

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»

6–10 сентября 2021 г.

Томск, Россия

УДК 539.216 539.22 538.91-405 620.18
ББК Г 534
Т29

Т29 Тезисы докладов Международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», 6-10 сентября 2021 года, Томск, Россия. – Томск : Издательство ТГУ, 2021. – 638 с.

ISBN 978-5-907442-03-0

Издание содержит тезисы международной конференции «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии». Физическая мезомеханика является научным направлением, в рамках которого материал представляется как иерархическая система взаимосвязанных структурных (масштабных) уровней. В книге отражены последние достижения в области развития принципов и методологии физической мезомеханики и результаты их применения к созданию перспективных материалов в интересах развития новых производственных технологий, освоения космического пространства, в том числе дальнего космоса, электроники, атомной энергетики, нефтегазового комплекса, медицины, транспорта и др. Книга адресована научным сотрудникам, инженерам, аспирантам и специалистам, занимающимся вопросами физической мезомеханики, разработки наноструктурных объемных и наноразмерных материалов, наноструктурированием поверхностных слоев, тонкими пленками и покрытиями, нанотехнологиями, компьютерным конструированием новых материалов и технологий их получения, технологиями локальной нестационарной металлургии и обработки материалов, неразрушающими методами контроля.

Публикуется в авторской редакции.

УДК 539.216 539.22 538.91-405 620.18
ББК Г 534

ISBN 978-5-907442-03-0

© Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 2021

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CANTOR**

¹Громов В.Е., ¹Рубанникова Ю.А., ^{1,2}Коновалов С.В., ¹Семин А.П.

¹*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк*

²*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара*

Цель настоящей работы – анализ последних статей по повышению механических свойств ВЭС Cantor.

Высокоэнтروпийные сплавы (ВЭС) представляют собой новый класс металлических материалов, обладающими свойствами, значительно превосходящими свойства обычных сплавов, вследствие чего вызывающими повышенный интерес исследователей в области физического материаловедения [1].

Для наиболее изученного ВЭС CrMnFeCoNi (сплав «Cantor») [2] с ГЦК решеткой несмотря на отличные механические свойства особенно при криогенных температурах, ударную вязкость, превышающую $200 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, и повышенное сопротивление ползучести, он обладает невысокой прочностью $< 400 \text{ МПа}$ при комнатной температуре, что вызывает необходимость ее улучшения. Были предприняты значительные усилия решения этой проблемы за счет зернограницного упрочнения, твердорастворного упрочнения, упрочнения выделениями и соответствующими теоретическими разработками. Другим путем увеличения прочности является частичная аморфизация, поскольку аморфная структура не содержит границ зерен или дислокаций. Вместе с тем CrMnFeCoNi ВЭС обладает повышенной пластичностью и является одним из самых вязких при повышенных температурах [1].

Сравнительно недавно было показано, что в двухфазном ВЭС $\text{Fe}_{50}\text{Mn}_{30}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ возможно достижение прочности и пластичности одновременно за счет деформационно-индуцированного превращения ГЦК решетки в ОЦК или ГПУ фазы.

Особенно хотелось бы отметить работы по созданию нанокристаллического состояния в ВЭС, например, путем высокого давления при кручении. Недостатком такого подхода является ограниченная пластичность высокопрочного сплава. Выход из ситуации возможен за счет создания бимодального распределения размера зерен путем соответствующей термообработки после деформации кручением при высоком давлении. Это может быть обусловлено тем, что крупные зерна больше аккомодируют деформацию, тогда как мелкие находятся в более сложном напряженно-деформированном состоянии, накапливают дислокации и обеспечивают деформационное упрочнение [1].

Создание бимодального распределения зерен по размерам ВЭС для повышения прочности и пластичности выглядит привлекательным из-за кажущейся простоты реализации [3]. Авторы создавали бимодальное распределение зерен путем прокатки иковки гомогенизированных при 1200°C слитков с последующей интенсивной пластической деформацией кручением при давлении $7,8 \text{ ГПа}$. Бимодальное распределение достигалось термообработкой при промежуточных температурах. CrMnFeCoNi сплав остается однофазным при $t^* > 800^\circ\text{C}$, но при кратковременном отжиге (до 2-х минут) достигалось до 2,5% крупнозернистой структуры с одновременным возможным выделением второй фазы (σ фазы), имеющим отрицательный эффект. По мнению [3], негативного эффекта можно избежать на стадии изготовления ВЭС путем более интенсивной консолидации крупных и нанозернистых порошков.

По сравнению с традиционным ВЭС Cantor сплав $(\text{CrMnFeCoNi})_{50}\text{Fe}_{50}$ обладает высокими прочностными параметрами (предел прочности $415\text{--}470 \text{ МПа}$) и пластичностью на уровне $45\text{--}77\%$. ОЦК фаза образовалась в зоне пересечения полос сдвига в зернах ГЦК фазы.

Для понимания природы улучшения механических свойств ВЭС важно знать механизмы пластической деформации и упрочнения. Выполненный в [4] комплекс исследований микроструктурных изменений для ВЭС Cantor при низких и комнатных

температурах вносит вклад в решение этой проблемы. Было показано, что для традиционно выплавленного сплава до деформации $\square$ 7,4% при 77 К и $\square$ 25% при 293 К пластичность является дислокационной. Растягивающие напряжения начало двойникования составляют $\square$ 720 МПа, а сдвиговые $\square$ 235 МПа. Модуль сдвига уменьшается с ростом деформации при 77 К и 293 К.

При температуре 77 К вклад двойниковый с сдвигов в общую деформацию невелик из-за сравнительно низкой объемной доли двойников. Но он существенен в деформационном упрочнении из-за возникновения границ раздела («динамическое» соотношение Холла-Петча).

Вне зоны $\square$ 7,4% истинной деформации скорость упрочнения постоянна при 77 К поскольку активируется двойникование, создающее новые границы раздела. При комнатной температуре наблюдается уменьшение скорости упрочнения с ростом деформации из-за их отсутствия вплоть до разрушения.

Таким образом, комбинация повышенных свойств «прочность-пластичность» при низких температурах по сравнению с комнатными обусловлена более ранним двойникованием, обеспечивающим дополнительное упрочнение. В соответствии с этим, авторы показывают, что предварительно продеформированные при 77 К образцы для образования нанодвойников, при последующем нагружении при 293 К проявляют повышенную прочность и пластичность по сравнению с недеформированными.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-19-00452.

1. Высокоэнтропийные сплавы / В.Е. Громов, С.В. Коновалов, Ю.Ф. Иванов, К.А. Осинцев, Ю.А. Рубанникова, О.А. Перегудов, А.П. Семин. Новокузнецк: Полиграфист. – 2021. – 179 с.
2. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // Mater. Sci. Eng. A. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218.
3. Otto F., Dlouhý A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi highentropy alloy // Acta Mater. 2013. Vol. 61. P. 5743–5755.
4. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // Acta Materialia. 2016. Vol. 118. P. 152–163.