

01,07

Исследование влияния электрического тока на прерывистую деформацию и акустическую эмиссию в алюминий-магниевом сплаве АМг5

© А.А. Шибков, А.А. Денисов, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, В.И. Иволгин

Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина,
Тамбов, Россия

E-mail: shibkov@tsu.tmb.ru

(Поступила в Редакцию 17 ноября 2014 г.)

Влияние постоянного электрического тока на прерывистую деформацию алюминий-магниевого сплава АМг5 исследовали методами акустической эмиссии и высокоскоростной видеосъемки распространяющихся деформационных полос. Обнаружено явление подавления током сигналов низкочастотной акустической эмиссии в полосе 1 Hz–2 kHz, связанной с развитием деформационных полос Портевена–Ле Шателье. Сделаны оценки характерных времен затухания и нарастания пластических неустойчивостей и вызванных ими акустических сигналов после включения и выключения тока соответственно.

Исследование проведено в рамках выполнения госзадания Министерства образования и науки РФ № 2014/285 (проект № 2476).

1. Введение

В работах авторов [1,2] экспериментально обнаружен эффект подавления прерывистой деформации Портевена–Ле Шателье (ПЛШ) постоянным электрическим током низкой плотности в алюминий-магневых сплавах АМг5 и АМг6. Эффект выражается в увеличении критической деформации ε_c появления первого деформационного скачка на кривой растяжения с ростом плотности тока в интервале $\sim 10\text{--}60\text{ А/мм}^2$. Рост ε_c , как обнаружено, сопровождается увеличением напряжения течения, причем критическая деформация и упрочнение током растут с увеличением плотности тока и содержания магния в сплаве. Предполагается, что обнаруженный эффект связан с подавлением током процесса динамического деформационного старения дислокаций из-за изменения подвижности примесных ионов, вызванного электромиграцией. Другой возможный механизм состоит в растворении током малых преципитатов — зон Гинье–Престона, что может вызвать подавление прерывистой деформации в рамках преципитатной модели инверсного поведения критической деформации [3–5]. Электромиграционный механизм, обусловленный силовым воздействием на примесные ионы со стороны электронов проводимости из-за изменения их импульса при рассеянии [6,7], требует очевидно меньше времени, чем диффузионное по своей природе растворение преципитатов. Поэтому одним из подходов экспериментального исследования механизма подавления током прерывистой деформации является изучение его инерционности, что требует оценки характерных времен затухания деформационных скачков и их возобновления после включения и выключения постоянного тока соответственно при деформациях, превышающих критическую ε_c . Цель настоящей работы состоит в исследовании переходных

процессов неустойчивой пластической деформации при включении и выключении тока в промышленном сплаве АМг5 с использованием метода акустической эмиссии и скоростной видеосъемки деформационных полос.

2. Методика

Методика приготовления и термообработки образцов изложена в работе [2], а методика изучения влияния тока на прерывистую деформацию ПЛШ отличалась постановкой электротоковых экспериментов. В [2] для исключения влияния джоулевого нагрева всего образца проводились квазиизотермические эксперименты: сначала образец вместе с изолированными участками захватов машины нагревали током до заданной температуры ($\approx 55^\circ\text{C}$) в течение 15 min, а затем образец с током деформировали до разрушения и строили зависимость от плотности тока критической пластической деформации ε_c , т.е. деформации появления первого скачка напряжения на деформационной кривой. В настоящей работе исследуется влияние тока на деформационное поведение при $\varepsilon > \varepsilon_c$, т.е. на собственно прерывистый участок кривой растяжения с акцентом на переходные процессы, связанные с включением и выключением тока. Для соблюдения квазиизотермичности образец сначала подвергали печному нагреву при температуре $T \approx 55^\circ\text{C}$ в течение времени $t_f \approx 15\text{ min}$. Затем образец деформировали с постоянной скоростью $\dot{\varepsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$ в испытательной машине Instron 3344 до появления первых скачков напряжения. После 15–20 скачков печной нагрев выключали и включали источник тока в цепи с образцом. Время переключения с печного на джоулев нагрев составляло около 3 s. За это время падение температуры образца не превышало 2°C (см. рис. 1). Величину

