

УДК 669.71:539.382:620.179.17

*С.В. МАКАРОВ***, *В.А. ПЛОТНИКОВ***, *****, *А.И. ПОТЕКАЕВ**, *****, *Л.С. ГРИНКЕВИЧ**

АКУСТИЧЕСКАЯ ВОЛНОВАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ АКТОВ В СЛАБОУСТОЙЧИВОМ СОСТОЯНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ГЦК-МЕТАЛЛОВ

Проведенный анализ низкочастотного спектра акустической эмиссии при высокотемпературной пластической деформации алюминия свидетельствует, что его дискретный вид обусловлен перераспределением колебательной энергии первичного акустического сигнала по резонансным колебаниям стоячих волн резонаторов. В слабоустойчивой кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме. Линейные размеры этой области связаны с длиной стоячей волны, определяющей макроскопический масштаб корреляции. Коррелированные деформационные сдвиги генерируют акустические сигналы, в результате интерференции которых формируется единичный акустический сигнал аномально высокой амплитуды. В слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки активация элементарных пластических сдвигов может быть осуществлена в результате совместного действия статических сил, тепловых флуктуаций и динамических сил стоячих акустических волн.

Ключевые слова: слабоустойчивое состояние, корреляция деформации, акустическая эмиссия.

Введение

К настоящему времени накоплен большой информационный материал по специфическому деформационному поведению конденсированных систем в слабоустойчивом состоянии (например, [1–8]): по локализации деформации [9], скачкообразным деформационным эффектам [10], высокотемпературным деформационным скачкам и высокоамплитудным акустическим сигналам [7]. Анализ этой информации позволяет считать акустическую эмиссию фактором корреляции элементарных деформационных актов в слабоустойчивом состоянии конденсированной системы в процессах пластической деформации, активизирующей элементарные пластические сдвиги наряду с механическими напряжениями и тепловыми флуктуациями. Явление акустической эмиссии, сопровождающее обширный круг процессов, уже не может восприниматься только как пассивный акустический эффект.

В рамках модели автоакустической эмиссии были сформулированы некоторые положения об активной роли акустической эмиссии в процессах деформации и разрушения кристаллов [11]. Согласно модели автоакустической эмиссии [12], скачкообразная деформация и дискретная акустическая эмиссия свидетельствуют о пространственно-временном упорядочении движения дефектов в кристалле. В этом случае кристалл представляет собой автоколебательную систему, для которой характерно возбуждение колебаний. При этом микроскопические процессы происходят кооперативно и самосогласованно, способствуя синхронизации колебаний и возбуждению квазипериодических релаксационных колебаний. Синхронизация и самосинхронизация мод излучения фактически является интерференцией волн напряжений с различными частотами. В основе этих процессов лежит корреляция элементарных излучателей в неравновесной (активной) среде, приводящая к формированию коротких импульсов сжатия и растяжения. Длительность импульсов тем меньше, чем больше волн с различными частотами участвуют в интерференции [13]. Это означает, что разрушение представляет собой разрыв наиболее напряженных связей не только тепловыми, но и акустическими флуктуациями [13]. Будем полагать адекватность концепции активной роли акустической эмиссии в процессах пластической деформации кристаллической среды, находящейся в слабоустойчивом состоянии. Данные представления позволяют непротиворечиво объяснить основные эффекты, наблюдаемые в ходе пластического течения. Например, локализацию деформации в макроскопическом масштабе, связь пластических сдвигов с действием не только тепловых флуктуаций, но и локализованных акустических колебаний.

Цель данной работы – провести сопоставительный анализ акустической эмиссии и накопления деформации при нагреве ГЦК-металлов в условиях действия механических нагрузок.

Слабоустойчивое состояние и акустический фактор корреляции

Особое состояние кристаллической решетки, именуемое слабоустойчивым [1–8] и связанное с состоянием атомного ансамбля в поле механических напряжений и тепловых флуктуаций, со-

вместное действие которых позволяет преодолеть потенциальный барьер разрыва связи [7, 14], дополнив фактором, связанным с акустической эмиссией.

