

На правах рукописи



Черкасова Татьяна Викторовна

**ДИСЛОКАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
СПЛАВОВ Cu-Al, Cu-Mn И СООТНОШЕНИЯ ФИЗИКИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ
ДЕФОРМАЦИИ**

Специальность

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Барнаул – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Тришкина Людмила Ильинична

Научный консультант: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук, профессор
Конева Нина Александровна

Официальные оппоненты: **Иванов Юрий Федорович**
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБУН «Институт сильноточной электроники СО РАН»,
ведущий научный сотрудник лаборатории плазменной
эмиссионной электроники

Коваленко Виктор Викторович
доктор физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
индустриальный университет»,
доцент кафедры физики им. профессора В.М. Финкеля.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет
имени Г.Р. Державина», г.Тамбов.

Защита состоится « ____ » _____ 2016 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.04 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46., e-mail: veronika_65@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова.

<http://www.altstu.ru/main/scienceevent/2952/>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук,
доцент



Романенко В.В.

Примечание: отзывы на автореферат, заверенные гербовой печатью организаций, просим присылать в 2-х экз. на адрес университета и e-mail: veronika_65@mail.ru

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для применения поликристаллических сплавов с размерами зерен микро- и мезоуровня, имеющих определенные заданные механические свойства, необходимо иметь полную физическую картину взаимосвязи предела текучести, напряжения течения с размером зерен, накоплением дефектов, энергией дефекта упаковки (ЭДУ), величиной твердорастворного упрочнения и др. Значительный интерес в этом отношении представляют сплавы систем Cu-Al и Cu-Mn, в которых в широких пределах можно изменять ЭДУ и твердорастворное упрочнение.

Физика пластической деформации в указанном выше научном направлении продвинулась достаточно далеко. Так, хорошо известна взаимосвязь напряжения течения σ с размером зерна d (соотношение Холла-Петча) [Petch N.J. 1953г, Hall E.O. 1951г]:

$$\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2}, \quad (1)$$

где σ – предел текучести материала, σ_0 – сопротивление деформированию монокристалла, k – коэффициент Холла-Петча, d – средний размер зерна. Соотношение (1) предполагает наличие прямолинейной зависимости между σ и $d^{-1/2}$. Тем не менее, имеются некоторые интервалы размеров зерен, где наблюдается отклонение от прямолинейной зависимости $\sigma = f(d^{-1/2})$. По данным различных исследователей показатель степени при d может изменяться в зависимости от типа материала. Значение коэффициента Холла-Петча k зависит от интервала размера зерен. Практически нет данных о том, как этот коэффициент зависит от концентрации твердого раствора и температуры испытания. Целенаправленно на широком спектре сплавов этот вопрос не изучался.

При анализе упрочнения металлических материалов часто используют взаимосвязь плотности дислокаций с напряжением течения, которая выражается соотношением Тейлора:

$$\sigma = \sigma_f + m \alpha G b \sqrt{\rho}, \quad (2)$$

где σ_f – сопротивление деформированию недислокационного происхождения, m – фактор Шмида, α – параметр, характеризующий величину междислокационного взаимодействия, ρ – скалярная плотность дислокаций. Согласно литературным данным, это соотношение выполняется как для чистых металлов (α -Fe, Ni, Al), так и для некоторых сплавов: Cu-Mn, Cu-Al и Al-Mg. Основные результаты получены для монокристаллов. Для поликристаллов имеются сведения лишь для ограниченного интервала размеров зерен. Соотношение Тейлора часто используется для оценки вклада дислокационной структуры в сопротивление деформированию. При этом всегда встает вопрос о величине параметра α , его зависимости от температуры испытания и характеристик материала. Величина этого параметра известна для монокристаллов меди. Именно это значение часто используется при оценке дислокационного вклада в сопротивление деформированию для различных материалов. Таким образом, вклад дислокационной составляющей в сопротивление деформированию в связи с этим оценивается достаточно приблизительно.

Важным соотношением физики пластической деформации является соотношение Холта [Holt D.L. 1970г.]:

$$D = C \rho^{-1/2}, \quad (3)$$

где D – размер ячеек, C – коэффициент пропорциональности. Соотношение экспериментально подтверждено в основном на ГЦК чистых металлах Ni, Al, Cu и для некоторых ГЦК поликристаллических сплавов Cu-Al и Cu-Mn. Ячеистая дислокационная субструктура (ДСС) является одной из часто наблюдаемых субструктур в деформированных материалах с повышенной ЭДУ. Выполнимость соотношения Холта – свидетельство процесса самоорганизации ДСС. Важным представляется целенаправленная проверка выполнимости этого соотношения для широкого круга материалов, в частности, для поликристаллов с разными размерами зерен.

Дислокации при деформации сначала испускаются из источников, а затем тормозятся при взаимодействии с другими дислокациями – это относительно слабые барьеры для движения дислокаций. Размножение дислокаций и их торможение являются случайными процессами,

поэтому их называют статистически запасенными дислокациями (СЗД), их плотность – ρ_s . Другая компонента средней скалярной плотности дислокаций – геометрически необходимые дислокации (ГНД), их плотность – ρ_G . Возникновение ГНД обусловлено наличием градиента пластической деформации. Представление о ГНД было введено М.Ф. Эшби [Ashby M.F. 1970г.] для объяснения роли границ зерен (ГЗ) в пластической деформации. Фактически плотность ρ_G определяет неоднородность деформации, связанную не только с ГЗ, но и с другими факторами, например, наличием частиц второй фазы и др. Если предположить, что вклады ρ_s и ρ_G в величину $\langle\rho\rangle$ являются аддитивными, то скалярную плотность дислокаций можно представить в следующем виде:

$$\rho = \rho_s + \rho_G. \quad (4)$$

Из анализа и сопоставления теоретических представлений о ГНД (М.Ф. Эшби, Т. Кортни [Courtney T.H. 2000г.]) и скалярной плотности дислокаций ρ (А.Н. Орлов [1977 г.]) следует, что величина ρ_G должна составлять 0.1 от $\langle\rho\rangle$. Экспериментально этот вопрос не исследован. Соответственно не совсем четко представляется роль ГНД в пластической деформации поликристаллов с разными размерами зерен.

В связи с этим **актуальным** является провести комплексное исследование эволюции параметров ДСС с развитием деформации, температурой испытания, состава сплавов и размера зерен. И на этой основе экспериментально обосновать некоторые соотношения физики пластической деформации.

Степень разработанности темы. К настоящему времени имеются данные по классификации типов ДСС и последовательностях их превращений при деформации ряда ГЦК твердых растворов. Количественные параметры, характеризующие дислокационную структуру для поликристаллических материалов, имеются лишь для некоторых размеров зерен. Нет полной картины влияния размера зерен на выполнимость ряда известных фундаментальных соотношений физики пластической деформации. Имеются отдельные экспериментальные данные о плотности геометрически необходимых дислокаций. Сведения о влиянии размера зерен и степени деформации на плотность ГНД и ее долю в скалярной плотности дислокаций отсутствуют.

Цель исследования. Изучение эволюции дислокационной структуры с деформацией поликристаллических сплавов систем Cu-Al и Cu-Mn с разными размерами зерен при разных температурах испытания и определение ее параметров. На этой основе провести экспериментальное обоснование некоторых соотношений физики пластической деформации.

В работе были поставлены и решены следующие **задачи исследования**:

- изучить эволюцию типов ДСС с деформацией в поликристаллических сплавах Cu-Al и Cu-Mn, измерить параметры, характеризующие разные типы ДСС, выявить влияние размера зерен, концентрации твердого раствора, степени деформации на изменение параметров ДСС;
- установить влияние концентрации твердого раствора, размера зерна, степени и температуры деформации на накопление в сплавах дислокаций, определить плотность дислокаций ($\rho_{\text{сост}}$) в каждом конкретном типе ДСС, получить зависимости $\sigma = f(\rho^{1/2})$ и $\sigma = f(\rho_{\text{сост}}^{1/2})$ для исследуемых сплавов, определить параметры междислокационного взаимодействия α и $\alpha_{\text{сост}}$ в соотношении Тейлора и установить влияние размера зерна, температуры деформации и концентрации твердого раствора на этот параметр;
- изучить взаимосвязь параметров ячеистой ДСС, исследовать выполнимость соотношения Холта при разных размерах зерен и температурах испытания;
- исследовать накопление статистически запасенных и геометрически необходимых дислокаций с деформацией, выявить влияние размера зерен, установить соотношение между величинами ρ_s , ρ_G и $\langle\rho\rangle$ в зависимости от степени деформации и размера зерна, определить влияние концентрации твердого раствора на накопление СЗД и ГНД в разных типах ДСС;
- определить взаимосвязь между напряжением течения и размером зерен в соответствии с соотношением Холла-Петча для исследуемых сплавов в широком интервале размеров зерен, установить влияние концентрации твердого раствора и температуры испытания на параметр k в этом соотношении;

- выявить роль эволюции дислокационной структуры при развитой пластической деформации в мало- и высококонцентрированных твердых растворах на зарождение микротрещин и пластичность исследуемых сплавов.

