



УДК 620.111:620.172:620.179.14

И. И. Папилов, П. И. Стоев

Обнаружение и исследование акустоэмиссионных эффектов при пластической деформации сталей в магнитном поле

(Представлено академиком НАН Украины А. С. Бакаем)

Исследованы особенности параметров акустической эмиссии при пластической деформации сталей Ст3 и 1Х18Н9Т в магнитном поле. Впервые обнаружены новые акустоэмиссионные 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 Х18Н9Т 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.

Одной из фундаментальных задач физики твердого тела является изучение процессов взаимодействия поля с веществом. На протяжении последних 30 лет проводятся интенсивные исследования влияния электрических и магнитных полей на характер пластического течения разных материалов. В работах многих авторов детально изучен и описан магнитоэластический эффект различных материалов [1–6].

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.

© И. И. Папилов, П. И. Стоев, 2014

В работах [2, 3, 7] показано, что электро- и магнитоэластические эффекты фактически снижают сопротивление материала деформированию. Но, несмотря на широкое исследование 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.

Целью данной работы является исследование особенностей поведения параметров акустической эмиссии (АЭ) при пластической деформации сталей в магнитном поле (МП). Для изучения влияния магнитного поля на пластическую деформацию сталей мы впервые применили метод АЭ. Этот метод дает очень важную информацию о движении дислокационных ансамблей и поэтому способен пролить дополнительный свет на механизмы протекающих при пластической деформации процессов и сравнить их со сложившимися теоретическими представлениями [9].

Материал и методика эксперимента. Материалом для образцов служили две марки стали: сталь Ст3 в виде листа толщиной 2,0 мм и листовая нержавеющая сталь 1X18H9T толщиной 1,0 мм. В средней части листовой заготовки размером 260×12 мм механическим способом изготавливали образец с рабочей частью 30×6 мм.

Для снятия напряжений, вызванных механической обработкой, образцы отжигались при температуре 500°C 1 час. Испытания на растяжение образцов проводились со скоростью деформации $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре. На испытательную машину монтировались два постоянных магнита цилиндрической формы ($\varnothing 60$ мм) из 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 записывались параметры деформирования и АЭ. Для регистрации АЭ использовался многоканальный акустический комплекс М400, позволяющий регистрировать и разделять сигналы АЭ в зависимости от их амплитуды. В качестве датчика АЭ использовался пьезокерамический преобразователь из керамики ЦТС-19 с резонансной частотой 180 кГц. Сбор, обработка и анализ результатов проводили с помощью ЭВМ и специально разработанных программ обработки данных [10].

Полученные 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 магнитоакустическими эффектами. На рис. 1, а показаны кривые деформации образцов Ст3 при деформации без магнитного поля (кривая 1) и в МП 5500 Э (кривая 2). Видно, что отличие двух кривых наблюдается в области предела текучести и состоит в наличии “зуба” текучести при деформации образцов стали без приложения магнитного поля и его исчезновении при деформации в магнитном поле. Известно, что появление “зуба” текучести связано с дислокационным механизмом деформации: про-

