

УДК 620.111: 620.172: 620.179.14

АКУСТО–ЭМИССИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЕЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

И.И. Папиров, П.И. Стоев

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»

Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая, 1

e-mail: papirov@kipt.kharkov.ua

Received September 23, 2013

Исследованы особенности акустической эмиссии (АЭ) при пластической деформации сталей Ст3 и 1X18H9T в магнитном поле. Впервые обнаружены новые акусто-эмиссионные эффекты, вызванные воздействием магнитного поля. В случае стали Ст3 наложение магнитного поля в процессе растяжения образцов приводит к существенному изменению спектра АЭ по амплитудам и устранению зуба текучести. На максимуме АЭ в области начала течения магнитное поле приводит к активации более мелких дислокационных ансамблей с низкой амплитудой и существенному снижению роли крупных дислокационных ансамблей с высокой амплитудой в деформацию материала. Деформация в магнитном поле аустенитной стали 1X18H9T приводит к дополнительной генерации сигналов АЭ, образованию перегиба на кривой общей суммы импульсов, связанного с α -мартенситным переходом, и существенному изменению характера самого спектра АЭ при испытании образцов в поле и без магнитного поля. Полученные результаты указывают на то, что главной причиной влияния магнитного поля на пластическую деформацию испытанных сталей является не изменение термоактивационных параметров пластического течения, а существенная перестройка дислокационных ансамблей, участвующих в этом процессе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: акустическая эмиссия, пластическая деформация, магнитное поле, акусто-эмиссионные эффекты

ACOUSTIC EMISSION EFFECTS AT A PLASTIC STRAIN OF STEELS IN A MAGNETIC FIELD

I.I. Papirov, P.I. Stoev

National Science Centre Kharkov Institute of Physics and Technology

Ukraine, 61108, Kharkov, Academicheskaya st., 1

The features of the behavior of the parameters of acoustic emission during plastic deformation of steel 3 and 1X18H9T in a magnetic field was studied. For the first time new effects of acoustic emission which are provoked by magnetic field influence are found. In the case of steel Ст3 application of a magnetic field in the process of deformation of the samples results in significant changes in the spectrum of the amplitudes of signals acoustic emission and the elimination of tooth strength. On a maximum the curve of activity of acoustic emission in the field of strains corresponding to the beginning of flow of a metal, the magnetic field leads to activation of smaller dislocation ensembles with low amplitudes and a substantial reduction of role of large-size dislocation ensembles with high amplitude. The deformation in the magnetic field of austenitic steel 1X18H9T leads to additional generation of acoustic signals, the formation of inflection on the curve of common sum of pulses associated with the α -martensitic transformation, and a significant change of spectrum of signals acoustic emission at test in magnetic field and when the field is absent. The results indicate that the main cause of the influence of magnetic field on the plastic deformation of the tested steels is not to change the parameters of thermal activation of plastic flow, and a significant restructuring of dislocation ensembles participating in the process.

KEY WORDS: acoustic emission, plastic deformation, magnetic field, acoustic emission effects

АКУСТИЧНО-ЕМИСІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ СТАЛЕЙ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

І.І. Папіров, П.І. Стоєв

Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»

Україна, 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1

Досліджені особливості поведінки параметрів акустичної емісії при пластичній деформації сталей Ст3 і 1X18H9T в магнітному полі. Вперше виявлені нові акустично-емісійні ефекти, що викликані дією магнітного поля. В разі сталі Ст3 накладення магнітного поля в процесі розтягування зразків приводить до істотної зміни спектру акустичної емісії по амплітудах та до усунення зуба текучості. На максимумі кривих залежності акустичної в області початку течії магнітне поле приводить до активації дрібніших дислокаційних ансамблів з низькою амплітудою та істотного зниження ролі крупних дислокаційних ансамблів з високою амплітудою у деформацію матеріалу. Деформація в магнітному полі аустенітної сталі 1X18H9T приводить до додаткової генерації сигналів акустичної емісії, утворення перегину на кривій загальної суми імпульсів, пов'язаного з α -мартенситним переходом, та суттєвої зміни характеру самого спектру акустичної емісії при випробуванні зразків в полі і без поля. Отримані результати вказують на те, що головною причиною впливу магнітного поля на пластичну деформацію випробуваних сталей є не зміна термоактивационних параметрів пластичної течії, а суттєва перебудова дислокаційних ансамблів, що беруть участь в цьому процесі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: акустична емісія, пластична деформація, магнітне поле, акусто-емісійні ефекти

Изучение процессов взаимодействия поля с веществом является одной из фундаментальных задач физики твердого тела. На протяжении последних 30 лет проводятся интенсивные исследования влияния электрических и магнитных полей на различные физико-механические характеристики материалов и особенно на характер их пластического течения и разрушения.

Показано, что при испытаниях в магнитном поле изменяются предел текучести, предел прочности,

максимальное удлинение и ползучесть материалов, износостойкость и долговечность деталей конструкций и инструмента. В работах многих авторов детально изучен и описан магнитоэластический эффект различных материалов [1-6].

Магнитоэластический эффект, или влияние магнитного поля на характеристики пластичности обычно связывают со многими факторами – изменением подвижности индивидуальных дислокаций, кинетическими (скоростными) особенностями движения дислокаций в магнитном поле, влиянием магнитного поля на некоторые структурные дефекты, чувствительностью самого эффекта к типу и концентрации закрепляющих примесей в испытуемых образцах. Даже в кристаллах германия и кремния обнаружено изменение скорости дислокаций после их магнитной обработки за счет высокоэнергетических процессов локальной перестройки структуры и силовых полей в области закрепления дислокаций [7]. Обнаружено также заметное сглаживание эффекта Портевена ле Шателле при включении магнитного поля [8].

