

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертационной работе РУСАНОВА Бориса Андреевича
«Влияние редкоземельных металлов на теплофизические свойства и
стеклообразующую способность сплавов Al-Ni-Co-R», представленной на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Диссертация Б. А. Русанова «Влияние редкоземельных металлов на теплофизические свойства и стеклообразующую способность сплавов Al-Ni-Co-R» посвящена комплексному исследованию сплавов на основе алюминия с 3d-переходными и редкоземельными металлами в кристаллическом, жидком и аморфном состояниях. В аморфном и нано-кристаллическом состоянии эти сплавы демонстрируют высокие коррозионные и механические свойства по сравнению с кристаллическими аналогами и исследуются многими научными группами по всему миру, что подтверждает актуальность представленного диссертационного исследования.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, содержащего основные выводы работы, и списка цитируемой литературы. Она изложена на 160 страницах, содержит 6 таблиц и 77 рисунков. Список литературы включает 110 наименований.

В **первой главе** проведен подробный обзор и анализ существующих данных по строению, кристаллизации и свойствам сплавов Al-Ni-Co-R (R = Nd, Sm, Gd, Tb, Yb) в кристаллическом, жидком и аморфном состояниях. Показана актуальность тематики диссертационной работы, сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** описаны методы исследований теплофизических свойств (плотности и электрического сопротивления) сплавов Al-Ni-Co-R в кристаллическом и жидком состояниях. Для изучения аморфных и нано-кристаллических сплавов приведена информация о методах рентгеноструктурного анализа и просвечивающей электронной микроскопии, кроме того, приведено описание методов дифференциальной сканирующей калориметрии,

дифференциального термического анализа и измерения электрического сопротивления аморфных лент.

Особое внимание автор уделяет особенностям методов измерения плотности и электрического сопротивления, конструкциям экспериментальных установок и обработке полученных данных. В области высоких температур гамма-денситометрия представляет собой одну из самых точных методик определения термических свойств металлических сплавов в твердом и жидком состояниях, включая сами области твердофазных превращений и плавления-кристаллизации. Автор в своём исследовании приводит описание абсолютного варианта метода проникающего гамма-излучения, ключевой особенностью которого является необходимость точного определения массового коэффициента поглощения – величины, погрешность которой оказывает существенное влияние на результирующую погрешность опытов. Главным отличием абсолютного метода от относительного является отсутствие необходимости в изготовлении эталонных образцов заданного состава. Автором диссертационного исследования проведена существенная работа по модернизации различных функциональных узлов экспериментальной установки по измерению плотности с использованием современного цифрового оборудования и приборов.

Описанный в работе бесконтактный метод измерения электрического сопротивления во вращающемся магнитном поле давно и хорошо известен среди специалистов, занимающихся исследованиями теплофизических свойств сплавов. Проведенная модернизация установки, описание которой приведено в диссертационном исследовании, безусловно, позволило достичь большей эргономичности и автоматизации процесса измерений.

Детальный анализ погрешностей измерений плотности и электрического сопротивления, выполненный автором диссертации, несомненно подтверждает заявляемую точность результатов экспериментов и достоверность полученных данных.

В **третьей главе** описана процедура подготовки образцов и приведены результаты экспериментальных исследований плотности и электрического

сопротивления сплавов $\text{Al}_{86}\text{Ni}_{8-x}\text{Co}_x\text{R}_6$ ($\text{R} = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Yb}; x = 2, 4$) в твердом и жидком состояниях до 1550 К, а также проведено обсуждение этих данных. По результатам гамма-экспериментов установлено, что при нагреве все изученные сплавы плавятся в широком интервале температур. При этом ниже некоторой температуры, которую диссертант обозначил T_3 , наблюдается гистерезис данных по плотности в циклах нагрева-охлаждения. Начало плавления (температура T_S) сопровождается скачкообразным уменьшением плотности на 2,2-5,7 %. Еще один скачок плотности, но уже с ее ростом на 1,3-2,7 %, фиксируется при температуре T_L , автор диссертации связывает ее с температурой ликвидуса. Данные ниже T_S и выше T_3 при нагреве и охлаждении совпадают. Такой вид температурной зависимости плотности был обнаружен впервые. По этой причине автором диссертации были выполнены дополнительные эксперименты с вариацией температурно-временных условий измерений.

Повторный нагрев во всем температурном интервале исследованных сплавов после первичного нагрева и охлаждения показал практически полное совпадение результатов измерений.

Эксперименты с изотермической выдержкой при температуре, незначительно превышающей температуру ликвидус (T_L), но ниже T_3 , показали, что переход из неравновесного состояния расплавов в равновесное может быть осуществлен двумя путями: перегревом расплавов за температуру начала гистерезиса и временными выдержками при температуре незначительно выше температуры ликвидус.

Плотность расплава $\text{Al}_{86}\text{Ni}_4\text{Co}_4\text{Tb}_6$ при повторном нагреве после первичного охлаждения без кристаллизации совпала в пределах погрешности измерений.

