

ОТЗЫВ

официального оппонента Столярова Владимира Владимировича на диссертационную работу Свирида Алексея Эдуардовича «Структура, фазовые превращения и свойства эвтектоидных β -сплавов на медной основе с эффектом памяти формы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации. В работе исследуется возможность эффективного измельчения зеренной структуры за счет высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) и мегапластической деформации (МПД) на поликристаллических эвтектоидных сплавах системы Cu-Al-Ni. Рассмотрены специфические процессы измельчения зерна под действием МПД и непрерывной динамической рекристаллизации в условиях механической нагрузки, обнаружены эффекты пластификации сплавов, что является актуальной металлургической задачей как с научной, так и практической точек зрения.

Структура и основное содержание работы. Диссертация работа Свирида А.Э. объемом в 151 страницу включает общую характеристику работы, пять глав с выводами, заключение, список цитируемой литературы из 149 источников.

Введение содержит разделы по обоснованию актуальности тематики диссертационной работы, постановке ее цели и задач, определению научной новизны, теоретической и практической значимости, формулированию положений, выносимых на защиту, обоснование степени достоверности результатов и личного вклада, а также сведения об опубликованных материалах в научных журналах и докладах на конференциях различного уровня, о связи работы с научными программами и соответствии паспорту научной специальности.

Первая глава представляет известные в литературе данные о термоупругом мартенситном превращении (ТМП). Рассмотрены основные закономерности влияния легирования на ТМП, структуру и физические

свойства низкотемпературных мартенситных фаз. Изложены современные представления о явлениях, происходящих в сплавах в предмартенситном состоянии. Сделано заключение, что к настоящему времени нет достаточно убедительных и непротиворечивых экспериментальных данных о роли различного легирования в структурно-фазовых превращениях, их влиянии на температуру и особенности ТМП, физические и механические свойства эвтектоидных сплавов на основе системы легирования Cu-Al-Ni, не определены полные зависимости ТМП трехкомпонентных сплавов, изучаемых в данной работе, от их химического состава, температуры и других внешних воздействий. В завершающем разделе главы обоснованы поставленные задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** приведены составы более 20 исследуемых сплавов Cu-Al-Ni, способы и режимы их деформационной и последующей термической обработки. Описаны экспериментальные методики исследования микроструктуры и комплекса механических свойств. В качестве основных способов МПД были выбраны кручение под высоким давлением (КВД) и одноосное сжатие (осадка). Как классическую термомеханическую обработку использовали высокотемпературный изотермический отжиг сплавов после горячейковки с закалкой в воде при комнатной температуре (ВТМО). При изучении фазового состава и микроструктуры сплавов преимущественно применялись методы рентгеноструктурного анализа, просвечивающей, растровой электронной микроскопии и оптической микроскопии. Измерения механических свойств выполняли методами одноосного растяжения, сжатия и микроиндентирования.

В **третьей главе** было изучено влияние химического состава на фазовый состав и микроструктуру, структурные типы аустенита и образующегося мартенсита, температуры ТМП и физико-механические свойства тройных сплавов систем Cu – (7 – 10)Al – 4.5Ni, Cu – (9-14)Al – 3Ni. Также исследовано влияние допирования бором на структурное и

механическое поведение сплавов Cu-Al-Ni. Представлены примеры реализации эффекта памяти формы (ЭПФ) на образцах сплава Cu-14Al-3Ni.

В четвертой главе было впервые исследовано влияние МПД для β -сплавов на основе Cu посредством кручения сдвигом под высоки давлением методом КВД. Данные ПЭМ показали, что КВД на 10 оборотов в мартенситном сплаве Cu-14Al-3Ni приводит к получению нанокристаллической (НК) структуры, на что указывает кольцевое распределение рефлексов на микроэлектронogramмах и темнопольная ПЭМ. В работе были также впервые проведены эксперименты с нагревом образцов НК-сплава Cu-14Al-3Ni после КВД, выполнен микроструктурный анализ влияния термообработки в широком интервале температур (вплоть до 1073К), измерены механические свойства и изучены характер разрушения образцов при различных температурах деформации.

Пятая глава содержит оригинальные данные о влиянии на структурно-фазовые превращения и механические характеристики сплава Cu-14Al-4Ni контролируемого на испытательной машине типа «Instron» одноосного сжатия (осадки), как при комнатной, так и при повышенных температурах. Механические испытания осадкой при повышенных температурах проводили в интервале температур 673-1073 К с шагом 100 К. Установлено, что рост температуры испытаний обеспечивает изменение стадийности и характера пластической деформации по сравнению с испытаниями при комнатной температуре. Показано, что повышение температуры деформации осадкой от комнатной температуры вплоть до 673 К при смене типа структуры сплава от мартенситного к аустенитному не привело к изменению величины $\sigma_{0.2}$, сохранившейся на уровне 400 МПа при росте предела прочности σ_b .

В заключении сформулированы основные общие выводы по диссертационной работе.