В условиях действия механического напряжения и температуры [14, 15] среднее время ожидания элементарного акта разрыва связи зависит от эффективной величины потенциального барьера, преодоление которого осуществляется термофлуктуационным путем. Величина барьера понижается работой внешних сил $\gamma\sigma$, локализованных на малом атомном ансамбле, поэтому может изменяться в широких пределах. Здесь σ – механическое напряжение, а γ – параметр. Таким образом, эффективный порог активации может значительно снижаться вплоть до нуля, отвечая особому слабоустойчивому к внешнему воздействию состоянию атомного ансамбля (близкое к надбарьерному движению). В таком состоянии кристаллической решетки пластическое течение связано с локальной слабой устойчивостью (или потерей устойчивости) относительно сдвига в зоне действия концентраторов напряжений [7], когда движение дислокационного сегмента осуществляется надбарьерно атермическим путем.

Локализация слабоустойчивого (или неустойчивого) состояния кристаллической структуры при пластической деформации обычно связывается с процессом самоорганизации дислокаций, проявляющейся в формировании линий и полос скольжения [16, 17]. При этом сопровождающая эволюцию структуры акустическая эмиссия отражает процессы самоорганизации, характеризует слабую устойчивость (или неустойчивость) и элементарные процессы в атомной подсистеме при внешнем воздействии [18].

Из приведенного выше следует, что макроскопический объем возможных элементарных источников акустической эмиссии должен стать, аналогично [12, 13], синхронизованным (или коррелированным) ансамблем излучателей. Очевидно, такая синхронизация может быть осуществлена волновым путем. Продуцируемый в ходе формирования одной деформационной полосы сигнал акустической эмиссии распространяется в виде волнового пакета, в котором фаза колебаний определяет направление (точнее, знак) смещения атомов из положения равновесия. Естественно, что эти динамические смещения накладываются на статические смещения атомов, обусловленные статическим полем напряжений.

Следует особо подчеркнуть, что локальное слабоустойчивое состояние кристаллической решетки является определяющим фактором для волновой синхронизации системы элементарных деформационных актов. В таком состоянии колебательное смещение акустической волны достаточно для активации дислокационного скольжения, фактически, атермического надбарьерного скольжения.

Это означает, что в выражении времени ожидания разрыва связи [7, 14] дополнительно к работе статических сил U_0 следует учитывать работу динамических сил U_d :

$$\tau(\sigma, T) = \tau \exp[(U_0 - \gamma\sigma - U_d)/kT],$$

где σ – механическое напряжение; γ – параметр; $\gamma\sigma$ – работа внешних сил.

Таким образом, эффективный порог активации уменьшается за счет тепловых флуктуаций, работы локализованных на структурном элементе статических сил и динамических сил акустической волны. Работа динамических сил акустического импульса оказывает возмущающее действие на совокупность систем скольжения, срабатывание которых будет зависеть от фазы колебаний в волновом пакете.

При высокотемпературной деформации ГЦК-металлов наблюдались два варианта накопления деформации при нагреве образцов в условиях действия механической нагрузки: монотонное и скачкообразное. Причем деформационные скачки представляют собой макроскопические деформационные акты, сопровождающиеся высокоамплитудными сигналами акустической эмиссии [7]. Из этого следует, что в условиях термомеханического воздействия потеря устойчивости кристаллической решетки в макроскопическом масштабе проявляется в виде деформационных скачков и высокоамплитудных сигналов акустической эмиссии. Элементарным деформационным актом при высокой температуре является формирование полосы деформации, представляющей собой выход на свободную или зернограничную поверхность большого количества дислокаций [18, 19].

Дислокационный ансамбль, формирующий деформационную полосу, может быть представлен как динамическая система [20], коллективное поведение которой связано с когерентным скольжением больших групп дислокаций. Анализ деформационных скачков в алюминии (аналогично и меди) (рис. 1) показал, что при формировании деформационной полосы мощность акустической эмиссии W прямо пропорциональна скорости деформации ($d\varepsilon/dt$) [7, 20].

Таким образом, выход на поверхность дислокационного ансамбля, представляющего собой систему элементарных когерентных излучателей, формирует акустический сигнал. Этот сигнал тем большей амплитуды, чем выше скорость накопления деформации. При увеличении температуры деформации происходит укрупнение полос деформации [21], что коррелирует с анализируемым на рис. 2 увеличением активационного объема.

