

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Старикова Сергея Анатольевича
«Деформационно-индуцированная сегрегация в аустенитных сплавах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук,
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Старикова С.А. посвящена исследованию процессов сегрегации, проходящих в условиях интенсивной пластической деформации (ИПД), способной влиять как на фазовые, так и на структурные превращения во многих сплавах, подвергнутых ИПД. Наблюдающиеся при этом атомное расслоение и деформационно-индуцированные сегрегации (ДИС) изменяют физические и механические свойства этих материалов.

Изучению ДИС посвящено немало как экспериментальных, так и теоретических статей. Однако до сих пор не было установлено место локализации ДИС в деформируемых материалах. Существующие на сегодняшний момент теоретические модели для описания ДИС ограничиваются двухкомпонентными сплавами, в которых в качестве главного фактора сегрегации рассматриваются направленные потоки неравновесных вакансий, генерируемых в процессе деформации. Однако в них не рассмотрены возможные потоки междоузельных атомов, учет которых становится важным при температурах деформации, близких к комнатным. А поскольку имеющиеся теоретические модели не распространены на случай трехкомпонентного сплава, то это также затрудняет и прямое сопоставление теоретических результатов с экспериментальными. В связи с этим, рецензируемая диссертационная работа является, безусловно, актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Рецензируемая диссертационная работа Старикова С.А. хорошо структурирована, все ее разделы логически связаны между собой. Представленные результаты соответствуют поставленной цели и сформулированным задачам исследования.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Во введении сформулированы актуальность работы, ее цели и задачи.

В первой главе автором представлен подробный литературный обзор, посвященный экспериментальному и теоретическому изучению процессов ДИС, в котором большое внимание уделено работам, посвященным генерации междоузельных атомов при деформации. Поскольку в диссертационной работе проводится параллель между процессами ДИС и радиационно-индуцированной сегрегацией (РИС), в литературном обзоре уделено также внимание обсуждению статей, посвященных экспериментальному и теоретическому изучению процессов сегрегации, наблюдаемых при облучении.

Вторая глава посвящена экспериментальному анализу мест локализации ДИС никеля на примере аустенитного сплава Х12Н30. Полученные результаты по приграничному дифракционному контрасту электронно-микроскопических изображений позволяют сделать обоснованный вывод о том, что при ИПД имеет место обогащение приграничных областей исследуемого сплава никелем.

В третьей главе рассмотрены вопросы теоретического описания процессов ДИС в аустенитных сталях. Исходно для анализа равновесных сегрегаций на границах зерен (ГЗ) применен метод молекулярной динамики (МД) с целью определения термодинамических стимулов образования сегрегаций в ГЦК-сплаве Fe-30Ni с использованием ЕАМ-потенциалов, хорошо апробированных для описания системы железо-никель. Расчеты показали, что атомы никеля не имеют собственных термодинамических стимулов для образования равновесной сегрегации на ГЗ. Отсюда сделан правомерный вывод о том, что для описания ДИС при ИПД необходимо использовать теорию неравновесных сегрегаций. Поэтому в третьей главе рассмотрена далее теоретическая модель неравновесной сегрегации при ИПД. Модель включает в

себя систему уравнений для диффузионных потоков деформационно-индуцированных точечных дефектов (ТД) (вакансий и междуузельных атомов) на стоки, которыми в рассматриваемом нами случае являются ГЗ, аналогично случаю образования приграничных атомных сегрегаций в процессе облучения высокоэнергетическими частицами.

Четвертая глава посвящена теоретическому исследованию влияния на процессы ДИС основных параметров (температуры, степени и интенсивности деформации, темпа генерации ТД, скорости ГЗ, а также состава сплава) на примере системы Fe-Cr-Ni. Показано, при ИПД ГЗ обогащаются никелевой компонентой и обедняются железом и хромом, что согласуется с известными экспериментальными данными. При этом учет движения ГЗ не приводит к подавлению приграничных сегрегационных процессов, в том числе и при комнатной температуре. Было установлено, что при повышении температуры эффект ДИС существенно понижается вплоть до его полного исчезновения, что также согласуется с данными эксперимента. Показано, что зависимости усредненных значений концентрации никеля и ширины обогащенной никелем зоны от скорости генерации ТД имеют характерный максимум в области средних значений скоростей генерации, что определяется конкуренцией между процессами сегрегации и рекомбинации ТД.