плотности тока подбирали таким образом, чтобы джоулев нагрев обеспечивал сохранение температуры 55°C с точностью $1\text{--}1.5^\circ\text{C}$. При уменьшении плотности тока печь выключали не полностью для соблюдения приблизительного постоянства температуры образца $T = T_f + \Delta T_f$, где T_f — температура печи, ΔT_f — приращение температуры, связанное с джоулевым нагревом. Условия $T \approx 55^\circ\text{C}$ и $\dot{\epsilon}_0 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, как установлено в работах [1,2], наиболее оптимальны для наблюдения подавления прерывистой деформации постоянным током в сплавах АМг5 и АМг6. Для исследования влияния длительности нарастания тока (времени фронта t_{fr}) при его включении на деформационное поведение сплава использовали генератор прямоугольных импульсов тока, позволяющий варьировать время фронта от 10^{-3} s до 1 s. Последнее значение сопоставимо со средним временным интервалом между скачками напряжения при скорости деформирования $\dot{\epsilon}_0 \sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

Метод акустической эмиссии, как известно, является очень чувствительным методом исследования прерывистой деформации [8–15]. Для регистрации сигналов акустической эмиссии (АЭ) в ходе прерывистой деформации использовали низкочастотный, с полосой $1 \text{ Hz} \text{--} 20 \text{ kHz}$, акустический датчик (вибропреобразователь) АР 34 (ООО „ГлобалТест“), который укрепляли через стеклянную пластину и слой масла на нижней неподвижной лопатке образца, связанной с базой (станией испытательной машины). Плоскопараллельная стеклянная пластинка необходима для обеспечения акустического контакта и электрической изоляции акустического датчика от образца с током. Выбор низкочастотного датчика с полосой $1 \text{ Hz} \text{--} 20 \text{ kHz}$ определялся характерными временами в эволюции деформационных полос ПЛШ, известными из литературы: длительностью наиболее быстрой начальной фазы развития полос, $0.2\text{--}1.0 \text{ ms}$ [16–18], и временем распространения полос $\sim 0.01\text{--}0.1 \text{ s}$ [19–21]. Сигнал АЭ $\varphi_{AE}(t)$ и ток через образец $I(t)$ записывались с помощью аналогоцифрового преобразователя и компьютера с частотой регистрации данных до 20 kHz . Динамика деформационных полос исследовалась *in situ* с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры VS-FAST/G6 (НПО „Видео-скан“) со скоростью 500 frames/s и компьютерной программы вычитания последовательных цифровых изображений полосы, позволяющей получать компьютерную визуализацию распространяющейся полосы при любых степенях деформации вплоть до разрушения [22–24].

3. Результаты и обсуждение

3.1. Подавление прерывистой деформации после включения тока при $\epsilon > \epsilon_c$. Пример квазиизотермического эксперимента с включением тока после начала прерывистой деформации, т.е. в момент времени, когда $\epsilon > \epsilon_c$, представлен на рис. 1. После начала прерывистой деформации, спустя время

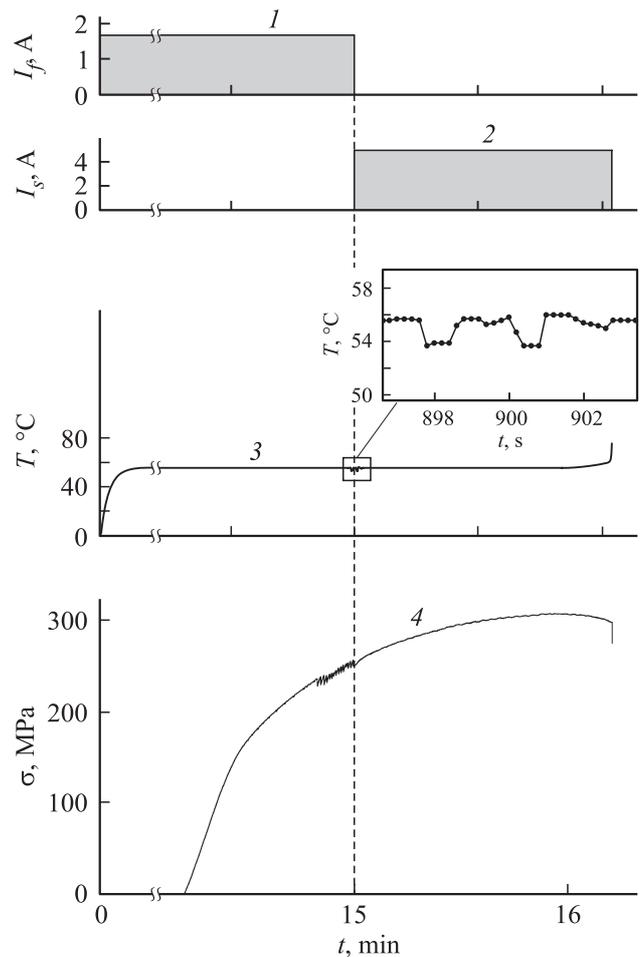


Рис. 1. Квазиизотермический эксперимент с включением тока при $\epsilon > \epsilon_c$. 1 — эпора тока $I_f(t)$ в печи электросопротивления, 2 — эпора тока $I_s(t)$, протекающего через деформируемый образец ($j = 52.7 \text{ A/mm}^2$), 3 — температура $T(t)$ образца, 4 — диаграмма растяжения образца со скоростью $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. На вставке — вариации температуры образца при переключении режима печного нагрева на джоулев нагрев. Штриховой линией отмечен момент переключения с печного нагрева на джоулев нагрев.

