

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-142-152

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ДИАГРАММ СТРУКТУРНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Я. Кочубей<sup>1</sup>, П.Л. Журавлева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Проведены эксперименты по горячей осесимметричной осадке заготовок из жаропрочных никелевых сплавов ЭП975-ИД и ЭП742-ИД и магниевых сплавов МА2 и МА3 в широком интервале температур и скоростей деформации. Формирующаяся структура исследована методами рентгеновской дифрактометрии. Разработан метод построения диаграмм структурных состояний для сплавов авиационного назначения, основанный на применении испытательной машины, настроенной на сжатие, и дифрактометрическом изучении структуры. Построенные диаграммы структурных состояний могут использоваться для разработки и оптимизации параметров технологии горячей обработки давлением для получения заготовок с регламентированной структурой.

**Ключевые слова:** рентгеновская дифрактометрия, горячая пластическая деформация, осесимметричная свободная осадка, рекристаллизация, диаграммы структурных состояний

**Для цитирования:** Кочубей А.Я., Журавлева П.Л. Применение рентгеновской дифрактометрии при построении диаграмм структурных состояний деформируемых сплавов авиационного назначения // Труды ВИАМ. 2022. № 2 (108). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-142-152.

Scientific article

## X-RAYS DIFFRACTOMETRY APPLICATION AT PLOTTING OF STRUCTURE CONDITIONS DIAGRAMS OF DEFORMABLE ALLOYS OF AVIATION ASSIGNMENT

A.Ya. Kochubey<sup>1</sup>, P.L. Zhuravleva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Axisymmetric hot compression experiments of nickel superalloy ЭП975-ИД, ЭП742-ИД and MA2, MA3 alloy specimens in a wide temperature and rate intervals were carried out. Structure formation was studied by x-ray diffractometry methods. Structure diagrams plotting method is based on using of the test machine which has been adjusted on compression, and structure studying is developed. Diagrams can be used for development and optimization of hot pressure technology parameters, for the purpose receiving preparations with the regulated structure.

**Keywords:** x-ray diffractometry, hot plastic deformation, axisymmetric compression, recrystallization, structure condition diagrams

**For citation:** Kochubey A.Ya., Zhuravleva P.L. X-rays diffractometry application at plotting of structure conditions diagrams of deformable alloys of aviation assignment. *Trudy VIAM*, 2022, no. 2 (108), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-2-142-152.

## Введение

Разработка современных сплавов авиационного назначения [1–8] со сложным комплексом механических свойств требует применения новейших методов структурных исследований, включающих рентгеновские дифракционные методы. Наиболее эффективным методом изучения закономерностей формирования структуры при горячей деформации является построение и анализ диаграмм структурных состояний [9–11].

Диаграммы структурных состояний устанавливают связь между температурно-скоростным режимом горячей деформации и соответствующей ему формирующейся структурой на установившейся стадии деформации (т. е. больших обжатиях) и являются эффективным средством при разработке технологических режимов горячей деформации – в частности, для получения заготовок с регламентированной структурой [12–14].

Классификация структуры горячедеформированных заготовок основывается на явлении рекристаллизации [15–17], в соответствии с которой структура может быть разделена на три типа:

- полностью рекристаллизованная;
- частично рекристаллизованная (при этом нерекристаллизованные объемы могут быть полигонизованы);
- нерекристаллизованная (включает полигонизованную и неполигонизованную структуры).

В данной работе тип формирующейся структуры горячедеформированных заготовок определяли методом рентгеновской дифрактометрии, т. е. без применения рентгеновских фотометодов, требующих больших затрат времени.

Формирование структуры горячедеформированных сплавов определяется соотношением скоростей двух конкурирующих физических процессов – деформационного упрочнения и термического разупрочнения.

Увеличение свободной энергии, связанное с увеличением плотности дислокаций (вследствие работы деформации), частично или полностью компенсируется в результате термически активируемых процессов возврата и/или рекристаллизации, что приводит к формированию структуры определенного типа. На установившейся стадии горячей деформации структура изменяется незначительно, что свидетельствует о структурном состоянии в процессе горячей деформации. Таким образом, диаграмма структурного состояния, построенная для одной степени деформации, применима для достаточно широкого интервала степеней деформации.

В последние годы получил развитие дифрактометрический метод построения диаграмм структурных состояний [18], которые ранее строили методом оптической металлографии [19] и с применением рентгеновских установок типа УРС, т. е. при съемке неподвижного образца и фотографической регистрации рентгеновских отражений. Изучение структуры каждого образца в отдельности занимало несколько часов, вследствие чего построение структурных диаграмм представляло собой длительную и трудоемкую процедуру. Поэтому актуальной является задача разработки более экспрессного и информативного метода изучения структуры горячедеформированных заготовок.

