

«Утверждаю»
Директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института физики твердого тела
имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук



чл.-корр. РАН А.А. Левченко
14 апреля 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу **Айнура Хатиповича Хайруллина** «ОСОБЕННОСТИ
ДИФФУЗИИ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА В МЕДИ», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика
конденсированного состояния».

Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа Хайруллина А.Х. посвящена экспериментальному исследованию особенностей диффузионных процессов в системах с отрицательной адсорбцией. Следует отметить, что отрицательная зернограничная адсорбция сама по себе не такое частое явление в металлических системах и чаще внимание уделяли зернограничной диффузии в системах с положительной адсорбцией. При этом основной эффект хорошо изучен – соотношение глубин проникновения по границам зерен и объему возрастает с увеличением коэффициента обогащения границ зерен. Следовало бы ожидать, соответственно, замедленную зернограничную диффузию для систем с отрицательной адсорбцией. Насколько значимо это замедление? Выбранные системы, между тем, относятся к достаточно распространенным в промышленности материалам, используемым как в парах трения (Cu-Fe), различных бронзах (Cu-Ni), в которых процессы на границах зерен достаточно важны, в связи с ускоренным фазообразованием, эффектами рекристаллизации и миграции границ. Особенностью работы является использование высоких концентраций диффузанта, что интересно именно с практической точки зрения. С другой стороны, это представляет научный интерес, как часть работы о возможности применения данных, полученных в идеализированных условиях разбавленных растворов для реальных систем.

Структура и объем диссертационной работы.

Структура диссертации: введение, 3 раздела, заключение, список литературы, приложение. Полный текст диссертации с приложениями насчитывает 189 стр., основной

текст диссертации – 124 страницы, содержит 53 рисунка и 46 таблиц. В списке литературы 108 источников. Автореферат диссертации насчитывает 28 страниц.

Научная новизна сформулирована во введении и выводах к диссертационной работе. К числу **наиболее важных научных результатов** можно отнести следующие:

- экспериментально установлено, что при диффузии железа в чистой меди и в исследованных сплавах на основе меди, не наблюдается опережающая зернограничная диффузия;
- экспериментально установлено, что зернограничная диффузия никеля в концентрированных растворах системы Cu–Ni существенно медленнее, чем диффузия в разбавленных растворах;
- предложено модифицированное уравнение Уиппла, которое позволяет корректно обрабатывать профили зернограничной диффузии в системах с полной растворимостью;
- экспериментально установлено, что при диффузии железа в медь возможно формирование пересыщенного твердого раствора вблизи поверхности раздела Fe/Cu.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что показано различие между макроскопически наблюдаемым массопереносом по границам зерен в неразбавленных растворах с результатами исследований в разбавленных растворах. На примере систем с отрицательной адсорбцией показано принципиальное различие в протекающих процессах, которые связаны с различием в оценке коэффициента обогащения границ зерен. Получены экспериментальные свидетельства фактов резкого замедления зернограничной диффузии, что связано с появлением дополнительной движущей силы – градиента поверхностного натяжения, который проявляется именно при отрицательной адсорбции. Полученные результаты могут быть использованы при оценке роли границ зерен сплавах с большим содержанием легирующих компонентов (никелевые жаропрочные сплавы, бронзы, нержавеющие стали), при обработке соединений разнородных сплавов, в медных сплавах, содержащих ниобий, кобальт, железо (контактные провода). Такие исследования могут быть интересны как для научных организаций (институты РАН: ИФТТ, ФИЦ ПХФ и МХ, Институт физики металлов УрО РАН, ИМЕТ РАН, так и для организаций имеющих научно-прикладную направленность: АО Композит, ВНИИЖТ, ВИАМ- Курчатовский институт, АО ЦНИИТмаш).

Достоверность полученных результатов подтверждается согласием между данными, полученными на двух принципиально отличающихся объектах диффузионных исследований – массивных образцах и фольгах, повторяемостью результатов, надежностью выбранных методов. Результаты исследований опубликованы в ведущих научных журналах, и представлены в виде докладов на российских и международных

конференциях, соответствующих теме диссертации. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания по диссертационной работе:

1. Во введении автор упоминает кобальт, как еще один элемент, отрицательно адсорбирующийся на границах зерен. Почему он не включен в исследования?
2. Автор не приводит количественных оценок, которые необходимы для понимания эффекта замедления зернограницной диффузии. Какие должны быть характерные величины коэффициента обогащения (обеднения) границы зерна, чтобы эффект был заметен?
3. Использование фольг для изучения ЗГД дает только качественный результат. И действительно, показано, что полученные данные хорошо сходятся в данном случае. Есть ли еще какие-то свидетельства, что этот метод хорошо описывает зернограницную диффузию в тех системах, где она наблюдается?

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки этой работы большого объема, важной по теме и с элементами научной новизны. Диссертационная работа А.Х. Хайруллина соответствует научной специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния». По актуальности, научной новизне и объему выполненных исследований диссертация представляет собой законченную научную работу.

Заключение

Диссертационная работа А.Х. Хайруллина «ОСОБЕННОСТИ ДИФФУЗИИ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА В МЕДИ» является законченной научной работой. В рамках исследования были получены новые результаты, которые имеют как научный, так и значительный практический интерес. Работа соответствует специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния». Результаты исследования, выносимые на защиту, были представлены и описаны в 4 печатных работах, которые входят в международные базы данных Web of Science, Scopus и ВАК. Автореферат и публикации соответствуют содержанию диссертации.

По объему выполненных исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает всем Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС П 710.05-22, предъявляемым к диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Айнура Хатиповича

Хайруллина, заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Доклад по диссертации А.Х. Хайруллина был заслушан на заседании семинара «Физическое материаловедение» 19 марта 2025 г.

Отзыв обсужден на заседании Ученого совета ИФТТ РАН 14 апреля 2025 г.

Составитель отзыва:

Заведующий лабораторией поверхностей раздела в металлах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, профессор
Борис Борисович Страумал

Подпись Б.Б. Страумала заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, к.ф.-м.н.



Терещенко А.Н.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН). Адрес: 142432, г. Черноголовка, Московская обл., ул. Академика Осипьяна д. 2. Тел.: 8(496)52 219-82. E-mail: adm@issp.ac.ru