приблизительно 10 s, в течение которого наблюдалось $15\text{--}20$ скачков напряжения, печь, которая поддерживала температуру образца 55°C , выключали и включали ток с временем фронта $t_{fr} = 1 \text{ ms}$. Деформирование образца продолжали с протекающим через него током до разрушения. После включения тока плотностью $50\text{--}55 \text{ A/mm}^2$ скачки полностью прекращались и кривая деформации оставалась гладкой (без макроскачков) до полного разрушения образца (рис. 1, кривая 4).

На рис. 2 представлено семейство кривых растяжения образцов сплава АМг5 при различных плотностях постоянного тока j от 0 до 52.7 A/mm^2 . Моменты включения тока отмечены стрелкой. Ток пропускали до разрушения образцов. Время печного нагрева устанавливалось одинаковым для всех экспериментов $\tau_f = 15 \text{ min}$. Температура образцов во всех экспериментах поддержи-

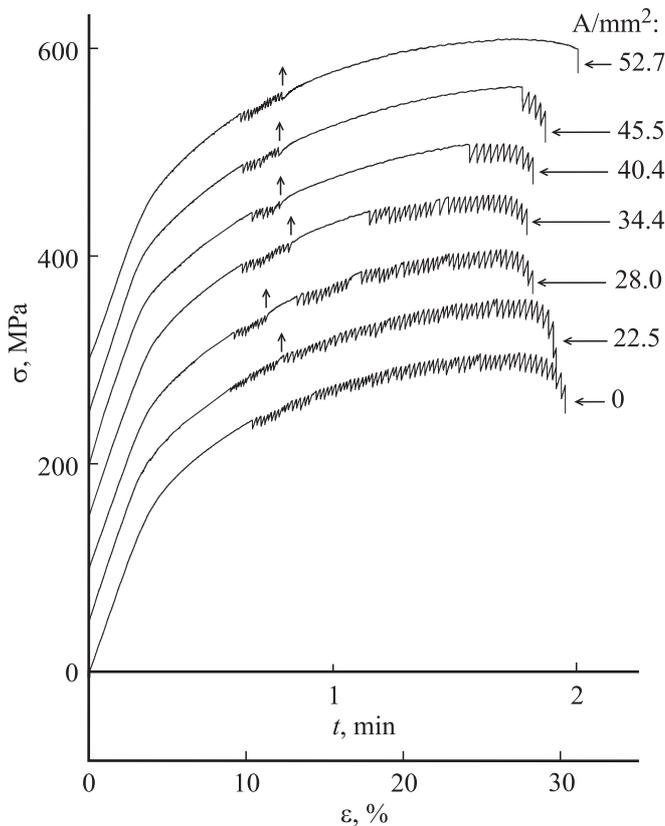


Рис. 2. Кривые растяжения при различных плотностях постоянного тока в одинаковых температурно-скоростных условиях деформирования ($T \approx 55^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$), демонстрирующие переход от прерывистого к монотонному пластическому течению с ростом плотности тока в сплаве АМг5. Кривые смещены друг относительно друга на постоянную величину 50 МПа по оси напряжения. Стрелками показаны моменты включения постоянного тока через деформируемый образец.

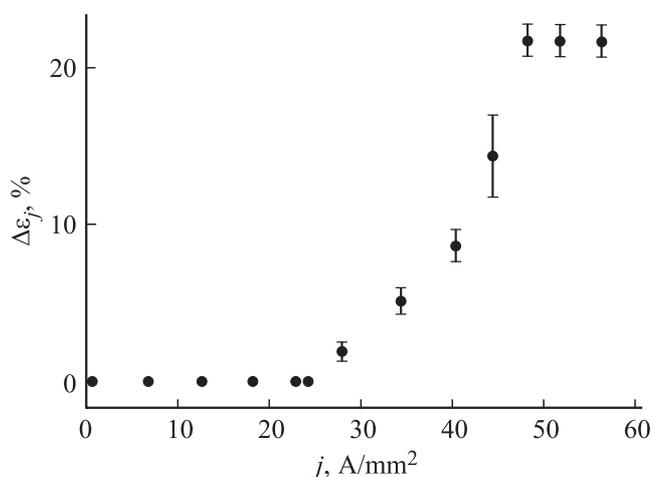


Рис. 3. Зависимость от плотности постоянного тока j гладкого (без скачков) участка диаграммы растяжения $\Delta\epsilon_j$ после включения тока (см. рис. 2).