Научная новизна работы:

- проведено исследование дислокационной структуры и ее параметров в поликристаллических сплавах систем Cu-Al и Cu-Mn с размерами зерен 10, 100 и 200 мкм при разных степенях деформации, температурах испытания и концентрациях твердого раствора; проведено обобщение результатов с использованием данных, полученных ранее в коллективе для размеров зерен 20, 40, 60, 120 и 240 мкм;
- проведена проверка выполнимости соотношения Тейлора для широкого интервала размеров зерен. Определены параметры междислокационного взаимодействия α и $\alpha_{\text{сост}}$ в соотношении Тейлора, установлено влияние размера зерна, температуры испытания, концентрации твердого раствора на эти параметры;
- выявлена выполнимость соотношения Холта для исследованных сплавов с разными размерами зерен;
- исследовано накопление СЗД и ГНД с деформацией в ГЦК твердых растворах с разным размером зерен, определены соотношения между ρ_s , ρ_G и $\langle \rho \rangle$, их изменения в зависимости от степени деформации и размера зерен. Установлено влияние концентрации твердого раствора на накопление СЗД и ГНД в разных типах ДСС.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в том, что полученные экспериментальные данные о параметрах ДСС и соотношениях между ними в твердых растворах ГЦК сплавов на основе меди позволяют расширить физические представления о закономерностях формирования микроструктур в поликристаллических сплавах с разным размером зерен и их влиянии на механические свойства. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании механических свойств поликристаллических ГЦК твердых растворов с различными типами субструктур.

Методология и методы исследования: использованы методы металлографии, дифракционной электронной микроскопии и механические испытания на растяжение.

Положения, выносимые на защиту

1. Закономерности накопления скалярной плотности дислокаций с деформацией и установление роли размера зерен, температуры испытания и концентрации твердого раствора в поликристаллах сплавов твердых растворов Cu-Al и Cu-Mn.
2. Соотношение Тейлора выполняется для поликристаллических твердых растворов Cu-Al и Cu-Mn с разными размерами зерен как для средней плотности дислокаций, так и для плотности дислокаций в каждом конкретном типе ДСС. Отклонение от прямолинейной зависимости между σ и $\langle \rho \rangle^{1/2}$ наблюдается в слабоконцентрированных сплавах с размером зерна 10 мкм.
3. Соотношение Холла-Петча выполняется для всех исследованных поликристаллических сплавов Cu-Al и Cu-Mn в интервале температур испытания от 293 до 673 К. Экспериментальные значения параметра Холла-Петча k и определены интервалы его значений в зависимости от содержания Al и Mn в сплавах, размера зерен и температур испытания.
4. Соотношение Холта реализуется в слабоконцентрированных твердых растворах с различными размерами зерен при температурах испытания: 293, 373, 473, 573, 673 К.
5. В твердых растворах Cu-Al наблюдается следующее поведение зависимостей ρ_G и ρ_s от степени деформации $\epsilon_{\text{ист}}$: при размере зерна $\langle d \rangle = 10$ мкм компонента ρ_G у границ зерен больше, чем ρ_s вплоть до $\epsilon_{\text{ист}} = 0.15 - 0.20$, при дальнейшем увеличении $\epsilon_{\text{ист}}$ и размера зерна ρ_s всегда больше, чем ρ_G как у границ ГЗ, так и в теле зерна. В сплавах системы Cu-Mn таких особенностей не наблюдается: $\rho_G < \rho_s$ при всех размерах зерен.
6. Различие в эволюции дислокационной структуры с деформацией определяет различную пластичность слабо- и высококонцентрированных твердых растворов систем Cu-Mn и Cu-Al.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных экспериментальных данных в диссертационной работе обеспечивается использованием современных методов исследования, сопоставлением полученных результатов эксперимента с исследованиями в этой области других авторов и статистической обработкой результатов исследования.

Результаты исследований были представлены и обсуждались на следующих научных конференциях: Материалы региональной научной конференции ТГАСУ "Естественные и гуманитарные науки в XXI веке". Томск, 2004 г.; XIX Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 2010, 2016; 13-й Международный симпозиум "Упорядочение в минералах и сплавах". Ростов-на-Дону, 2010, Международный симпозиум ОМА-18 "Упорядочение в минералах и сплавах". Ростов-на-Дону, сентябрь 2015; Материалы Международной конференции "Иерархически организованные системы живой и неживой природы". Томск, 2013; Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. Томск, 2013; VIII Международной конференции "Фазовые превращения и прочность кристаллов". Черноголовка, 2014; XIII Международная школа-семинар «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах». г. Барнаул, 2014; "Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys". Russia-China, 2015; "Перспективные материалы в технике и строительстве" Всероссийская научная конференция молодых ученых с международным участием, ПМТС. Томск, 2014, 2015; Международной конференции "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций". Томск, ИФПМ СО РАН, 2015; XIX Международной конференции "Физика прочности и пластичности материалов". Самара, июнь 2015; LVII Международной конференции "Актуальные проблемы прочности". Севастополь, май 2016.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с научным направлением ТГАСУ №12 "Кристаллическая электронная и дефектная структура металлов и сплавов" и в рамках госзаданий Минобрнауки России № 3.295.2014/к и №461.

Публикации. Содержание диссертации опубликовано в 27 работах, из них 10 статей – в научных журналах из перечня ВАК РФ, 4 статьи в журналах SCOPUS, 13 статей и 4 тезиса в трудах конференций различного уровня.

Личный вклад автора заключается в совместной с научным руководителем и научным консультантом постановке задач исследования, получении, обработке и обсуждении результатов эксперимента, написании статей в соавторстве, выступлении с докладами на научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения и четырех разделов, основных выводов по работе и списка цитируемой литературы из 177 наименований. Работа изложена на 184 страницах машинописного текста, включая 76 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, поставлены и сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура и объем диссертации.

В первом разделе "Классификация дислокационных субструктур. Основные соотношения физики пластической деформации" приводится анализ литературных данных по теме исследования. Представлена классификация поликристаллических материалов по размерам зерен. Проведен анализ выполнимости соотношения Холла-Петча для материалов с разным размером зерен. Дана классификация типов ДСС в ГЦК твердых растворах и последовательность их превращений при деформации. Проведен анализ имеющих данных о выполнимости соотношения Холта в ячеистой ДСС. Проанализированы литературные данные о связи напряжения течения со скалярной плотностью дислокаций в различном интервале деформаций и представлены результаты, свидетельствующие о выполнимости соотношения Тейлора для чистых металлов (Cu, α -Fe, Ni, Al) и для некоторых ГЦК сплавов. Для ГЦК

твердых растворов проведен сравнительный анализ различных факторов, влияющих на накопление средней скалярной плотности дислокаций и ее составляющих: геометрически необходимых и статистически запасенных дислокаций. Раздел завершается постановкой цели и задач исследования.

Второй раздел – "Материалы и методы эксперимента" представлены составы исследуемых сплавов Cu-Mn с содержанием Mn: 0.4; 2; 4; 6; 8; 10; 13; 19; 20; 25 ат.% и Cu-Al с содержанием Al: 0.5; 1; 3; 5; 8; 10; 12; 14 ат.%. Образцы деформировались растяжением при температурах T от 293 K до 673 K на машине «Instron» с постоянной скоростью $2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, с записью диаграмм для определенных степеней деформации $\epsilon_{\text{ист}}$ до момента, пока образец не разрушался.

- методики подготовки образцов для металлографических и электронно-микроскопических исследований (электролитическая полировка, травление, указан состав электролита);

- методики обработки экспериментальных данных: метод секущих для измерения средней скалярной плотности дислокаций, размера зерен, размера дислокационных ячеек, плотности микродвойников, плотности микрополос, расстояний между дислокациями, сгущениями R и дислокационными барьерами r ;

Плотность геометрически необходимых дислокаций ρ_G определялась с использованием формулы:

$$\rho_G = \frac{1}{b} \frac{\partial \phi}{\partial l} = \frac{1}{b} \chi, \quad (5)$$

где b – вектор Бюргерса, χ – кривизна кручения кристаллической решетки. Величина градиента разориентировки $\partial \phi / \partial l$ определялась из ширины изгибного экстинкционного контура Δl при контролируемом изменении угла наклона фольги $\Delta \phi$, измерение которого проводилось в колонне электронного микроскопа, снабженного гониометром. Плотность статистически запасенных дислокаций определялась как разница между средней скалярной плотностью дислокаций и плотностью ГНД, формула (4).

