

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Пасынкова Александра Юрьевича

«Термодинамика и кинетика эволюции структуры и фазового состава низколегированных сталей при аустенитизации и горячей деформации», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертационной работы. Диссертационная работа Пасынкова А.Ю. посвящена моделированию структурных и фазовых превращений в многокомпонентных многофазных системах на примере низколегированных сталей. Эта работа направлена на решение проблемы создания подходов (моделей и программ на их основе) для прогнозирования структуры и фазового состава низколегированных сталей в условиях различных внешних воздействий. В научном плане была поставлена цель, состоящая в построении единой модели для описания эволюции структуры аустенита и состояния карбонитридных выделений при горячей деформации и рекристаллизации с учетом взаимного влияния процессов эволюции карбонитридных выделений и структуры аустенита. Следует отметить, что в мире выполнено несколько работ аналогичной направленности, однако все они либо не учитывают влияние выделения фаз на эволюцию структуры, либо делают это слишком упрощенно. В связи с вышесказанным, рецензируемая диссертационная работа, безусловно, актуальна как с научной, так и с практической точек зрения.

Структура и содержание диссертационной работы. А.Ю. Пасынковым проанализировано большое количество работ, посвященных моделированию фазовых и структурных превращений в низколегированных сталях, в том числе относящихся к описанию эволюции структуры при горячей деформации.

Диссертационная работа состоит из введения, 5-ти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. **Во введении** сформулирована актуальность работы, ее цели и задачи. **В первой главе** приводится обзор литературы, посвященный термодинамическому моделированию, а именно CALPHAD-методу как фактически единственному методу для моделирования фазовых равновесий в многокомпонентных многофазных системах. Кратко рассмотрены существующие модели для описания эволюции вторых фаз, отмечены их сильные и слабые стороны. Дан обзор моделей, которые позволяют оценить средний размер зерна на основе информации о размерах и объемных долях частиц вторых фаз, присутствующих в сплаве. Приводятся существующие на сегодняшний день подходы и модели к описанию эволюции структуры

сталей при деформации. В заключение первой главы автором поставлены цели и задачи исследования диссертационной работы. **Во второй главе** на основе CALPHAD-метода строится термодинамическое описание для 11-ти компонентной системы (Fe–V–Nb–Ti–C–N–Al–Cr–Mn–Ni–Si), которая по составу и числу компонентов близка к реальной промышленной стали. На базе полученного термодинамического описания проведены расчеты, оценивающие влияние таких элементов, как Al, Cr, Mn, Ni и Si на растворимость карбонитридных фаз. **В третьей главе** представлена предложенная Пасынковым А.Ю. кинетическая модель для описания эволюции вторых фаз в сплавах. Главной особенностью модели является возможность моделировать эволюцию нескольких составов вторых фаз с учетом полидисперсности ансамблей выделений. Модель позволяет описать все этапы эволюции частиц вторых фаз: зарождения, роста, растворения и коагуляции. С помощью программы, созданной на основе модели, проведена серия расчетов, на основе которых автором впервые убедительно показано, что эволюция одной карбонитридной фазы может оказывать влияние на эволюцию другой карбонитридной фазы. **В четвертой главе** автором предложен способ применения результатов расчетов кинетической модели для оценки размера зерна аустенита. Показано, что во многих случаях на основе результатов расчета эволюции выделений фаз можно удовлетворительно прогнозировать размер аустенитного зерна в сталях с карбонитридным упрочнением. **В пятой главе** представлена модель, описывающая эволюцию структуры аустенита при горячей деформации в случае, когда процессы деформации и рекристаллизации сопровождаются выделением карбонитридных фаз. Модель учитывает взаимное влияние изменения в ходе деформации таких структурных параметров, как плотность дислокаций, средний размер зерна аустенита (с учетом релаксационных процессов и процессов выделения), а также эволюции карбонитридных фаз. Модель принимает во внимание также полидисперсность ансамблей выделений.