валась приблизительно постоянной $T = 55 \pm 1^\circ\text{C}$ до и после включения тока с тем, чтобы исключить влияние джоулевого нагрева всего образца на его деформационное поведение.

Из рисунка видно, что с уменьшением плотности тока в интервале от 52.7 до 28 А/мм² гладкий участок деформационной кривой постепенно уменьшается, т.е. спустя некоторое время, зависящее от плотности тока, после включения тока скачки напряжения спонтанно возобновились и наблюдались до разрыва образца. Зависимость от плотности тока j величины гладкой составляющей пластической деформации $\Delta\epsilon_j$ после включения тока представлена на рис. 3. Видно, что подавление скачков напряжения в данных условиях эксперимента ($T \approx 55^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ и $\tau_f = 15 \text{ min}$) начинается при некоторой критической плотности тока $j_c \approx 25 \text{ A/mm}^2$. Отметим, что в экспериментах, описанных в работе [2], когда образец обрабатывался током в течение 15 min до деформирования и затем в течение всего процесса деформирования до разрушения, критическая плотность тока составляла $\approx 15 \text{ A/mm}^2$. Как и в работе [2], с ростом плотности тока выше критической сначала подавляются скачки ПЛШ типа В (25–35 А/мм²), затем типа В + С (35–40 А/мм²) и наконец, при $j \geq 40 \text{ A/mm}^2$ — скачки типа С. Описанная картина выглаживания участка деформационной кривой после включения тока, как обнаружено, не зависит от длительности нарастания тока при включении, т.е. от времени фронта, которое варьировалось от 1 ms до 1 s.

3.2. Деформационный и акустический отклики на прямоугольные импульсы тока. Для исследования переходных процессов неустойчивой деформации, связанных с включением и выключением постоянного тока, через деформируемый образец пропускали прямоугольные импульсы тока с длительностью „крыши“, значительно превышающей среднее время между скачками. (При скорости $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, среднее время между скачками увеличивается с ростом деформации, от около 0.4 s до приблизительно 1.0 s). Плотность тока на крыше $j = 40\text{--}45 \text{ A/mm}^2$ подбирали таким образом, чтобы длительность крыши ($\approx 15\text{--}20 \text{ s}$) прямоугольного импульса тока была приблизительно вдвое меньше длительности гладкого участка кривой растяжения в отсутствие выключения тока при той же плотности тока (см. рис. 2). Синхронно с записью кривой деформации велась регистрация сигналов АЭ и видеосъемка деформационных полос на поверхности образца. Основные результаты этих экспериментов представлены на рис. 4–6.

На рис. 4 представлена синхронная запись диаграммы растяжения $\sigma(t)$ со скоростью деформирования $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, сигнала АЭ $\varphi_{\text{АЭ}}(t)$ и двух последовательных прямоугольных импульсов тока. Первый прямоугольный импульс пропускали через деформируемый образец на начальной стадии прерывистой деформации ($\sigma \approx 230\text{--}260 \text{ MPa}$), которая в отсутствие тока характеризуется скачками типа В, а второй — вблизи предела

прочности сплава ($\sigma \approx 285\text{--}300\text{ МПа}$), где в отсутствие тока преобладает смесь скачков типов *B* и *C*. В результате пропускания импульсов тока амплитудой около 40 А/мм^2 подавляются скачки типа *B*, что приводит к а) выглаживанию кривой растяжения первым прямоугольным импульсом и б) скачкообразному переходу от скачков типа *B + C* к скачкам типа *C* при пропускании второго прямоугольного импульса.