Влияние электромагнитного поля на характер пластического течения в кристаллических телах обычно связывают с облегчением движения дислокаций и с влиянием дрейфующих в решетке электронов на процессы размножения, движения и взаимодействия дислокаций [2]. В.Я. Кравченко [9] показал, что сила электронного торможения движущихся дислокаций в магнитном поле и при низких температурах, наоборот, возрастает за счет влияния поля на движение электронов проводимости, причем сама эта сила может меняться в процессе деформации.

В работах [2,3,9] показано, что электроэластический и магнитоэластический эффекты фактически снижают сопротивление материала деформированию. Но, несмотря на обширные исследования и начавшееся практическое применение этих явлений, их механизмы оказываются проблематичными, и многие авторы объясняют трудности интерпретации результатов параллельным развитием нескольких физических эффектов, вносящих разные вклады в результирующее воздействие электрического и магнитного полей на процесс пластического течения твердых тел. Очевидно, что внешние поля могут оказывать воздействие на процессы генерирования и движения линейных дефектов кристаллического строения (дислокаций и вакансий), или, иными словами, на кинетику пластической деформации. На микроуровне можно говорить о влиянии внешних полей на процессы генерации дислокаций, а также на энергию активации и активационный объем движения и взаимодействия дислокаций с препятствиями в кристаллах. К сожалению, большинство этих выводов относительно влияния полей на механизмы деформации являются скорее умозрительными, нежели экспериментально доказанными.

При низких температурах деформации возникает еще один эффект, связанный с влиянием на движение дислокаций электронного ветра (силы электронного увлечения). Дефекты кристаллического строения, в том числе дислокации, тормозят движение электронного ветра, а магнитное поле дополнительно вызывает его отклонение. В результате влияния электронного ветра на единицу длины дислокации действует дополнительная сила F_j , пропорциональная скорости дислокаций V :

$$F_j = BV,$$

здесь B коэффициент электронного торможения дислокаций [9,10], величина $B \sim 10^{-4}$ г/см.с.

В зависимости от знака дислокаций, эта сила может способствовать движению дислокаций или тормозить его в поле.

Еще одна сила, влияющая на движение дислокаций при низких температурах, связана с рассеянием электронов на границах раздела и передаваемым им импульсом [9]. Показано, что эта сила действует в направлении растяжения и приблизительно равна 100 дин/см².

Определенное влияние на пластическую деформацию металлов может оказывать также пинч-эффект – влияние магнитного поля на свободные электроны в металлах вне связи с их магнитными свойствами. Известно, что магнитное поле действует на электронный газ с силой Лоренца, причем эта сила всегда направлена к центру проводника. В результате электронный газ сжимается к центру проводника, образуя отрицательный объемный электрический заряд, а у поверхности проводника, где концентрация электронов понижается, формируется положительный заряд (при этом, естественно, полный заряд проводника остается равным нулю). Вследствие такой поляризации в проводнике образуется электрическое поле (поле Холла), которое, действуя с силой Кулона на ионную решетку, приводит к ее упругому сжатию с образованием механических напряжений.

Целью данной работы является исследование особенностей поведения параметров акустической эмиссии при пластической деформации сталей в магнитном поле (МП).

В данной работе для изучения влияния магнитного поля на пластическую деформацию сталей мы впервые применили метод акустической эмиссии. Этот метод позволяет получать важную информацию о движении дислокационных ансамблей и поэтому способен дать дополнительную информацию о механизмах процессов, протекающих при пластической деформации и сравнить их со сложившимися теоретическими представлениями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Материалом для образцов служили две марки стали: сталь Ст3 в виде листа толщиной 2,0 мм и листовая нержавеющая сталь 1Х18Н9Т толщиной 1,0мм.

Из стальных листов вырезали заготовки для образцов, которые имели размер 260×12 мм. Затем механическим способом в средней части заготовки изготавливали рабочую часть размером 30×6 мм. Для снятия напряжений, вызванных механической обработкой, образцы отжигали при температуре 500°C в течение 1 часа.

Испытания на растяжение образцов проводили на универсальной испытательной машине 1958 У10-1 со скоростью деформации $1 \times 10^{-4} \text{сек}^{-1}$ при комнатной температуре.

На испытательную машину монтировали два постоянных магнита цилиндрической формы (\varnothing 60мм) из сплава Nd-Fe-B, которые создавали в области деформации образца поперечное магнитное поле напряженностью 5500 Э. Нерабочая часть образца находилась вне магнитного поля.

При растяжении образцов синхронно регистрировали параметры деформирования и акустической эмиссии.

Для регистрации акустической эмиссии использовали многоканальный акустический комплекс М400, позволяющий регистрировать и разделять сигналы АЭ в зависимости от их амплитуды. Амплитудное значение шумов, приведенное к входу предварительного усилителя, составляло 5мкВ. Уровни амплитудной дискриминации каналов составляли 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 100 мкВ относительно этого значения.

В качестве датчика-регистратора АЭ использовали пьезокерамический преобразователь из керамики ЦТС-19 с резонансной частотой 180 кГц. Датчик крепили к исследуемому образцу через слой акустической 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 и специально разработанных программ обработки данных [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ферритная сталь Ст3

При деформации ферритной низкоуглеродистой стали Ст3 мы обнаружили несколько эффектов, связанных, во-первых, с существенным влиянием магнитного поля на кривые деформации исследуемого материала, и, во-вторых, с сопровождающими их акусто-эмиссионными эффектами. На рис. 1а показаны кривые деформации стали Ст3 при деформации без поля (кривая 1) и в магнитном поле (кривая 2). Главное отличие двух кривых наблюдается на пределе текучести и состоит в наличии зуба текучести при деформации образцов стали без приложения магнитного поля (кривая 1) и его исчезновении при деформации в магнитном поле (кривая 2). Известно, что появление «зуба» текучести связано с дислокационным механизмом деформации: в начале пластического течения плотность дислокаций является недостаточной для обеспечения более высокой степени деформации; поэтому после достижения точки верхнего предела текучести начинается интенсивное образование новых ансамблей дислокаций за счет их отрыва от облаков примесей, что и приводит к падению напряжения после прохождения зуба текучести.