В третьем разделе "Накопление дефектов с деформацией в поликристаллических сплавах систем Cu-Al и Cu-Mn. Роль концентрации твердого раствора, размера зерен и температуры испытания" представлены результаты электронно-микроскопических исследований формирования типов ДСС с изменением концентрации легирующего элемента в поликристаллических сплавах систем Cu-Al и Cu-Mn при разных степенях деформации, температурах испытания и размерах зерен. Рассмотрено влияние выше перечисленных параметров на накопление дислокаций в этих сплавах. Проведено детальное исследование ДСС для сплавов с размерами зерен 10, 100 и 200 мкм. Для полноты картины и обобщения влияния размера зерна на формирование и развитие типов ДСС и ее параметров использовались некоторые данные, которые были получены в диссертационной работе Тришкиной Л.И. в сплавах с размерами зерен 20, 40, 60, 120 и 240 мкм. Рассмотрена выполнимость соотношения Тейлора в различных типах ДСС для всех исследованных сплавов. Исследована выполнимость соотношения Холла-Петча для широкого диапазона размеров зерен. Выявлено влияние температуры и концентрации твердого раствора на величину коэффициентов Холла-Петча (k) и Холта (C).

Рассмотрим формирование типов ДСС для сплавов системы Cu-Al с размером зерна 100 мкм при $\epsilon_{\text{ист}} = 0.10$. На рис. 1 представлены электронно-микроскопические изображения типов ДСС в сплавах системы Cu-Al с разной концентрацией Al от 0.5 до 14 ат.%. В сплавах с концентрацией $C_{\text{Al}} < 8 \text{ ат.}\%$ в начале пластической деформации формируются клубки из дислокаций и ячеистая ДСС, а при $C_{\text{Al}} > 8 \text{ ат.}\%$ – ячеисто-сетчатая и сетчатая ДСС. Повышение степени деформации ($\epsilon_{\text{ист}} \geq 0.20$) приводит к появлению разориентировок и образуются следующие типы ДСС: в сплавах при $C_{\text{Al}} < 8 \text{ ат.}\%$ разориентированная ячеистая и фрагментированная, а при в сплавах $C_{\text{Al}} > 8 \text{ ат.}\%$ – ячеисто-сетчатая и микродвойниковая. Типы

ДСС, которые реализуются в сплавах при степенях деформации 0.30–0.50 с одним и тем же размером зерна приведены на рис. 2.

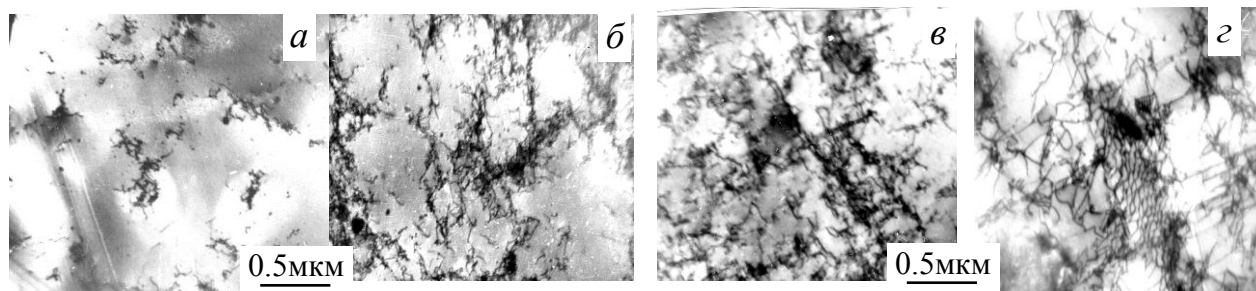


Рис. 1. Электронно-микроскопические изображения типов ДСС в сплавах системы Cu-Al с разной концентрацией легирующего элемента: *а* – клубковая, *б* – ячеистая, *в* – ячеисто-сетчатая, *г* – сетчатая. Степень деформации $\epsilon_{ист} = 0.10$. Размер зерна 100 мкм: *а, б* – $C_{Al} < 5\text{ ат.}\%$, *в* – $C_{Al} = 8\text{ ат.}\%$, *г* – $C_{Al} > 10\text{ ат.}\%$. $T = 293\text{ K}$

При небольших степенях пластической деформации в медно-марганцевых сплавах наблюдается та же последовательность превращений ДСС, что и в сплавах Cu-Al. На рис. 3 представлены электронно-микроскопические изображения типов ДСС при повышенных степенях деформации в сплавах системы Cu-Mn с разной концентрацией Mn (0.4 – 25 ат.%).

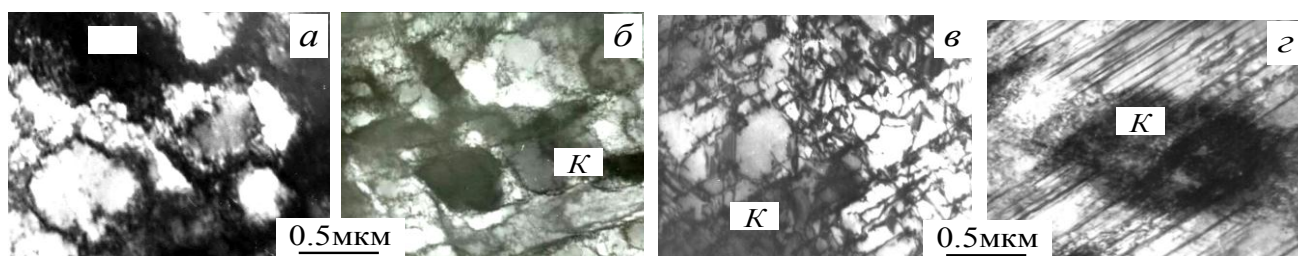


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения типов ДСС в сплавах системы Cu-Al с разной концентрацией легирующего элемента: *а* – разориентированная ячеистая, *б* – фрагментированная, *в* – ячеисто-сетчатая с разориентировками, *г* – микродвойниковая. Степень деформации $\epsilon_{ист} = 0.30-0.50$. Размер зерна 100 мкм: *а, б* – $C_{Al} < 5\text{ ат.}\%$, *в* – $C_{Al} = 8\text{ ат.}\%$, *г* – $C_{Al} > 10\text{ ат.}\%$. $T = 293\text{ K}$. *К* – экстинкционный деформационный контур

Наблюдается следующая последовательность развития типов ДСС с изменением концентрации Mn: разориентированная ячеистая, разориентированная ячеисто-сетчатая и микрополосовая.

Было проведено изучение закономерностей заполнения дислокациями пространства образца сплава в процессе пластической деформации. Были проведены измерения и выполнен анализ расстояний (X) между дислокациями, дислокационными барьерами и дислокационными сгущениями в исследуемых сплавах. На рис. 4 представлены результаты изменения расстояний между дислокациями в зависимости от степени деформации в сплаве Cu-5 ат.% Al с размером зерна $\langle d \rangle = 100\text{ мкм}$ в различных типах ДСС при температурах испытания $T = 293\text{ K}$ (4, *а*), 573 K (4, *б*). Увеличение степени деформации приводит к уменьшению расстояний X между дислокациями во всех исследованных типах ДСС кроме расстояний X внутри ячеек. Дислокации, находящиеся внутри ячеек, под действием напряжения «уходят» в стенки ячеек, тем самым, увеличивая плотность дислокаций в них.

Рассмотрим процесс формирования стенок ячеек с ростом степени деформации, так как они при небольших степенях деформации не полностью сформированы. Часть стенок может состоять из одной или нескольких дислокаций, или большего их числа. На основании проведенных измерений расстояний между дислокациями были построены распределения X ,

которые приведены на рисунке 5 *а, б*. Анализ распределений показывает, что при $\varepsilon_{\text{ист}} = 0.10$ (*а*) наблюдается две стадии образования стенок дислокационных ячеек: заштрихованная часть указывает на формирование клубков из дислокаций, а остальная часть распределения соответствует появлению ячеистой ДСС. При этом вид распределения – двумодальный.

