

## ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНЫХ УПРОЧНЯЮЩИХ ЧАСТИЦ НА ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ

Данейко О.И., Ковалевская Т.А.

Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Томск, Россия, E-mail: [olya\\_dan@mail.ru](mailto:olya_dan@mail.ru)

Создание материалов все более сложного фазового и компонентного состава, обладающих уникальными свойствами, является неуклонной тенденцией технологии конструкционных материалов. Целенаправленное управление прочностными и пластическими свойствами, как и выявление оптимальных структурных состояний конструкционных дисперсно-упрочненных материалов невозможны без выяснения механизмов формирования высокой прочности при деформации. Эффективным путем исследования процесса пластической деформации служит сочетание реального физического эксперимента с математическим моделированием и вычислительным экспериментом. Моделирование позволяет описать процесс пластической деформации в соответствии с сопутствующими ему и реализующими его структурными превращениями.

Целью настоящей работы является исследование пластического поведения материала с алюминиевой матрицей и упрочняющими некогерентными частицами различной дисперсности при разных температурах. Для исследования использовалась математическая модель пластической деформации дисперсно-упрочнённых материалов с ГЦК-матрицей и некогерентными недеформируемыми частицами. Предполагалось, что частицы упрочняющей фазы имеют сферическую форму и равномерно распределены в матрице.

Модель включает уравнения баланса деформационных линейных (сдвигобразующие дислокации, призматические петли вакансионного и межузельного типа, дислокационные диполи вакансионного и межузельного типа) и точечных (межузельные атомы, моновакансии и бивакансии) дефектов с учетом их генерации, аннигиляции и трансформации в процессе пластической деформации. Система дифференциальных уравнений, описывающих процессы накопления линейных и точечных дефектов, имеет общий вид [1–3]:

$$\frac{d\rho_k}{da} = G(\delta, \Lambda_p, \tau_{dyn}, D) + R(\rho_k, \dot{a}),$$

где  $\rho_k$  – плотность дефекта какого-либо типа;  $a$  – деформация сдвига;  $\dot{a}$  – скорость деформации;  $G$  – генерация (появление и размножение) и  $R$  – релаксация (аннигиляция и трансформация) какого-либо дефекта;  $\delta$  – диаметр упрочняющих частиц;  $\Lambda_p$  – расстояние между частицами;  $\tau_{dyn}$  – напряжение, избыточное над статическим сопротивлением движению дислокаций;  $D$  – диаметр зоны сдвига. Каждый параметр модели имеет физический смысл и может быть вычислен из физических соображений (или указаны пределы его изменения) [4, 5].

Предполагалось, что формирование дислокационных диполей начинается при достижении в материале критической плотности дислокаций [5], определяемой масштабными характеристиками упрочняющей фазы (размером частиц, расстоянием между центрами частиц). Внешнее воздействие на материал задается уравнением или системой уравнений, имеющих различную структуру в зависимости от физического воздействия, которое является причиной деформации.

В модели учтены основные механизмы генерации и аннигиляции деформационных дефектов [5]. В уравнениях баланса дислокаций учтена аннигиляция винтовых дислокаций поперечным скольжением, невинтовых – переползанием за счет осаждения на них точечных дефектов. Функции, описывающие скорость генерации и аннигиляции деформационных дефектов, получены на основе анализа механизмов формирования зоны кристаллографического сдвига в дисперсно-упрочненных материалах [5].

С использованием математической модели пластической деформации дисперсно-упрочненных материалов с ГЦК-матрицей и некогерентной упрочняющей фазой проведено исследование влияния температуры деформации на кривые деформационного упрочнения и кинетику составляющих дефектной подсистемы при разных сочетаниях масштабных характеристик упрочняющей фазы.

Показано, что в широком спектре температур деформации с увеличением размера частиц или уменьшением расстояния между ними напряжение течения возрастает. Для деформационного упрочнения гетерофазных сплавов характерно существование двух стадий, разделенных критической плотностью дислокаций, при превышении которой начинается формирование дислокационных диполей, вследствие чего увеличивается общая плотность дислокаций и значительно увеличивается упрочнение материала. При увеличении расстояния между упрочняющими частицами критическая плотность дислокаций в материале достигается при меньшей степени деформации и, следовательно, дислокационные диполи в таких сплавах формируются на более ранних стадиях деформации. Скорость накопления дислокационных диполей значительно выше в материалах с малым расстоянием между упрочняющими частицами. Поэтому может сложиться ситуация при некоторой степени деформации, когда в материале с меньшей объемной долей частиц напряжение течения будет более высоким, чем в сплаве с большей объемной долей.

При высоких температурах дислокационные диполи не формируются, что является одной из причин слабого деформационного упрочнения материала.

Наблюдается уменьшение напряжения течения с увеличением температуры деформации (рис. 1). Отсутствие диполей в составе дислокационной структуры приводит к монотонному уменьшению напряжения течения при возрастании температуры деформации (рис. 1, кр. 1-7). Напряжение течения увеличивается при уменьшении размера частиц в пределах одной объемной доли упрочняющей фазы.

Появление дипольных структур в составе дислокационного ансамбля дисперсно-упрочнённого сплава с размером частиц  $\delta = 50$  нм при низких температурах нарушает монотонную последовательность уменьшения напряжения течения с ростом размера наночастиц (рис. 1, кр. 9). Вместе с тем, формирование дипольных дислокационных конфигураций в материалах является причиной наличия областей сильной температурной чувствительности на кривых температурной зависимости напряжения течения (рис. 1, кр. 8, 9).