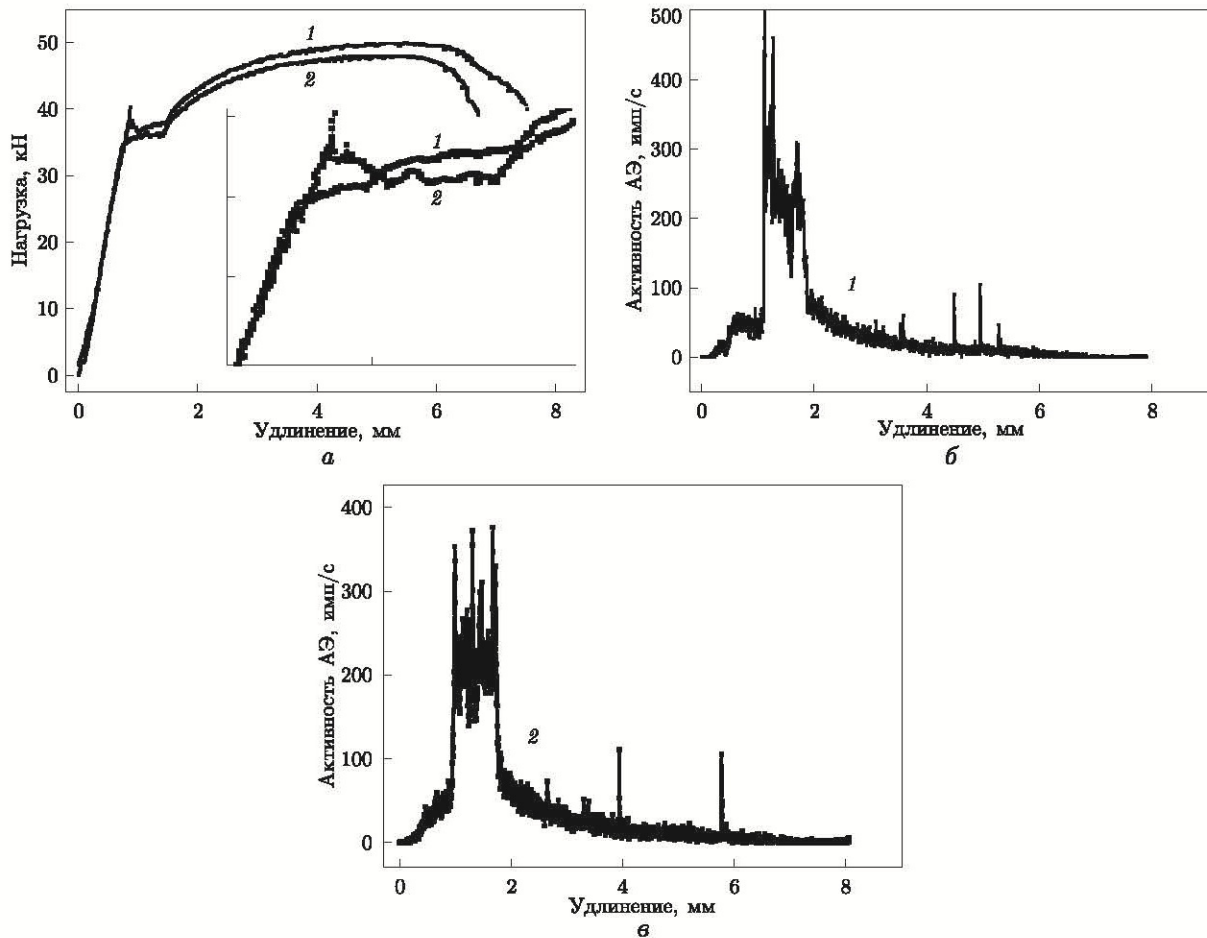


Рис. 1. Кривые деформации (а) и активность АЭ (б, в) при растяжении образцов стали Ст 3 без магнитного поля (кривая 1) и в магнитном поле (кривая 2)

пессами интенсивного образования новых ансамблей дислокаций и отрыва их от облаков примеси, которые происходят в начале пластического течения материала.

Зависимости активности АЭ образцов в МП и при его отсутствии приведены на рис. 1, б, в. 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.

Для понимания радикального влияния МП 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 $N_{\min}/N_{\max} \sim 2$. Рис. 2, а иллюстрирует резкое уменьшение количества низкоамплитудных импульсов АЭ при растяжении в МП. Иными словами, МП приводит к активации более мелких дислокационных ансамблей и к существенному снижению роли крупных дислокационных ансамблей.

