

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭВОЛЮЦИЮ ДЕФЕКТНОЙ СУБСТРУКТУРЫ И ПОВЕРХНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Д. В. Загуляев, С. В. Коновалов, В. Е. Громов, Ю. Ф. Иванов*

Сибирский государственный индустриальный университет

**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Поступила в редакцию 20.10.2010 г.

Аннотация: методами дифракционной и сканирующей электронной микроскопии проведены исследования изменения дислокационной субструктуры и фрактографии поверхности разрушения при ползучести алюминия в магнитном поле. Показано, что наложение магнитного поля приводит к более высокой степени дефектности структуры и интенсификации в зоне разрушения процесса формирования дислокационных петель. Установлено, что в присутствии магнитного поля формирующийся рельеф поверхности разрушения обладает меньшими средними размерами по сравнению с обычными условиями эксперимента.

Ключевые слова: магнитное поле, дислокационная субструктура, поверхность разрушения, ползучесть, алюминий.

Abstract: analyses of the dislocation substructure and fracture surface formed in aluminum at the creep in the magnetic field are carried out by the methods of diffraction and scanning electron microscopy. It is shown that the imposition of magnetic field leads to the higher degree of the defect structure and intensification in the zone of the fracture of the process of dislocation loops shaping. It is established that in the presence of magnetic field the forming relief of the surface of destruction possesses smaller average sizes in comparison with the normal conditions for experiment

Key words: magnetic field, dislocation substructure, fracture surface, creep, aluminum.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие техники и современных технологий приводят к созданию мощных энергетических установок, формирующих вокруг себя магнитные и электрические поля. Поскольку большинство конструкций, механизмов работают в условиях механических нагрузок (например, ползучесть), приводящих к разрушению, для анализа ресурса их работы необходимо изучение поведения металлов в условиях внешних энергетических воздействий.

В последнее десятилетие проведено большое количество исследований и установлено, что даже энергетически слабое магнитное поле с индукцией до 1 Тл, воздействующее на твердые тела, подвергаемые деформированию, способно существенно изменять как кинетику протекания процесса, так и интегральные прочностные и пластические характеристики [1—3]. Приро-

ду этого явления принято связывать со спиновой конверсией в примесных центрах, приводящей к перестройке их электронной структуры и соответствующему снижению их взаимодействия с дислокациями [4, 5]. Это облегчает перемещение дислокаций (пластифицирует материал), уменьшая связанные со средним пробегом между препятствиями характеристики деформации, в частности увеличивая скорость ползучести.

К сожалению, исследований, посвященных установлению влияния магнитного поля на процесс пластической деформации поликристаллических металлов, недостаточно [6]. Для понимания физической природы разрушения металлов при ползучести в условиях воздействия магнитным полем необходимым является проведение комплекса исследований, включающего исследования эволюции дислокационной субструктуры при различной степени деформации и рельефа поверхности разрушения, что и являлось целью работы.

© Загуляев Д. В., Коновалов С. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф., 2010

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Поликристаллический технически чистый алюминий марки А 85 был выбран в качестве материала для исследований. Образцы имели форму пластин с размерами рабочей части $150 \times 5 \times 0,46$ мм³. Предварительная подготовка исходной структуры заключалась в рекристаллизационном отжиге при 770 К в течении 2 часов. В дальнейшем образцы при комнатной температуре подвергали ползучести с постоянным растягивающим напряжением $\sigma = 65$ МПа до разрушения ($\epsilon \approx 22$ %). Первая половина из них (15 образцов) деформировалась в условиях внешнего магнитного поля с индукцией 0,3 Тл, вторая половина — без него.

Исследования структуры образцов осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии фольг на просвет. Фольги готовили из объема материала, расположенного в центральной части образца (при $\epsilon \approx 15$ %), и из прилегающего к зоне разрушения (при $\epsilon \approx 22$ %). Исследования поверхности разрушения, осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии с помощью прибора

«SEM 515 Philips». Параметры структуры материала и поверхности разрушения определяли, используя методы стереологии [7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛА, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Анализ субструктуры, формирующейся в алюминии при ползучести ($\epsilon = 15$ %) показал, что независимо от того, существовало внешнее магнитное поле или нет, наблюдается зеренно-субзеренная (блочная) структура. Средние размеры блоков не зависят от условия испытаний и составляют: для изотропных — $D = 1,6$ мкм; для анизотропных — продольные размеры $D = 0,65$ мкм, поперечные $L = 1,5$ мкм; коэффициент анизотропии $k = L/D = 2,3$.