Типичный скачок разгрузки имеет почти треугольную форму с характерным временем спада около 50 мс

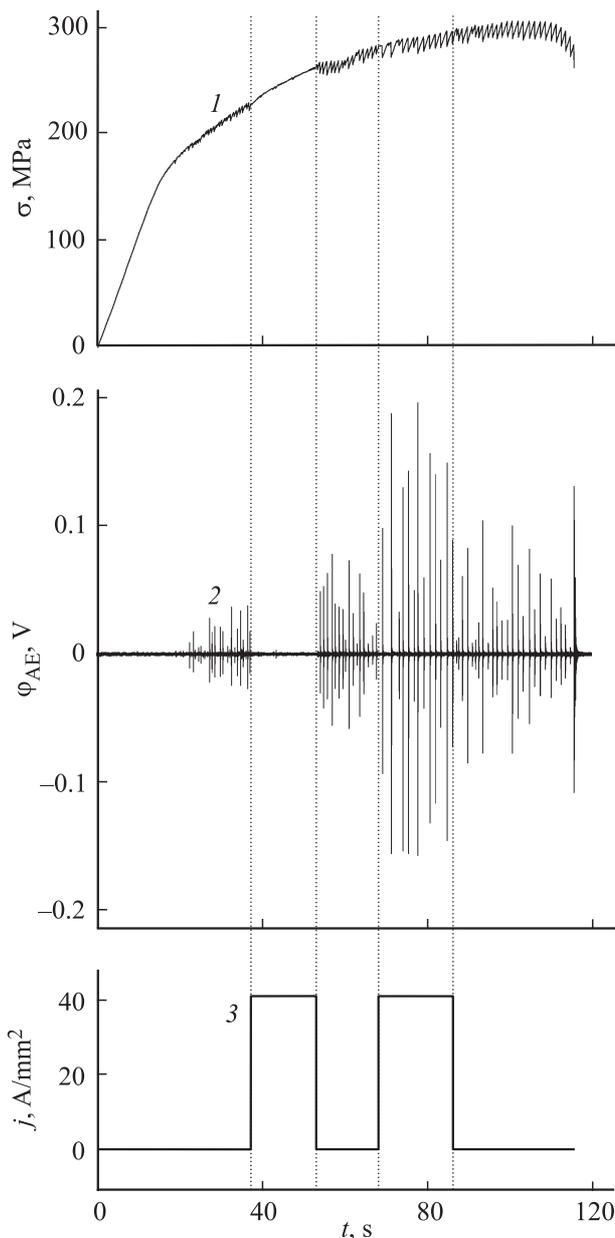


Рис. 4. Влияние прямоугольных импульсов тока на прерывистую деформацию и акустическую эмиссию в сплаве АМг5. 1 — диаграмма растяжения $\sigma(t)$ со скоростью $\dot{\epsilon}_0 = 3 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$, 2 — сигнал АЭ $\varphi_{\text{АЭ}}(t)$, 3 — эпюра плотности тока $j(t)$. На крыше прямоугольных импульсов $j = 41.4\text{ А/мм}^2$. $T \approx 55^\circ\text{С}$.

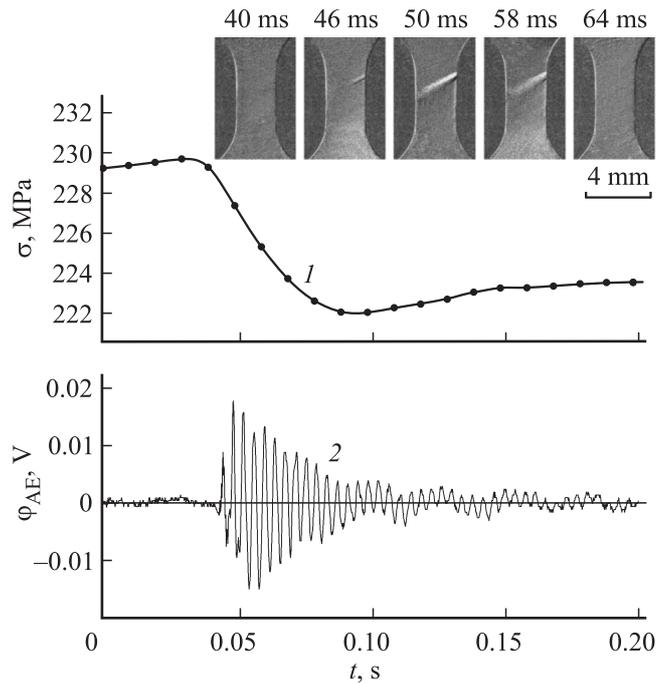


Рис. 5. Последний скачок разгрузки (1) механической системы машина—образец (частота записи данных 100 Гц) перед включением первого прямоугольного импульса тока и соответствующий сигнал АЭ (2). На вставке — полоса ПЛМ, распространяющаяся на фронте скачка напряжения.