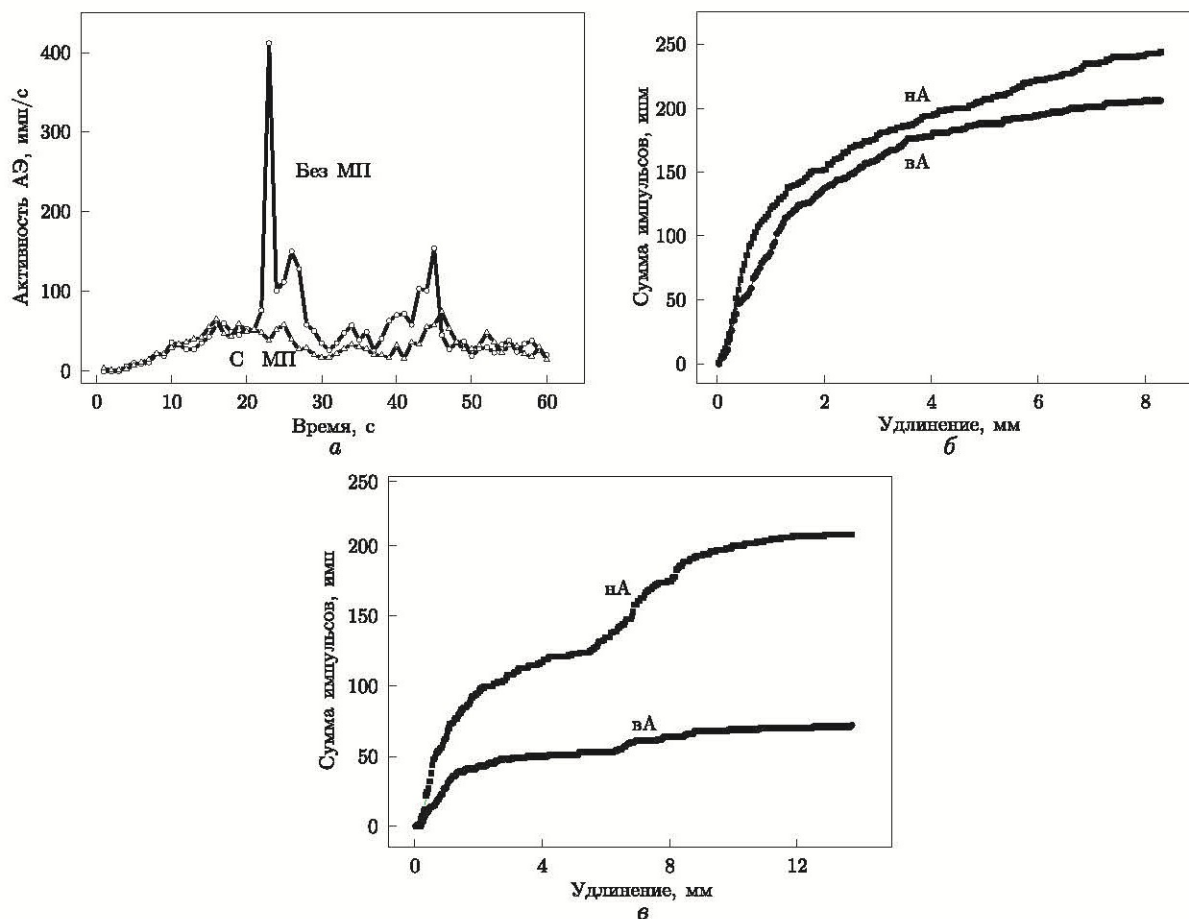


Рис. 2. Кривые активности АЭ (а) стали Ст 3 и суммы импульсов АЭ различной амплитуды (нА — импульсы низкой, вА — высокой амплитуды) у образцов нержавеющей стали (б, в) при растяжении

Поскольку малые дислокационные ансамбли дают импульсы АЭ малой амплитуды, то они могут уходить в нерегистрируемую шумовую часть спектра, т. е. в реальной картине перераспределения дислокационных ансамблей по размерам в магнитном поле доминирующая роль низкоамплитудных сигналов в спектре АЭ может оказаться еще более существенной.