Цель данной работы – дальнейшее усовершенствование дифракционного метода исследования структуры горячедеформированных сплавов авиационного назначения на примере жаропрочных никелевых и магниевых сплавов, а также рентгенографическое изучение закономерностей формирования структуры жаропрочных никелевых и магниевых сплавов при горячей обработке давлением с применением дифрактометрического метода.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

### Материалы и методы

#### Методика эксперимента

Сущность методики построения диаграмм структурных состояний состоит:

- в проведении систематического эксперимента по горячей осесимметричной осадке в заданном интервале скоростей и температур деформации при фиксированной степени деформации;
- в определении типа структуры образцов, деформированных по заданным температурно-скоростным режимам;
- в указании (на сетке диаграммы) типа структуры, соответствующей каждому температурно-скоростному режиму;
- в проведении (на сетке диаграммы) разграничивающих линий (изолиний) с целью выделения областей со структурой одинакового типа, т. е. с эквивалентными структурными состояниями.

Для изучения закономерностей формирования структуры в процессе горячей деформации выбрана схема одноосного сжатия, которая имеет следующие преимущества перед растяжением:

- шаровая составляющая тензора напряжений – сжимающая, что обеспечивает достаточную пластичность и гарантирует достижение установившейся стадии деформации до начала разрушения;
- при испытаниях на сжатие образцы значительно быстрее можно извлечь из печи, чем образцы при растяжении, что позволяет в большей степени сохранить структуру, полученную при горячей деформации до закалки образца в воде.

#### Методика горячей деформации

Экспериментальная установка для проведения горячей деформации сплавов (осадки) представляет собой гидравлическую испытательную машину МТС-50 с установленной на ней электропечью, обеспечивающей изотермические условия деформации при заданной температуре. Схема установки представлена на рис. 1, а, изменение формы образца в процессе осесимметричной осадки – на рис. 1, б.

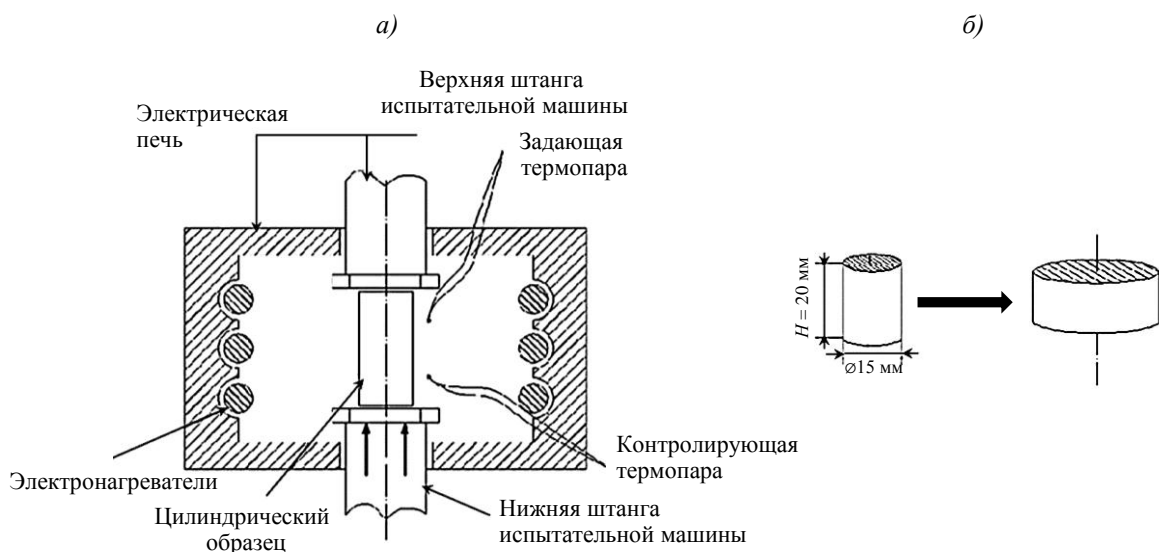


Рис. 1. Экспериментальная установка для горячей осадки в изотермических условиях (а) и изменение формы образца никелевого сплава в процессе осадки (б)

Проведены эксперименты по горячей деформации промышленных магниевых сплавов МА2 и МА3 системы Mg–Al–Zn. С целью предотвращения образования на образцах «бочки», т. е. для снижения неоднородности деформации, осадку осуществляли со смазкой, для удержания которой образцы имели на торцах проточки глубиной ~0,3 мм. В качестве смазки применяли порошок графита. Свободную осесимметричную осадку цилиндрических образцов размером  $\varnothing 17 \times 25$  мм осуществляли на величину деформации  $\varepsilon = 50\%$  в интервале скоростей деформации  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$  при температурах 250, 300, 350, 375, 400 и 450 °С.