(см. рис. 5 и 6) для всех видов скачков, что видимо связано с инерционностью испытательной машины, и временем восстановления напряжения около 0.4 с для скачков типа *B* и около 1 с для скачков типа *C*, средняя амплитуда которых приблизительно вдвое превышает среднюю амплитуду скачков типа *B*. Важно отметить, что угол наклона кривой $\sigma(t)$ на стадии восстановления нагрузки совпадает с соответствующим наклоном на начальном, упругом участке кривой деформации. Это означает, что стадия роста напряжения обусловлена чисто упругой релаксацией механической системы машина—образец после завершения скачка разгрузки, триггером развития которого, как показывают данные скоростной видеосъемки, является зарождение и расширение одиночных полос деформаций (см. вставку на рис. 5).

Начальная стадия развития полосы деформации является триггером акустического сигнала. Типичный сигнал АЭ показан на рис. 5, кривая 2. Огибающая сигнала содержит стадию роста продолжительностью $10\text{--}15\text{ мс}$, соответствующую длительности активной стадии развития деформационной полосы и стадии спада с постоянным временем около 30 мс , соответствующей свободным затухающим колебаниям на частоте 260 Гц , которая совпадает, по данным баллистической калибровки, с одной из собственных частот механической системы машина—образец.

На „крыше“ первого прямоугольного импульса длительностью 15 с скачки напряжения не наблюдаются:

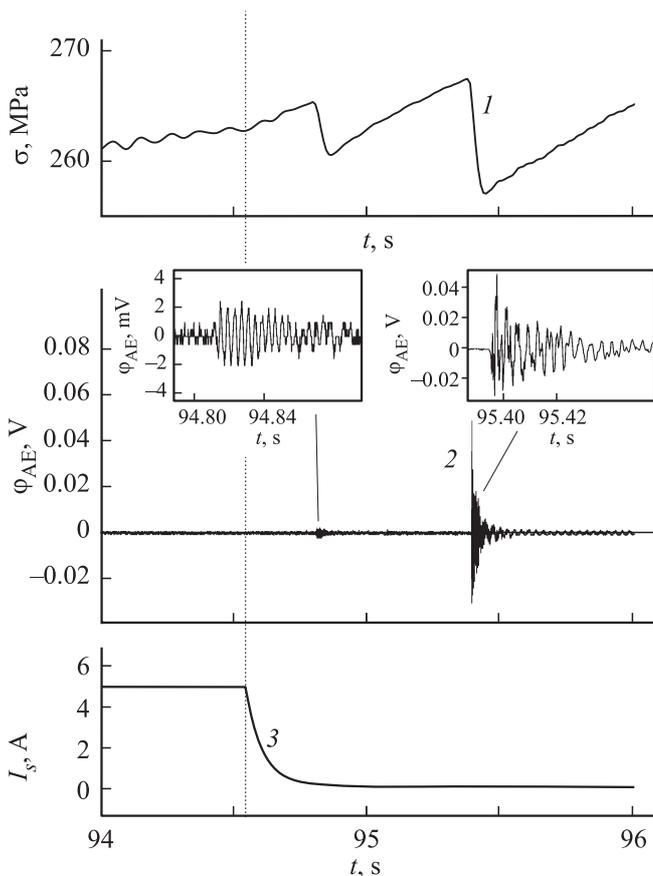


Рис. 6. Возобновление скачков напряжения после выключения тока и соответствующие сигналы АЭ. 1 — фрагмент диаграммы растяжения $\sigma(t)$, 2 — сигнал АЭ $\varphi_{\text{АЭ}}(t)$, 3 — эпюра тока $I_s(t)$ через образец. На вставках — акустические сигналы, вызванные развитием первых двух скачков разгрузки.

соответствующий участок кривой растяжения демонстрирует монотонную деформацию. Видеосъемка не обнаруживает деформационных полос и соответственно отсутствуют акустические сигналы. Можно утверждать, что постоянный электрический ток низкой плотности подавляет низкочастотную акустическую эмиссию, поскольку подавляется ее источник — зарождение и развитие полос макролокализованной деформации.

Инерционность эффекта подавления прерывистой деформации оценим как время задержки между выключением тока (с длительностью переднего фронта $t_{fr} \approx 1$ ms значительно меньшей характерных времен процесса) и деформационным откликом на него — исчезновением деформационных полос, скачков разгрузки и акустических сигналов. Анализ откликов на первый прямоугольный импульс тока показывает, что после включения тока исчезает первый и последующие (ожидаемые в отсутствие тока) скачки напряжения и соответственно деформационные полосы и сигналы АЭ. Поэтому оценкой сверху времени инерции подавления током прерывистой деформации можно считать время между скачками на этом участке диаграммы растяжения, т.е. около 0.4 s.