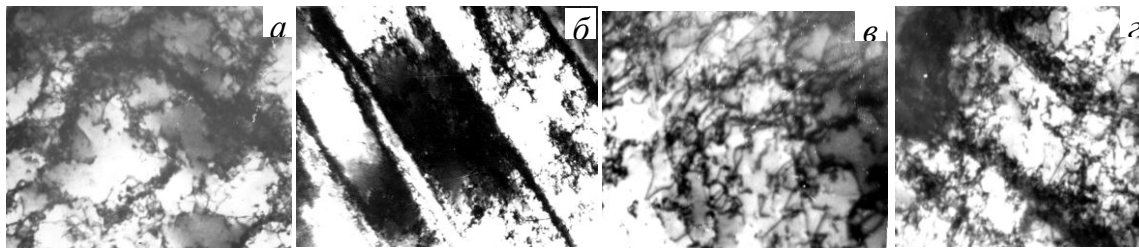


Рис. 3. Электронно-микроскопические изображения типов ДСС в сплавах системы Cu-Mn с разной концентрацией легирующего элемента: *а* – разориентированная ячеистая, *б, г* – микрополосовая, *в* – ячеисто-сетчатая с разориентировками. Степень деформации $\varepsilon_{\text{ист}} = 0.30$. Размер зерна 100 мкм: *а, б* – $C_{\text{Mn}} < 5\text{ат.}\%$, *в* – $C_{\text{Mn}} = 8\text{ат.}\%$, *г* – $C_{\text{Mn}} > 10\text{ат.}\%$

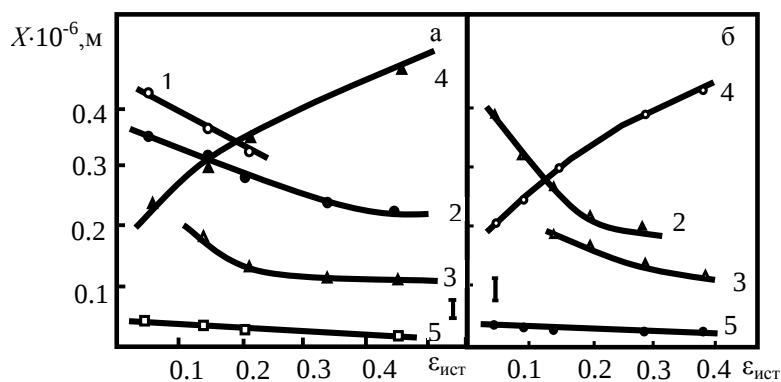


Рис. 4. Зависимости расстояний X между дислокациями в разных типах ДСС от $\varepsilon_{\text{ист}}$ в сплаве Cu-5ат.% Al: 1 – в дислокационном хаосе, 2 – в неразориентированной ячеистой ДСС, 3 – в разориентированной ячеистой ДСС, 4 – внутри ячеек, 5 – в стенках ячеек. $\langle d \rangle = 100$ мкм. T : *а* – 293 К, *б* – 573 К

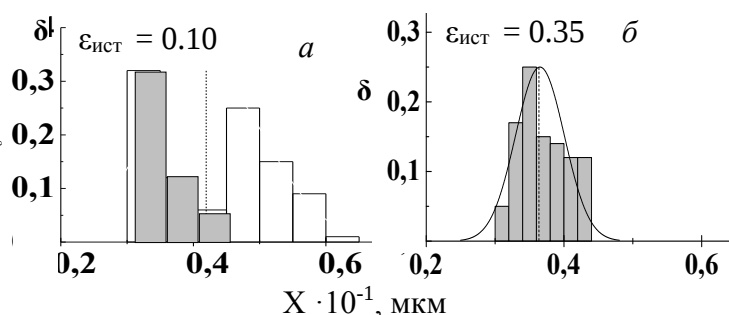


Рис. 5. Распределения расстояний между дислокациями (X) внутри и в стенках ячеек в ячеистой ДСС при $\varepsilon_{\text{ист}}$ и $T = 293$ К, $\langle d \rangle = 100$ мкм. Затененные колонки на распределениях – участки, где хорошо сформировались стенки

Распределения на рис. 5, *б*, соответствуют $\varepsilon_{\text{ист}} = 0.35$. Разброс расстояний между дислокациями в стенках ячеек становится незначительным, сами ячейки достаточно хорошо сформированы, при этом вид распределения одномодальный. В сплавах систем Cu-Mn и Cu-Al с ростом степени деформации при $T = 293$ К расстояния между дислокациями уменьшаются. С повышением температуры испытания в сплавах Cu-Mn расстояния X увеличиваются, а в сплавах Cu-Al – уменьшаются. Было установлено, что повышение T , приводит к появлению дефектов упаковки в сплавах Cu-Al, что свидетельствует о снижении ЭДУ. Это сопровождается увеличением плотности дислокаций в этих сплавах при температурах испытания ниже комнатной, поскольку дислокации оказываются "привязанными" к плоскости скольжения. В сплавах Cu-Mn влияние температуры на величину ЭДУ не обнаружено.

Для проверки соотношения Тейлора (2) для исследуемых в работе сплавов с разной концентрацией Al и Mn, размером зерен и температурой испытания была измерена средняя скалярная плотность дислокаций $\langle \rho \rangle$ и $\rho_{\text{сост}}$, где $\rho_{\text{сост}}$ – средняя скалярная плотность дислокаций в конкретных субструктурах. На рис. 6 приведены зависимости " $\sigma - \langle \rho \rangle^{1/2}$ " для сплава Cu-5ат.% Al с размерами зерен 10 и 200 мкм при разных температурах испытания. Видно, что для

сплава с размером зерен больше 10 мкм реализуется линейная зависимость между σ и $\rho^{1/2}$, что демонстрирует выполнимость соотношения Тейлора (2), а в слабоконцентрированных сплавах с размером зерна 10 мкм наблюдается отклонение от линейной зависимости. Это отклонение связано с высокой плотностью границ зерен в сплаве с малым размером зерна. С уменьшением размера зерен дислокации более интенсивно взаимодействуют с их границами, чем при больших размерах зерен. Отметим, что соотношение Тейлора базируется только на междислокационных взаимодействиях. В связи с этим становится понятным отклонение от выполнимости соотношения Тейлора в поликристаллическом сплаве с размером зерна $\langle d \rangle = 10$ мкм. Следует отметить, что между σ и $\rho_{\text{сост}}^{1/2}$ наблюдается линейная зависимость в сплавах в широком интервале размеров зерен, содержания Al и Mn и температур испытания.

Были выполнены измерения параметров α и $\alpha_{\text{сост}}$ при разных T , размерах зерен $\langle d \rangle$ и концентрациях Al и Mn. Значения параметра α определялись из наклона зависимостей $\sigma = f(\langle \rho \rangle^{1/2})$. Например, для сплавов с концентрацией $C_{\text{Al,Mn}} = 0.5 \text{ ат. \%}$ и $\langle d \rangle = 100$ мкм значение $\alpha = 0.4$, а для сплава с размером зерна 200 мкм – $\alpha = 0.6$. Для

определения параметра $\alpha_{\text{сост}}$ использовались зависимости $\sigma = f(\langle \rho_{\text{сост}} \rangle^{1/2})$, при этом учитывались значения плотности дислокаций в каждом типе ДСС. Например, в неразориентированной ячеистой ($C_{\text{Al}} < 8 \text{ ат. \%}$) при размере зерна 10 мкм параметр $\alpha_{\text{сост}} = 0.65$, а при $\langle d \rangle = 200$ мкм – $\alpha_{\text{сост}} = 0.8$. Экспериментально установлено, что с ростом размера зерна величина $\alpha_{\text{сост}}$ увеличивается. Значения параметра $\alpha_{\text{сост}}$ изменяется от 0.15 до 1.0 в интервале размеров зерен 10 – 200 мкм и увеличиваются с ростом T во всех исследованных типах ДСС. Отметим также, что в разориентированных ДСС в сплавах с повышенным содержанием легирующего элемента величина параметра $\alpha_{\text{сост}}$ выше, чем в неразориентированных ДСС для всех исследованных размеров зерен.

В работе проведена проверка выполнимости соотношения Холла-Петча (1) для широкого спектра поликристаллических сплавов и определены значения параметра k в этом соотношении в зависимости от содержания Al и Mn при разных T и размерах зерен 10, 100, 200 мкм. Из анализа полученных результатов (рис. 7) и полученных ранее в диссертационной работе Тришкиной, следует, что зависимости $\sigma = f(\langle d \rangle^{-1/2})$ являются линейными, что свидетельствует о выполнимости соотношения Холла-Петча для широкого спектра исследуемых сплавов и большом интервале размеров зерен от 10 до 240 мкм.

Изменение параметра k в зависимости от концентрации твердого раствора Cu-Mn представлено на рис. 8. С ростом концентрации Mn до 8 ат. % и при повышении T от 473 до 673 K параметр k несколько увеличивается, а при $T = 293 \text{ K}$ – уменьшается. При содержании Mn более 10 ат. % параметр k практически остается постоянным в интервале температур 273 – 673 K, его величина находится в пределах от 0.5 до 0.8.