Достоверность представленных результатов. Достоверность полученных Пасынковым А.Ю. результатов, обоснованность положений и выводов обеспечивается тем, что в основе разработанных методов лежит реалистичная постановка задачи, содержащая соответствующие поставленной цели допустимые упрощения, лишь незначительно снижающие общность задачи и обеспечивающие высокую достоверность результатов моделирования. Сказанное обеспечивается сопоставлением полученных результатов с результатами экспериментальных работ.

Среди полученных результатов, отражающих **научную значимость работы**, следует выделить следующие:

1. На основе CALPHAD-метода построено термодинамическое описание для температурной области существования аустенита системы Fe–V–Nb–Ti–C–N–Al–Cr–Mn–

Ni–Si, которая в максимальной степени соответствует низколегированным сталям с карбонитридным упрочнением, и разработана программа, предназначенная для проведения расчетов, относящихся к этой системе.

2. Разработана модель для описания эволюции нескольких ансамблей карбонитридных выделений сложного состава в многофазных многокомпонентных системах. Метод основан на использовании приближения среднего поля для описания эволюции выделений вторых фаз и на классической теории зарождения для расчета скорости образования новых зародышевых центров. Учитываются также полидисперсность ансамблей выделений, диффузионное взаимодействие элементов в матрице. Метод может использоваться на всех стадиях эволюции выделений: зарождения, роста, растворения и коагуляции выделений.

3. Предложена модель, в рамках которой описывается эволюция структуры аустенита при горячей деформации и рекристаллизации для случая, когда процессы деформации и рекристаллизации могут сопровождаться выделением карбонитридных фаз, с учетом взаимного влияния этих процессов. Разработаны алгоритмы и соответствующие программы, позволяющие моделировать эволюцию структуры и фазового состава при горячей деформации.

Практическая значимость. Разработанные А.Ю. Пасынковым модели и программы на их основе могут быть использованы инженерами-исследователями в качестве как самостоятельного, так и вспомогательного инструмента изучения фазового состава, эволюции среднего размера зерна и кинетики выделения частиц избыточных фаз при отжиге и при деформации сталей в температурной области стабильного аустенита. Предложенные модели могут быть применены и для других многофазных многокомпонентных систем.

Полученная с помощью программного комплекса информация может быть полезна предприятиям металлургической промышленности в целях оптимизации химического состава, режимов термической обработки и горячей деформации малоуглеродистых низколегированных сталей.

Кроме того предложенные подходы и программы после соответствующей доработки могут быть применены ко многим другим сплавам и материалам.

Публикации и апробация диссертационной работы. Результаты диссертации в необходимой степени апробированы и опубликованы. По теме диссертации автор опубликовал 6 работ в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ. Министерства науки и высшего образования РФ. Результаты исследований были представлены более чем на 10 международных и всероссийских научных конференциях и получили высокую оценку специалистов. Полученные в диссертации результаты

соответствуют поставленной цели и задачам исследования. Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Во второй главе, посвященной термодинамическому моделированию, автором не приведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными.

2. Модель, описывающая эволюцию частиц, учитывает только гомогенное зарождение (на дислокациях), хотя зарождение вторых фаз может происходить и на границах зерен.

3. В работе имеются мелкие опечатки и неточности типа: «...выполнен ряд расчётов, в которых исследовалась влияние...» (стр. 51),

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки рецензируемой работы.

В целом, следует отметить, что диссертация Пасынкова Александра Юрьевича является законченной научно-исследовательской работой, вносящий существенный вклад в решение важной научной проблемы, связанной с моделированием эволюции структуры многофазных многокомпонентных систем при изотермической выдержке и горячей деформации. Работа соответствует паспорту специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» (пункт 5).

Учитывая оригинальность, а также высокую научную и практическую ценность представленной диссертационной работы, считаю, что она соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по вышеуказанной специальности, а ее автор, Пасынков Александр Юрьевич, безусловно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени.