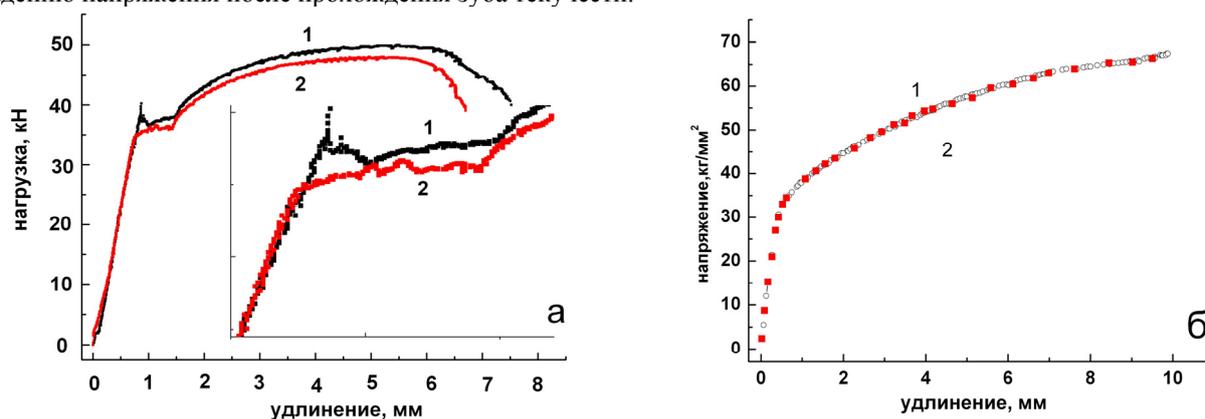


Рис. 1. Кривые деформации при растяжении образцов стали без магнитного поля (○ (кривая 1)), в магнитном поле (■ (кривая 2))
а - сталь Ст3, б - 1X18H9T

Мы видим, что магнитное поле радикальным образом влияет на этот процесс, устраняя характерную особенность деформации малоуглеродистых сталей в виде зуба текучести. Влияние магнитного поля на характер изменения кривых деформации немагнитной аустенитной стали 1X18H9T отличается от воздействия на образцы из ферромагнитной стали Ст3. Из рис. 1б видно, что диаграммы деформации образцов стали 1X18H9T без поля (рис. 1б кривая 1) и в магнитном поле (рис. 1б, кривая 2) подобны друг другу и кривые на графике совмещаются.

Зависимости активности АЭ образцов Ст3 в МП и его отсутствии приведены на рис. 2а,б. Видно, что в процессе растяжения образцов Ст3 в МП заметно снижается активность АЭ. Влияние МП на кривую

деформации стали Ст3 и на регистрируемую АЭ наиболее сильно проявляется именно в районе зуба и площадки текучести. На стационарной стадии течения после окончания площадки текучести МП практически не влияет: кривые деформации и спектры АЭ здесь практически идентичны у образцов, растягиваемых без поля и в МП.

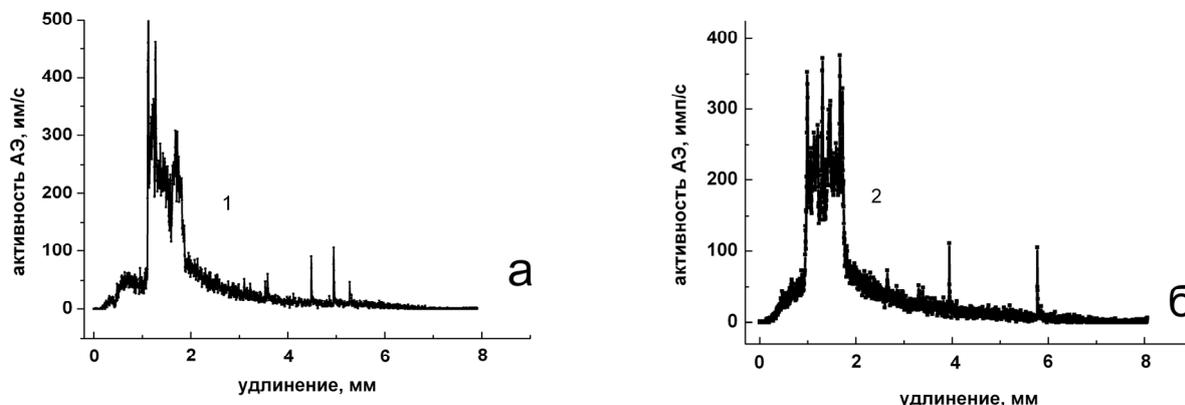


Рис. 2. Зависимость активности АЭ при растяжении образцов стали Ст3
а - без магнитного поля, б - в магнитном поле

Для понимания радикального влияния МП на процесс деформации был проведен анализ распределения амплитуд сигналов АЭ в области пластического течения. Установлено, что при растяжении без поля на максимуме активности АЭ соотношение низкоамплитудных (N_{\min}) и высокоамплитудных импульсов (N_{\max}) сравнимо между собой $N_{\min}/N_{\max}=1,17$, тогда как при растяжении в МП $N_{\min}/N_{\max}\sim 2$.

