

«Утверждаю»



ВРИО директора Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт физики твердого тела  
Сибирского отделения Российской академии наук

чл.-корр. РАН А.А. Левченко

30.03.2026

## ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу **Ивана Сергеевича Петрова** «ИССЛЕДОВАНИЕ  
КАПИЛЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ СИСТЕМЫ СЕРЕБРО-МЕДЬ С  
ПЛОТНЫМ И ПОРИСТЫМ  $\gamma$ -ЖЕЛЕЗОМ», представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.8 «Физика  
конденсированного состояния»**

### Актуальность темы диссертационной работы

Диссертационная работа И.С. Петрова посвящена экспериментальному исследованию закономерностей смачивания, растекания и пропитки в системах, где в качестве твердой подложки выступает плотное и пористое железо, а в качестве жидкости использованы расплавы системы серебро-медь. Результаты, полученные из экспериментов по смачиванию и растеканию, демонстрируют нелинейную зависимость косинуса контактного угла от состава расплава. При этом концентрационная зависимость косинуса контактного угла расходится с концентрационной зависимостью поверхностного натяжения расплавов системы серебро-медь. Термодинамическое моделирование поверхностных свойств медно-серебряных расплавов на границе с твердой железной подложкой позволило выявить причину данного расхождения – обогащение межфазной границы медью. При пропитке пористого железа было установлено, что скорости движения расплавов, богатых серебром, на три порядка величины меньше скоростей движения богатыми медью расплавами внутри пористого тела, хотя классическая модель капиллярной пропитки Лукаса-Уошберна предсказывает разницу всего в 30 %. Введение порогового давления, присущего пористым геометриям с отличной от идеальной структуры пористого тела, описываемой длинным тонким капилляром постоянного сечения, позволило адекватно описать скорость движения медно-серебряных расплавов внутри пористого железа. Выбранная система (Ag-Cu) является основой для высокотемпературных припоев, в связи с чем исследование смачивания и растекания представляет собой практический интерес. Научный же интерес связан с возможностью

применения подходов, описанных в данной работе, к различным метал-металлическим системам.

### **Структура и объем диссертационной работы.**

Структура диссертации содержит: введение, три главы, заключение, список использованных источников, приложения. Полный текст диссертации с приложениями насчитывает 139 стр., основной текст диссертации – 129 страниц, содержит 61 рисунок и 8 таблиц. В списке литературы 178 источников. Автореферат диссертации насчитывает 21 страницу.

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

- создана модель движения металлического расплава из капли конечного размера в изотропном пористом теле;
- было показано, что скорость движения жидкости при растекании не зависит ни от состава, ни от температуры и составляет  $\sim 1$  м/с, в то время как скорости движения фронта пропитки сильно зависят от температуры и состава и варьируются от  $0,07 \pm 0,01$  мм/с для чистого серебра до  $420 \pm 100$  мм/с для чистой меди
- термодинамическое моделирование показало, что на межфазной границе медно-серебряный расплав/твердое железо наблюдается преимущественная адсорбция меди: при концентрации в объеме расплава 10 ат. % Cu на границе содержится более 90 ат. % Cu. Выделение меди на границе хорошо согласуется с концентрационной зависимостью контактного угла.
- наличие порогового угла для начала пропитки реальных тел существенно сказывается на кинетике движения фронта расплава внутри пористого тела. Близкие значения угла смачивания железа серебром ( $50 \pm 5^\circ$ ) к теоретическому пороговому значению ( $50,72^\circ$ ) в модели плотноупакованных равных сфер объясняет существенную разницу в скоростях впитывания медно-серебряных расплавов разных концентраций.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в разработке модели движения жидкости внутри пористого тела и определении факторов, влияющих на скорость движения расплава внутри пористого тела. На примере систем с разным химическим взаимодействием было показано, что разработанные модели и подходы применимы как для исследования систем со слабым химическим взаимодействием (Ag-Fe), так и для систем с сильным химическим взаимодействием (Cu-Fe). Получены