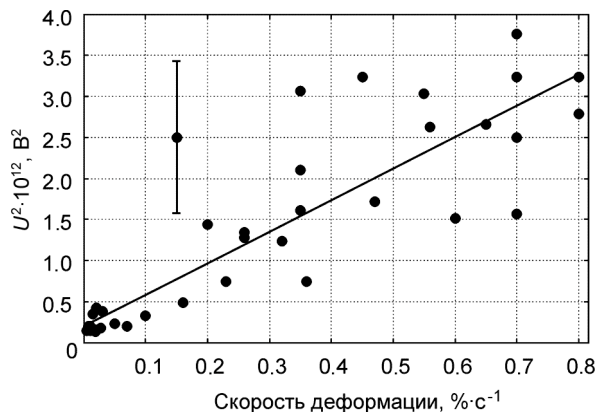


Рис. 1. Зависимость квадрата амплитуды акустического сигнала от скорости деформации алюминия на скачкообразном участке. Линейная аппроксимация зависимости осуществлена при коэффициенте корреляции 0.9

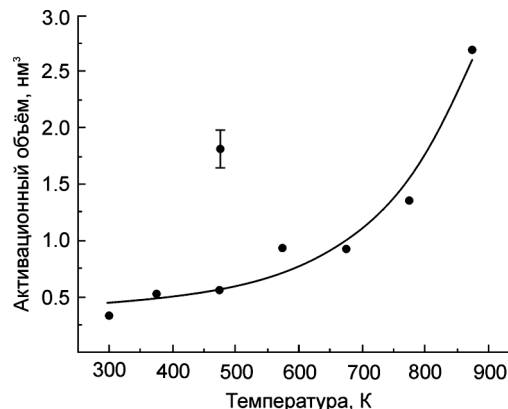


Рис. 2. Зависимость активационного объема элементарного деформационного акта от температуры термомеханического цикла

Макроскопическая величина деформационного скачка в проведенных экспериментах свидетельствует, что в этом акте участвует более чем одна деформационная полоса. То есть эффект корреляции в процессе макроскопического скачка должен охватывать систему деформационных полос в макроскопическом масштабе, а амплитуда акустического сигнала будет выступать в качестве меры корреляции.

Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии

Спектральный анализ колебательных процессов осуществлен с частой дискретизации исходных сигналов 10 МГц. Полученный спектр колебательных процессов системы образец – волновод свидетельствует, что даже в отсутствие источника акустической эмиссии формируются резонансные пики спектральной плотности. На рис. 3 показано, что в такой системе акустический спектр характеризуется в основном единичным пиком на частоте 35.7 кГц и низкочастотным широкополосным фоном спектральной плотности.

Из анализа спектра акустического шума системы образец – волновод следует дискретный характер спектральной плотности в отсутствие продуцирования сигналов акустической эмиссии. Это свидетельствует, что система образец – волновод представляет собой резонансную систему, состоящую из нескольких резонаторов, распределяющих колебательную энергию шумового возмущения по спектральным диапазонам в виде стоячих продольных и поперечных волн. Более того, при любой конфигурации образец – волновод в системе формируется акустическое поле, представляющее собой систему резонансных колебаний в виде совокупности стоячих продольных и поперечных волн, в которых концентрируется колебательная энергия шума.

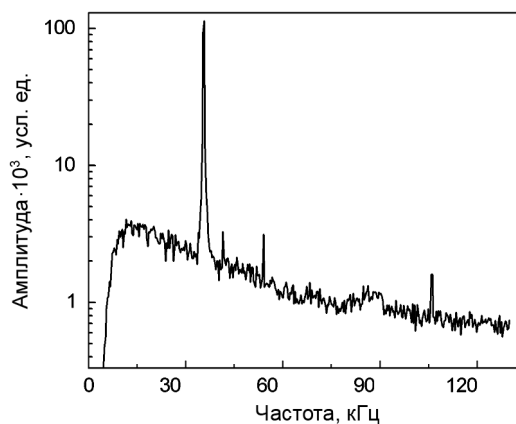


Рис. 3. Спектральная плотность шума системы образец – волновод

Рассмотрим экспериментальные данные по регистрации акустической эмиссии, накоплению деформации в алюминии в температурном интервале нагрева от комнатной до 600 °С при нагрузке 39 МПа (рис. 4). Накопление деформации осуществлялось двояко: до температуры 500 °С характер накопления монотонный (область 1 на рис. 4, б), после 500 °С – накопление деформации осуществлялось скачкообразно в виде последовательности

макроскопических деформационных актов, перемежающихся участками с монотонным накоплением деформации (область 2 на рис. 4, б). Сопоставляя рис.4, а и б, несложно видеть кардинальное изменение характера акустической эмиссии при переходе из температурной области 1 в область 2.