Нержавеющая сталь 1Х18Н9Т. При деформации немагнитной аустенитной стали 1Х18Н9Т мы обнаружили несколько магнитоакустических эффектов, существенно отличающихся от описанных выше для ферромагнитной стали Ст3. Прежде всего, оказалось, что диаграммы деформации образцов этой стали без поля и в МП подобны друг другу. Однако при таком подобии деформационных кривых спектры АЭ (рис. 3) и свойства образцов после деформации без поля и в МП существенно отличаются. Из рис. 3, а видно, что суммарное количество регистрируемых импульсов АЭ при деформации без поля приблизительно в три раза выше, чем при деформации в МП. Радикально отличается характер зависимости суммарного количества импульсов АЭ от деформации без МП (кривая 1 на рис. 3, а) и в МП (кривая 2) — в первом случае она плавная и не имеет особенностей, во втором испытывает перегиб в области деформаций $\epsilon > 10\%$.

На графике зависимости активности АЭ в МП (см. рис. 3, в) в процессе деформации наблюдается явно различимый максимум, соответствующий аномалии на рис. 3, а.

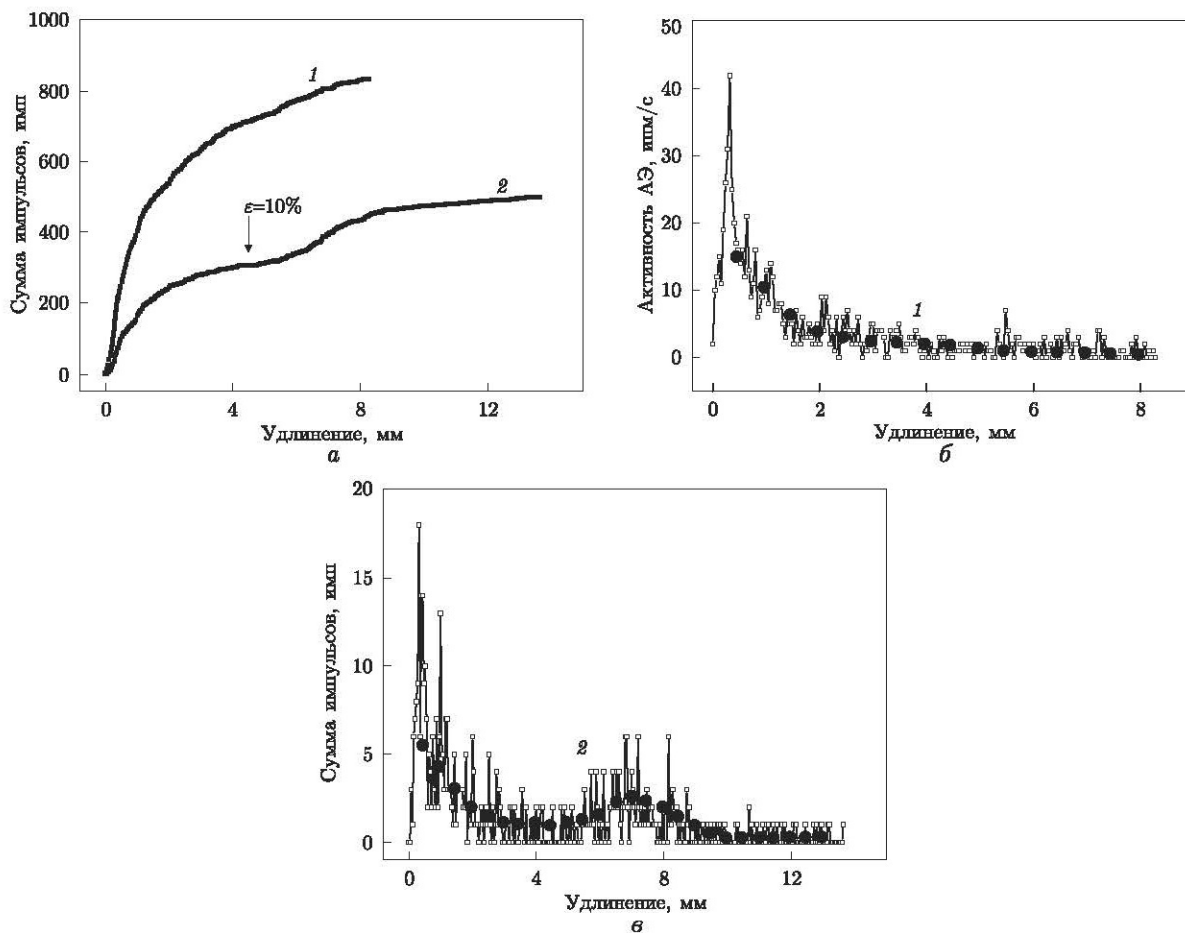


Рис. 3. Кривые зависимости зарегистрированной суммы импульсов (а) и активности АЭ при растяжении образцов нержавеющей стали без магнитного поля (б) и в магнитном поле (в)

Анализ распределения амплитуд сигналов АЭ показал, что как и в случае ферритной Ст3, существенно меняется характер самого спектра АЭ при испытании образцов в поле и без поля (рис. 2, б, в): 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 $N_{\min}/N_{\max} \sim 3$, т. е. низкоамплитудные импульсы доминируют.

Полученная совокупность экспериментальных данных также свидетельствует в пользу нашего предположения, что при деформации немагнитной аустенитной стали в поле существенным образом меняется структура дислокационных ансамблей, участвующих в процессе пластического течения. МП стимулирует организацию и движение меньших по величине скоплений дислокаций, а количество крупных уменьшается почти в три раза или еще больше. Регистрируемое уменьшение общего числа импульсов при деформации в МП вовсе не означает, что так происходит на самом деле — просто низкоамплитудные импульсы попадают в полосу шумов, расширяя ее. Иными словами, наложение МП способствует активации низкоамплитудных источников и существенному уменьшению роли высокоамплитудных.

Что касается аномалий на кривых спектров АЭ в процессе деформации (рис. 3), то нами установлено, что они соответствуют выпадению в процессе деформации аустенита

