

Накопление деформации в алюминиево-магниевом сплаве в условиях высокотемпературного нагружения и спектральная плотность сигналов акустической эмиссии

С.В. Макаров¹, В.А. Плотников^{1,2}, М.В. Лысиков¹

¹Алтайский государственный университет (Барнаул, Россия)

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН (Томск, Россия)

Spectral Density of Acoustic Emission Signals and Accumulation of Deformation in an Aluminum-Magnesium Alloy at High-Temperature Loading

S.V. Makarov¹, V.A. Plotnikov^{1,2}, M.V. Lysikov¹

¹Altai State University (Barnaul, Russia)

²Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS (Tomsk, Russia)

Приведены результаты исследования процессов накопления деформации в алюминиево-магниевом сплаве в условиях высокотемпературного нагружения от комнатных температур до 500 °С. Проведен анализ спектров сигналов акустической эмиссии в условиях активного накопления деформации: монотонного — в области низких температур (до температуры деформационного структурного перехода), квазискачкообразного — в высокотемпературной области. Анализ спектральной плотности сигналов акустической эмиссии свидетельствует о перераспределении колебательной энергии первичного акустического сигнала по резонансным колебаниям стоячих сдвиговых и продольных волн резонатора, геометрия которого соответствует области локализации деформации (проточки образца). Показано, что в спектре сигналов при монотонном накоплении деформации в области низких температур фактически не сформированы резонансы в выделенных резонансных частотах. В области высоких температур при квазискачкообразном накоплении деформации в резонаторе накапливается заметная энергия колебаний стоячих волн (как для сдвиговых, так и продольных волн). В кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме, который связан с длиной стоячей волны, определяющей макроскопический масштаб корреляции.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, высокотемпературная деформация, монотонная и скачкообразная деформация, спектральная плотность.

This paper presents results of the study of strain accumulation processes in an aluminum-magnesium alloy at high-temperature loading conditions from room temperature to 500 °C. The analysis of acoustic emission signals spectra is conducted for the conditions of active deformation accumulation: monotone - in the area of low temperatures (up to a temperature of deformation structural transition), stepwise — in the high temperature area.

Analysis of spectral density of acoustic emission signals indicates redistribution of vibrational energy of the primary acoustic signal on the resonance vibrations of standing shear and longitudinal waves of the resonator, which geometry corresponds to deformation localization area.

It is shown that resonances at selected resonance frequencies are not formed in the spectrum of the signal with a monotonic accumulation of deformation in the area of low temperatures. During stepwise deformation accumulation in the area of high temperatures, the resonator accumulates noticeable vibration energy of standing waves (shear and longitudinal waves). In the crystalline environment, oscillations of standing waves activate elementary deformation shifts which are related to the length of the standing wave that defines the macroscopic scale of correlation.

Key words: acoustic emission, high temperature deformation, monotonic and abrupt deformation, the spectral density.

Введение. Результаты экспериментальных исследований по деформированию алюминиево-магниевого сплава в условиях высоких температур свидетельствуют о том, что в ходе нагружения накопление деформации осуществляется двояким образом: монотонным путем, когда на зависимости деформации от времени (температуры) процесса отсутствуют события, нарушающие монотонность; немонотонным путем, когда на этой зависимости наблюдаются макроскопические деформационные скачки [1]. Эти особенности деформационного поведения коррелируют с акустической эмиссией, сопровождающей процесс накопления деформации при высоких температурах: монотонное накопление деформации сопровождается низкоамплитудной акустической эмиссией; скачкообразное накопление деформации характеризуется высокоамплитудными единичными сигналами акустической эмиссии.

Известно, что эффект прерывистой текучести в алюминиево-магниевого сплавах при механическом нагружении представляет собой процесс формирования полос деформации, являющихся областями локализации пластической деформации [2]. Прерывистая текучесть на зависимости *напряжение — деформация* проявляется в скачках (зубцах) напряжения, причем полоса деформации, ответственная за акты прерывистой текучести, является макроскопическим объектом и развивается из критического зародыша полосы. Наблюдаются два типа полос деформации: пространственно неорганизованные полосы и пространственно организованные. Каждый акт прерывистой текучести связан с появлением одной полосы деформации [3]. Прерывистая текучесть сопровождается импульсами акустической эмиссии, коррелирующими с появлением полос деформации, т.е. каждому скачку напряжений соответствует импульс акустической эмиссии [3, 4].