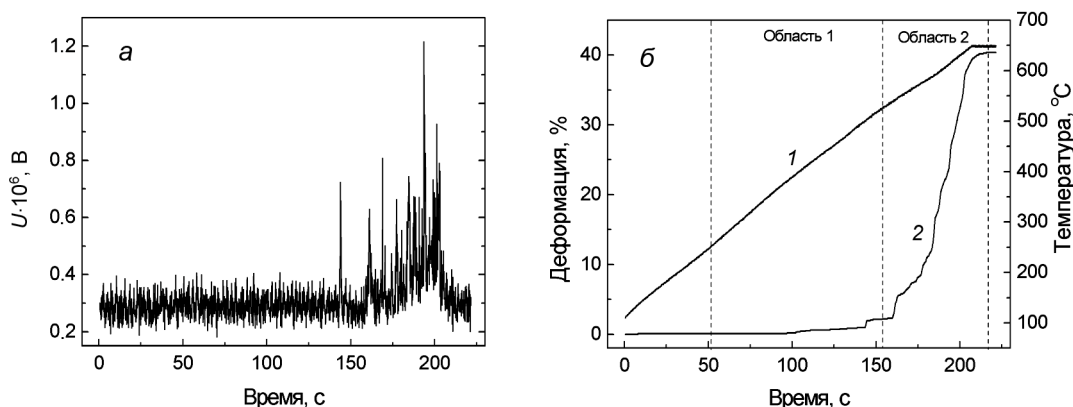


Рис. 4. Акустическая эмиссия (а) и накопление деформации (б) при нагреве алюминия в условиях действия механической нагрузки в 39 МПа: кр. 1 – температура в ходе нагрева; кр. 2 – монотонное и скачкообразное накопление деформации

Естественно, что такому характеру накопления деформации соответствует два вида спектров акустической эмиссии (рис. 5). На рис. 5, а представлен спектр сигналов акустической эмиссии, характерный для монотонного накопления деформации и монотонной акустической эмиссии. На рис. 5, б приведен спектр сигналов акустической эмиссии, характерный для скачкообразного накопления деформации и импульсной акустической эмиссии. Спектральная плотность сигналов в системе образец – волновод представлена системой дискретных линий, распределенных в низкочастотном диапазоне частот. Причем она существенно отличается от спектра шума пьезокерамики

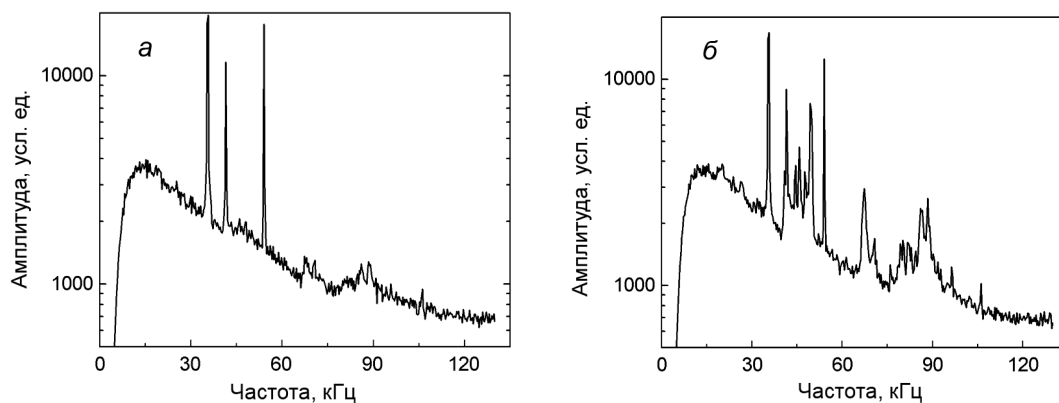


Рис. 5. Частотный спектр акустической эмиссии системы образец – волновод для монотонного (а) и скачкообразного (б) накопления деформации