Для более точной оценки необходимо синхронизировать момент включения тока с различными фазами развития деформационной полосы на фронте скачка разгрузки, что является предметом дальнейших исследований.

Рассмотрим теперь переходные процессы на заднем фронте первого прямоугольного импульса тока. Как видно из рис. 6, после выключения тока скачки напряжения на диаграмме растяжения возобновляются. Первый скачок напряжения, амплитудой $\Delta\sigma \approx 3-5$ МПа, как правило, в 2–3 раза меньше, чем средняя амплитуда последующих скачков, возникает спустя $\Delta t \approx 200-300$ ms (на рис. 6 $\Delta t = 260$ ms). Этот скачок напряжения сопровождается генерированием сравнительно слабого сигнала АЭ, амплитудой на порядок ниже амплитуды последующих акустических всплесков. Видеосъемка показывает развитие небольшой незавершенной дугообразной деформационной полосы на подвижной лопатке образца. Второй и последующие скачки напряжения по амплитуде и форме ничем не отличаются от скачков в отсутствие электротокowego воздействия. Поэтому инерционность деформационного и акустического откликов на выключение тока оценим как не превышающую $\Delta t \approx 200-600$ ms.

Рассмотрим изменение деформационного поведения сплава АМг5 на крыше второго прямоугольного импульса тока (см. рис. 4), который пропускали при высоких напряжениях растяжения, около 300 МПа, на участке кривой деформирования, который в отсутствие тока характеризуется скачками типа $B + C$. Как отмечалось выше, включение тока на этом участке подавляет скачки типа B и на кривой деформации остаются только скачки типа C . В отличие от „обычных“ скачков типа C , которые следуют друг за другом, стартуя сразу после восстановления напряжения до исходного значения, первые после включения тока скачки стартуют реже обычных; время между скачками, также как и время после включения тока и развитием первого скачка напряжения достигает 1.5–1.75 s, в то время как в отсутствие тока среднее время между скачками смеси B и C на этом участке не превышает 0.6–0.7 s. Таким образом, скачки на „крыше“ второго прямоугольного импульса тока более редкие и высокоамплитудные, амплитудой до $\Delta\sigma \sim 15$ МПа. Соответственно эти скачки сопровождаются самыми высокоамплитудными сигналами АЭ (см. рис. 4, кривая 2) в среднем приблизительно в три раза большей амплитуды, чем сигналы АЭ, вызванные скачками типа $B + C$ до включения тока. На начальной стадии акустического сигнала продолжительностью ~ 10 ms возбуждаются более высокочастотные гармоники до 2 kHz по сравнению с сигналом АЭ в начале прерывистого течения, что обусловлено более высоким уровнем напряжения и соответственно более высокими скоростями деформационных полос, особенно на начальной стадии их развития.

Таким образом, в зависимости от плотности постоянного тока и участка на кривой растяжения, на котором через деформируемый образец пропускается ток, он может как полностью подавлять полосообразование и

акустическую эмиссию, так и увеличивать амплитуду акустических сигналов. С ростом плотности тока фактор подавления начинает преобладать и при плотностях выше 50 A/mm^2 весь участок деформационной кривой после включения тока оказывается гладким, соответственно полностью подавляется полосообразование и низкочастотная, в полосе $\sim 1 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$, акустическая эмиссия.

4. Заключение

Настоящая работа продолжает исследования явления подавления эффекта Портевена–Ле Шателье постоянным электрическим током низкой плотности в алюминий-магниевого сплавах, начатые в работах авторов [1,2]. Помимо регистрации и анализа кривых растяжения в жесткой испытательной машине для изучения влияния тока на развитие пластических неустойчивостей использовали метод акустической эмиссии и скоростную, со скоростью 500 frames/s , видеосъемку поверхности деформируемых образцов. Установлено, что при включении постоянного тока после начала прерывистого течения, т.е. при деформации больше деформации ϵ_c появление первого скачка напряжения, прерывистое течение сменяется на монотонное (без скачков), если плотность постоянного тока превышает критическое значение $j_c \approx 25 \text{ A/mm}^2$. Гладкий участок кривой растяжения затем спонтанно сменяется на прерывистый. С увеличением плотности постоянного тока в интервале $25 - 50 \text{ A/mm}^2$ растет гладкий участок деформационной кривой и при $j > 50 \text{ A/mm}^2$ образец деформируется без скачков вплоть до разрушения. Для исследования переходных процессов, связанных с включением и выключением постоянного тока исследовали влияние на деформационное поведение прямоугольного импульса тока с длительностью крышки, значительно превышающей среднее время между скачками. Обнаружено, что после включения тока на ранних стадиях прерывистой деформации подавляется очередной и последующие скачки напряжения, ожидаемые в отсутствие тока и, кроме того, подавляются низкочастотные, в полосе частот $\sim 1 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}$, сигналы АЭ и их источники — распространяющиеся деформационные полосы. После выключения тока прерывистая деформация, полосообразование и сигналы АЭ возобновляются, причем первый импульс с амплитудой почти вдвое меньшей последующих, возникает спустя временной интервал в пределах от 0.2 до 0.6 s . Показано, что полученные результаты не зависят от длительности фронта прямоугольного импульса, который варьировали в пределах трех порядков от 1 ms до 1 s , а определяются только амплитудой и длительностью крышки прямоугольного импульса тока.