В четвертом разделе "Накопление скалярной плотности дислокаций и ее компонент при деформации сплавов. Соотношение Холта. Роль размера зерна" приведены результаты исследования влияния размера зерна на накопление средней скалярной плотности дислокаций $\langle \rho \rangle$ и ее компонент (ρ_s и ρ_G) при деформации твердых растворов Cu-Al и Cu-Mn. Представлены результаты измерений $\langle \rho \rangle$, ρ_s и ρ_G как у границ зерен, так и в теле зерен, определен размер упрочненной зоны вблизи границы зерна. Получены закономерности изменения с деформацией в ячеистой ДСС размера ячеек (D), ширины их стенок (h) и плотности дислокаций в них. Выявлена роль размера зерна, температуры испытания и концентрации легирующего элемента на величины D и h для всех исследованных сплавов. Изучена выполнимость соотношения

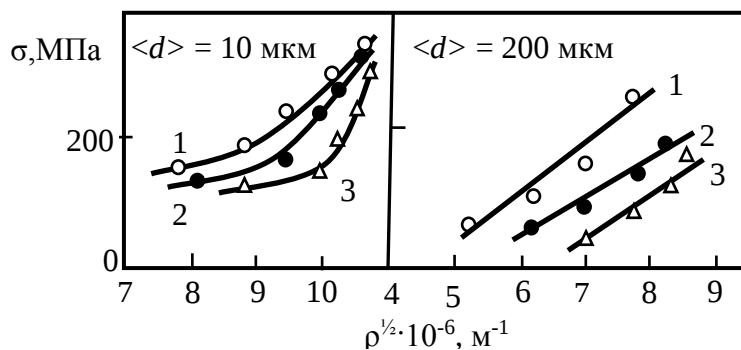


Рис. 6. Поведение зависимостей $\sigma = f(\rho^{1/2})$ в сплаве Cu-5ат.%Al при разных T :

1 – $T = 293 \text{ K}$; 2 – $T = 523 \text{ K}$; 3 – $T = 573 \text{ K}$

Холта для сплавов с различными размерами зерен и рассмотрены другие соотношения подобия для ячеистой ДСС. Изучены факторы, которые приводят к разной пластичности поликристаллических сплавов систем Cu-Mn и Cu-Al. Выявлены типы разориентированных ДСС с разным содержанием Mn (или Al) по границам которых происходит зарождение микротрещин.

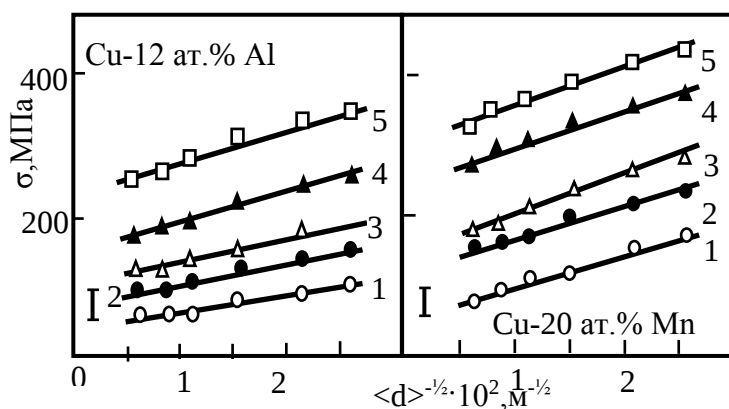


Рис. 7. Взаимосвязь напряжения течения σ с $\langle d \rangle^{-1/2}$ при разных $\epsilon_{ист}$: 1 – 0.02; 2 – 0.05; 3 – 0.10; 4 – 0.20; 5 – 0.30. $T = 293\text{ K}$. Сплавы указаны на графиках

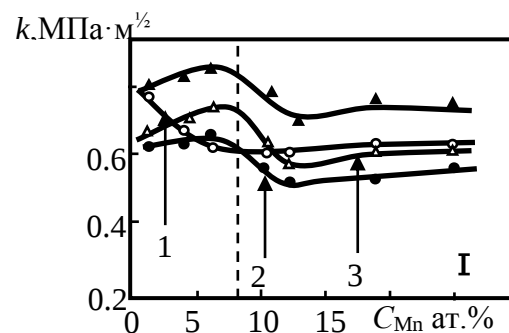


Рис. 8. Изменение параметра k с концентрацией Mn при $\epsilon_{ист} = 0.30$ и разных T : 1 – 293 K, 2 – 473 K, 3 – 573 K, 4 – 673 K. Пунктирная линия обозначает переход от ячеистой ДСС к ячеисто-сетчатой ДСС. Сплав Cu-6 ат.% Mn

В результате проведенных исследований было установлено влияние размера зерна на накопление средней скалярной плотности дислокаций $\langle \rho \rangle$ и ее компонент ρ_s и ρ_G при деформации сплавов. Измерения $\langle \rho \rangle$, ρ_G и ρ_s проводилось как в среднем по образцу, так и на расстоянии 0.3 мкм от границ зерен и далее в теле зерна через 1 мкм. Установлено, что с удалением от ГЗ значения $\langle \rho \rangle$, ρ_G и ρ_s уменьшаются во всех исследованных сплавах при разных $\epsilon_{ист}$ и $\langle d \rangle$. На рис. 9 представлены зависимости $\langle \rho \rangle$, ρ_G и ρ_s вблизи и вдали от ГЗ от степени деформации для двух размеров зерен $\langle d \rangle = 10\text{ мкм}$ и 200 мкм . В сплавах у границ и в теле зерна при $d > 10\text{ мкм}$ и всех степенях деформации ρ_s всегда выше, чем ρ_G . При $\langle d \rangle = 10\text{ мкм}$ наблюдается интересная особенность в поведении зависимостей ρ_G и ρ_s от степени деформации в сплавах с концентрацией Al (0.5...14 ат.%): величина ρ_G до деформаций $\epsilon_{ист} \approx 0.20$ выше, чем ρ_s . При дальнейшем повышении $\epsilon_{ист}$ происходит изменение соотношения компонент: величина ρ_s становится больше, чем ρ_G . В сплавах системы Cu-Mn таких особенностей не наблюдается: $\rho_G < \rho_s$ при всех исследованных размерах зерен.

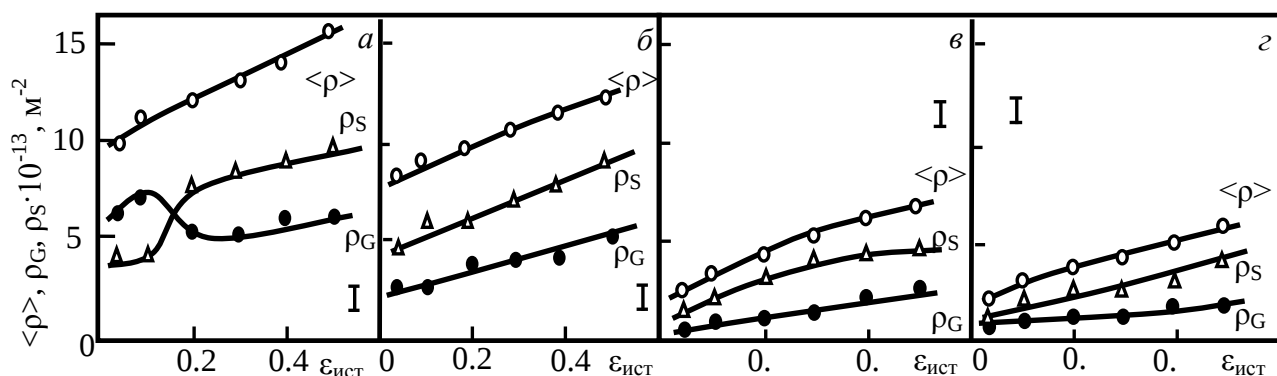


Рис. 9. Изменения $\langle \rho \rangle$, ρ_G и ρ_s со степенью деформации в сплаве Cu-0.5 ат.% Al при $T = 293\text{ K}$: а, в – у границ зерен; б, г – в теле зерна. Размер зерна $\langle d \rangle$: а, б – 10 мкм; в, г – 200 мкм. особенностей не наблюдается: $\rho_G < \rho_s$ при всех исследованных размерах зерен.

Сравним полученные в работе результаты с теоретическими предсказаниями М.Ф. Эшби и А.Н. Орлова. Сопоставление формул $\rho_G = \frac{\varepsilon}{4bd}$ и $\rho \approx \frac{\varepsilon}{0.4b \cdot d}$ показывает, что соотношение ρ_G/ρ должно быть равным примерно 0.10, то есть ρ_G составляет 0.10 от $\langle \rho \rangle$. В данной работе экспериментально установлено, что отношение $\rho_G/\langle \rho \rangle \approx 0.40$ при всех исследованных $\varepsilon_{ист}$ и $\langle d \rangle$.