Проведены также эксперименты по горячей деформации жаропрочных никелевых сплавов ЭП742-ИД и ЭП975-ИД. Образцы размером  $\varnothing 15 \times 20$  мм деформировали на величину деформации  $\varepsilon = 50\%$  по 18 температурно-скоростным режимам:

Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ , $\text{с}^{-1}$	Температура деформации, °С
$10^{-3}$	1150; 1100; 1050; 1000; 950
$10^{-2}$	1150; 1100; 1050; 1000; 950
$10^{-1}$	1150; 1100; 1050; 1000
$10^0$	1150; 1100; 1050; 1000

Выбор столь широкого интервала скоростей деформации обусловлен тем, что различные технологические процессы обработки давлением осуществляются с различной скоростью деформации: ковка –  $\dot{\varepsilon} \geq 10^0 \text{ с}^{-1}$ ; прессование –  $\dot{\varepsilon} = 10^{-2} - 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , штамповка (на прессе) –  $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} - 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Температурный интервал 950–1150 °С полностью находится в ( $\gamma$ – $\gamma'$ )-области сплава ЭП975-ИД, в то время как для сплава ЭП742-ИД температура 1150 °С находится в области  $\gamma$ -твердого раствора; температура 1100 °С соответствует температуре полного растворения  $\gamma'$ -фазы, а интервал температур 950–1050 °С принадлежит температурной ( $\gamma$ – $\gamma'$ )-области.

#### *Методика исследования структуры*

В данной методике определение типа структуры осуществляется с применением рентгеновского дифрактометра, т. е. без фотографической регистрации рентгеновских отражений и, как следствие, без проведения работ, связанных с приготовлением фотореактивов, проявлением, фиксированием, промыванием и высушиванием фотопленки.

Кроме того, принципиальное отличие данного метода от фотометода не только в способе регистрации, но и, что более существенно, в способе съемки: в фотометод образец во время съемки неподвижен, поэтому фиксируются случайные сечения узлов обратной решетки, что снижает информативность по отношению к совершенству кристаллической решетки. К тому же на размер фокусного пятна на рентгенограмме одновременно (аддитивно) влияют два фактора – размер зерна и совершенство кристаллической решетки, что затрудняет их разделение (особенно при переэкспонировании).

В данном дифрактометрическом методе съемку осуществляют в режиме  $\omega$ -сканирования (при неподвижном счетчике), поэтому зерна непрерывно изменяют свою кристаллографическую ориентацию по отношению к рентгеновскому лучу. В результате узел обратной решетки зерна полностью (последовательно) пересечет сферу отражений (сферу Эвальда). Таким образом, размер зерна влияет на интенсивность (высоту) пика интенсивности, а совершенство решетки – на его ширину,

т. е. информация о размере зерен и степени совершенства их кристаллических решеток разделена.

Тип структуры горячедеформированного образца определяется по типу (виду) соответствующей дифрактограммы. По характерным признакам дифрактограммы могут быть разделены на три типа:

– «гладкие» без острых пиков (или со сплошным фоном) – соответствуют деформированной (т. е. нерекристаллизованной) структуре. Такому типу (рис. 2, а) ставится в соответствие условный символ ○;

– «зубчатые» при наличии явно выраженного фона – соответствуют частично рекристаллизованной структуре. Такому типу (рис. 2, б) ставятся в соответствие условные символы ◐, ◑, ◒ и ◓ – в зависимости от степени рекристаллизации (т. е. доли рекристаллизованного объема);

– отдельно расположенные пики с интенсивностью, во много раз превышающей интенсивность фона дифрактограммы (или вообще без заметного фона), – соответствуют полностью рекристаллизованной структуре. Такому типу субструктуры (рис. 2, в) соответствует условный символ ●.

