УДК 669.295.017:621.789

Павел Николаевич Медведев^{1*}, Александр Яковлевич Кочубей¹, Елена Владимировна Филонова¹, Ева Александровна Лукина¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научноисследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г.Москва, Россия; *admin@viam.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

Предложена экспериментальная методика моделирования процесса прокатки методом плоской осадкой с применением специализированной оснастки. Проведен термомеханический расчет с целью выявления условий действия механизмов динамического возврата И динамического рекристаллизации. Проанализированы возможности применения прямых полюсных фигур (ППФ), EBSD, анализ профиля рентгеновской линии 2D детектором исследования процессов структурообразования для при высокотемпературной деформации. Данный опробован метод для алюминиевого сплава системы Al-Cu-Li.

Ключевые слова: рентгеновская дифрактометрия, EBSD, полюсные фигуры, кристаллографическая текстура, возврат, рекристаллизация, термомеханика, термическая обработка, алюминиевые сплавы

Pavel N. Medvedev, Aleksander Ya. Kochubey, Elena V. Filonova, Eva A. Lukina

ANALYTICAL DIFFRACTION METHODS FOR STUDYING STRUCTURE FORMATION PROCESSES DURING HIGH TEMPERATURE DEFORMATION AND HEAT TREATMENT

An experimental technique for simulating the flat-upset rolling process using specialized equipment is proposed. A thermomechanical calculation was carried out in order to identify the operating conditions of the dynamic recovery and dynamic recrystallization mechanisms. The possibilities of using direct pole figures (SPF), EBSD, and analysis of the X-ray line profile with a 2D detector to study structure formation processes during high-temperature deformation are analyzed. This method has been tested for aluminum alloy of the Al-Cu-Li system.

[©] Медведев П. Н., Кочубей А. Я., Филонова Е. В., Лукина Е. А.

Key words: X-ray diffractometry, EBSD, pole figures, crystallographic texture, return, recrystallization, thermomechanics, heat treatment, aluminum alloys

Актуальность применения алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Li в авиационной промышленности обусловлена их высокой удельной прочностью по сравнению с другими алюминиевыми за счет легирования Li. Исследование термомеханических характеристик и процессов структурообразования позволит подобрать оптимальные технологические параметры для получения полуфабрикатов с заданной структурой.

В работе [1] показана возможность моделирования прокатки горячей прокатки (схема плоской деформации) проведены эксперименты по горячей осадке с применением испытательной машины, настроенной на одноосное сжатие, с применением разработанной специализированной оснастки, позволяющей реализовать плоскую схему деформации при осадке.

В работах [1-3] проведен анализ структуры и кристаллографической текстуры. В работе [4] проведены термомеханические расчеты с определением порога по параметру Зинера-Холомона Z (рис. 1 и 2) процессов динамического возврата (теплой деформации) и динамической рекристаллизации (горячей деформации).

Цель работы в расширениие возможностей дифракционных методов применительно к исследованию структуры материала после высокотемпературной деформациии (ВТД) и термической обработки (ТО).







Рис. 2. Диаграмма механизмов высокотемпературной деформации (ДМД) сплава системы Al-Cu-Li [4]

Деформирование проведено на испытательной машине оснащенной температурной камерой и настроенной на сжатие. Варьировались три темепратуры 400, 440 и 480 °C и три скорости деформации 10⁻³, 10⁻², 10⁻¹ с⁻¹. Сжатие проведено специализированной оснасткой для создания

плоскодеформированного состояния в зоне деформации образца. Остывание образцов проведено с печью. ТО после ВТД проведена по стандартной схеме для алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Li.

Рентгеноструктурный анализ проведен на рентгеновском дифрактометре, оснащенном текстурной приставкой Эйлера и плоским полупроводниковым детектором. Образцы для данного вида исследований подготовлены с центральных зон образца с плоскости нормальной к оси приложения нагрузки. Исследование структуры проведено с применением прямых полюсных фигур (ППФ) записанных для плоскостей $\{220\}$, а также записью в режиме 2D (фрагменты дебаевских колец) в диапазоне углов $2\theta = 35-85^{\circ}$. Регистрация дифрактограмм проведена в монохроматическом CuK-излучении.

Из данных дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD) получены изображения границ зерен и проведено закрашивание зерен в цвет, соответвующий определенному структурному состоянию: красный цвет – деформированные зерна, синий цвет – рекристаллизованные и зеленый цвет – полигонизованные (рисунок 4). Присвоение структурного состояния происходит на основе расчета угла (ориентации в углах Эйлера) рассеяния рядом стоящих точек. На ППФ отдельное рекристаллизованное зерно будет выглядить в виде точки, деформированное и полигонизованное в виде размытого пятна (рисунок 4, *a-г*). Таким образом происходит картирование зерен, находящихся в разных структурных состояниях. Образцы для данного вида исследований подготовлены с центральных зон образца с высотного направления нормалью к которой поперечна оси приложения нагрузки.

