ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Тороповой Любови Валерьевны
«Математическое моделирование устойчивой моды дендритного роста при различных условиях кристаллизации»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14—
Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Тороповой Любови Валерьевны посвящена комплексному исследованию задачи об отборе устойчивой моды дендритного роста при различных кристаллических симметриях в условиях вынужденной конвекции, а также при наличии температурной и концентрационной анизотропии поверхностного натяжения на искривленной (паробоидальной) границе раздела фаз и вызванных этой анизотропией внутренних конвективных явлений (ячеек). Задача является **актуальной**, так как рост дендритов из переохлажденной или пересыщенной среды является одним из часто встречающихся типов фазовых превращений, протекающих в различных областях науки: от физики конденсированного состояния и материаловедения до процессов получения различных соединений в химической промышленности. Это обуславливает **практическую и теоретическую важность** изученных автором различных механизмов роста дендритных кристаллов в переохлаждённых расплавах. **Достоверность** полученных результатов обеспечивается, на мой взгляд, хорошим сопоставлением развитой в диссертации теоретической модели с методами численного моделирования и экспериментом.

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения.

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена обзору современных исследований дендритного роста, а именно автором достаточно подробно рассмотрены основные методы анализа дендритной морфологии и компьютерного моделирования, подробно описан накопленный обширный теоретический и экспериментальный материал по эволюции дендритных кристаллов, особое значение уделено методу электромагнитной левитации как технике безконтейнерного эксперимента.

Во второй главе автором приводится решение задачи об устойчивой моде дендритного роста при различных условиях кристаллизации. Автор описывает распределения температуры, концентрации примеси, компоненты скорости конвективного течения расплава двумерного и трехмерного параболического (параболоидального) дендрита с учетом анизотропии поверхностного натяжения на границе кристалл-жидкость. Далее автором выполняется линейный анализ морфологической устойчивости роста вершины дендрита, определяющий

маргинальную моду волнового числа для кондуктивных и конвективных граничных условий на поверхности растущего кристалла. Полученный результат приводит к критериям отбора и балансам переохлаждений для термического и термо-химического устойчивого роста параболического дендрита с произвольной симметрией кристаллической решетки в условиях внешней (вынужденной) и внутренней конвекции в жидкой фазе.

Третья глава посвящена сравнению развитой теории устойчивого дендритного роста с методами численного моделирования и экспериментом. На примере различных материалов показано качественное и количественное соответствие теории как с натурными экспериментами, так и с компьютерным моделированием. Также автором подробно описано влияние конвективного потока на затвердевание сплава $TiAl_{45/55}$. Развитая в диссертационном исследовании теоретическая модель с конвективными граничными условиями описывает результаты эксперимента при средних скоростях роста вершины и сравнительно небольшом переохлаждении, тогда как кондуктивная модель хорошо описывает эксперимент при больших значениях переохлаждения, что подтверждает практическую применимость теории.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы и перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

По содержанию диссертации имеются некоторые замечания.

1. Рассмотренная в диссертационном исследовании теоретическая модель применима для однокомпонентных и бинарных сплавов. Может ли данная модель описывать многокомпонентные системы или кристаллизацию растворов, а также возможный вынос и накопление примесей, всегда существующих в чистых расплавах?
2. В главе 2 описывается математическое моделирование дендрита, растущего во встречном потоке жидкости с учетом конвекции. Можно ли обобщить данную теорию дендритного роста на случай роста кристаллов в условиях повышенной гравитации? Как сказывается довольно сильная (как правило экспоненциальная) зависимость вязкости жидкости от температуры при достаточно высоких переохлаждениях (сотни градусов) на рассматриваемые модели, где зависимость вязкости жидкости от температуры не просматривается?
3. В главе 3 приводится сравнение теоретической модели устойчивого дендритного роста с экспериментом по скорости роста в зависимости от переохлаждения. Экспериментальные данные, используемые для сравнения теории с конвективными граничными условиями были получены в электромагнитном левитаторе. Каким образом может быть оценена скорость потока в левитирующей капле?

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не снижают значения диссертационной работы.

В целом, диссертация Тороповой Л.В. представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, содержит новые **оригинальные результаты**, имеющие высокую теоретическую и практическую значимость. Результаты диссертации с достаточной полнотой опубликованы в 11 печатных работах, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, 10 из которых входят в базы данных Web of Science и Scopus. По результатам работы получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертации успешно прошли апробацию на российских и международных конференциях.

Тема и содержание работы соответствуют паспорту специальности 01.04.14— теплофизика и теоретическая теплотехника. Автореферат и опубликованные работы правильно и полно отражают содержание диссертации. Достоверность и новизна полученных результатов хорошо обоснованы, личный вклад автора ясно определен.

Считаю, что диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-11 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Торопова Любовь Валерьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры физики конденсированного
состояния и наноразмерных систем
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина»

Кисеев Валерий Михайлович

« 22 » сентября 2020 г.

Почтовый адрес:
Адрес: 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
Тел. +7 (343) 2616780
E-mail: Valery.Kiseev@urfu.ru

Подпись Кисеева В.М. заверяю

ведущий документовед
ОДОУ
/С.В. Жукова