В объеме блоков выявлена разнообразная дислокационная субструктура: хаотическая, сетчатая, ячеистая, а также дислокационные петли (рис. 1).

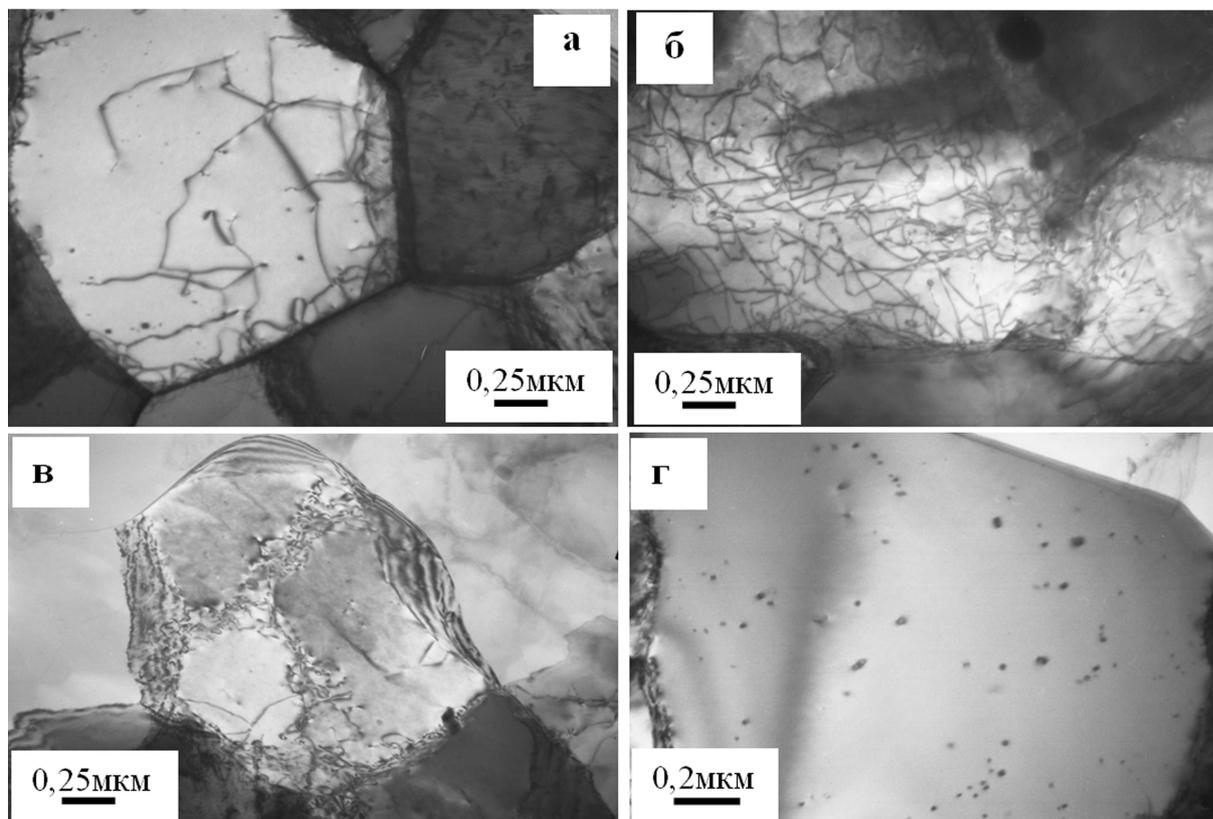


Рис. 1. Типы дислокационных субструктур, формирующихся в алюминии при ползучести: а — хаотическая; б — сетчатая; в — ячеистая; г — дислокационные петли

В качестве параметров, характеризующих дислокационную субструктуру, использовали величину скалярной плотности дислокаций и объемную долю типа субструктуры. Результаты количественного анализа дислокационной субструктуры представлены на рис. 2 и 3.