ферромагнитных α -мартенситных выделений. Это подтверждается прямыми измерениями намагниченности испытанных образцов.

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, т. е. 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 МП 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 МП 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 МП необходимо отдельно учитывать изменение вклада в энергию взаимодействия дефектов, обусловленного квантовой интерференцией электронных волн. Относительная роль этого эффекта будет увеличиваться с понижением температуры.

Проведенные в настоящей работе наблюдения ставят под сомнение получившие широкое распространение представления о влиянии поля на характер термоактивационного движения дислокаций, т. е. влияние 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. [8]). Известно также, что образованию ферромагнитных α -мартенситных выделений в парамагнитном аустените способствует деформация материала [8]. 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 магнитноакустическими эффектами, обнаруженными в настоящей работе, являются: дополнительная АЭ, возникающая при деформации стали в МП, образование перегиба на кривой $N(\varepsilon)$ (рис. 3, а), связанного с α -мартенситным переходом, и существенное изменение характера самого спектра АЭ при испытании образцов в поле и без поля. Мы видим, что, как и в случае ферритной стали Ст3, магнитное поле существен-

но 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 МП 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.

Таким образом, в настоящей работе мы обнаружили несколько новых особенностей поведения параметров акустической эмиссии при пластической деформации сталей в МП, названных нами акустоэмиссионными эффектами.

Впервые наблюдаемые акустоэмиссионные эффекты состоят в следующем.

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 МП приводит к активации более мелких дислокационных ансамблей с низкой амплитудой и существенному снижению роли крупных дислокационных ансамблей с высокой амплитудой.

4. 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 магнитном поле.

5. При деформации в МП аустенитной стали X18N9T 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 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 МП $N_{\min}/N_{\max} \sim 3$, т. е. низкоамплитудные импульсы доминируют.

7. Полученные результаты связаны не столько с влиянием МП 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.

