ОТЗЫВ

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

Во многих технических приложениях в области атомной энергетики, авиа-космической промышленности и ряде других материалы работают в условиях сильных внешних воздействий, таких как облучение, высокие температуры, большие механические напряжения. Это приводит к изменениям структуры, которые негативно отражаются на физико-механических свойствах и могут привести к утрате работоспособности элементов конструкций. Во всех перечисленных случаях внешние воздействия приводят к образованию большого количества собственных точечных дефектов, которые порождают вторичные дефекты и приводят к изменениям фазового состава, реализуя механизмы аномального формоизменения, охрупчивания, потери прочности и другие, способные привести к разрушению конструкций. Изучение эволюции структуры материалов при интенсивной генерации точечных дефектов является важным, как в плане теоретического описания происходящих процессов, так и в прикладном отношении. Интенсивная пластическая деформация, как и облучение, приводит к образованию большого количества точечных дефектов, что стимулирует процессы диффузии как примесных атомов внедрения, так и замещения, что может приводить к образованию сегрегаций.

Работа Старикова Сергея Анатольевича посвящена выявлению механизмов формирования деформационно-индуцированной сегрегации на примере тройного аустенитного сплава Fe-Cr-Ni, **что определяет ее актуальность.**

Структура и содержание работы. Диссертация изложена на 116 страницах. Состоит из введения, 5 глав и заключения. Содержит 40 рисунков и библиографический список, включающий 116 источников. Материал изложен четко и последовательно, структурирован и логично распределен по главам.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и положения, выносимые на защиту, описана структура диссертационной работы.

В первой главе. Приведен анализ состояния исследуемого вопроса и обзор литературы по экспериментальному изучению ДИС и ее теоретическому описанию. Проводится параллель между процессами ДИС и РИС, приводятся результаты ряда работ, посвященных РИС.

Во второй главе приведен анализ экспериментально установленных областей локализации сегрегации никеля в аустенитном сплаве Fe-12Cr-30Ni, подвергнутом ИПД, при этом использовались результаты ПЭМ и микрозондового РСА. Было установлено, что в процессе СД произошла фрагментация зерен и перераспределение Ni с обеднением его содержания в центре зерен, что явилось косвенным подтверждением его сегрегации у границ зерен. Непрямыми методами измерения межплоскостного расстояния было установлено вероятное наличие сегрегаций никеля вдоль границ зерен. Эффект локализации никеля у границ сопоставляется с РИС никеля.

Третья глава посвящена теоретическому описанию процессов ДИС в аустенитных сплавах. При этом использовались пакеты программ, разработанных в центрах США. При расчетах использовались EAM межатомные потенциалы. Определение термодинамических стимулов взаимодействия атомов никеля с границами зерен проводилось по результатам расчета энергии взаимодействия атомов Fe и Ni в различных конфигурациях. В использованной модели границы при выбранном потенциале расчеты не выявили собственных термодинамических стимулов для сегрегации никеля на ГЗ. Поэтому далее говорится о необходимости использовать для описания теорию неравновесных сегрегаций.

Далее в главе представлена математическая модель, описывающая процессы неравновесной сегрегации, происходящие при ИПД. Модель основана на системе уравнений для диффузионных потоков точечных дефектов и атомов сплава. Она использована для описания трехкомпонентного сплава, компоненты которого равномерно распределены по всему объему. В работе, со ссылкой на другие работы, принято, что при ИПД вакансии и междоузлия образуются в соизмеримых количествах, которые впоследствии считаются равными. Приводится система соответствующих уравнений. Анализируются различные ситуации поведения границ зерен при ИПД. Приведены значения параметров, использованные при расчетах, которые были проведены с использованием компьютерных программ РИС.

В четвертой главе говорится об исследованиях влияния основных параметров (температуры, степени и интенсивности деформации, скорости генерации точечных дефектов и прочих) на процессы ДИС га примере тройного сплава Fe-Cr-Ni. Приведены значения параметров, входящих в уравнения модели,

которые выбраны из набора значений, приведенных в литературе, где они имеют существенный разброс.

Для случая покоящейся ГЗ показаны расчетные профили концентраций компонентов сплава Х12Н30 после проведения деформации в течение 10 минут при температуре 400 К и скорости генерации точечных дефектов$10^{-4}c^{-1}$, что соответствует условиям эксперимента. Расчет показывает, что у границ происходит увеличение концентрации атомов Ni по сравнению с удаленными от границы областями. Ширина этой зоны составляет несколько нанометров. Утверждается, что эта обогащенная зона влияет на изменение магнитных свойств.

Аналогичный расчет сделан для движущейся ГЗ. Показано, что область обогащенная Ni, наблюдается, главным образом, позади движущейся границы.

Расчеты, проведенные для случаев различающихся начальных концентраций компонентов при варьируемых температурах ИПД, позволили выявить зависимости эффекта от этих параметров. В частности, было показано, что превышение температуры 700 К приводит к ослаблению эффекта, а при достижении температуры 900 К ДИС никеля на границах практически не происходит.