Анализируя результаты, приведенные на рисунках 2 и 3, можно отметить, что независимо от условия проведения эксперимента (в магнитном поле или без него), основным типом дислокационной субструктуры является хаотическая дислокационная субструктура. Ее объемная доля составляет 72 и 77 % для $\epsilon = 22$ и 15 % в отсутствие поля, соответственно. Более явные отличия обнаруживаются при сопоставлении скалярной плотности дислокаций и дислокационных петель: ползучесть привела к увеличению более чем в 3 раза величины ска-

лярной плотности дислокаций и формированию дислокационных петель. При этом значения обоих параметров дислокационной субструктуры выше в алюминии, деформированном в присутствии магнитного поля. Отметим, что чем выше плотность дислокационных петель, тем больше степень закрепления дислокаций и тем выше прочность материала [8].

В объеме материала, прилегающего к зоне разрушения, также выявлены хаотическая, сетчатая, ячеистая дислокационные структуры и дислокационные петли. Независимо от действия магнитного поля основной является хаотическая дислокационная структура (рис. 2).

Исследования структуры зоны разрушения ($\epsilon = 22\%$) показали, что существенным образом магнитное поле оказывает влияние на плотность дислокационных петель: ползучесть в

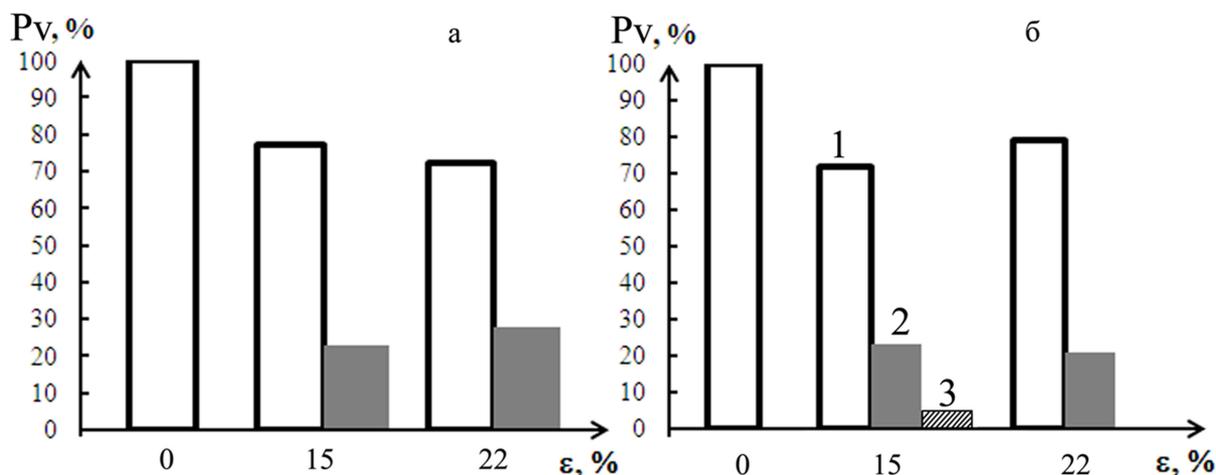


Рис. 2. Распределения объемной доли типов дислокационных субструктур в зависимости от величины деформации без магнитного поля (а) и при $B = 0,3$ Тл (б): 1 — хаотическая, 2 — сетчатая, 3 — ячеистая дислокационные субструктуры