Одним из основных механизмов пластической деформации является дислокационный механизм. Образование и движение дислокаций сопровождаются излучением упругих колебаний. Эти колебания (упругие волны) регистрируются в виде импульсов АЭ [12]. Иными словами процессы деформации в материале служат источником АЭ, сигналы которой регистрируют с помощью высокочувствительных датчиков.

Принято считать, что амплитуда сигнала АЭ дает информацию об энергии источника излучения [12,13]. В работе [13] сделана оценка энергетических параметров дислокационных источников излучения. Эта оценка позволила сделать вывод о том, что для регистрации акустического излучения необходимо, чтобы энергия источника превышала порог чувствительности акусто-эмиссионной аппаратуры (10^{-16} Дж). Поэтому аппаратно невозможно зарегистрировать АЭ при движении единичной дислокации (ее энергия 10^{-23} Дж) или небольшого количества движущихся дислокаций, а экспериментально регистрируемое акустическое излучение может быть вызвано только совместным движением достаточно большого количества дислокаций – дислокационным скоплением (дислокационным ансамблем). Поэтому по амплитуде регистрируемых сигналов АЭ мы можем оценить энергию дислокационного ансамбля.

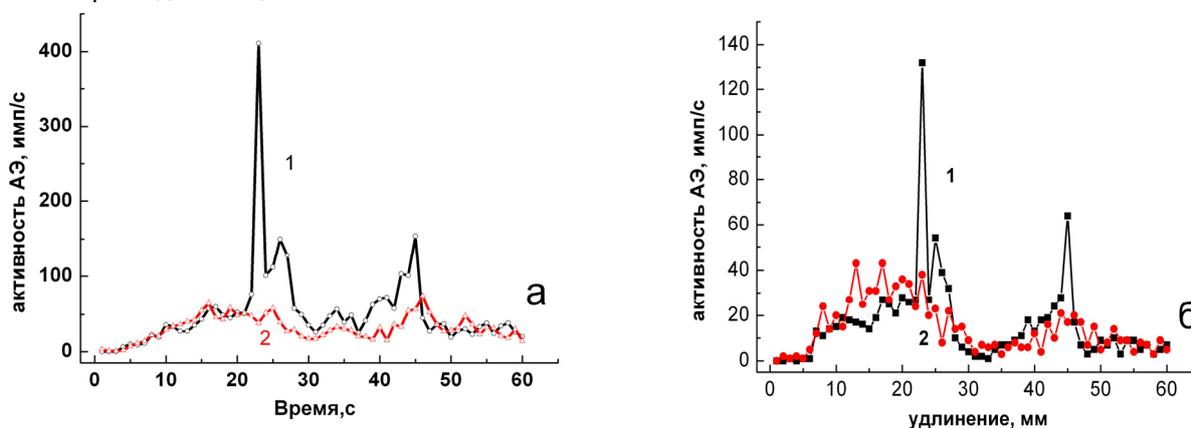


Рис. 3. Кривые активности сигналов АЭ различной амплитуды при растяжении образцов стали Ст 3
без магнитного поля (кривая 1) и в магнитном поле (кривая 2)
а – сигналы АЭ низкой амплитуды, б – высокой амплитуды

На рис. 3 приведена зависимость активности АЭ в области напряжений, соответствующих пределу текучести для низкоамплитудных импульсов (а) и эта же зависимость для высокоамплитудных сигналов АЭ (б) при испытаниях образцов в МП и в его отсутствии. Из рис. 3 видно, что деформация в МП приводит к снижению активности импульсов АЭ. Это снижение наблюдается для сигналов АЭ всех амплитуд, но особенно

заметно для сигналов низкой и высокой амплитуды.

Таким образом, при деформировании стали Ст3 в МП:

- снижается количество импульсов АЭ по всем энергетическим уровням;
- отношение числа импульсов с низкой амплитудой к числу импульсов с высокой существенно растет.

Это позволяет сделать вывод о том, что при деформировании МП приводит к активации более мелких дислокационных ансамблей и к существенному снижению роли крупных дислокационных ансамблей. Кроме того, необходимо учитывать, что работа деформации при растяжении образцов с полем и без него приблизительно одинаковая. Обеспечить равное значение величины работы деформации в МП, которая выполняется менее энергетичными ансамблями дислокаций (меньше дислокаций в скоплении) можно только за счет действия большего числа ансамблей. Фактически мы должны были наблюдать не только рост низкоамплитудных сигналов по отношению к высокоамплитудным, но и абсолютный рост низкоамплитудных сигналов АЭ.

Следует отметить, что аппаратно нерегистрируемая часть низкоамплитудных импульсов АЭ наблюдается визуально: в процессе деформирования материала в МП полоса шумов на осциллографе становится более широкой.

Исчезновение АЭ авторы наблюдали ранее при изучении деформации сверхпластичных сплавов на основе цинка и олова [14].