В **пятой главе** представлены результаты расчета кинетики формирования сегрегаций при ИПД и для случая радиационного воздействия на тот же сплав Х12Н30. Расчеты проведены для широкого диапазона скоростей генерации точечных дефектов от 10^{-24} до $10^{-2}.c^{-1}$. Показано, что при радиационном воздействии наблюдаются немонотонные зависимости усредненной концентрации никеля от времени. Максимальное значение достигается за времена $\sim 6\cdot 10^{2}$ с, а для выхода на уровень стационарной концентрации требуется около $4\cdot 10^{3}$ с. Далее проводится анализ зависимости эффекта от температуры и скорости движения ГЗ, который, в частности, показывает, что движение ГЗ является основной причиной немонотонной временной зависимости усредненной концентрации никеля.

Анализируется зависимость усредненной концентрации никеля от времени деформации и скорости генерации точечных дефектов. Показано, что режим «быстрой» ДИС (когда концентрация достигает максимума) может быть реализован при достаточно большой скорости деформации и невысоких температурах. В качестве причины не монотонности рассматривается двух стадийное протекание процесса: вначале образуется сегрегация никеля у границ, а затем она «рассасывается» по всему зерну.

В выводах по диссертации перечислены основные результаты, полученные в работе

Научная новизна заключается в использовании модели ДИС для описания трехкомпонентного сплава Fe-Cr-Ni. Полученные результаты расчетов сопоставлены с данными выполненных экспериментальных исследований при различных режимах ИПД.

Практическая ценность приведенных в диссертационной работе результатов заключается в том, что с определенными поправками экспериментальные результаты, полученные при исследовании ДИС, могут быть использованы для анализа и прогнозирования формирования РИС.

Обоснованность и достоверность результатов обеспечена использованием апробированных программных пакетов, в частности, предназначенных для расчетов РИС, а также согласием полученных результатов с данными, приведенными в литературных источниках. Результаты диссертационной работы, прошли апробацию на международных и российских конференциях.

Замечания к работе

В качества замечаний можно отметить следующее:

1 На стр. 10 автореферата в формуле (3) для изменения концентрации точечных дефектов перед дивергенцией вектора потока должен стоять знак минус, а не плюс.

2 На стр. 11 автореферата приводится фраза: «…на ГЗ концентрация ТД равна термически равновесной, а ***в середине зерна потоки точечных дефектов равны нулю***…». Непонятно, о чем говорит автор, потоки на что, или через что?

3 В четвертой главе на стр. 69 говорится, что «Количество сегрегировавшего никеля и характерные размеры обогащенной никелем зоны… позволяют объяснить изменение магнитных свойств…». В то же время, как видно из рис. 4.6, ширина обогащенной никелем зоны составляет около 3 нм. Нетрудно посчитать, что для зерен размером, например, 10 мкм объемная доля приграничного, обогащенного никелем, слоя составляет $\sim 10^{-3}$. У никеля удельная намагниченность существенно ниже, чем у железа. Объяснение при столь малой объемной доле выглядит сомнительным. Следовало бы привести численную оценку, которая показала бы, действительно ли есть согласование, или толщина обогащенного слоя должна быть больше.

4 В первой главе говорится: «Показано, что имеющиеся экспериментальные и теоретические данные ***допускают возможность генерации двух видов дефектов*** при деформации». Ниже говорится, что при ИПД образуются «***сопоставимые*** количества вакансий и междоузлий» (стр. 9 автореферата), а затем, со ссылкой на один из литературных источников, принимается, что при ИПД образуется «***равное количество***

вакансий и междоузлий». Это принципиально важное утверждение, поскольку именно от него зависит, насколько сопоставимы ИПД и облучение. Но сколь-нибудь убедительных доводов в его пользу в диссертационной работе не приводится.

Отмеченные замечания не затрагивают основных результатов, полученных в работе, и не влияют на ее конечную оценку. Диссертационная работа «Деформационно-индуцированная сегрегация в аустенитных сплавах» является логически законченным целостным научным трудом, удовлетворяющим требованиям Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации к кандидатским диссертациям, а ее автор Стариков Сергей Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Советник дирекции
АО «Институт реакторных материалов»
Доктор технических наук, шифр специальности 15.16.01
«Металловедение и термическая обработка металл
Эксперт РАН, сертификат 2016-01-1466-0090 А.В. Козлов

Подпись Козлова А.В. заверяю
И.О. заместителя директора по
Кандидат технических наук К.И. Ильин

АО «Институт реакторных мате
Адрес: а/я 29 624250 г. Заречный Свердловской обл.
Тел (34377) 35001, факс (34377) 3 51 31,
e-mail: irm@irmatom.ru

С отзывом ознакомлен
24.04.2017. / Стариков С.А. /

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

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

Фамилия, имя, отчество	Козлов Александр Владимирович
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень (с указанием шифра специальности, по которой защищена диссертация)	Доктор технических наук, 15.16.01
Основное место работы	
Должность	Советник дирекции
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Акционерное общество «Институт реакторных материалов»
Почтовый индекс, адрес, веб-сайт, телефон, адрес электронной почты организации	624250, г. Заречный, Свердловской области, а/я 29 http://www.irm-atom.ru (34377) 35001 irm@irmatom.ru

Список основных публикаций официального оппонента, составляющего отзыв, за последние пять лет по теме диссертации (2012-2017 г.г.)