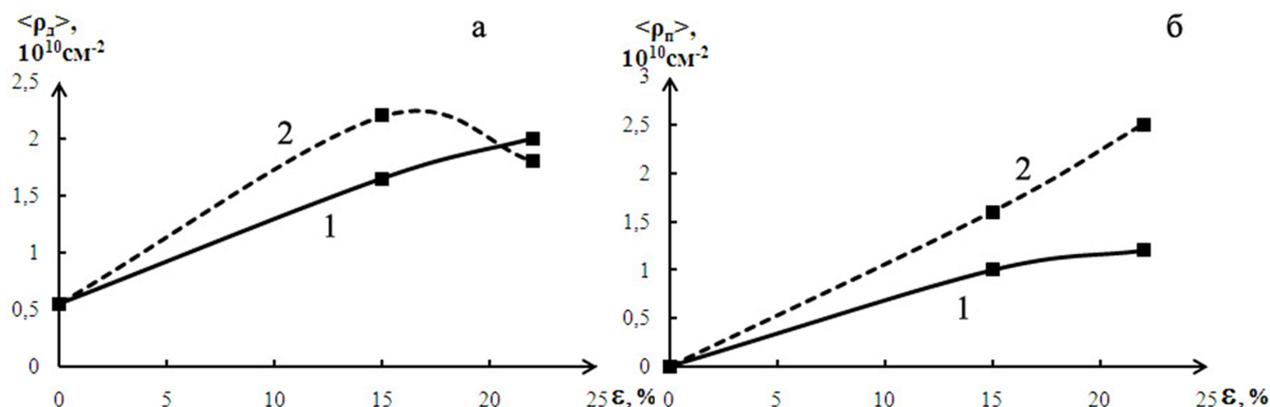


Рис. 3. Зависимости средней скалярной плотности дислокаций (а) и дислокационных петель (б) от величины деформации без магнитного поля (кривая 1) и при $B = 0,3$ Тл (кривая 2)

присутствии внешнего магнитного поля приводит к формированию структуры, плотность дислокационных петель в которой в 2 раза выше, чем при ползучести в обычных условиях (рис. 3). Очевидно, что эти петли созданы в результате коагуляции в диски точечных дефектов — вакансий или межузельных атомов, порожденных пластической деформацией.

Таким образом, внешнее магнитное поле приводит к интенсификации процесса образования вакансий и межузельных атомов при ползучести алюминия. Присутствие в материале дислокационных петель, как и дислокаций при достаточно высокой их плотности приводит к повышению его прочности [8].

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЯ, ФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Макроскопический вид поверхности излома плоского образца алюминия, разрушенного при растяжении в условиях ползучести, приведен на рис. 4. Выявляются две зоны – волокнистая зона и зона среза. Этот факт указывает на то, что разрушение алюминия происходило в условиях стабильного роста трещины. Основную площадь поверхности разрушения занимает волокнистая зона, сформированная ямками разрушения, представляющими собой половину микропоры, через которую прошло разрушение. Зона среза в образце, разрушенном в обычных условиях, занимает незначительную (порядка 10 %) часть поверхности разрушения (рис. 4, а) и более выражена в образце, разрушенном в условиях внешнего магнитного поля (порядка 30 %) (рис. 4, б).

Типичные для испытанных образцов фрактотграммы, демонстрирующие ямки разрушения, приведены на рис. 5. Вблизи ямок и на их внутренних поверхностях видны волнистые тонкие линии (линии указаны стрелками).

Это свидетельствует о том, что рост ямок происходит путем скольжения материала по многим действующим системам. Следовательно, независимо от методики испытания на ползучесть, поверхности изломов алюминия являются вязкими с большой плотностью полос скольжения и глубокими ямками, свидетельствующими о высокой локальной пластичности материала.

Деформация алюминия в условиях ползучести приводит к формированию поверхности разрушения с широким диапазоном размеров ямок вязкого излома (рис. 5). Выполненный в настоящей работе статистический анализ поверхности разрушения показал, что средний размер (диаметр) ямок вязкого излома зависит как от условий проведения эксперимента, так и от места их формирования (волокнистая зона или зона среза). А именно, в зоне волокнистого излома при ползучести без магнитного поля средний размер ямок вязкого излома 3,4 мкм; ползучесть в условиях внешнего магнитного поля приводит к уменьшению среднего размера ямок вязкого излома более чем в 2 раза (1,5 мкм). Одновременно с этим уменьшается и интервал существования размеров ямок: в экспериментах без магнитного поля размер ямок изменялся в пределах от 1 до 9 мкм; присутствие магнитного поля приводит к существенному уменьшению предельных размеров ямок (0,25...5 мкм).