Результаты измерений электросопротивления сплавов также демонстрируют наличие гистерезиса этого свойства, однако в жидком состоянии он находится в пределах погрешности метода и лишь в двухфазной области выходит за ее пределы. Температуры солидус и ликвидус на температурных

зависимостях совпадают с температурами, зафиксированными в экспериментах по измерению плотности в пределах ± 2 К.

Анализ совокупности полученных экспериментальных данных позволил Русанову Б.А. сделать предположение, что расплавы Al-Ni-Co-R представляют собой микронеоднородные системы выше температуры ликвидус. При перегреве выше температуры начала гистерезиса плотности, либо при термовременных выдержках происходит распад крупномасштабных неоднородностей, фиксируемых в денситометрических опытах, однако на уровне электронной подсистемы изменений не происходит.

В заключительной части главы построены и проанализированы зависимости исследованных свойств сплавов при одинаковой концентрации никеля и кобальта от атомного номера редкоземельного металла.

В **четвертой главе** описан метод получения аморфных материалов и представлены результаты исследований структуры, свойств и процессов кристаллизации аморфных сплавов $Al_{86}Ni_{8-x}Co_xR_6$ ($R = Nd, Sm, Gd, Tb, Yb; x = 2, 4$). Использовались методы ДТА, ДСК, дифракции рентгеновских лучей, просвечивающей электронной микроскопии, стандартный четырехзондовый метод для измерения электрического сопротивления. Показано, что сплавы кристаллизуются в несколько стадий, с выделением стабильных и метастабильных интерметаллидов различной стехиометрии. Установлена последовательность выделения фаз при кристаллизации аморфных сплавов. Впервые показано, что аморфные сплавы с большим содержанием кобальта - $Al_{86}Ni_4Co_4R_6$ представляют собой системы, обладающие более высокой термической стабильностью и стеклообразующей способностью по сравнению с составами $Al_{86}Ni_6Co_2R_6$.

В целом Русановым Б.А. получен большой объем новых достоверных экспериментальных данных по теплофизическим и структурным свойствам сплавов системы Al-Ni-Co-R в твердом, жидком и аморфном состояниях. Исследованы процессы кристаллизации из жидкого и аморфного состояний, определены характерные температуры, установлена связь структуры аморфных

материалов, морфологии и состава включений от концентрации переходного металла и вида лантаноида. Результаты диссертационной работы имеют важное научное и практическое значение, опубликованы в рейтинговых научных журналах, а также прошли апробацию на Всероссийских и Международных конференциях.

В качестве замечаний отмечу следующее:

1. На странице № 36 диссертации автор указывает ... где B – фактор накопления, зависящий от их энергии гамма-квантов и геометрии установки. В нашем случае этот фактор не превышает 0.00004 ... На самом деле приведена величина не фактора накопления, а его отличие от единицы. Кроме того, отсутствует ссылка на источник, где приведен соответствующий расчет.
2. Температуру T_L , автор диссертации связывает с температурой ликвидуса, однако, даже исходя из приведенных данных, величина T_L это температура завершения неравновесного плавления или более точно температура завершения растворения основной массы тугоплавких соединений в жидком алюминии. Температура ликвидуса это температура начала кристаллизации равновесного расплава или температура в конце процесса рекалесценции (при наличии переохлаждения) и, согласно графикам диссертации, она находится лишь незначительно выше T_S .
3. Используемый гамма-плотномер дает возможность проводить сканирование образцов. Почему автор диссертации не использовал эту возможность, чтобы подтвердить отсутствие градиента состава по высоте образцов?
4. Хотя диссертация хорошо оформлена и написана хорошим русским языком ее чтение требует значительных усилий, т.к. она перегружена первичными экспериментальными данными в ущерб приведения обобщений. В диссертации содержатся незначительные неточности и ошибки. Например, гамма-метод используется для измерения плотности не последние 40 лет, а с конца 60-х годов прошлого столетия; стр. 44; Узел счёта импульсов,

прошедших через тигель с образцом (через тигель проходят не импульсы, а гамма-кванты); стр. 96: Бреговских пиков, а не Береговских пиков и т.д.

Отмеченные недостатки не влияют на достоверность и значимость полученных результатов и сделанных выводов. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации.

На мой взгляд диссертационная работа Б.А. Русанова «Влияние редкоземельных металлов на теплофизические свойства и стеклообразующую способность сплавов Al-Ni-Co-R» полностью соответствует паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния по физико-математическим наукам, а также отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы Русанов Борис Андреевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Главный научный сотрудник лаборатории термодинамики веществ и материалов, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1

тел.: 8(383) 336-07-06

E-mail: stankus@itp.nsc.ru


Станкус Сергей Всеволодович
14 февраля 2022 г.

Подпись С.В. Станкуса заверяю.
Начальник отдела кадров ИТ СО РАН





С.Ю. Грехнева