1. Козлов А.В., Портных И.А. Миграция и накопление на дислокациях трансмутационного гелия в аустенитных сталях при нейтронном облучении // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 4. С. 414-421.
2. Liu Y., Shikama T., Torok G. Results with irradiation Materials Examination of austenitic steels microstructure change induced neutron irradiation by using of neutron scattering methods // IAEA TECDOC SERIES. Use of neutron beams for materials research relevant to the Nuclear Energy Sectjr. IAEA-TECDOC-1773, Vienna. 2015. P. 42-50
3. Козлов А.В., Портных И.А. и др. Эволюция радиационных дефектов в никеле при низкотемпературном нейтронном облучении // Физика металлов и металловедение. 2014. Т. 115. № 1. С. 42-48.
4. Козлов А.В., Портных И.А.. Панченко В.Л., Митрофанова Н. М. Зависимость критического диаметра пор в аустенитной стали ЧС-68 от температуры нейтронного облучения в модели образования гелий-вакансионных пузырьков // Физика металлов и металловедение, 2012, том 113, № 5, с. 549-560.
5. A.V. Kozlov, I.A. Portnykh, A.I. Blokhin, D.A. Blokhin, N.A. Demin The dependence of critical diameter of void nuclei in ChS68 austenitic steel on temperature of neutron irradiation in the model of formation of helium-vacancy bubbles // Inorganic Materials Applied Research, 2013.Vol. 4. № 3. p. 183-188.
6. Kozlov A.V., Panchenko V.L., Kozlov K.A., Russkich I.M., Kozlov An.V. Evolution of radiation defects in nickel under low-temperature neutron irradiation // The Physics of Metals and Metallography, 2014. Vol. 115. # 1. P. 39-45.
7. Чукалкин Ю.Г., Козлов А.В., Евсеев М.В. Эволюция магнитных свойств аустенитной оболочечной стали ЧС68 при облучении в реакторе БН- 600 // Физика металлов и металловедение, 2014.т. 115. № 3.С. 248-256/.
8. Портных И.А., Козлов А.В., Панченко В.Л. // Влияние дозово-температурных параметров нейтронного облучения до максимальной повреждающей дозы 77 сна на характеристики пористости, сформировавшейся в стали 0.07C-16Cr-

19Ni-2Mo-2Mn-Ti-Si-V-P-B, // Физика металлов и металловедение, 2014. т115. № 6.С 644-672
9. Козлов А.В., Портных И.А., Целищев А.В. и др. Определение энергии миграции вакансий в оболочечных сталях ЧС68 и ЭК164 // Металлы, 2014. №.3. С. 76-83.
10. Козлов А.В.., Портных И.А. Зависимость скорости стационарного распухания оболочек твэлов из стали ЧС68 от характеристик нейтронного облучения // ФММ, 2016, том 117, № 8, С. 871-874.
11. . Н.В. Глушкова, В.А. Цыгвинцев, А.В. Козлов , В.Л. Панченко Изменение характеристик тонкой структуры стали ЧС-68 при нейтронном облучении // Физика и химия обработки материалов,2016, № 4,С.12-20.
12. A.V. Kozlov, I.A Portnykh, A.V. Tselishchev at el. Energy of Vacancy Migration in 0.06C–16Cr–15Ni–2Mo–2Mn–Ti–Si–V–B and 0.07C–16Cr–19Ni–2Mo–2Mn–Ti–Si–V–P–B Cladding Steels // Russian Metallurgy (Metally), Vol. 2014, № 5, p.412-418.
13. A.V. Kozlov, I.A. Portnykh, A.V. Tselishchev Relation between the vacancy migration energy in austenitic steels and their resistance to irradiation-induced swelling // Russian metallurgy (Metally), 2016. № 1 p.p.39-44.
14. A.V. Kozlov, I.A. Portnykh Dependence of steady-state swelling rate for claddings made of ChS-68 steel on neutron irradiation characteristics // Phys. Met. Metallogr. 2016, Vol. 117, No 8, P. 871-874.
15. Портных И.А., Козлов А.В., Панченко В.Л., Митрофанова Н.М. Характеристики радиационной пористости, сформировавшейся при облучении в реакторе БН-600 в материале оболочек из стали ЭК164 (06Х16Н20М2Г2БТФР) – ИД х.д. Физика металлов и металловедение, 2012, том 113, № 5, с. 549-560.

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

Советник дирекции,

Доктор технических наук А.В. Козлов

И.О. заместителя директора

Кандидат технических наук К.И. Ильин