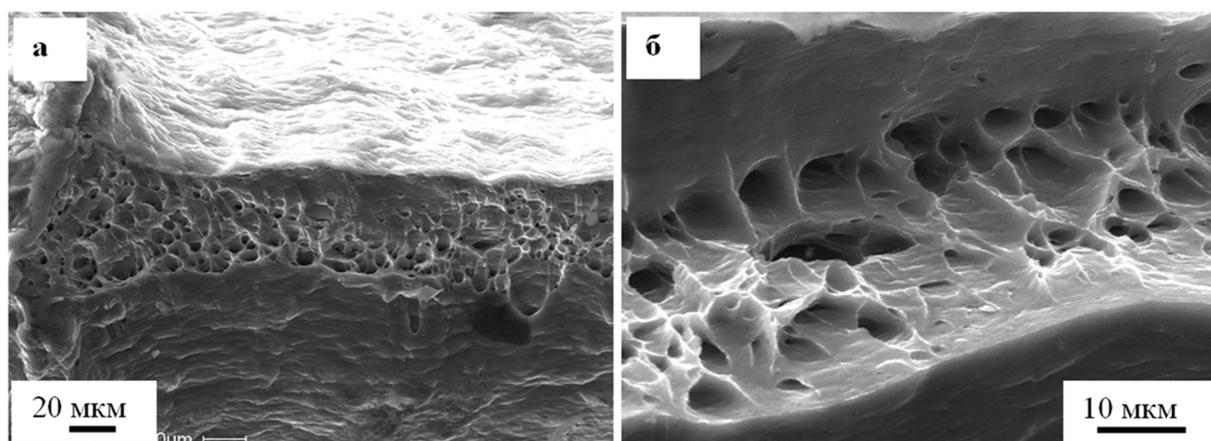


Рис. 4. Фрактотграммы поверхности разрушения. Ползучесть в присутствии внешнего магнитного поля (б) и без него (а)

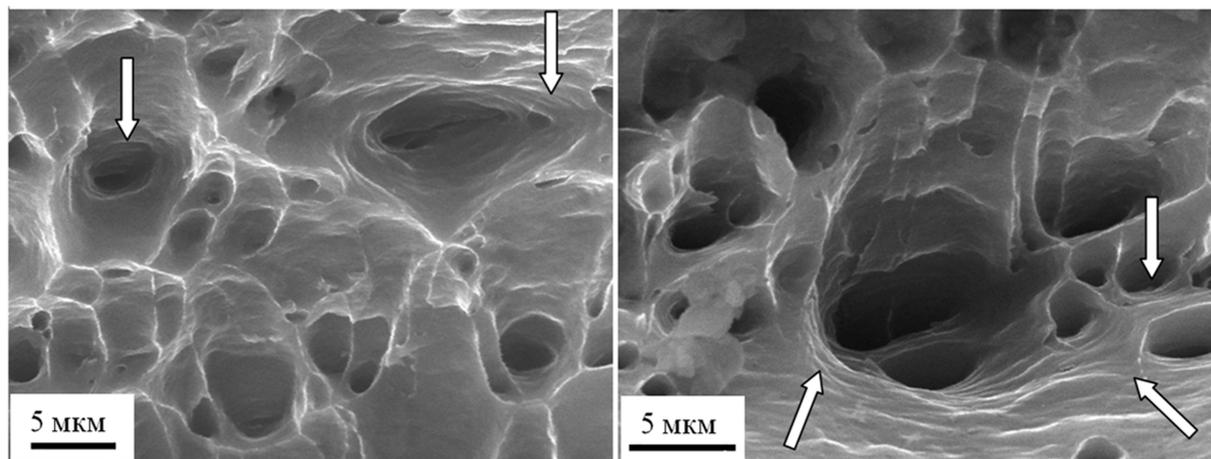


Рис. 5. Фрактограммы, демонстрирующие ямки разрушения

Зона среза в исследованных образцах также содержит ямки вязкого излома (ямки сдвига) (рис. 4). Проведенные количественные исследования показали, что в этом случае средние размеры ямок вязкого излома независимо от условий проведения экспериментов несколько меньше ямок вязкого излома, формирующихся в зоне волокнистого излома. А именно, при испытаниях без магнитного поля средние размеры ямок вязкого излома 1,75 мкм (минимальные размеры 0,5 мкм; максимальные — 4 мкм); при разрушении образцов в присутствии магнитного поля средние размеры ямок вязкого излома 1,1 мкм (минимальные размеры 0,25 мкм; максимальные — 3,75 мкм).