В заключительной пятой главе представлены результаты численного моделирования кинетики формирования сегрегаций на ГЗ при ИПД и в случае радиационного облучения. Показано, что временные зависимости усредненных значений концентрации никеля в случае как движущихся, так и неподвижных ГЗ могут носить немонотонный характер, предсказываемый не только при облучении, но и при деформации. В заключении резюмированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная значимость диссертационной работы Старикова С.А. заключается в том, что экспериментально доказана приграничная локализация ДИС никеля в austenитной стали. Предложена теоретическая модель ДИС, распространенная на случай трехкомпонентного сплава в условиях ИПД.

Исследованы процессы перераспределения атомов легирующих элементов и образования сегрегаций никеля при ИПД в стабильных austenитных сплавах типа Fe-Cr-Ni.

В практическом плане важно, что ДИС и РИС на ГЗ описываются сходными закономерностями, что позволяет проводить прогнозирование РИС в различных реакторных сталях с помощью данных по ДИС, полученных в условиях ИПД.

Результаты выполненной Старикиным С.А. диссертационной работы доложены на 7-ми престижных российских и международных конференциях и получили высокую оценку специалистов. Они опубликованы в 14 печатных работах, из них 4 в журнале «Физика металлов и металловедение», входящем в перечень изданий рекомендуемых ВАК РФ.

Автореферат диссертации написан четко и ясно и адекватно отражает содержание диссертации.

Достоверность полученных результатов, обоснованность положений и выводов по работе обеспечивается использованием разработанного ранее и апробированного в Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского ГНЦ РФ пакета программ RIS, предназначенного для решения сегрегационных задач в процессе облучения высокоэнергетическими частицами, а также согласием полученных в диссертации данных с результатами известных из литературы экспериментов.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В пятой главе при исследовании кинетики РИС использовалась скорость генерации ТД, равная 10^{-4} сна/с. При этом не указано, какому облучению соответствует выбранная скорость генерации ТД.

2. Поскольку атомы компонентов сплава Fe-Cr-Ni имеют близкие размеры, то уместно предположить, что атомы никеля образуют смешанные гантели с

междоузельными атомами хрома и железа. Однако в диссертационной работе энергии связи смешанных гантелей не были приняты во внимание.

3. В параграфах 4.1 и 4.2 при описании профилей концентраций компонентов сплава следовало бы пояснить, что выбор температуры деформации, равной 400 К, определялся наличием соответствующих экспериментальных данных.

4. Поскольку экспериментально был исследован также сплав Х12Н40, было бы уместным дополнить приведенные в диссертации результаты профилями концентраций компонентов этого сплава.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки рецензируемой работы.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния: по формуле специальности, области исследования и отрасли физико-математических наук.

Диссертационная работа Старикова С.А. является законченной научно-исследовательской работой, в которой получен ряд принципиально новых результатов, свидетельствующих о серьезной научной и практической значимости работы. Предложена теоретическая модель ДИС на случай трехкомпонентного сплава в условиях ИПД, учитывающая рождение и поглощение ТД, а также их взаимную рекомбинацию. Исследованы перераспределение атомов легирующих элементов и образование сегрегаций никеля при ИПД в стабильных аустенитных сплавах типа Fe-Cr-Ni. Экспериментально определена приграничная локализация ДИС никеля. В практическом плане важно, что ДИС и РИС на ГЗ описываются сходными закономерностями.

В целом считаю, что диссертационная работа Старикова С.А. соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой

степени кандидата физико-математических наук, а сам автор Старикив Сергей Анатольевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Заведующий лабораторией
пучковых воздействий,
главный научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Института электрофизики УрО РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор

В.В. Овчинников

«25 » апреля 2017 г.

Почтовый адрес: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

Тел.: +7(343)267-87-74, +7(343)267-87-12

Журнал заявлен:

Ученый секретарь ИЭФ УрО РАН
кандидат физ.-мат. наук

Е.Е. Кокорина

С обсуждением

/Старикив С.А./

26.04.2017.