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

В.В. Овчинников
«30» апреля 2019 г.

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

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

e-mail: vladimir@ier.uran.ru

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

Е.Е. Кокорина

с отзывом ознакомились.
Пасынков А.Ю. 06.05.2019
А.Ю. Пасынков

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертации Пасынкова Александра Юрьевича на тему
«Термодинамика и кинетика эволюции структуры и фазового состава
низколегированных сталей при аустенитизации и горячей деформации»
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	Главный научный сотрудник, заведующий лабораторией
Наименование подразделения	Лаборатория пучковых воздействий
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) 267-87-96 admin@iep.uran.ru

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

1. Ovchinnikov V. V. Nanoscale dynamic effects under cascade-forming irradiation // Surface and Coating Technology. 2018. V. 355. P. 65-83.
2. Гущина Н. В., Овчинников В. В., Махинько Ф. Ф., Кайгородова Л. И., Распосиенко Д. Ю. Влияние мегапластической деформации и последующего ионного облучения на структуру сплава Al-Li-Cu-Mg // Известия вузов. Физика. 2018. Т. 61. № 8/2. С. 146-150.
3. Романов И.Ю., Гущина Н.В., Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Степанов А.В., Медведев А.И., Стародубцев Ю.Н., Белозеров В.Я., Логинов Б.А. Воздействие ионного облучения на процесс нанокристаллизации и изменение рельефа поверхности ленты сплава

- $Fe_{72.5}Cu_1Nb_2Mo_{1.5}Si_{14}B_9$ // Известия вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 10. С. 157-165.
4. Бедин С.А., Овчинников В.В., Ремнев Г.Е., Махинько Ф.Ф., Павлов С.К., Гущина Н.В., Загорский Д.Л. Оценка радиационной стабильности нанопроволок сплава $Fe_{0.56}Ni_{0.44}$ под воздействием мощных импульсных пучков ионов // ФММ. 2018. Т. 119. № 1. С. 45-53.
 5. 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 процесс 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.
 6. Ovchinnikov V. V., Gushchina N. V., Mozharovsky S.M., Kaigorodova L.I. Low-temperature volume radiation annealing of cold-worked bands of Al-Li-Cu-Mg alloy by 20-40 keV Ar^+ ion // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 168. 012067.
 7. Gushchina N. V., Ovchinnikov V. V., Makhin'ko F. F., Linnik S. A. Effect of ion beam treatment (Ar^+ , $E=30$ keV) on the microstructure of titanium alloys // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 830. P. 012089.
 8. 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.
 9. 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.
 10. Овчинников В.В., Гущина Н.В., Овчинников С.В. Мессбауэровское и резистометрическое исследование индуцированного ионной бомбардировкой $\alpha(OЦК) \rightarrow \gamma(ГЦК)$ фазового превращения и внутрифазовых процессов в сплаве Fe-8.25 at % Mn // Физика металлов и металловедение. 2015. Т. 116. № 12. С. 1-11.
 11. 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 modes for production of a uniform submicrograin structure in molybdenum // High Pressure Research. 2015. № 5. P. 300-309.
 12. Гущина Н.В., Можаровский С.М., Овчинников В.В., Махинько Ф.Ф., Кайгородова Л.И. Влияние облучения ускоренными ионами Ar^+ на структуру, фазовый состав и механические свойства сплава 1960 (Al-Zn-Mg-Cu) после естественного старения // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58. № 9/3. С. 92-96.
 13. Ovchinnikov V.V., Makhin'ko F.F., Solomonov V.I. Thermal-spikes temperature measurement in pure metals under argon ion irradiation ($E = 5-15$ keV) // Journal of Physics: Conference Series. 2015. 652 012070.

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 УрО РАН

кандидат физ.-мат. наук

Е.Е. Кокорина