и усилительного каскада регистрирующей системы, спектральная плотность которого представляет собой слабовозрастающую функцию с максимумом около 11 кГц. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии для монотонного накопления деформации представлена тремя спектральными линиями ниже 60 кГц и слабо выраженной областью около 90 кГц. В то же время спектральная плотность сигналов акустической эмиссии для скачкообразной области характеризуется существенным усложнением спектра, появлением новых спектральных линий, хорошо разрешимых, в том числе и около 90 кГц. В таблице приведены измеренные и рассчитанные параметры резонаторов системы образец – волновод для всей совокупности спектральных линий, характеризующих процесс накопления деформации в алюминии. Расчет геометрических параметров резонаторов осуществлялся из условия стоячей волны $2L = k\lambda$ (λ – длина волны). В системе образец – волновод важен резонатор, связанный с образцом, который представляет собой участок волновода длиной 30 мм. Он выполнен как концентратор напряжений, на котором локализуется деформация. Из данных таблицы следует, что на продольных волнах отвечающий этому участку резонатор, ви-

димо, формирует стоячие волны на частотах 67.4, 86 и 88.5 кГц. Наиболее вероятно возбуждение стоячих сдвиговых волн в этом резонаторе на первых гармониках.

Параметры акустических резонаторов системы образец – волновод для области 2

Номер резонатора	Частоты, Гц	L , мм, продольная волна, $k = 1, V = 6420$ м/с	L , мм, сдвиговая волна, $k = 1, V = 3040$ м/с	L , мм, сдвиговая волна, $k = 1, V = 2530$ м/с
1	35700	89.9	42.6	35.4
2	41500	77.3	36.6	30.5
3	44500	72.1	34.2	28.4
4	45800	70.1	33.2	27.6
5	47900	67.0	31.7	26.4
6	49400	65.0	30.8	25.6
7	54000	59.4	28.1	23.4
8	67400	47.6	22.6	18.8
9	86000	37.3	17.7	14.7
10	88500	36.3	17.2	14.3

Дискретный характер спектральной плотности сигналов акустической эмиссии свидетельствует о том, что рассматриваемая система образец – волновод представляет собой резонансную систему, состоящую из нескольких резонаторов. Они распределяют колебательную энергию как акустического шума, так и первичных элементарных излучателей акустической эмиссии по спектральным диапазонам в виде стоячих продольных и поперечных волн. Это означает, что представленные спектры акустической эмиссии являются вторичным эффектом по отношению к первичному акустическому сигналу. Источником акустической эмиссии является выход на поверхность ансамбля дислокаций одной системы скольжения, формирующих одну полосу деформации [16].

Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии в ходе монотонного накопления деформации представлена в основном в виде трех резонансных пиков. В ходе скачкообразного накопления деформации хорошо разрешается максимум спектральной плотности на частоте около 90 кГц, характеризующий формирование стоячих волн в области локализации деформации. Характерно, что на деформируемом участке наблюдается заметная спектральная плотность, свидетельствующая о формировании достаточно устойчивой стоячей волны. Таким образом, при скачкообразном накоплении деформации в резонаторе, представляющем собой область локализации деформации, накапливается заметная энергия колебаний стоячих волн.

Акустический волновой фактор самоорганизации элементарных деформационных актов

Понятие слабоустойчивого состояния кристаллической решетки подразумевает, что в таком состоянии кристаллическая система представляет собой активную среду [13, 22]. Это означает, что при пластическом течении кристаллическая решетка представляет собой колебательную систему, возбужденную в режиме стоячей волны. Активация элементарного деформационного акта является результатом действия как тепловых флуктуаций [7, 14], так и акустических колебаний [8]. Так как стоячая волна имеет макроскопический масштаб, то и активация элементарных деформационных актов осуществляется в макроскопическом масштабе. Это происходит в некоторой совокупности плоскостей скольжения, благоприятно ориентированных по отношению к колебательным смещениям стоячей волны. В условиях слабоустойчивого состояния кристаллической решетки колебательные смещения активируют элементарные сдвиги, которые представляют собой коррелированный макроскопический ансамбль элементарных деформационных актов, формирующих макроскопический скачок деформации. Таким образом, стоячая акустическая волна определяет макроскопический масштаб корреляции элементарных деформационных сдвигов. В то же время стоячая волна естественно определяет и область локализации деформации, которую можно представлять [23] как область концентрации источников акустической эмиссии. В свою очередь, коррелированный ансамбль элементарных деформационных актов формирует единичный акустический сигнал, являющийся результатом интерференции некоторого множества элементарных акустических сигналов, которые удовлетворяют условию когерентности. В этой связи система оказывается жестко синхронизированной как в отношении элементарных деформационных актов, так и в отношении формируемых акустических сигналов.