экспериментальные подтверждения резкой зависимости скорости движения расплава внутри реального пористого тела от контактного угла как следствие наличия порогового давления, возникающего при пропитке пористых тел с неидеальной геометрией порового пространства. Полученные результаты могут быть использованы для оценки скорости движения расплава внутри пористого тела при производстве псевдосплавов, создании композиционных материалов и при создании изделия путем селективного лазерного спекания. Такие исследования могут быть интересны как для научных организаций, так и для организаций, имеющих научно-прикладную направленность.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается согласием между данными, полученными при исследовании скорости впитывания путем погружения пористого тела в расплав металла и при определении скорости впитывания капли расплава в пористую подложку методом сидящей капли. 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. В работе предложена оригинальная модель для пересчета объема видимой капли в скорость движения фронта пропитки внутри пористого тела. Однако при выводе уравнения авторы принимают, что пропитанная область имеет форму половины эллипсоида, а ее объем в  $1/p$  раз превышает объем впитавшейся жидкости. Насколько обосновано такое допущение для пористой структуры, полученной спеканием частиц неправильной формы? Не приводит ли использование этой геометрической идеализации к систематической погрешности при определении абсолютных значений скорости фронта?
2. Автор делает вывод о том, что поверхность железных подложек соответствует чистому железу, основываясь на диаграмме равновесия Fe-C-O при давлении  $10^{-3}$  Па. Однако в методике спекания использовалась восстановительная атмосфера Ar + 10% H<sub>2</sub>, а не вакуум. Необходимо пояснить, корректно ли переносить выводы о фазовом равновесии, полученные для вакуумных условий, на эксперименты в проточной восстановительной атмосфере, и как наличие водорода влияет на состояние поверхности железа?
3. В работе приведен расчет потери массы для чистого серебра (5,5%), который авторы считают значимым, но ссылаются на литературный источник с меньшей скоростью испарения. В то же время в кинетических зависимостях объема капли при пропитке не видно поправок на испарение. Каким образом учитывалось или контролировалось

испарение расплава при обработке данных о скорости пропитки, особенно для длительных экспериментов?

4. Автор показывает, что концентрационная зависимость контактного угла определяется адсорбцией меди на межфазной границе твердое тело/жидкость. Однако в расчетах по уравнению Батлера использовалось предположение об отсутствии адсорбции компонентов на поверхности твердого тела. Не может ли адсорбция на поверхности твердого тела вносить вклад в изменение межфазного натяжения и, следовательно, контактного угла?

5. Полученная в работе скорость пропитки чистой медью (420 мм/с) на три порядка превышает литературные данные (1,26 мм/с). Авторы объясняют это более высоким временным разрешением своей методики. Однако столь значительное расхождение может указывать не только на разницу в методах, но и на принципиально иной механизм процесса (например, инерционное течение на начальной стадии). Можно ли утверждать, что в экспериментах по погружению (литературных) измерялась та же физическая величина – скорость движения фронта на начальной стадии, а не усредненная по всему образцу?

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности выполненных исследований и не влияют на общую положительную оценку представленной диссертационной работы.

#### **Заключение**

Диссертационная работа И.С. Петрова «ИССЛЕДОВАНИЕ КАПИЛЛЯРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВОВ СИСТЕМЫ СЕРЕБРО-МЕДЬ С ПЛОТНЫМ И ПОРИСТЫМ  $\gamma$ -ЖЕЛЕЗОМ» является законченной научной работой. В рамках исследования были получены новые результаты, которые имеют как научный, так и практический интерес. Работа соответствует специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния». Результаты исследования, выносимые на защиту, были представлены и описаны в 5 печатных работах, которые входят в международные базы данных Web of Science, Scopus и ВАК. Автореферат и публикации соответствуют содержанию диссертации.

По объему исследований, их актуальности и научному уровню диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС П 710.05-24, предъявленным к диссертации на соискание степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Иван Сергеевич Петров, заслуживает

присуждения ему степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»

Доклад по диссертации И.С. Петрова был заслушан на заседании семинара «Физическое материаловедение» 25 марта 2026 г.

Отзыв был обсужден на заседании Ученого совета ИФТТ РАН 30 марта 2026 г.

**Составитель отзыва:**

Заведующий лабораторией материаловедения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук, кандидат технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение в металлургии, доцент

Иван Борисович Гнесин



Подпись И.Б. Гнесина 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.: +7 49652 21982. E-mail: [adm@issp.ac.ru](mailto:adm@issp.ac.ru)