

Влияние дендритной ликвации на фазовый состав и механизмы деформации многокомпонентного сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ *

А.В. Лучин¹, Д.Ю. Гуртова^{1,2}, Е.Г. Астафурова¹

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Изучена микроструктура сплава $\text{Fe}_{40}\text{Mn}_{40}\text{Co}_{10}\text{Cr}_{10}$ в литом состоянии, после пластической деформации и рекристаллизационных отжигов при температурах 1373 и 1473 К. Показано, что литой сплав обладает дендритной микроструктурой, а в дендритных областях помимо основной γ -фазы (с ГЦК-решеткой) образуется ϵ -мартенсит охлаждения с ГПУ-кристаллической решеткой. Дендритная ликвация также препятствует деформационному $\gamma \rightarrow \epsilon$ -превращению в междендритных областях. Установлено, что пластическая деформация и отжиг позволяют получить в исследуемом сплаве однородную по химическому составу аустенитную структуру.

Ключевые слова: многокомпонентные сплавы, фазовые превращения, аустенит, мартенсит, микроструктура.

Введение

На протяжении последних двух десятилетий одним из объектов пристального внимания исследователей выступали высокоэнтропийные многокомпонентные сплавы, наиболее ярким представителем которых по праву можно считать сплав Кантора $\text{Fe}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Co}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Ni}_{20}$ [1]. Ключевой особенностью таких многокомпонентных систем является способность образовывать однофазные твердые растворы несмотря на то, что входящие в состав сплавов элементы имеют разные типы кристаллических решеток. Число основных компонентов в высокоэнтропийных сплавах должно быть не менее пяти, и они должны находиться в эквиатомном соотношении [1, 2]. Не принимая во внимание величину конфигурационной энтропии, можно было бы ожидать, что такие сплавы будут иметь гетерофазную структуру, включающую множество интерметаллидов. Однако сплав Кантора кристаллизуется с образованием дендритной микроструктуры, состоящей из двух близких по составу аустенитных фаз с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой [1, 3].

Внимание к семейству сплавов Кантора обусловлено их превосходными механическими свойствами при пониженных и криогенных температурах, прежде всего высокой пластичностью. Относительное удлинение эквиатомного сплава Кантора при $T = 77$ К может достигать 100%, а предел прочности – превышать 1 ГПа [4]. Такие превосходные низкотемпературные свойства объясняются специфическим сочетанием механизмов деформации: скольжением и «нанодвойникованием», которое реализуется при пониженных температурах благодаря низкой энергии дефекта упаковки материала ($\text{ЭДУ} = 25$ мДж/м² при 298 К) [5–7]. При этом величина ЭДУ не обеспечивает развития деформационных фазовых переходов в сплаве Кантора даже при криогенной деформации растяжением [6]. Именно действие двойникования в качестве механизма деформации, дополнительного к скольжению дислокаций, обеспечивает высокую прочность и пластичность сплава при пониженных температурах [5–8]. При комнатной температуре (293 К) предел текучести сплава Кантора относительно низкий: от 180 до 350 МПа при размере зерен соответственно от 160 до 5 мкм, а основным механизмом деформации сплава выступает дислокационное скольжение [5, 8].

Понижение ЭДУ в сплавах системы FeMnCoCrNi обеспечивает проявление значительных TWIP- и TRIP-эффектов при деформации материала (Twinning Induced Plasticity – пластичность, вызванная двойникованием, Transformation Induced Plasticity – пластичность, вызванная фазовым превращением) [9, 10]. TWIP- и TRIP-эффекты способствуют увеличению пластичности, деформационного упрочнения и прочности сплавов [10, 11]. D. Wei с соавторами [9] показали, что уменьшение ЭДУ в сплаве системы FeMnCoCrNi за счет увеличения концентрации Co и Cr сопровождается изменением механизма деформации от преимущественно дислокационного скольжения в классическом сплаве Кантора к комплексному упрочнению за счет дислокационного скольжения и TWIP/TRIP-эффектов в неэквиатомных сплавах. С точки зрения использования такого подхода к улучшению механических свойств сплавов системы FeMnCoCrNi вызывает интерес неэквиатомный

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00261, <https://rscf.ru/project/20-19-00261>.