В статье [2] проведено сопоставление различных структурных состояний (наклеп, полигонизация и рекристаллизация) с эффектами на прямых полюсных фигурах. Данные рассуждения можно расширить и на эффекты, наблюдаемые при дифракционной съемке 2D детектором (рисунок 5). Данные эффекты связаны с тем, что при рекристаллизации уменьшается размер узла обратной решетки. При съемки ППФ происходит сечение узла обратной решетки в азимутальной плоскости, а при дифракционной съемке 2D детектором в плоскости азимутальной и радиальной. На ППФ, полученных методом EBSD, в рекристаллизованных зернах также наблюдается «пятнистость» как и на ППФ, полученных рентгеновским методом.



Рис. 3. 1D и 2D дифракционные спектры для образца после деформации 400°С, $\dot{\varepsilon} = 10^{-1} \text{ c}^{-1}$

Рис. 4. Карта структурных состояний и ориентации плоскостей {220} на стереографической проекции

Для высокотемпературной деформации (рис. 6) и последующего отжига (рис. 7) проведена систематизация картин ППФ и 2D картин дифракции в координатах температуры и скорости деформации.



Рис. 5. ППФ и 2D спектры для разных структурных состояний материала: *а* – деформированное состояние; *б* – полигонизованное состояние; *в* – рекристаллизованное состояние

Анализ карт, представленных на рисунках 6 и 7, позволяет сделать следующие выводы о протекающих процессах при высокотемпературной деформации и последующей термической обработке:

– в области 480°С при скорости деформации 0,001 с⁻¹ наблюдается полигонизованная структура, которая сохраняется при ТО;

– в области 480°С/0,01с⁻¹ и 440°С/0,001с⁻¹ помимо полигонизованной структуры наблюдаются рекристаллизованные зерна в большей или меньшей степени соответственно;

– в области 480°C/0,1с⁻¹ наблюдаются полигонизованные и рекристаллизованные зерна, что указывает на процесс спонтанной рекристаллизации с полным переходом в рекристаллизованное состояние при TO;

в остальных областях при ВТД зерна находятся в деформированном состоянии;

после ТО области 400°С переходят в полностью рекристаллизованное состояние;

– в области 440°С/0,01с⁻¹ и 0,1с⁻¹ проходит рекристаллизация с частичным сохранение полигонизованной структуры.



Рис. 6. Карты ППФ {220} и рентгеновских спектров (20 =35-85°) образцов после высокотемпературной деформации



Рис. 7. Карты ППФ {220} и рентгеновских спектров (20 =35-85°) образцов после высокотемпературной деформации и термообработки

Полученные результаты структурных состояний коррелирует с результатами термомеханических расчетов. При динамической рекристаллизации происходит интенсивное рассеяние дислокаци и снимается

113

движущая сила для спонтанной и статической рекристаллизации. Структура материала после теплой деформации способствует прохождению последующих процессов рекристаллизации. Полученные диаграммы текстурного состояния, дебаевских колец и диагарммы механизмов ВТД друг друга подтверждают и взаимно непротеворечивы.

Покакзана информативность дифракционных методов исследования структурного состаяния материала после ВТД и ТО. Представленные методы можно использовать самостоятельно, но оптимально применять совместно, для верификации и взаимному дополнению полученных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 1. Кочубей А.Я. Закономерности текстурообразования при плоской осадке сплава системы Al-Cu-Li/ Кочубей А.Я. [и др.] // Технология Легких Сплавов. №1. 2016 с. 74-79. doi:10.22349/1994-6716-2023-115-3-107-120
- 2. Кочубей А.Я. Применение рентгеновской дифрактометрии в исследованиях процессов структурообразования при горячей обработке давлением и термической обработке деформированных металлов и сплавов/ Кочубей А.Я., Медведев П.Н., Журавлева П.Л. // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). С. 50-60. doi:10.18577/2307-6046-2024-0-5-50-60
- 3. Лукина Е.А. Закономерности формирования структуры в ходе рекристаллизационных процессов в сплаве В-1480 системы Al-Cu-Li при термомеханическом воздействии / Лукина Е.А. [и др.] // Деформация и разрушение материалов, 2021. №9. С. 11–17. doi:10.31044/1814-4632-2021-9-11-17
- 4. Лукина Е.А. Термомеханика пластического течения сплавов системы Al-Cu-Li/ Лукина Е.А. [и др.] // Вопросы материаловедения. 2023. № 3 (115). С. 107-120. doi:10.22349/1994-6716-2023-115-3-107-12

REFERENCES

- Kochubey A.Ya. Patterns of texture formation during flat upsetting of an alloy of the Al-Cu-Li system / A.Ya. Kochubey [et al.] // Technology of Light Alloys. 2016. №. 1. P. 74-79
- Kochubey A.Ya. Application of X-ray diffractometry in studies of structure formation processes during hot pressure treatment and heat treatment of deformed metals and alloys / A.Ya. Kochubey, P.N. Medvedev, P.L. Zhuravleva // Proceedings of VIAM. 2024. № 5 (135). P. 50–60
- 3. Lukina E.A. Regularities of structure formation during recrystallization processes in the B-1480 alloy of the Al-Cu-Li system under thermomechanical influence / Lukina E.A. [et al.] // Deformation and destruction of materials. 2021. №. 9. P. 11–17
- Lukina E.A. Thermomechanics of plastic flow of alloys of the Al-Cu-Li system / Lukina E.A. [et al.] // Questions of materials science. 2023. № 3 (115). P. 107– 120.