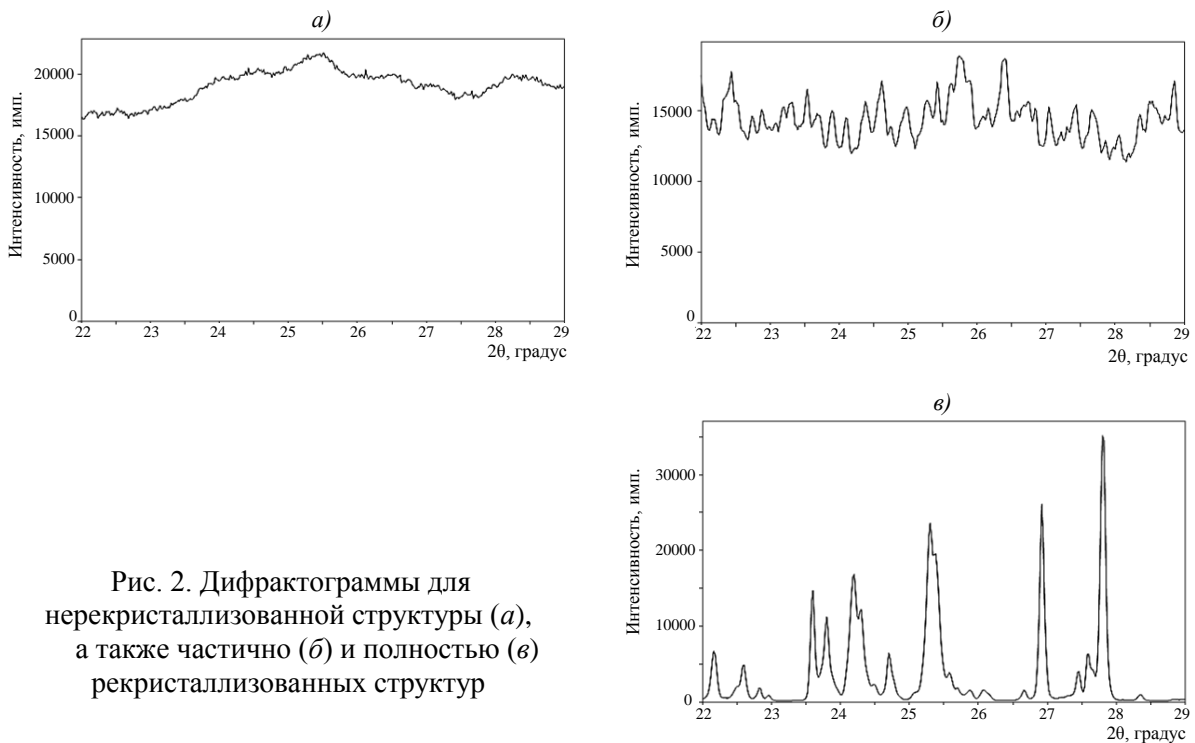


Рис. 2. Дифрактограммы для нерекристаллизованной структуры (а), а также частично (б) и полностью (в) рекристаллизованных структур

При дифрактометрической съемке методом  $\omega$ -сканирования ширина пика характеризует совершенство (степень дефектности) кристаллической структуры, что, по-видимому, даст возможность отличить динамическую рекристаллизацию от спонтанной.

*Методика построения диаграмм структурных состояний*

Порядок работы при построении диаграмм структурных состояний следующий:

– провести резку образцов, деформированных согласно режимам заданной температурно-скоростной сетки, на электроэрозионном станке по требуемому сечению (осевому или радиальному);

- растворить поверхностный слой образцов методом химического или электролитического травления на глубину  $\sim 0,2$  мм с целью удаления вещества зоны термического влияния, образованной в процессе электроэрозионной резки;
- установить образец в держатель рентгеновского дифрактометра и провести рентгеновскую съемку в режиме  $(\theta-2\theta)$ -сканирования;
- на полученной дифрактограмме выбрать одну из наиболее интенсивных линий  $(hkl)$  и определить для нее двойной брэгговский угол  $2\theta_{hkl}$ ;
- установить счетчик дифрактометра в фиксированное угловое положение  $2\theta_{hkl}$  и провести съемку образца в режиме  $\omega$ -сканирования в угловом интервале  $\omega = \theta_{hkl} \pm 3$  градуса;
- процедуру повторить для всех образцов исследуемой температурно-скоростной сетки режимов;
- провести анализ всех полученных дифрактограмм (кривых качания). Каждой дифрактограмме присвоить соответствующий символ структурного состояния:  $\bigcirc$ ,  $\odot$ ,  $\ominus$ ,  $\bullet$  или  $\bullet$ ;
- нанести на температурно-скоростную сетку символы структурных состояний, соответствующих каждому температурно-скоростному режиму деформации;
- провести на диаграмме разделительные линии между символами  $\bigcirc$  и  $\odot$ , а также  $\ominus$  и  $\bullet$ .