В заключение отметим, что для более точного измерения инерционности явления подавления током пластических неустойчивостей необходима быстродействующая система синхронизации прямоугольного импульса тока

с различными фазами эволюции деформационных полос. Результаты таких исследований будут представлены в последующих работах авторов.

Список литературы

- [1] A.A. Shibkov, A.A. Denisov, M.A. Zheltov, A.E. Zolotov, M.F. Gasanov. *Mater. Sci. Eng. A* **610**, 338 (2014).
- [2] А.А. Шибков, А.А. Денисов, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, М.Ф. Гасанов, С.С. Кочегаров. *ФТТ* **57**, 228 (2015).
- [3] Y. Brechet, Y. Estrin. *Scr. Met. Mater.* **31**, 185 (1994).
- [4] Y. Brechet, Y. Estrin. *Key Eng. Mater.* **97–98**, 235 (1994).
- [5] Y. Brechet, Y. Estrin. *Acta Met. Mater.* **43**, 3, 955 (1995).
- [6] E.C. Yeh, K.N. Tu. *J. Appl. Phys.* **88**, 5680 (2000).
- [7] K.N. Tu, C.C. Yeh, C.Y. Liu, C. Chin. *Appl. Phys. Lett.* **76**, 988 (2000).
- [8] C.R. Heiple, S.H. Carpenter. *J. Acoustic Emission* **6**, 177 (1987).
- [9] М.М. Криштал, Д.Л. Мерсон. *ФММ* **10**, 187 (1991).
- [10] М.М. Криштал, Д.Л. Мерсон. *ФММ* **81**, 155 (1996).
- [11] J.M. Reed, M.E. Walter. *Mater. Sci. Eng. A* **359**, 1 (2003).
- [12] F. Chmelik, F.B. Klose, H. Dierke, J. Sachl, H. Neuhauser, P. Lukac. *Mater. Sci. Eng. A* **462**, 53 (2007).
- [13] M.A. Lebyodkin, N.P. Kobelev, Y. Bougherira, D. Entemeyer, C. Fressengeas, V.S. Gornakov, T.A. Lebedkina, I.V. Shashkov. *Acta Mater.* **6**, 3729 (2012).
- [14] I.V. Shashkov, M.A. Lebyodkin, T.A. Lebedkina. *Acta Mater.* **60**, 6842 (2012).
- [15] A. Vinogradov, A. Lazarev. *Scr. Mater.* **66**, 745 (2012).
- [16] G.F. Xiang, Q.C. Zhang, H.W. Lin, X.P. Wu, X.Y. Ju. *Scr. Mater.* **56**, 721 (2007).
- [17] W. Tong, H. Tao, N. Zhang, L.G. Jr. Hector. *Scr. Mater.* **53**, 87 (2005).
- [18] М.М. Криштал, А.К. Хрусталева, А.В. Волков, С.А. Бородин. *Доклады РАН.* **426**, 36 (2009).
- [19] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. *ФТТ* **52**, 2223 (2010).
- [20] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. *Кристаллография* **56**, 147 (2011).
- [21] А.А. Шибков, М.А. Желтов, А.Е. Золотов, А.А. Денисов, Е.В. Выжанов. *Деформация и разрушение материалов* **15**, 42 (2011).
- [22] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов. *Изв. РАН. Сер. физ.* **76**, 97 (2012).
- [23] А.А. Шибков, А.Е. Золотов. *Письма в ЖЭТФ* **90**, 412 (2009).
- [24] А.А. Шибков, А.Е. Золотов, М.А. Желтов, А.В. Шуклинов, А.А. Денисов. *ФТТ* **53**, 1873 (2011).