Таким образом, при деформировании образцов стали Ст3 получены следующие экспериментальные результаты:

- влияние магнитного поля на кривую деформации стали Ст3 и на регистрируемую АЭ наиболее сильно проявляется в районе зуба и площадки текучести. На стационарной стадии течения после окончания площадки текучести магнитное поле практически не влияет: кривые деформации и спектры АЭ здесь практически идентичны у образцов, растягиваемых без поля и в магнитном поле;

- наложение магнитного поля в процессе растяжения образцов существенно (в 1,5 раза) снижает регистрируемую активность АЭ в начале пластического течения (количество импульсов на пределе текучести $N=350$ против >500);

- существенно изменяется амплитудное распределение импульсов при растяжении образцов с полем и без поля: при растяжении без поля на максимуме АЭ соотношение низкоамплитудных N_{\min} и высокоамплитудных импульсов N_{\max} сравнимо между собой $N_{\min}/N_{\max}=1,17$, тогда как при растяжении в магнитном поле $N_{\min}/N_{\max}\sim 2$. Иными словами, магнитное поле приводит к активации более мелких дислокационных ансамблей и к существенному снижению роли крупных дислокационных ансамблей;

- при деформировании образцов в МП на экране осциллографа наблюдается расширение полосы шумов, что свидетельствует об увеличении числа низкоамплитудных импульсов. Счетчики акустического комплекса не регистрируют эти импульсы из-за того, что их амплитуда ниже порога срабатывания аппаратуры. Поэтому реальная картина перераспределения дислокационных ансамблей по размерам в магнитном поле может оказаться еще более существенной: скорее всего малоамплитудные импульсы играют доминирующую роль в спектрах АЭ при наложении магнитного поля.

Нержавеющая сталь 1X18H9T

При деформации немагнитной аустенитной стали 1X18H9T мы обнаружили несколько акусто-эмиссионных эффектов, существенно отличающихся от описанных выше для ферромагнитной стали Ст3. Прежде всего, оказалось, что диаграммы деформации образцов этой стали без поля (рис. 1б кривая 1) и в магнитном поле (рис. 1б, кривая 2) подобны друг другу. Однако, при почти полном подобии деформационных кривых, зависимости параметров АЭ (рис. 4,5) и свойства образцов после деформации без поля и в магнитном поле существенно отличаются. На рис.4а,б и рис. 5 приведены зависимости активности и общей суммы импульсов АЭ при деформировании образцов нержавеющей стали в магнитном поле и при его отсутствии. Как и в случае стали Ст3, для немагнитной стали X18H9T был проведен анализ распределения амплитуд сигналов АЭ в области пластического течения. Влияние магнитного поля на изменение соотношения импульсов низкой и высокой амплитуды в интегральной величине суммы регистрируемых сигналов приведен на рис. 6а,б. Характерный вид амплитудного распределения сигналов АЭ при деформировании нержавеющей стали в МП и без МП приведен на рис. 7.

Впервые наблюдаемые акусто-эмиссионные эффекты в нержавеющей стали X18H9T состоят в следующем:

- суммарное количество регистрируемых акустическим спектрометром импульсов АЭ при деформации без поля приблизительно в 3 раза ниже, чем при деформации в магнитном поле (рис. 5);

- зависимость суммарного количества импульсов АЭ от деформации без МП (кривая 1 на рис. 5) и в МП (кривая 2 на рис. 5) радикально отличается – в первом случае она плавная и не имеет особенностей, во втором испытывает перегиб в области деформаций $\epsilon > 10\%$;

- на кривой активности АЭ (рис. 4б) наблюдается явно различимый максимум, соответствующий аномалии на рис. 5 и отвечающий области перегиба на кривых суммарного количества импульсов АЭ;

- как и в случае ферритной стали Ст3, существенно меняется характер амплитудного распределения АЭ

при испытании образцов в поле и без поля : при испытании без МП количество низкоамплитудных N_{\min} и высокоамплитудных импульсов N_{\max} сравнимо между собой $N_{\min}/N_{\max}=1,18$, тогда как при испытании в МП $N_{\min}/N_{\max}\sim 3$, то есть низкоамплитудные импульсы доминируют.

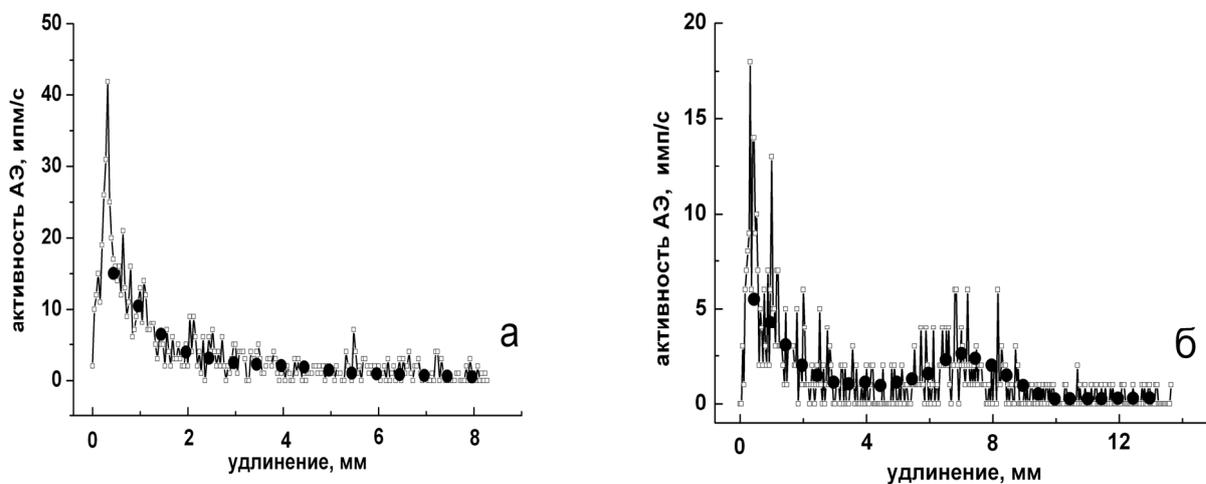


Рис. 4. Зависимость активности АЭ при деформировании образцов нержавеющей стали 1X18H9Т
а – без МП, б – в МП