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертации Старикова Сергея Анатольевича на тему
"Деформационно-индуцированная сегрегация в austenитных сплавах"
по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук

Фамилия, имя, отчество	Овчинников Владимир Владимирович
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень (с указанием шифра специальности, по которой защищена диссертация)	Доктор физико-математических наук, 01.04.07
Основное место работы	
Должность	Заведующий лабораторией
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук
Почтовый индекс, адрес, веб-сайт, телефон, адрес электронной почты организации	620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106 http://www.iep.uran.ru (343) 2678796 admin@iep.uran.ru

Список основных публикаций официального оппонента, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации:

1. Овчинников В. В., Махинько Ф. Ф., Гущина Н. В., Степанов А. В., Медведев А. И., Стародубцев Ю. Н., Катаев В. А., Цепелев В. С., Белозеров В. Я. Воздействие ионного облучения на процессы нанокристаллизации и магнитные свойства магнитомягкого сплава $Fe_{72.5}Cu_1Nb_2Mo_{1.5}Si_{14}B_9$ // ФММ. – 2017. – Т. 118. – № 2. – С. 158-166.
2. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V. Mücklich A. Acceleration of volume decomposition of supersaturated Al + 4 wt.%Cu solid solution under irradiation with Ar^+ ions // Phys. Status Solidi B. – 2016. – Vol. 253. – № 4. – P. 770-777.
3. Ovchinnikov V.V., Gushchina N.V., Bedin S.A. Combined ion (Ar^+ , 20 keV) and light irradiation of the quenched Fe-8.25 at % Mn alloy. Separation between thermal and radiation induced long-range effects // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 110. – 012027.
4. Bedin S. A., Makhin'ko F. F., Ovchinnikov V. V., Gerasimenko N. N., Zagorskiy D. L. Radiation Stability of Metal Nanowires // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 168. – 012096.
5. Gushchina N.V., Ovchinnikov V.V., Mücklich A. Ion irradiation-induced decomposition of Al + 4 wt. % Cu supersaturated solid solution // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 110. – 012103.
6. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Овчинников С.В. Мессбауэровское и резистометрическое исследование индуцированного ионной бомбардировкой α (ОЦК) $\rightarrow \gamma$ (ГЦК) фазового превращения и внутрифазовых процессов в сплаве Fe-8.25 at % Mn // Физика металлов и металловедение. – 2015. – Т. 116. – № 12. – С. 1-11.
7. Ovchinnikov V.V., Gushchina N.V., Gapontseva T.M., Chashchukhina T.I.,

- Voronova L.M., Pilyugin V.P., Degtyarev M.V. Optimal deformation and ion irradiation models for production of a uniform submicrograin structure in molybdenum // High Pressure Research. – 2015. – № 15. – Р. 1-10.
8. Овчинников В.В., Можаровский С.М., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф., Колобнев Н.И., Хохлатова Л.Б. Исследование возможности радиационного отжига сплава 1424 (Al-Li-Mg-Zn-Mn) пучками ускоренных ионов аргона // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. Т. 57. – № 3/3. – С. 216-219.
 9. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Можаровский С.М., Кайгородова Л.И. Исследование процессов формирования наноразмерных интерметаллидных фаз в сплаве 1441 системы Al-Li-Mg-Zn-Mn в ходе облучения пучками ускоренных ионов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. Т. 56. – № 1/2. – С. 163-166.
 10. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Махинько Ф.Ф., Сдобнов Н.В., Федяй А.В. Ионно-лучевая обработка порошков карбонильного железа с целью улучшения функциональных характеристик сердечников для электронных устройств из композита «диэлектрик-карбонильное железо» // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 1/2. – С. 167-170.
 11. Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Соломонов В.И., Гущина Н.В., Кайгородова О.А. Свечение поверхности металлических мишеней при облучении ионами Ar^+ с энергией 5-20 кэВ // ПДТФ. – 2012. – Том 38. – Выпуск 1. – С. 86-94.
 12. Чемеринская Л.С., Овчинников В.В., Сачков И.Н. Инициируемое ионным облучением упорядочение сплава FePd₂Au // Известия вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 1/2. – С. 171-174.

Даю согласие на обработку моих персональных данных и на размещение их в свободном доступе в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» и в единой информационной системе.

Официальный оппонент

В.В. Овчинников

Ученый секретарь ИЭФ Ур
кандидат физ.-мат. наук

Е.Е. Кокорина