Спектральный и динамический анализы прерывистой текучести обнаруживает наличие дальнедействующих долговременных корреляций в деформируемом материале [5]. Природа пространственной и временной корреляции согласно [6] связана с каскадным механизмом размножения деформационных полос. Однако фактором корреляции выступает локализованное на фронте границы деформационной полосы напряжение, а также дальнедействующие напряжения изгиба. На основе спектрального и динамического анализов утверждается, что фликкер-шумовая структура и монофрактальность силового отклика свидетельствуют о состоянии самоорганизующейся критичности деформируемого материала. Однако роль акустической эмиссии в процессах пространственной и временной корреляции элементарных деформационных актов не обсуждается.

Целью данной работы является исследование акустической эмиссии при высокотемпературной деформации алюминиево-магниевого сплава как фактора корреляции элементарных деформационных актов, проведение спектрального анализа и изучение эволю-

ции спектральной плотности в цикле нагрева от температуры и скорости деформации.

1. Методика экспериментов. Образцы в виде стержней длиной 300 мм с квадратным сечением 5x5 мм, изготовленные из листового проката сплава АМг6, представляли собой волноводы, на которых были сформированы области локализации деформации диаметром 4 мм и длиной 30 мм. Для исследования пластических свойств в экспериментах была использована так называемая мягкая схема нагружения, в которой фиксировалась деформация как функция параметров силового воздействия.

Нагрев образца осуществляли именно в области локализации деформации. Остальную часть стержня не нагревали, она выполняла роль волновода. В реальном режиме времени одновременно регистрировались механическое нагружение, накопление деформации, температура и среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии. Измерения проводили с помощью оригинальной установки, схематичное изображение которой приведено на рисунке 1. Как следует из схемы установки, образец нагружали сдвиговым напряжением и измеряли сдвиговую деформацию. Нагружение постоянной нагрузкой в термомеханическом цикле осуществляли в ходе непрерывного нагрева образцов со скоростью около 1 град/с сплава начиная от 25 °С и до 500 °С и последующего охлаждения до комнатной температуры.

2. Методика спектрального анализа сигналов акустической эмиссии. Регистрация акустической эмиссии осуществляли с помощью широкополосного пьезопреобразователя GT205 (полоса пропускания до 40–100 кГц). В экспериментах пьезопреобразователь был акустически связан с волноводом образца.

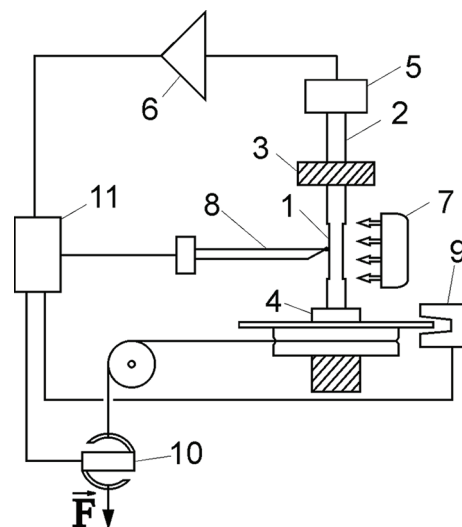


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — образец, 2 — волновод, 3 — неподвижный держатель, 4 — подвижный держатель, 5 — пьезодатчик с предварительным усилителем, 6 — усилитель, 7 — нагреватель, 8 — термомпара, 9 — датчик деформации, 10 — датчик нагрузки, 11 — аналого-цифровой преобразователь, компьютер

Усиленный сигнал акустической эмиссии поступает на вход широкополосного аналого-цифрового преобразователя АЦП ЛА-н150-14РСІ (ширина полосы пропускания — 500 кГц, частота дискретизации — 7 МГц), его дальнейшая обработка осуществлялась с помощью универсальной программы «Регистратор данных АЦП», которая регистрировала высокочастотный сигнал акустической эмиссии. Одновременно рассчитывался уровень среднеквадратического напряжения сигнала, по которому впоследствии можно было выбрать участки для быстрого преобразования Фурье. Для быстрого преобразования Фурье использовался стандартный алгоритм [7].

3. Экспериментальные результаты. Экспериментальные данные по регистрации акустической эмиссии в широком диапазоне частот, накоплению деформации в алюминиево-магниевом сплаве в температурном интервале нагрева от комнатной до 550 °С при нагрузке 120 МПа приведены на ри-

сунке 1. Накопление деформации до температуры 450 °С осуществляется монотонно (область 1, рис. 1), чему соответствует монотонная акустическая эмиссия, и квазискачкообразно в высокотемпературной области 2 (в интервале 450–550 °С), в которой наблюдается значительный рост среднеквадратического напряжения акустической эмиссии. Согласно нашим работам при температуре 450 °С осуществляется смена механизма накопления деформации [8]. Квазискачкообразный характер накопления деформации представляет собой последовательность макроскопических деформационных актов, перемежающихся участками с монотонным накоплением деформации.

Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии при высокотемпературной активной деформации алюминиево-магниевого сплава перераспределена в область низких частот (ниже 100 кГц). Поэтому анализ спектральной плотности сигналов акустической эмиссии будет проведен в низкочастотном диапазоне.

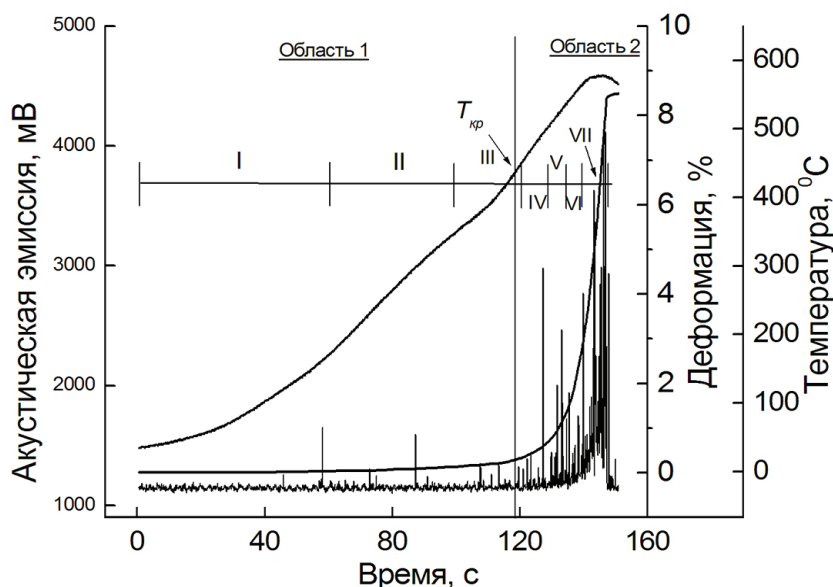


Рис. 2. Акустическая эмиссия (1), накопление деформации (2), температура (3) в неизотермическом цикле при нагрузке 120 МПа

Спектральный анализ сигналов акустической эмиссии проведен для выделенных римскими буквами на рисунке 2 интервалов экспериментальных данных, критерием выбора которых является скорость накопления деформации.

На рисунке 3 представлены характерные спектры сигналов акустической эмиссии, полученные в одном неизотермическом цикле на деформационных участках с разными температурно-скоростными параметрами (интервалы I–VII, рис. 1). Мощность спектральной плотности, приведенной на рисунке 3а, характерна для монотонного накопления деформации и монотонной акустической эмиссии,

а на рисунке 3б — для участков квазискачкообразного накопления деформации и высокоамплитудной акустической эмиссии.

При деформировании алюминиево-магниевого сплава в области 1 (низких температур, интервал II) с низкой скоростью накопления деформации ($v = 0,03\% \text{ с}^{-1}$) мощность спектральной плотности сигналов акустической эмиссии в диапазонах 40–50 и 80–95 кГц близка к уровню шума (рис. 3а). Очевидно, что спектральная линия с амплитудой 20000 усл. ед. на частоте 35,4 кГц соответствует резонансному колебанию, не связанному с деформационными процессами, а представляет собой шум измерительного тракта.

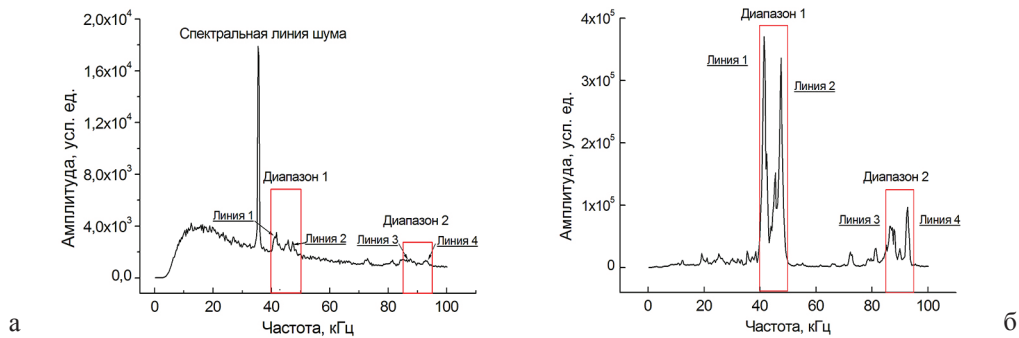


Рис. 3. Мощность спектральной плотности акустической эмиссии для двух участков накопления деформации в области 2, различающихся скоростью накопления деформации v : а – $v = 0,03 \text{ с}^{-1}$, б – $v = 0,203 \text{ с}^{-1}$