Форму и глубину ямок (микропор) можно связать (при условии испытания одного материала и идентичной схемы нагружения) с вязкостью разрушения. Глубокие конические ямки часто наблюдаются при разрушении очень пластичных материалов [9]. Считается [10], что повышение трещиностойкости сопровождается увеличением глубины ямок на поверхности изломов. Если предположить, что глубина ямок вязкого излома пропорциональна их размеру, то можно заключить, что наложение внешнего магнитного поля способствует некоторому снижению вязкости разрушения алюминия в условиях ползучести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные в работе исследования технически чистого алюминия показали, что испытания в присутствии магнитного поля приводят к большому накоплению скалярной плотности дислокаций, формирующих, преимущественно,

структуру дислокационного хаоса, к более развитому процессу формирования дислокационных петель. Исследования зоны разрушения показали, что испытания в присутствии магнитного поля сопровождаются интенсификацией процесса формирования дислокационных петель, способствуя повышению прочности материала. Методом сканирующей электронной микроскопии, установлено, что в присутствии магнитного поля формирующийся рельеф поверхности разрушения (ямки вязкого разрушения) обладает меньшими средними размерами, по сравнению с обычными условиями эксперимента. Это позволяет заключить, что магнитное поле приводит к некоторому снижению вязкости разрушения технически чистого алюминия при деформации в условиях ползучести, оказывая влияние на состояние дефектной субструктуры объема и поверхностного слоя материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.» (гос. контракт № П411).

ЛИТЕРАТУРА

1. Альшиц В. И. Магнитопластический эффект: основные свойства и физические механизмы / В. И. Альшиц [и др.] // Кристаллография. — 2003. — № 5. — С. 826—854.
2. Головин Ю. И. Магнитопластичность твердых тел (Обзор) / Ю. И. Головин // ФТТ. — 2004. — № 5. — С. 769—803.
3. Альшиц В. И. Магнитопластический эффект в монокристаллах алюминия / В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Е. А. Петржик // ФТТ. — 1992. — № 1. — С. 155—158.

4. Альшиц В. И. Деформация кристаллов LiF в постоянном магнитном поле / В. И. Альшиц [и др.] // ФТТ. — 2000. — № 2. — С. 270—272.

5. Иванова О. А. Влияние периодически зависящих от времени магнитных полей на заселенности спиновых состояний радикальных пар / О. А. Иванова [и др.] // Вестник ВГУ, серия: Физика. Математика. — 2008. — № 2. — С. 16—19.

6. Загуляев Д. В. Ползучесть поликристаллического Al в постоянном магнитном поле / Д. В. Загуляев, С. В. Коновалов, В. Е. Громов // Вестник ЧелГУ. — 2009. — № 24. — С. 49—53.

7. Чернявский К. С. Стереология в металлургии / К. С. Чернявский. — М.: Металлургия, 1977. — 208 с.

8. Фридель Ж. Дислокации / Ж. Фридель. — М.: Мир, 1967. — 644 с.

9. Фрактография и атлас фрактограмм // Справ. изд. Пер. с англ. / Под ред. Дж. Феллоуза. — М.: Металлургия, 1982. — 490 с.

10. Иванова В. С. Количественная фрактография. Усталостное разрушение / В. С. Иванова, А. А. Шанявский. — Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение, 1988. — 400 с.

Загуляев Д. В., аспирант кафедры физики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Тел.: (3843) 78-43-67

Коновалов С. В., кандидат технических наук, доцент кафедры физики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru, konovserg@gmail.com

Тел.: (3843) 78-43-67

Громов В. Е., доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой физики, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Тел.: (3843) 46-22-77

Иванов Ю. Ф., доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики, Томский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: yufi@mail2000.ru

Тел.: (3822) 49-17-13

Zagulyaev D. V., Postgraduate student of physics department, Siberian state university of industry

E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

Тел.: (3843) 78-43-67

Konovalov S. V., Candidate in technical sciences, assistant of professor physics department, Siberian state university of industry

E-mail: konovalov@physics.sibsiu.ru, konovserg@gmail.com

Тел.: (3843) 78-43-67

Gromov V. E., Doctor of physics and mathematics, professor, head of physics department, Siberian state university of industry

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Тел.: (3843) 46-22-77

Ivanov Y. F., Doctor of physics and mathematics, professor of physics department, Tomsk state university of architecture and building

E-mail: yufi@mail2000.ru

Тел.: (3822) 49-17-13