На рис. 10 представлены зависимости средней скалярной плотности дислокаций и ее компонент от размера зерна при степени деформации 0.30. Увеличение размера зерна от 10 мкм до 100 мкм в сплаве Cu-0.5ат.% Al приводит к резкому уменьшению средней скалярной плотности дислокаций и ее компонент. При размере зерна больше 100 мкм зависимости практически выходят на насыщение. Можно полагать, что размер зерна в $\langle d \rangle = 100$ мкм является критическим при всех исследованных степенях деформации для накопления скалярной плотности дислокаций и ее компонент.

На рис. 11 представлены зависимости величины приграничных областей (ΔX) с повышенной плотностью дислокаций от размера зерна при разных степенях деформации для сплавов Cu-5ат.%Al и Cu-12ат.%Al. Рост размера зерна приводит к уменьшению области значений ΔX во всех исследованных сплавах. При этом ширина приграничной зоны и плотность дислокаций в ней выше в высоколегированных сплавах, чем в малолегированных. Это свидетельствует о значительной роли твердорастворного упрочнения в накоплении дислокаций в зернах поликристалла.

В работе была исследована ячеистая ДСС, которая формируется в малолегированных сплавах. Были измерены следующие параметры ячеистой ДСС: D – размер ячеек, h – ширина стенок, $\rho_{вн}$ – плотность дислокаций внутри ячеек и в их стенках $\rho_{ст}$. С ростом степени деформации размер ячеек уменьшается, а ширина их стенок увеличивается для всех исследованных размеров зерен. При глубоких степенях деформаций размер ячеек стремится к ширине их стенок. Рост температуры испытания приводит к уменьшению $\langle \rho \rangle$ и $\rho_{ст}$, $\rho_{вн}$ в сплавах системы Cu-Mn, а в сплавах системы Cu-Al – увеличивается.

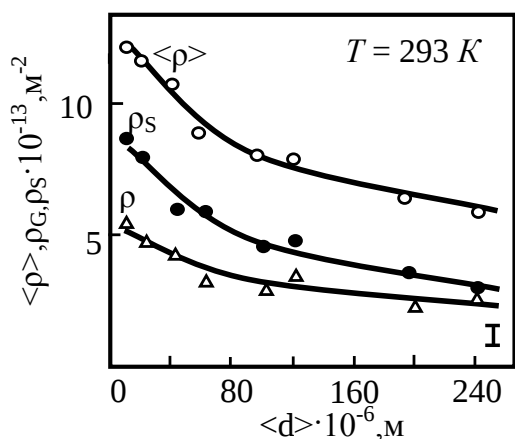


Рис. 10. Поведение параметров $\langle \rho \rangle$, ρ_G и ρ_S в зависимости от размера зерна $\langle d \rangle$ в сплаве Cu-0.5ат.% Al. $\varepsilon_{ист} = 0.30$

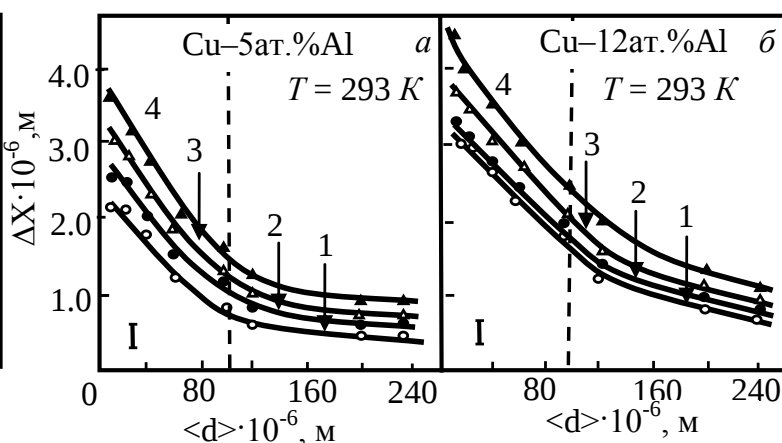


Рис. 11. Зависимости размеров (ΔX) областей с повышенной плотностью дислокаций $\langle \rho \rangle$ у границ зерен от $\langle d \rangle$ при разных C_{Al} и $\varepsilon_{ист}$: 1 – 0.05, 2 – 0.25, 3 – 0.45, 4 – 0.60

Проведен анализ соотношения Холта (3) для сплавов систем Cu-Al и Cu-Mn с концентрацией легирующего элемента до 6 ат.% и размерами зерен 10, 100 и 200 мкм. Для более полного анализа были использованы также ранее полученные результаты для размеров зерен 20, 40, 60, 120 и 240 мкм. На примере сплава Cu-5ат.%Al проанализируем соотношение Холта. Рассмотрим зависимость размера ячеек от обратной величины корня квадратного из средней скалярной плотности дислокаций для двух температур испытания (293 K и 573 K) и

размеров зерен (10, 100 и 200 мкм). Эти результаты представлены на рис. 12. Из рисунка следует, что зависимости $D = f(\langle \rho \rangle^{-1/2})$ имеют линейный характер для данного сплава с разными размерами зерен, деформированного как при комнатной температуре, так и при $T = 573 \text{ K}$. Подобные зависимости наблюдаются и для других исследованных в работе сплавов, в которых в процессе деформации формируется ячеистая ДСС. Наличие линейных зависимостей между параметрами D и $\rho^{-1/2}$ для разных размеров зерен и температур деформации свидетельствует как о выполнимости соотношения Холта, так и о процессах самоорганизации в дислокационной структуре. Увеличение размера зерна как в сплавах с Al, так и с Mn приводит к уменьшению параметра C в соотношении Холта при температурах испытания 293 и 523 K. При $T = 573 \text{ K}$ поведение C в зависимости от размера зерен менее однозначное. Отметим, что в сплавах с добавками Al значения этого коэффициента при всех размерах зерен и температурах испытания больше, чем в сплавах с Mn.

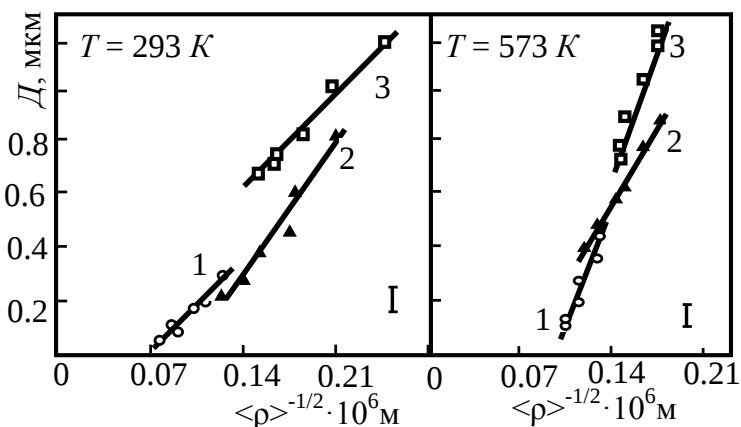


Рис. 12. Зависимости размера ячеек D от обратной величины корня квадратного из средней скалярной плотности дислокаций $\langle \rho \rangle^{-1/2}$ в сплаве Cu-5 ат.% Al с размером зерна $\langle d \rangle$: 1 – 10 мкм, 2 – 100 мкм, 3 – 200 мкм. Температура испытания указана на графиках. Точки на зависимостях соответствуют определенным $\epsilon_{\text{ист}}$.

Было проведено исследование взаимосвязи между другими параметрами, характеризующими ячеистую ДСС, которые были предложены Д. Кульманн-Вильсдорф: $h = P\rho^{-1/2}$ и $h = \beta D$, где P и β некоторые коэффициенты. Установлено, что для исследуемых сплавов наблюдается выполнимость этих соотношений, что свидетельствует о процессах подобия и самоорганизации в ячеистой ДСС.

Было установлено, что мало- и высококонцентрированные исследуемые сплавы имеют разную пластичность. Малоконцентрированные сплавы разрушаются при $\epsilon_{\text{ист}} \approx 0.60$, высококонцентрированные – при $\epsilon_{\text{ист}} \approx 0.80 - 0.90$. В работе было выявлено, что этот эффект связан с различием в эволюции дефектной структуры с деформацией сплавов. В малоконцентрированных сплавах Cu-Al и Cu-Mn развитие деформации сопровождается формированием разориентированной ячеистой ДСС. Этот процесс развивается достаточно быстро. Уже при $\epsilon_{\text{ист}} \approx 0.20$ образуются разориентированные ячейки. По их границам с дальнейшим развитием деформации образуются микротрещины. В сплавах Al образуются еще и фрагментированная ДСС, по границам фрагментов также зарождаются микротрещины.