На рисунке 3б приведен спектр сигналов акустической эмиссии, полученный на высокотемпературном квазискачкообразном участке накопления деформации (интервал VII, рис. 2) с высокой скоростью около $v = 0,2 \% \text{ с}^{-1}$, характерной особенностью которого является наличие высокоамплитудных спектральных линий в частотных диапазонах около 40–50 (1) и 85–95 (2)кГц, амплитуды которых на порядки величины превосходят амплитуды спектральных линий при монотонном накоплении деформации.

Дискретный характер мощности спектральной плотности сигналов акустической эмиссии свидетельствует, что система *образец — волновод* представляет собой резонансную систему, состоящую из резонаторов, распределяющих колебательную энергию акустической эмиссии по выделенным спектральным диапазонам (рис. 3а, 3б). Колебательная энергия акустической эмиссии может накапливаться на резонаторах (резонансных объемах) системы образец-волновод путем формирования стоячих акустических волн.

Резонаторы определяют набор длин волн исходя из условия стоячей волны $L = \frac{\lambda}{2} k$,

где L — геометрический размер резонатора; λ — длина волны; k — номер резонанса. Рассчитаны геометрические параметры резонаторов для случая распространения сигналов акустической эмиссии в виде сдвигового (табл. 1) и продольного (табл. 2) волновых пакетов.

Как следует из спектральных данных, резонансы для сдвиговых волн (скорость сдвиговой волны в алюминии равна 3040 м/с) в диапазоне 1 (40–50 кГц, линии 1, 2) (табл. 1), а также для продольных волн (скорость продольной волны в алюминии равна 6420 м/с) в диапазоне 2 (85–95 кГц, линии 1, 2) (см. табл. 2) соответствуют геометрии концентратора деформации длиной около 40 мм, который является областью локализации сдвиговой деформации. Расчет геометрии резонансов, проведенный по спектральным линиям 1, 2 — частотного диапазона 1 и линиям 3, 4 — частотного диапазона 2 для разных температурно-скоростных параметров процесса накопления деформации, представлен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1
Стоячие сдвиговые волны в системе *волновод — образец* для области локализации деформации.
Геометрия резонансной области

№	$\Delta T, \text{ }^\circ\text{C}$	$\bar{T}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\dot{\epsilon}, \text{ с}^{-1}$	$\nu, \text{ Гц}^*$	$L, \text{ м}$	$h, \text{ усл. ед.}$	$l, \text{ усл. ед.}$	$S, \text{ усл. ед.}$
I	40-180	110	0	41809 (1)	0,035776	1556	1000	526200
				45776 (2)	0,032143	4000	1000	
II	180-355	270	0,030	41809 (1)	0,035776	1253	1000	5053000
				46081 (2)	0,032143	3800	1000	
III	355-455	405	0,082	41809 (1)	0,036283	6900	500	4971500
				45481 (2)	0,033421	3043	500	
IV	455-510	480	0,141	41503(1)	0,036463	30752	1000	34555500
				45481 (2)	0,033421	7607	500	
V	510-530	520	0,172	41503 (1)	0,036644	35669	1000	110158400
				45166 (2)	0,032231	41383	1800	
VI	530-570	550	0,197	41503 (1)	0,036599	201306	2300	534103800
				44860 (2)	0,033611	47400	1500	
VII	570-580	575	0,203	41503 (1)	0,036599	369324	2500	1828417500
				45471 (2)	0,031951	335225	2700	

* В скобках обозначены спектральные линии, приведенные на рисунке 3а,б.