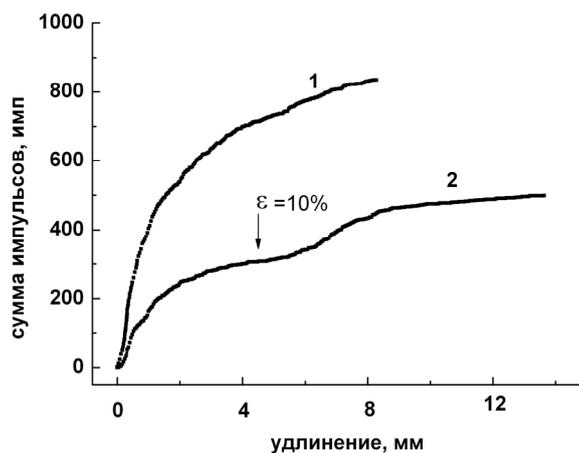


Рис. 5. Кривые зависимости зарегистрированной суммы импульсов АЭ при растяжении образцов нержавеющей стали без МП (кривая 1) и в МП (кривая 2)

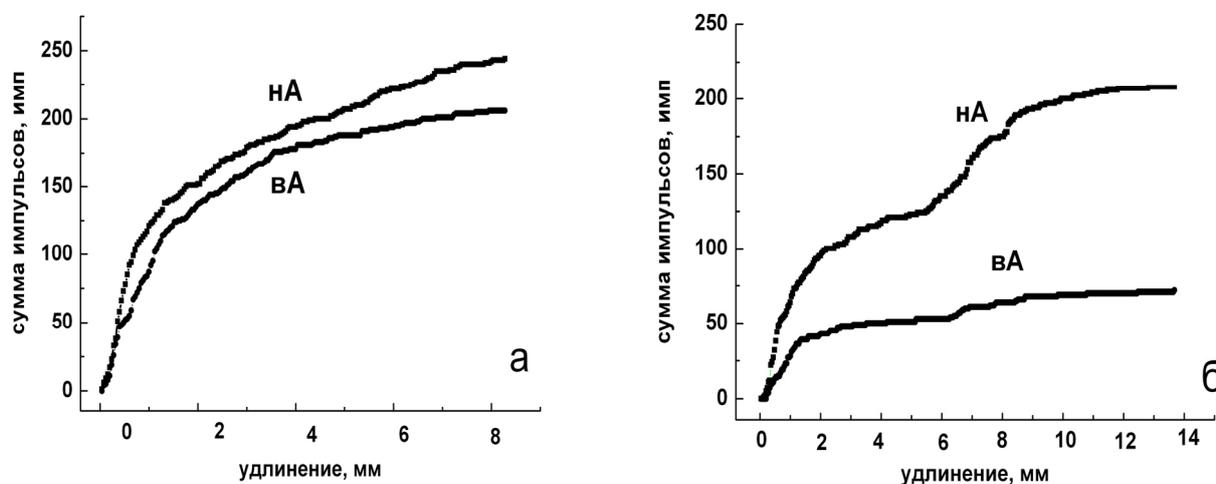


Рис. 6. Кривые суммы импульсов АЭ различной амплитуды (НА–импульсы низкой, ВА–высокой амплитуды) у образцов нержавеющей стали 1X18H9Т при растяжении
а - без МП, б - в МП

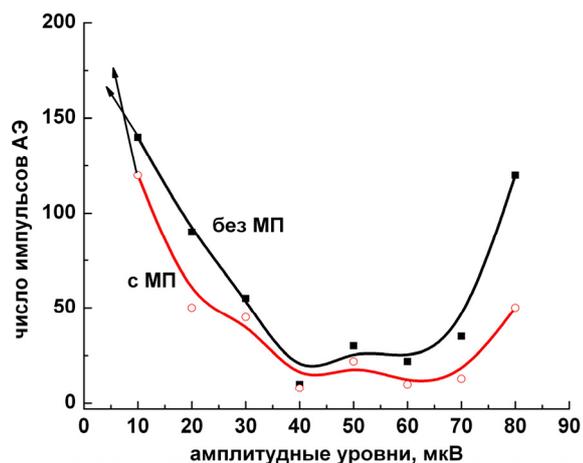


Рис. 7. Амплитудное распределение сигналов АЭ при деформировании в образцов из нержавеющей стали без МП и в МП

процессе деформации аустенита ферромагнитных α -мартенситных выделений. Это подтверждается прямыми измерениями намагниченности испытанных образцов. При испытании аустенитной стали без магнитного поля измеренная намагниченность образцов после деформации очень слабая (2-3 Э) и практически заметно не влияет на зависимость $N(\epsilon)$, тогда как при деформации в магнитном поле она возрастает до 9 Э и увеличивается до 17 Э при дальнейшем увеличении скорости деформации. При этом образование в магнитном поле выделений ферромагнитного α -мартенсита вызывает повышение числа импульсов АЭ на всех каналах амплитуд регистрируемых сигналов, но особенно — низкоамплитудных (N_{\min}) импульсов (рис. 6б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Принято считать, что внешние поля влияют на изменение уровня механических напряжений, необходимых для движения дислокаций и способны уменьшать энергию активации их термоактивированного движения, то есть высоту барьеров при взаимодействии дислокаций со стопорами [4,5]. Это связано с тем, что под влиянием внешних полей может измениться величина барьеров, преодолеваемых дислокациями при их движении. Скажем, вокруг точечных дефектов (вакансий или растворенных атомов) кристаллическая решетка деформируется и образуется локальное поле упругих напряжений, способное изменить здесь электрическое поле. Электроны проводимости в металле частично экранируют это поле, образуя электронное облако вокруг дефекта кристаллической решетки. Можно говорить об изменении «упругой» и «электростатической» составляющих энергии преодолеваемого барьера. Оценка влияния электрического и магнитного полей на высоту таких барьеров выполнена в работах [4,5]. В частности, выяснено, что магнитное поле может влиять на константу экранирования, причем результирующая сила зависит от величины поля и того, какой из вкладов, диамагнитный или парамагнитный, преобладает в магнитной восприимчивости электронной подсистемы. Показано также, что для вакансий действие магнитного поля на высоту барьеров является квадратичным по напряженности поля и не зависит от природы стопора дислокации. Для закреплений в виде примесей барьеры линейно зависят от величины магнитного поля и могут достигать заметных величин уже при полях более 100 Э.

