МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАСТИЧНОСТИ СПЛАВОВ АЛЮМИНИЯ С МЕДЬЮ

Красников В.С., Майер А.Е., Фомин Е.В., Погорелко В.В., Безбородова П.А., Латыпов Ф.Т., Эбель А.А.

Челябинский Государственный Университет, Челябинск

vas.krasnikov@gmail.com

В работе развивается многомасштабный подход к описанию пластической деформации алюминиевых сплавов, включающий молекулярно-динамический (МД), континуальный и подход дискретной дислокационной динамики (ДДД). На МД уровне исследуется движение и генерация дислокаций в алюминии, содержащем упрочняющие включения, характерные для Al-Cu системы. Исследуются как классические типы упрочняющих включений, так и гибридные, зарегистрированные при детальном анализе электронно-микроскопических изображений в последнее десятилетие. Показано, что в условиях высокоскоростной деформации ($\geq 10^6$ c^{-1}) наиболее часто реализуемыми механизмами взаимодействия дислокаций с включениями является перерезание и образование петли Орована. Определены размеры разных типов включений, для которых наблюдается переход от перерезания к образованию петли Орована. Продемонстрировано, что при накоплении пластической деформации в системе при многократном прохождении дислокации даже для прочных включений, например θ’ фазы, наблюдается переход от формирования петли Орована к перерезанию.

Полученные МД данные обобщаются с помощью континуальных моделей, описывающих основные процессы, наблюдаемые на атомарном уровне, что позволяет далее их использовать на более высоком структурном уровне. Для описания механического отклика представительного объема сплошной среды предложена двумерная схема ДДД. Расчетная область содержит большое число дислокаций и упрочняющих включений. Взаимодействие между дислокациями и включениями описывается с помощью ранее предложенных моделей, откалиброванных на МД данных. Размеры включений задаются в соответствии с логнормальным распределением, наблюдаемым в реальных сплавах.

Проведены исследования зависимости напряжения течения сплава в зависимости от типа упрочняющих включений, распределения частиц по размерам и температуры. Полученные значения напряжения течения, коэффициентов температурного разупрочнения достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными по динамической сдвиговой прочности алюминиевых сплавов. Проведенные исследования зависимости напряжения течения от характерного размера упрочняющих частиц адекватно отражают наблюдаемые в эксперименте величины и тенденции с учетом экспериментальной погрешности. Продемонстрировано, что при фиксированной концентрации легирующих атомов, большую сдвиговую прочность и меньшую склонность к пластической локализации демонстрируют сплавы с мелкими упрочняющими включениями. Показано, что с ростом пластической деформации возможно разрушение упрочняющих включений с последующим снижением вклада включений в общее напряжение течения сплава. Установлен эффект гибридизации θ’ фазы, выражающий в росте сдвиговой прочности на 35% при постоянной концентрации атомов меди