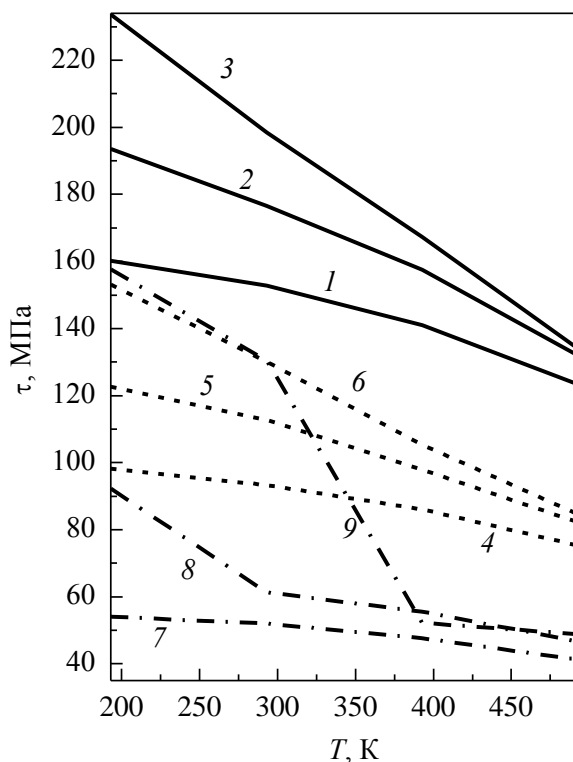


Рисунок 1 - Температурная зависимость напряжения течения. Объемная доля упрочняющей фазы 0.1 %. Диаметр частиц, нм: кр. 1-3 – 10, кр. 4-6 – 20, кр. 7-9 – 50. Степень деформации: кр. 1, 4, 7 – 0.05; кр. 2, 5, 8 – 0.1; кр. 3, 6, 9 – 0.2

Температурная зависимость напряжения течения при малых степенях деформации (рис. 1, кр. 1, 4, 7) менее выражена, чем при больших деформациях. При высоких температурах значимый вклад в аннигиляционные процессы в дислокационной подсистеме вносят термодинамически равновесные точечные дефекты, что приводит к заметному снижению напряжения течения. Наиболее сильно

температурная зависимость напряжения течения выражена при низких температурах деформации. Это обусловлено тем, что при увеличении температуры всё больше точечных дефектов становятся подвижными и включаются в аннигиляционные процессы

Обнаружен диапазон температур для материалов с разным сочетанием масштабных характеристик упрочняющей фазы, в котором наблюдается термическая стабильность напряжения течения. Выявлены области сильной температурной зависимости напряжения течения.

Показано, что в материалах с наноразмерными частицами дислокационные диполи не образуются на протяжении всего процесса пластической деформации в условиях постоянной скорости деформации в широком спектре температур вплоть до высоких степеней деформации. Таким образом, дислокационная структура материалов, упрочненных наноразмерными частицами, включает в себя наряду со сдвигообразующими дислокациями призматические петли вакансионного и межузельного типа.

Таким образом, в настоящей работе показано, что размер упрочняющих частиц является определяющим параметром для величины напряжения течения дисперсно-упрочнённых сплавов при разных температурах деформации. Наблюдается монотонное уменьшение напряжения течения с ростом температуры деформации. В докритической области плотностей дислокаций увеличение размера частиц упрочняющей фазы (при фиксированной объёмной доле упрочняющей фазы) снижает напряжение течения. С появлением дипольных конфигураций в составе дислокационного ансамбля значительно увеличивается плотность дислокаций и напряжение течения соответствующих материалов, что влечёт за собой нарушение монотонного снижения напряжения течения с ростом размера упрочняющих частиц.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Daneyko O.I., Kovalevskaya T.A., Kolupaeva S.N., Kulaeva N.A., Semenov M.E. Influence of the temperature and strain rate on the evolution of the dislocation structure of a dispersion-hardened material with FCC matrix // Russian Physics Journal. – 2012. – V. 54. – No. 9. – pp. 989-993.
2. Данейко О.И., Ковалевская Т.А., Колупаева С.Н., Семёнов М.Е., Мелкозёрова Н.А. Влияние скорости деформации на деформационное упрочнение и эволюцию дефектной подсистемы в гетерофазных материалах с ГЦК-матрицей // Изв. вузов. Физика. – 2009. – Т. 52. – № 9-2. – С.125-131.
3. Кулаева Н.А., Данейко О.И., Ковалевская Т.А., Старенченко В.А. Влияние масштабных характеристик упрочняющей фазы со сверхструктурой  $L_{12}$  на эволюцию дислокационных диполей в процессе пластической деформации // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21. – № 3. – С. 1089-1092.
4. Matvienko O., Daneyko O., Kovalevskaya T. Mathematical modeling of nanodispersed hardening of FCC materials / Acta Metallurgica Sinica (English Letters). – 2018. – Vol. 31. – Issue (12). – pp. 1297-1304.
5. Ковалевская Т.А., Виноградова И.В., Попов Л.Е. Математическое моделирование пластической деформации гетерофазных сплавов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1992. – 168 с.