В высококонцентрированных сплавах дислокационная структура оказывается более однородной, ячеек и фрагментов не образуется, формируется сетчатая ДСС, затем ячеисто-сетчатая. В разориентированной ячеисто-сетчатой возникает микрополосовая ДСС, а в сплавах с Al – микродвойниковая субструктура. Микротрещины в сплавах образуются вблизи оборванных субграниц. Таким образом, деформационные разориентированные границы формируются при более глубоких деформациях, чем в малоконцентрированных сплавах. На рис. 13, а - в представлено электронно-микроскопические изображения разориентированных деформационных границ, по которым образуются микротрещины. Общим для всех исследованных сплавов образование микротрещин по ГЗ (рис. 13, г). На рис. 14 приведены зависимости плотности деформационных разориентированных границ в зависимости от степени деформации $\epsilon_{\text{ист}}$ для мало- и высококонцентрированных сплавов. Видно, что плотность деформационных разориентированных границ при одной и той же степени деформации в малоконцентрированных сплавах оказывается выше, чем в сплаве с большой концентрацией Mn и Al. Развитие деформации способствует более быстрому разрушению

малоцентрированных сплавов по сравнению с концентрированными. Таким образом, различие в эволюции дефектной структуры мало- высококонцентрированных сплавов в значительной степени определяет различие в их пластичности.

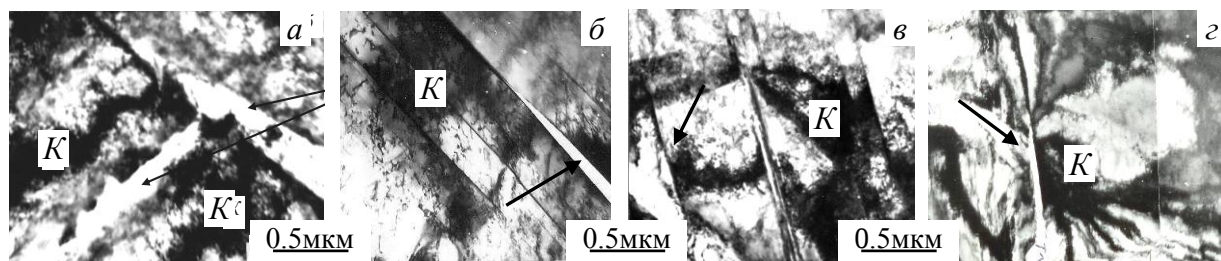
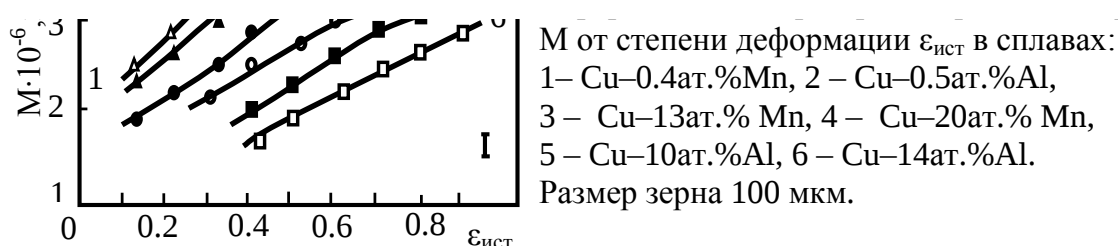


Рис. 13. Электронно-микроскопические изображения разориентированных субструктур с микротрещинами, которые формируются вдоль разориентированных границ: *а* – стенок ячеек, *б* – микродвойников, *в* – в субструктуре вблизи оборванных субграниц, *г* – границ зерен при $\epsilon_{ист} = 0.80-0.90$. Микротрещины указаны стрелками. Размер зерна 100 мкм



ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Изучена эволюция дислокационной структуры с деформацией в поликристаллических сплавах Cu-Al и Cu-Mn с разным размером зерен. Установлено определенное различие в дислокационных субструктурах, формирующихся в сплавах этих систем. В начале пластической деформации ($\epsilon_{ист} = 0.05 - 0.10$) в слабоконцентрированных сплавах Cu-Al формируется клубковая субструктура, в Cu-Mn сплавах – дислокационный хаос. В высококонцентрированных сплавах Cu-Al при $\epsilon_{ист} = 0.05 - 0.10$ образуются дефекты упаковки, в сплавах Cu-Mn этой структуры не наблюдается. При $\epsilon_{ист} = 0.30 - 0.40$ наблюдается микродвойниковая структура в сплавах с Al, в сплавах с Mn микродвойники отсутствуют.

2) Установлены закономерности изменения средней скалярной плотности дислокаций в зависимости от степени деформации, размера зерен мезоуровня, температуры испытания и концентрации твердого раствора поликристаллических сплавов систем Cu-Al и Cu-Mn. Выявлена взаимосвязь накопления дислокаций с размером зерна при разных $\epsilon_{ист}$: при $\langle d \rangle$ меньше 100 мкм – это влияние значительное, а при $\langle d \rangle > 100$ мкм – зависимости ослабевают. Результаты свидетельствуют об уменьшении роли ГЗ в накоплении дислокаций при $\langle d \rangle$ больше 100 мкм.

3) Установлена зависимость плотности дислокаций в сплавах системы Cu-Al от ЭДУ: плотность дислокаций возрастает с уменьшением ЭДУ. Увеличение температуры деформации в сплавах системы Cu-Mn уменьшает плотность дислокаций, в сплавах системы Cu-Al – увеличивает, что обусловлено уменьшением ЭДУ в них с ростом температуры деформации. Увеличение содержания Mn или Al приводит к возрастанию плотности дислокаций, что обусловлено ростом твердорастворного упрочнения в сплавах обеих систем и уменьшением ЭДУ (в сплаве с Al).

4) Проведено изучение компонент дислокационной структуры – ГНД и СЗД. Выполнено измерение их плотности вблизи ГЗ и в теле зерна при разных степенях деформации и размерах зерен. Установлено, что величина ρ_G и ρ_S увеличивается со степенью деформации. При всех исследованных размерах зерен $\rho_S > \rho_G$ в теле зерен. В сплавах системы Cu-Al при размере зерен $\langle d \rangle = 10$ мкм наблюдаются особенности: вблизи ГЗ компонента $\rho_G > \rho_S$ вплоть до $\epsilon_{ист} = 0.15 - 0.20$. При дальнейшем увеличении $\epsilon_{ист}$ величина ρ_S становится больше, чем ρ_G . Это

отражает тот факт, что при небольших размерах зерен ($\langle d \rangle \leq 10$ мкм) имеет место значительный градиент деформации в зернах, обусловленный наличием их границ. В сплавах с разным содержанием Mn таких особенностей не наблюдается.

5) Установлено, что соотношение Тейлора, определяющее зависимость напряжения течения σ от $\rho^{1/2}$, выполняется во всех исследованных сплавах в широком интервале размера зерен ($\langle d \rangle = 20 - 240$ мкм). При размере зерна 10 мкм в слабоконцентрированных сплавах Cu-Al и Cu-Mn наблюдается отклонение от прямолинейной зависимости σ от $\langle \rho^{1/2} \rangle$. Определены значения параметра междислокационного взаимодействия α и интервалы его изменения во всех исследованных сплавах в зависимости от концентрации Al и Mn, температуры деформации и размера зерен.

6) Проведены измерения плотности дислокаций ($\rho_{\text{сост}}$) в различных ДСС. Установлена прямая пропорциональная зависимость между σ и $\rho_{\text{сост}}^{1/2}$. Определены значения параметра междислокационного взаимодействия ($\alpha_{\text{сост}}$) для различных типов ДСС. В сплавах системы Cu-Al при содержании Al меньше 8 ат.% величина параметра $\alpha_{\text{сост}}$ – практически не изменяется, а в сплавах с Mn – уменьшается, но его значение выше в сплавах с Al. При концентрациях больше 8 ат.% в этих же структурах значение параметра $\alpha_{\text{сост}}$ в сплавах несколько увеличивается, в сплавах Cu-Al не изменяется. С ростом температуры испытания значения параметра $\alpha_{\text{сост}}$ в неразориентированной ячеистой субструктуре сплавов Cu-Mn увеличивается, в сплавах Cu-Al – не изменяется при всех исследованных размерах зерен.

7) Исследовано формирование ячеистой ДСС в сплавах при различных размерах зерен. Измерены ее параметры: размер ячеек, ширина их стенок, плотность дислокаций в стенках и внутри ячеек. Установлена выполнимость соотношения Холта между размером ячеек D и $\rho^{-1/2}$.