1. *Вонсовский С. В.* Магнетизм. – Москва: Наука, 1971. – 1032 с.
2. *Спицын В. И., Троицкий О. А.* Электропластическая деформация металлов. – Москва: Наука, 1985. – 160 с.
3. *Громов В. Е., Зуев Л. Б., Козлов Э. В., Целлермайер В. Я.* Электростимулированная пластичность металлов и сплавов. – Москва: Недра, 1996. – 290 с.
4. *Роцуцкий А. М., Батаронов И. Л.* Физические основы электропластической деформации металлов // Изв. вузов. Физика. – 1996. – **39**, № 3. – С. 57–65.
5. *Батаронов И. Л.* Механизмы влияния электрического поля и электрического тока на пластическую деформацию металлов // Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Воронеж, 2007.
6. *Головин Ю. И.* Магнитопластичность твердых тел. – Москва: Машиностроение, 2003. – 108 с.
7. *Кравченко В. Я.* Влияние электронов на торможение дислокаций в металлах // Физика тв. тела. – 1966. – **8**. – С. 927–935.
8. *Сагарадзе В. В.* Деформационно-индуцируемые низкотемпературные диффузионные превращения в сталях // Развитие идей академика В. Д. Садовского. – Екатеринбург, 2008. – С. 192–217.
9. *Грешников В. А., Дробот Ю. Б.* Акустическая эмиссия. – Москва: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
10. *Папиров И. И., Стоев П. И.* Акустическая эмиссия титана в процессе деформации // Вопр. атомной науки и техники. Сер. “Питання атомної науки та техніки”. – 2007. – № 4. – С. 184–191.

ННЦ “Харьковский физико-технический институт” НАН Украины

Поступило в редакцию 27.08.2013

І. І. Папіров, П. І. Стоєв

Виявлення і дослідження акустоемісійних ефектів при пластичній деформації сталей у магнітному полі

Досліджено особливості поведінки параметрів акустичної емісії при пластичній деформації сталей Ст3 і 1Х18Н9Т у магнітному полі. Вперше виявлено нові акустоемісійні ефекти, що викликані дією магнітного поля. У випадку сталі Ст3 накладення магнітного поля в процесі розтягування зразків призводить до істотної зміни спектра акустичної емісії по амплітудах та до усунення “зуба” текучості. На максимумі АЕ в області початку течії магнітне поле призводить та 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 Х18Н9Т призводить до додаткової генерації сигналів АЕ, утворення перегину на кривій загальної суми імпульсів, пов’язаного з α -мартенситним переходом, та суттєвої зміни характеру самого спектра акустичної емісії при випробуванні зразків у полі і без магнітного поля. Отримані результати вказують на те, що головною причиною впливу магнітного поля на пластичну деформацію випробуваних сталей є не зміна термоактиваційних параметрів пластичної течії, а істотна перебудова дислокаційних ансамблів, що беруть участь у цьому процесі.

I. I. Papirov, P. I. Stoev

Detection and research of acoustic emission effects at a plastic strain of steels in a magnetic field

The features of the behavior of the acoustic emission parameters during a plastic deformation of steels 3 and 1Kh18N9T in a magnetic field are studied. For the first time, new acoustic-emission effects which are induced by a magnetic field are found. In the case of steel 3, the application of a magnetic field in the process of deformation of the samples results in significant changes in the spectrum of the amplitudes of acoustic emission signals and the elimination of the yield "tooth". On the maximum of the acoustic emission activity in the field of strains corresponding to the beginning of flow of a metal, the magnetic field leads to the activation of smaller dislocation ensembles with low amplitudes and a substantial reduction of the role of large-size dislocation ensembles with high amplitude. The deformation in the magnetic field of austenitic steel 1Kh18N9T leads to the additional generation of acoustic signals, the formation of an inflection on the curve of the total sum of pulses associated with the α -martensitic transformation, and a significant change of the spectrum of acoustic emission signals at the test in a magnetic field and when the field is absent. The results indicate that the main cause of the influence of a magnetic field on the plastic deformation of the tested steels is not a change in the parameters of thermal activation of a plastic flow, but a significant restructuring of the dislocation ensembles participating in the process.