Таблица 2

Стоячие продольные волны в системе волновод-образец для области локализации деформации.
Геометрия резонансной области

№	$\Delta T, ^\circ C$	$\bar{T}, ^\circ C$	$\dot{\varepsilon}, \% \cdot c^{-1}$	$\nu, Гц^*$	L, м	h, усл. ед.	l, усл. ед.	S
I	40-180	110	0	86092 (3)	0,037286	1725	900	4663500
				93287 (4)	0,03441	1830	1700	
II	180-355	270	0,030	86290 (3)	0,0372	100	400	440000
				92960 (4)	0,034531	400	1000	
III	355-455	405	0,082	85593 (3)	0,037503	2324	1000	1562400
				93089 (4)	0,034483	1200	1950	
IV	455-510	480	0,141	85963 (3)	0,037342	1152	700	4664000
				92760 (4)	0,034605	840	900	
V	510-530	520	0,172	86161 (3)	0,037256	4642	1900	16707800
				92710 (4)	0,034624	4640	1700	
VI	530-570	550	0,197	86620 (3)	0,037058	65000	2050	162830000
				92600 (4)	0,034665	19720	1500	
VII	570-580	575	0,203	87822 (3)	0,036551	72306	2100	391842600
				92760 (4)	0,034605	96000	2500	

* В скобках обозначены спектральные линии, приведенный на рис. 2а,б.

Как показано в таблицах, ширина и высота спектральных линий изменяются в процессе высокотемпературного деформирования. Как следует из сопоставления спектральных данных на рисунках 3а, 3б, амплитуда спектральных линий возрастает более чем на два

порядка при переходе в область высокотемпературной деформации с высокой скоростью (например, $\nu = 0,203 \% c^{-1}$ для интервала VII), а площадь под спектральными максимумами изменяется не монотонным образом, как показано на рисунке 4.

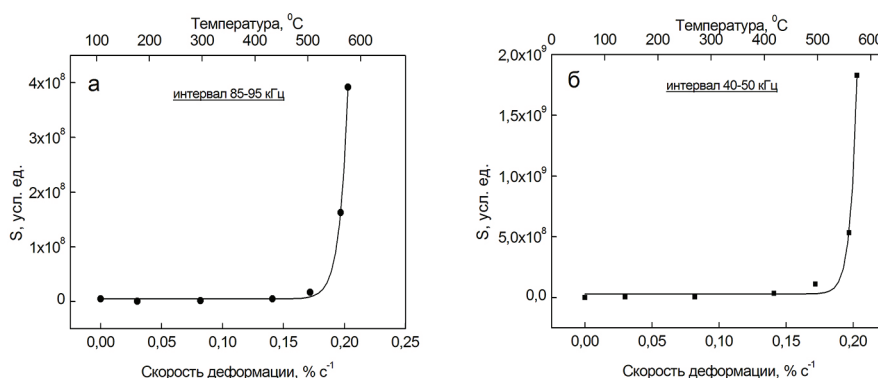


Рис. 4. Изменение площади под кривой спектральной плотности с ростом температуры в цикле при нагрузке 120 МПа: а — для продольных волн в диапазоне 85 – 95 кГц, б — для сдвиговых волн в диапазоне 40 – 50 кГц

4. Обсуждение экспериментов. Накопление деформации в алюминиево-магниевом сплав при нагреве до 550 °C и действии постоянной нагрузки 120 МПа осуществляется двояким образом: до критической температуры монотонным путем, а в области высоких температур — квазискачкообразным. Монотонному накоплению деформации с низкой скоростью (около 0,03 % c⁻¹) соответствует монотонный рост среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии, квазискачкообразному (с высокой скоростью около 0,2 % c⁻¹) — единичные сигналы среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии, формирующие высокоамплитудный пик в области высоких темпе-

ратур. В области низких температур монотонное накопление деформации контролируется преимущественно термически активируемым переползанием дислокаций, в высокотемпературной области накопление деформации контролируется преимущественно зернограницными процессами генерации полных решеточных дислокаций границами зерен [9].

Анализ спектральной плотности сигналов акустической эмиссии, полученной в области активного накопления деформации в алюминиево-магниевом сплаве, свидетельствует о перераспределении колебательной энергии первичного акустического сигнала по резонансным колебаниям стоячих сдвиговых (ди-

апазон 1, рис. 3б) и продольных (диапазон 2, рис. 3б) волн резонатора, геометрия которого соответствует области локализации деформации (проточки образца).

В спектре сигналов при монотонном накоплении деформации в области низких температур (интервал II, рис. 2) фактически не сформированы резонансы в выделенных частотных диапазонах 1,2 (рис. 3а). В то же время в области высоких температур (интервал VII, рис. 2) при квазискачкообразном накоплении деформации в резонаторе накапливается заметная энергия колебаний стоячих волн, как для сдвиговых, так и для продольных волн (диапазоны 1,2, рис. 3б).

В кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме, связанном с длиной стоячей волны, определяющей макроскопический масштаб корреляции. В то же время коррелированные деформационные сдвиги генерируют акустические сигналы, отвечающие условию когерентности, в результате интерференции которых формируется единичный акустический сигнал аномально высокой амплитуды. Эти сигналы компенсируют потери колебательной энергии стоячих волн в резонаторе, связанном с областью локализации деформации, что поддерживает корреляцию элементарных деформационных актов [10].

Заключение. Проведенный спектральный анализ сигналов акустической эмиссии показал, что в высокочастотном диапазоне (100–700 кГц) спектральная плотность мала, в то время как в низкочастотном (40–95 кГц) существенно выше. Это свидетельствует о том, что в системе образец — волновод происходит перераспределение энергии первичного высокочастотного акустического сигнала по низкочастотным резонаторам. Спектральная плотность акустической эмиссии представляет собой

острые резонансные линии, свидетельствующие о существовании резонансных объемов в пластически деформируемом материале.

Особенностью низкочастотных дискретных спектров сигналов акустической эмиссии для высокотемпературного квазискачкообразного накопления деформации является наличие двух частотных областей: область 1 — 40–50 кГц, область 2 — 85–95 кГц, в которых спектральная плотность существенно выше спектральной плотности шума. Геометрические параметры резонаторов были рассчитаны исходя из условия формирования стоячей волны $L = \kappa\lambda/2$, L — геометрический размер резонатора.

Резонансы для продольных длин волн в области 2 (85–95 кГц) и поперечных в области 1 (40–50 кГц) соответствуют геометрии деформируемой части образца длиной 30 мм, которая является областью локализации деформации. С ростом температуры в цикле экспоненциально увеличивается средняя мощность спектральной плотности для медианных частот двух спектральных областей 1, 2, что свидетельствует об увеличении колебательной энергии стоячих волн в объеме деформируемого материала. Однако форма (высота, ширина) спектральных линий выделенных областей (область 1: 40–50 кГц, область 2: 85–95 кГц) меняется не монотонным образом при высокотемпературном накоплении деформации.

Такой характер изменения формы спектральных линий может свидетельствовать об изменении геометрии резонансных деформируемых объемов материала (локализации пластического течения) в процессе высокотемпературного нагружения сплава Al — Mg. Локализация деформации в масштабе образца может свидетельствовать о макроскопической корреляции пластического течения деформируемого кристалла.

Библиографический список

1. Макаров С.В., Лысиков М.В. Накопление деформации в алюминий-магний-магний сплав в условиях деформационного структурного перехода // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2017. — №1. DOI: 10.14258/izvasu(2017)1-03.
2. Криштал М.М. Особенности образования полос деформации при прерывистой текучести // ФММ. — 1993. — Т. 75, №5.
3. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Взаимосвязь макролокализации деформации, прерывистой текучести и особенностей акустической эмиссии при деформировании алюминий-магний-магний сплавов // ФММ. — 1996. — Т. 81, № 1.
4. Криштал М.М., Мерсон Д.Л. Влияние геометрических параметров образца на механические свойства и акустическую эмиссию при прерывистой текучести в Al-Mg сплавах // ФММ. — 1991. — № 10.
5. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Денисов А.А., Гасанов М.Ф. Спектральный и динамический анализ пластических неустойчивостей при прерывистой ползучести алюминий-магний-магний сплава // ФТТ. — 2014. — Т. 58, №5.
6. Шибков А.А., Золотов А.Е., Желтов М.А., Гасанов М.Ф., Денисов А.А. Макролокализация пластической деформации при прерывистой ползучести алюминий-магний-магний сплава АМг6 // ЖТФ. — 2014. — Т.84, №4.
7. Марпл.-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. — М., 1990. — 584 с.

8. Макаров С.В., Плотников В.А., Лысиков М.В., Колубаев Е.А. Накопление деформации и акустическая эмиссия в условиях термомеханического нагружения алюминиево-магниевого сплава // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2015. — № 1/2. DOI: 10.14258/izvasu(2015)1.2-06.

9. Гудкин М.Ю., Овидько И.А., Скиба Н.В. Зернограничное скольжение и эмиссия решеточных дислокаций

в нанокристаллических материалах при сверхпластической деформации // ФТТ. — 2005. — Т. 47, № 9.

10. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. Макроскопическая корреляция элементарных деформационных актов в слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки ГЦК металлов // Известия вузов. Физика. — 2014. — Т. 57, № 4.