5. – С. 5-16.
16. Панин В.Е. Влияние внутренней структуры и состояния поверхности на развитие деформации на мезоуровне малоуглеродистой стали / В.Е. Панин, А.И. Слосман, Н.А. Антипина, А.В. Литвиненко // Физическая мезомеханика. – 2001. – Т. 4. – № 1. – С. 105-110.
17. Тишкин А.П. Связь числа сигналов акустической эмиссии с развитием пластической зоны в вершине трещины / А.П. Тишкин // Дефектоскопия. – 1989. – № 2. – С. 61–65.