8) Установлено, что соотношение Холла-Петча выполняется для всех исследованных в работе сплавов в широком интервале размеров зерен и температур испытания. Определены значения параметра k в данном соотношении и его изменения в зависимости от содержания в сплавах Mn и Al. С ростом концентрации до 5 ат.% в сплавах Cu-Al – убывает, а в сплавах Cu-Mn – увеличивается. С ростом концентрации больше 5 ат.% параметр k не изменяется в сплавах обеих систем, но он несколько выше в сплавах с Mn. Значение параметра k увеличивается от 0.4 до 0.8 в интервале температур 273 – 573 К в сплавах Cu-Al, в сплавах с марганцем в этом же интервале температур не изменяется.

9) Установлено, что последовательности превращения ДСС с деформацией в мало- и высококонцентрированных сплавах определяют различия в зарождении микротрещин и пластичности сплавов. В малоконцентрированных сплавах границы разориентированной ячеистой ДСС являются источником возникновения микротрещин. В концентрированных сплавах до значительных степеней деформации дислокационная структура оказывается более однородной. Формирование разориентированных деформационных границ (границы микрополос и микродвойников) и возникновение микротрещин сдвигается к более глубоким деформациям, чем в малоконцентрированных сплавах. Соответственно увеличивается пластичность сплавов.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

В рецензируемых научных журналах, входящих в список ВАК:

1. Конева, Н.А. Влияние температуры деформации и размера зерна на формирующиеся субструктуры и величину вкладов геометрически необходимых и статистически запасенных дислокаций в среднюю плотность дислокаций в сплавах системы Cu-Al. /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов //Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – № 9. – С. 98-104.
2. Козлов, Э.В. Геометрически необходимые дислокации на мезоуровне поликристаллов ГЦК металлических материалов. /Э.В. Козлов, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Н.А. Конева //Изв. РАН. Серия физическая.. – 2011. – Т.75, №5– С. 713-715.

3. Конева, Н.А. Микрополосовая дислокационная субструктура: формирование и эволюция с деформацией. /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов //Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2013. – Т. 10, № 2.– С. 283-289.
4. Конева, Н.А. Зарождение и эволюция микрополосовой дислокационной субструктуры при деформации ГЦК твердых растворов. /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. //Вестник Тамбовского Университета. – 2013. – Т.18, вып.4. – С. 1529-1530.
5. Тришкина, Л.И. Влияние размера зерен на механические свойства и дислокационную структуру сплавов на основе меди. /Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Н.А. Конева, Э.В. Козлов //Фундаментальные проблемы современного материаловедения.. – Т.11. – № 4/2. – 2014. – С. 628-632.
6. Конева, Влияние размера зерен на накопление и распределение дефектов при пластической деформации поликристаллических ГЦК твердых растворов на основе меди /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. //Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 5. – С. 2-7.
7. Конева, Н.А. Роль размера зерен и твердорастворного упрочнения в формировании дислокационных субструктур сплавов Cu-Mn при деформировании /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. //Деформация и разрушение материалов. – 2016. № 3. – С. 15-19.
8. Конева, Н.А. Разориентированные дислокационные субструктуры и разрушение поликристаллических сплавов системы Cu-Al /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. //Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 5. – С. 2-8.
9. Конева, Н.А. Эволюция дислокационной структуры при деформации поликристаллических сплавов на основе меди и их пластичность /Н.А. Конева, Э.В. Козлов, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова //Фундаментальные проблемы современного материаловедения.. – Т.13. – № 2. – 2016. – С. 162-166.
10. Kozlov, Ed.V. Geometrically necessary dislocations in FCC polycrystalline metallic materials on the mesoscale. / Ed.V. Kozlov, L.I. Trishkina, T.V. Cherkasova, N.A. Koneva //Bulletin of the Russian Academy of Sciences Physics. 2011. – V. 75. – № 5. – P. 670-672.

В других научных изданиях:

11. Koneva, N.A. Formation of disoriented dislocation substructures and fracture of Cu-Mn polycrystal solid solutions /N.A. Koneva, L.I. Trishkina, T.V. Cherkasova, E.V. Kozlov //Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures AIP Conference Proceedings 1683. – New York: AIP Publishing, 2015. – V. 1683. – P. 020088-1–020088-5.
12. Trishkina, L. Distribution of Distances between Dislocation in Different Types of Dislocation Substructures in Deformed Cu-Al Alloys [Электронный ресурс]/ L. Trishkina, T. Cherkasova, N. Zboykova, N. Koneva, E. Kozlov //Advanced Materials in Technology and Construction (AMTC-2015) AIP Conf. Proc. 1698; 2016 AIP Publishing LLC 978-0-7354-1345-0/\$30.00; Doi 10.1063/1.4937823.
13. Koneva, N.A. Accumulation of dislocations at plastic deformation of Cu-Al polycrystal concentrated solid solutions /N.A. Koneva, L.I. Trishkina, T.V. Cherkasova, E.V. Kozlov //В сб.: Effect of external influences on the strength and plasticity of metals and alloys. Book of the International seminar articles. Edition in Chief: Professor Sc. D., Starostenkov M.D. 2015. – P. 48-49.
14. Конева, Н.А. Закономерности накопления дислокаций при пластической деформации поликристаллов /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов //XIX Петербургские чтения по проблемам прочности. Сборник материалов. Часть 1. Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Научный совет РАН. – 2010. – С.21-23.
15. Конева, Н.А. Геометрически необходимые дислокации и проблема упрочнения поликристаллов. /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. //Упорядочение в минералах и сплавах. 13-й международный симпозиум. I, II Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН. – 2010. – С. 18-20.
16. Конева, Н.А. Геометрически необходимые дислокации и проблема упрочнения поликристаллов / Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В.Черкасова, Э.В. Козлов //XIX

Петербургские чтения по проблемам прочности. Сборник материалов. Часть 1. Санкт-Петербург: ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Научный совет РАН. – 2010. – С. 18-20.

17. Конева, Н.А. Геометрически необходимые дислокации на мезоуровне поликристаллов ГЦК металлических материалов /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов //Упорядочение в минералах и сплавах. 13-й международный симпозиум. I, II Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2010. – С. 5-8.
18. Конева, Н.А. Параметр междислокационного взаимодействия и сопротивление деформированию твердых растворов. /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов //Материалы Международной конференции "Иерархически организованные системы живой и неживой природы" Материалы международной конференции 2013, Томск. – С.46-50.
19. Конева, Н.А. Распределение дефектов, накопленных при пластической деформации поликристаллических ГЦК сплавов /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов //Материалы Международной конференции "Иерархически организованные системы живой и неживой природы" Материалы международной конференции Томск, 2013. — С. 54-58.
20. Конева, Н.А. Самоорганизация в ячеистой дислокационной субструктуре. /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. //Материалы Международной конференции "Иерархически организованные системы живой и неживой природы" Материалы международной конференции. Томск. – 2013. – С. 58-62.
21. Конева, Н.А. Соотношение Холла-Петча и его параметры для поликристаллических твердых растворов Cu-Al и Cu-Mn /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов //Перспективные материалы в технике и строительстве (ПМТС-2013). Материалы Первой Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. Томск 21-25 октября 2013г. – С. 18-20.
22. Конева, Н.А. Дефекты, накапливаемые при пластической деформации в сплавах Cu-Al /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов [электр. текстовый дом.] //Перспективные материалы в строительстве и технике (ПМТС-2014). Материалы Международной научной конференции молодых ученых. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2014. – С. 538–544.
23. Конева, Н.А. Влияние размера зерен на механические свойства и дислокационную структуру сплавов на основе меди /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. [Электронный ресурс] //XIII Международная школа-семинар «Эволюция дефектных структур в конденсированных средах» Барнаул, Россия, 20 – 25 октября 2014 http://mks-phys.ru/docs/Programma_Barnaul-14.pdf
24. Конева, Н.А., Влияние размера зерен на накопление и распределение дефектов при пластической деформации поликристаллических ГЦК твердых растворов на основе меди /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов [Электронный ресурс] //Фазовые превращения и прочность кристаллов: сб. тезисов VIII Международной конференции. – Черноголовка. – 2014. – С. 31. <http://www.issp.ac.ru/ebooks/conf/2014Kurdumov.pdf>
25. Конева, Н.А. Изменение внутренних напряжений с деформацией и расстоянием от их источников в поликристаллических сплавах Cu-Al /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. //Перспективные материалы в технике и строительстве (ПМТС-2015). Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2015. – С. 254–257.
26. Конева, Н.А. Эволюция дислокационной субструктуры с деформацией и пластичность поликристаллических твердых растворов Cu-Mn и Cu-Al. /Н.А. Конева, Л.И. Тришкина, Т.В. Черкасова, Э.В. Козлов. // XXII Петербургские чтения по проблемам прочности. К 110-летию со дня рождения академика С.Н. Журкова и 85-летию со дня рождения профессора В.А. Лихачева. 12-14 апреля 2016. Сборник материалов. Санкт-Петербург: сб. материалов. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2016. Научный – С. 360-363.