Научная новизна результатов диссертационной работы

Полученные Свиридом А.Э. результаты вносят существенный вклад в развитие современных представлений о влиянии легирования, последующей термообработки и мегапластической деформации на эволюцию структуры, фазового состава и свойств поликристаллических эвтектоидных сплавов системы Cu-Al-Ni:

1. Установлено, что основными причинами подавления термоупругих мартенситных превращений и эффекта памяти формы в эвтектоидных сплавах системы Cu-Al-Ni и развития в них катастрофической зернограницной хрупкости являются эвтектоидный распад, крупнозернистость аустенита и его высокая упругая анизотропия. Определены основные морфологические признаки пакетно-пирамидального мартенсита и зафиксировано снижение в диапазоне (900 – 250) К температур термоупругих мартенситных превращений в закаленных сплавах при повышении содержания Al от 9.0 до 14.0 масс. %.
2. Впервые показано, что в исходно крупнозернистых (размер зерна ~ 1 мм) сплавах может быть получена мелкозернистая структура (размер зерна ~ 0.15–0.2 мм) как за счет легирования (7.5–9.5) масс. % Al или (0.1–0.2) масс.% В, так и использования повторного рекристаллизационного отжига с закалкой или контролируемого изотермического сжатия при температурах выше границы эвтектоидного распада. При этом уменьшение размеров субструктурных элементов мартенсита обеспечивает более однородное распределение в объеме зерен нормальных и сдвиговых напряжений.
3. Обнаружено, что в сплавах Cu-Al-Ni к радикальному измельчению до ультрамелкозернистого состояния (с размером зерна ~1–5 мкм) приводит деформация кручением под высоким давлением с последующим кратковременным отжигом и посредством изотермической осадки при температурах вблизи или ниже границы эвтектоидного распада, обеспечивающая при этом их высокую твердость и прочность.

4. Получен эффект пластификации сплавов в мелко- и ультрамелкозернистом состоянии после одноосного сжатия в аустенитном состоянии, а также в мартенситном состоянии при механических испытаниях на растяжение.

5. Выявлена корреляция пластичности механизмов разрушения сплавов системы Cu-Al-Ni: в пластичных сплавах реализуется преимущественно вязкий мелкочечный внутризеренный механизм разрушения в отличие от зернограничного механизма разрушения хрупких крупнозернистых сплавов-прототипов.

Практическая значимость полученных результатов

Показано, что установленные температуры термоупругих мартенситных превращений сплавов Cu-Al-Ni изменяются в очень широком диапазоне, что определяет широкие возможности их применения в различных сферах техники, подбирая химический состав и способы обработки в зависимости от условий эксплуатации, требуемого интервала температур, реализуемой термо- и механоупругой обратимой деформации и памяти формы, а также и других эффектов.

Результаты работы соответствуют поставленным целям и задачам, их **достоверность** подтверждается воспроизводимостью и согласием с более ранними литературными данными. Для экспериментов и исследований в работе было использовано аттестованное сертифицированное оборудование.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

Литобзор

1. Предпочтения выбора системы Cu-Al-Ni, как основного материала исследования, в сравнении с системой Cu-Zn-Al, не являются достаточно убедительными.

Методы исследования

2. Отсутствует информация о размерах образцов при испытании на растяжение (рис.2.4) и сжатие (рис.2.8).

3. Регистрация ТМП выполнена разными методами (РСА, резистивный, магнитная восприимчивость, оптика, ПЭМ). Какой из методов является основным? Во всех ли случаях указанные методы подтверждают друг друга? (рис.4.19)

Результаты

4. При интерпретации рис.4.5 следовало бы подчеркнуть упрочняющую роль старения, начинающегося при более низких температурах, по сравнению с разупрочнением, вызванным рекристаллизацией.

5. Корректное сравнение механических свойств на (рис.4.11) возможно только для характеристик прочности, поскольку испытания были выполнены на образцах, отличающихся формой и размерами, а также на разных испытательных машинах.

6. Полезным было бы привести результаты исследований любых видов стабильности и функциональных свойств деформированных состояний, особенно подвергнутых КГД.

7. Используется классификация и терминология, не принятые в научных статьях (проэвтектоидный распад, «мелко- и среднезернистые» структуры)

Вышеуказанные вопросы и замечания не снижают общий высокий уровень диссертационной работы. Диссертация представляет собой законченную работу, в рамках которой проведено большое количество всесторонних экспериментальных исследований и дана научно обоснованная их интерпретация.

Содержание диссертации соответствует пункту 1 «Теоретическое и экспериментальное изучение физической природы свойств металлов и их сплавов, неорганических и органических соединений, диэлектриков и в том числе материалов световодов как в твердом, так и в аморфном состоянии в зависимости от их химического, изотопного состава, температуры и давления»; пункту 2 «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной

природы и дисперсные системы» и пункту 3 «Изучение экспериментального состояния конденсированных веществ (сильное сжатие, ударные воздействия, изменение гравитационных полей, низкие температуры), фазовых переходов в них и их фазовые диаграммы состояния» паспорта специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Содержание автореферата А.Э. Свирида соответствует содержанию диссертации.