Заключение

В слабоустойчивом состоянии кристаллической решетки активация элементарных пластических сдвигов может быть осуществлена в результате совместного действия статических сил, тепловых флуктуаций и динамических сил стоячих акустических волн.

Проведенный анализ низкочастотного спектра акустической эмиссии при высокотемпературной пластической деформации алюминия свидетельствует, что его дискретный вид обусловлен перераспределением колебательной энергии первичного акустического сигнала по резонансным колебаниям стоячих волн резонаторов. В слабоустойчивой кристаллической среде колебания стоячей волны активируют элементарные деформационные сдвиги в некотором объеме, который связан с длиной стоячей волны, определяющей макроскопический масштаб корреляции. Коррелированные деформационные сдвиги генерируют акустические сигналы, в результате интерференции которых формируется единичный акустический сигнал аномально высокой амплитуды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потекаев А.И., Клопотов А.А., Кулагина В.В., Гюнтер В.Э. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 10. – С. 61–67.
2. Потекаев А.И., Дмитриев С.В., Кулагина В.В. и др. Слабоустойчивые длиннопериодические структуры в металлических системах / под ред. А.И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 308 с.
3. Потекаев А.И., Кулагина В.В. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 8. – С. 5–23.
4. Старостенков М.Д., Потекаев А.И., Сеница Н.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 2. – С. 41–48.
5. Старостенков М.Д., Потекаев А.И., Сеница Н.В. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 42–47.
6. Потекаев А.И., Макаров С.В., Плотников В.А. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 47–54.
7. Потекаев А.И., Макаров С.В., Плотников В.А. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 23–30.
8. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 7. – С. 81–86.
9. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Горбатенко В.В. // ЖТФ. – 1995. – Т. 65. – № 5. – С. 91–103.
10. Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. // ФТТ. – 2008. – Т. 50. – № 5. – С. 815–819.
11. Бовенко В.Н. // ДАН СССР. – 1983. – Т. 271. – № 5. – С. 1086–1090.
12. Бовенко В.Н. // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 1. – С. 129–137.
13. Бовенко В.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физич. – 1986. – Т. 50. – № 3. – С. 509–512.
14. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
15. Слуцкер А.И. // ФТТ. – 2004. – Т. 46. – № 9. – С. 1606–1613.
16. Малыгин Г.А. // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 9. – С. 979–1010.
17. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 230 с.
18. Плотников В.А., Макаров С.В. // ФММ. – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 424–430.
19. Криштал М.А., Мерсон Д.Л., Кацман А.В., Выбойщик М.А. // ФММ. – 1988. – Т. 66. – № 3. – С. 599–604.
20. Лебедин М.А., Дунин-Барковский Л.Р. // ЖЭТФ. – 1998. – Т. 113. – № 5. – С. 1816–1829.
21. Розенберг В.М. Ползучесть металлов. – М.: Металлургия, 1967. – 276 с.
22. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 4. – С. 14–18.
23. Никитин Е.С., Семухин Б.С., Зуев Л.Б. // Письма в ЖТФ. – 2008. – Т. 34. – № 15. – С. 70–74.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия Поступила в редакцию 19.05.14.

**Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия

***Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

****Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова

Томского государственного университета, г. Томск, Россия

E-mail: plotnikov@phys.asu.ru; potekaev@spti.tsu.ru

Макаров Сергей Викторович, к.ф.-м.н., доцент каф. общей и экспериментальной физики;

Плотников Владимир Александрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. общей и экспериментальной физики АлтГУ, ведущ. науч. сотр. ИФПМ СО РАН;

Потекаев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, директор;

Гринкевич Лариса Сергеевна, профессор, директор ВШБ ТГУ.