Помимо рассмотренного изменения константы экранирования в магнитном поле необходимо отдельно учитывать изменение вклада в энергию взаимодействия дефектов, обусловленных квантовой интерференцией электронных волн. Относительная роль этого эффекта будет увеличиваться с понижением температуры.

Полученные в настоящей работе наблюдения ставят под сомнение получившее широкое распространение представления о влиянии поля на характер термоактивационного движения дислокаций, то есть о влиянии поля на величину активационного объема (понижения уровня барьеров для движения дислокаций). Полученные результаты указывают на то, что главной причиной влияния поля на пластическую деформацию является не изменение термоактивационных параметров пластического течения, а существенная перестройка дислокационных ансамблей, участвующих в этом процессе.

Намагничивание некоторых аустенитных сталей в процессе обработки магнитным полем известно и подробно изучено школой В.Д.Садовского (см. [15]). Известно также, что образованию ферромагнитных α -мартенситных выделений в парамагнитном аустените способствует деформация материала [15]. Из полученных в данной работе результатов следует, что совместное влияние МП и деформации интенсифицирует процесс образования α -мартенситных выделений, причем этот эффект растет с деформацией и дополнительно увеличивается с ростом скорости деформации. Можно утверждать, что образующиеся в процессе деформации дислокационные ансамбли способствуют интенсификации образования α -мартенситных выделений.

Принципиально новыми акусто-эмиссионными эффектами, обнаруженными в настоящей работе,

являются: обнаружение дополнительной АЭ, возникающей при деформации стали в магнитном поле, образование перегиба на кривой $N(\epsilon)$ (рис. 4,5), связанного с α -мартенситным переходом, и существенное изменение характера самого спектра АЭ при испытании образцов в МП и без МП. Мы видим, что, как и в случае ферритной стали Ст3, магнитное поле существенно влияет на характер и структуру дислокационных ансамблей, облегчая организацию более подвижных малых скоплений и в несколько раз ограничивая роль крупных скоплений, дающих высокоамплитудные импульсы АЭ.

Физическая природа влияния магнитного поля связана не столько с термоактивируемым движением дислокаций, сколько с безактивационными процессами движения дислокационных ансамблей и с их влиянием на образование α -мартенситных выделений в аустенитной стали при деформации. Согласно этой концепции, под влиянием внешнего магнитного поля скопления дислокаций открепляются от препятствий безактивационным путем за счет увеличения атермических сил, действующих на скопление дислокаций за счет магнитного поля. Иными словами, внешнее поле благоприятствует механическим напряжениям в движении неравновесных ансамблей дислокаций за счет безактивационного отрыва дислокационных скоплений от стопоров. Полученные данные показывают, что при этом резко меняются сами дислокационные ансамбли: при деформации без поля крупные и малые ансамбли сравнимы по количеству, при деформации в поле доминируют малоамплитудные ансамбли. В свою очередь образующиеся дислокационные ансамбли оказывают влияние на образование α -мартенситных выделений. Количество таких выделений оказывается не очень большим и не влияет на упрочнение нержавеющей стали (рис. 16).

Еще один эффект, способный повлиять на акустическую эмиссию при деформации образцов в магнитном поле связан с так называемыми баркгаузенским шумом [16,17].

При намагничивании ферромагнетика за счет переворота намагниченности в отдельных доменах процесс сопровождается дискретными шумами, способными дополнительно увеличивать акустическую эмиссию. Это связано с тем, что процесс происходит не плавно, а скачками в отдельных магнитных доменах. Поскольку в данной работе мы не наблюдали дополнительного систематического роста уровня АЭ при деформации ферромагнитного материала в магнитном поле, то, по всей видимости, в данном случае баркгаузенский эффект не превышает уровень шума, образующегося при измерении АЭ. Действительно, объем материала, в котором происходит изменение намагниченности при единичном скачке стенки домена, вычисленный при изучении баркгаузенского шума, составляет 10^{-8} - 10^{-9} см³. Это означает, что линейный размер скачка доменной стенки имеет величину ~ 10 мкм.

Как мы выяснили ранее, при изучении пластической деформации мелкозернистых материалов [14], амплитуды сигналов АЭ, возникающих в мелкозернистых материалах при сверхпластическом течении, резко уменьшаются и образующиеся при этом сигналы по амплитуде не превышают уровня шума. Таким образом, можно предполагать, что и в данной работе эффект Баркгаузена не превышал приборного порога регистрации малоамплитудных импульсов АЭ, то есть не выходил за пределы регистрируемых шумов. Вместе с тем, в дальнейшем представляет интерес возможность изучения баркгаузенского шума, образующегося за счет смещения доменных стенок, при деформации монокристаллов или крупнозернистых ферромагнетиков без поля и с полем не методами электроники, а с помощью АЭ. Возможно, смещение доменных стенок в крупных доменах в этом случае может быть зарегистрировано с помощью АЭ.