Основное содержание диссертации представлено в 9 научных публикациях, в том числе – 6 статьях в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 2 главы в монографиях, 10 тезисов докладов на российских и международных конференциях. Основные результаты, выводы, положения и рекомендации работы докладывались и обсуждались на 7-ми российских и международных конференциях.

Считаю, что диссертационная работа «Структура, фазовые превращения и свойства эвтектоидных β -сплавов на медной основе с эффектом памяти формы» является законченной научно- квалификационной работой и полностью удовлетворяет требованиям пункта 9 Положения «О присуждении ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Свирид Алексей Эдуардович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник,
ФГБУН Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва

Столяров
Владимир
Владимирович

Дата подписа

ноября 2020 г.

в Столярова В.В.

Ведущий специалист
по качеству

С. М. Резанов

С отзывом
ознакомлен
19.11.2020

7
Свирид
А.Э.

СВЕДЕНИЯ ОБ ОФИЦИАЛЬНОМ ОППОНЕНТЕ

по диссертации Свирида Алексея Эдуардовича «Структура, фазовые превращения и свойства эвтектоидных β -сплавов на медной основе с эффектом памяти формы», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Фамилия, имя, отчество	Столяров Владимир Владимирович
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень (с указанием шифра специальности по которой защищена)	доктор технических наук, 05.16.01
Основное место работы	
Должность	Главный научный сотрудник
Наименование подразделения	Лаборатория узлов трения для экстремальных условий
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)
Почтовый индекс, адрес, веб сайт, телефон, адрес электронной почты организации	101990, Москва, М.Харитоньевский, пер., 4 www.imash.ru (495) 624-98-63 info@imash.ru

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

1. Q. Zhang, W. P. Song, X. H. Li, V. V. Stolyarov, X. Y. Zhang, Stress-dependent deformation behaviour in bulk titanium–nickel alloys, *Materials Science and Technology*, 32, 12, 2016, 1200-1205.
2. V. V. Stolyarov, Electroplastic Effect in Nanocrystal and Amorphous Alloys, *Inorganic Materials*, 2016, Vol. 52, No. 15, pp. 1541–1544.
3. Misochenko, A.A., Chertovskikh, S.V., Shuster, L.S., Stolyarov, V.V., Influence of Grain Size and Contact Temperature on the Tribological Behaviour of Shape Memory Ti49.3Ni50.7 Alloy, *Tribology Letters*, Vol. 65, Issue 4, 1 2017, Номер статьи 131
4. S. V. Dmitriev, R. I. Babicheva, D. V. Gunderov, V. V. Stolyarov, K. Zhou, Martensitic phase transformation in NiTi bi-crystals with symmetric $\Sigma 25$ twist and tilt grain boundaries, *Letters on Materials* 8 (2), 2018 pp. 225-230.
5. Stolyarov V.V., Features of electroplastic effect in alloys with martensite transformation, *Acta Metallurgica Sinica (Engl. Lett.)* 31(12) 2018 1305-1310.
6. A. A.Misochenko, J. V. Tilak Kumar, S. Jayaprakasam, K. A. Padmanabhan, V. V. Stolyarov, Microstructure Evolution and Mechanical Behavior in Shape Memory Nanostructured TiNi Alloy, *Defect and Diffusion Forum, Superplasticity in Advanced Materials - ICSAM 2018*, Vol. 385, pp. 169-174, 2018.
7. J.V., T.K., Jayaprakasam, S., Padmanabhan, K.A., Misochenko, A.A., Stolyarov, V.V. 2019 On the tensile behaviour of coarse and ultrafine grained NiTi, *Materials Characterization*, 149, с. 41-51
8. Frolova, A.V., Tsarenko, Y.V., Rubanik, V.V., Stolyarov, V.V., Rubanik, V.V., Tensile Strain of Alloys with the Martensitic Transformation under the External Impact. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics* 2019 83(10), 1289-1293
9. Терентьев В. Ф., Столяров В. В., Фролова А. В., Сиротинкин В. П., Механические свойства ТРИП-стали ВНС9-III при различных температурах испытания, Деформация и разрушение материалов. 2019. № 11. С. 31-36.
10. T. Kumar, S. Jayaprakasam, Padmanabhan K.A., Frolova A.V., Stolyarov V.V., Influence of strain rate and strain at temperature on TRIP effect in a metastable austenitic stainless steel, *Mater Sci.Eng.A*,777,139046
11. Корольков О.Е., Столяров В.В., Шляпин А.Д., Деформируемость титановых сплавов под током, *Машиностроение и инженерное образование* 1 (62) 2020 стр. 21-27

Даю согласие на обработку моих персональных данных и на размещение их в свободном доступе в сети информационно-телекоммуникационной сети "Интернет" и в единой информационной системе.

Официальный оппонент

В.В. Столяров

Ученый секретарь

В.Ф. Юдкин

*Согласен дать
свое согласие*

В.В. Столяров