ВЫВОДЫ

1. Пластическая деформация образцов ферритных и аустенитных сталей в магнитном поле существенно влияет на спектры АЭ, особенно в области предела текучести.
2. В случае стали Ст3 наложение магнитного поля в процессе растяжения образцов приводит к устранению зуба текучести и существенному изменению спектра АЭ по амплитудам.
3. На максимуме АЭ в области начала течения магнитное поле приводит к активации более мелких дислокационных ансамблей с низкой амплитудой и к существенному снижению роли крупных дислокационных ансамблей с высокой амплитудой.
4. На стационарной стадии течения после окончания площадки текучести магнитное поле практически не влияет: кривые деформации и спектры АЭ здесь практически идентичны у образцов, растягиваемых без поля и в магнитном поле.
5. При деформации в магнитном поле аустенитной стали 1X18H9T кривая деформации мало меняется, но магнитное поле радикально меняет зависимость суммарного количества импульсов от деформации – без магнитного поля она плавная и не имеет особенностей, а при испытании в магнитном поле испытывает перегиб в области деформаций $\epsilon > 10\%$. Кроме того, в записываемом в процессе деформации спектре АЭ наблюдается явно различимый максимум, соответствующий указанной аномалии. Это связано с активацией магнитным полем мартенситного перехода с образованием ферромагнитной фазы.
6. Как и в случае ферритной стали Ст3, существенно меняется характер самого спектра АЭ аустенитной стали при испытании образцов в поле и без поля: при испытании без магнитного поля количество низкоамплитудных N_{\min} и высокоамплитудных импульсов N_{\max} сравнимо между собой $N_{\min}/N_{\max}=1,18$, тогда как при испытании в магнитном поле $N_{\min}/N_{\max}\sim 3$, то есть низкоамплитудные импульсы доминируют.
7. Полученные результаты связаны не столько с влиянием магнитного поля на термоактивированный

процесс движения дислокаций и снижение высоты барьеров, сколько с безактивационным преодолением препятствий дислокационными скоплениями в результате увеличения сил, действующих на скопление дислокаций за счет магнитного поля.

8. Полученные данные показывают, что при этом резко меняются сами дислокационные ансамбли: при деформации без поля крупные и малые ансамбли сравнимы по количеству, при деформации в поле низкоамплитудные импульсы доминируют.

9. Баркгаузенский шум, связанный с движением доменных стенок в настоящей работе не зафиксирован вследствие малой величины соответствующих им импульсов АЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vonsovskii S.V. Magnetizm. – М: Nauka, 1971.–1032 s.
2. Spitsyn V.I., Troitskii O.A. Elektroplasticheskaya deformatsiya metallov. – М.: Nauka, 1985.– 160 с.
3. Gromov V.E., Zuev L.B., Kozlov E.V., Tsellermaier V.Ya. Elektrostimulirovannaya plastichnost' metallov i splavov. – М.: Nedra, 1996. – 290 s.
4. Roshchupkin A.M., Bataronov I.L. Fizicheskie osnovy elektroplasticheskoi deformatsii metallov // Izv. vuzov. Fizika. –1996. – Т. 39, № 3. – С. 57–65.
5. Bataronov I.L. Mekhanizmy vliyaniya elektricheskogo polya i elektricheskogo toka na plasticheskuyu deformatsiyu metallov //Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk.– Voronezh.– 2007.
6. Golovin Yu.I. Magnitoplastichnost' tverdykh tel. – М: Mashinostroenie, 2003. –108 s.
7. Velikhanov . A.R. Deformatsiya germaniya v usloviyakh sovmestnogo deistviya toka i magnitnogo polya // FTT.– 2011.– Т.53, vyp.3. – S. 504-507.
8. Dunin-Barkovskii L.R., Morgunov R.B., Tanimoto Y. Vliyanie postoyannogo magnitnogo polya 15T na effekt Portevena-Le Shatel'e v kristallakh NaCl // FTT.– 2005.– Т.47, vyp. 7.– S. 1241-1246.
9. Kravchenko V.Ya. Vliyanie elektronov na tormozhenie dislokatsii v metallakh // FTT.– 1966.– Т.8.– S. 927–935.
10. Kaganov M.I., Kravchenko V.Ya., Natsik V.D. Elektronnoe tormozhenie dislokatsii v metallakh // Uspekhi fiz. nauk.– 1993. – Т. 11. – S.655-682.
11. Papirov I.I., Stoev P.I. Akusticheskaya emissiya titana v protsesse deformatsii // Voprosy atomnoi nauki i tekhniki, seriya «Pitannya atomnoi nauki ta tekhniki». –2007.– №4. – S. 184–191.
12. Greshnikov V.A., Drobot Yu.B. Akusticheskaya emissiya. – М: Izd-vo standartov, 1976. – 272 s.
13. Tripalin A.S., Builo S.I. Akusticheskaya emissiya. Fiziko-mekhanicheskie aspekty. – Iz-vo Rostovskogo universiteta, 1986. - 160 s.
14. Papirov I.I., Karpov E.S., Palatnik M.I., Mileshkin M.B. Ischeznovenie akusticheskoi emissii pri sverkhplastichnosti // DAN SSSR.– 1981.– Т. 256, № 2.– S. 392–394.
15. Sagaradze. V.V. Deformatsionno-indutsirumye nizkotemperaturnye diffuzionnye prevrashcheniya v stalyakh. «Razvitie idei akademika V.D. Sadovskogo». – Ekaterinburg, 2008. – S.192-217.
16. Tikadzumi S. Fizika ferromagnetizma.– М.: Mir, 1987.– 154s.
17. Barkhausen N. Zwie mit hilfe der neuen verstärkter entdeckte erschein-ungen // Phis. Z. – 1919. – Vol.20. – P.401.