Таким образом, на построенной диаграмме указаны температурно-скоростные области горячей деформации, при которой формируются полностью рекристаллизованная, частично рекристаллизованная и нерекристаллизованная структуры.

### Результаты и обсуждение

#### *Анализ закономерностей формирования структуры при горячей деформации магниевых сплавов МА2 и МА3*

На рис. 3 представлены диаграммы структурных состояний магниевых сплавов МА2 и МА3, построенные согласно вышеприведенным методикам, из которых следует, что:

- при температуре  $250$  °С независимо от скорости деформации структура нерекристаллизованная с сильно развитым двойникованием (по данным оптической металлографии);
- началу рекристаллизации для сплава МА2 соответствует температура  $300$  °С, а для сплава МА3:  $350$  °С;
- интенсивный рост степени рекристаллизации имеет место, начиная с температуры  $375$  °С.

Анализ диаграмм структурных состояний магниевых сплавов МА2 и МА3, построенных в данной работе, позволяет дать некоторые технологические рекомендации:

- деформацию этих сплавов необходимо проводить при температурах  $>350$  °С;
- упрочняющую термомеханическую обработку следует проводить при температурах  $<300$  °С.

Для подтверждения результатов, представленных на диаграммах структурных состояний, построенных методом рентгеновской дифрактометрии, проведены структурные исследования горячедеформированных образцов методом оптической металлографии (рис. 4).

Анализ результатов металлографических структурных исследований, полученных методом рентгеновской дифрактометрии ( $\omega$ -сканирование), показал полное соответствие выводов относительно типа структуры.

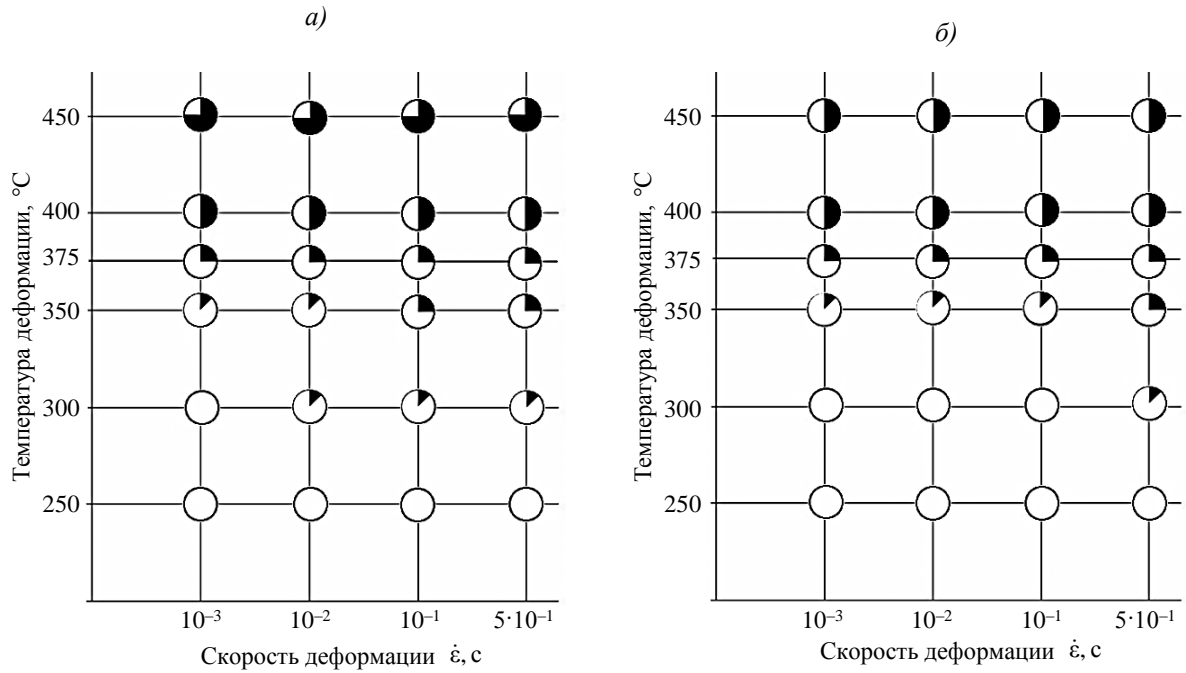


Рис. 3. Диаграммы структурных состояний магниевых сплавов МА2 (а) и МА3 (б)

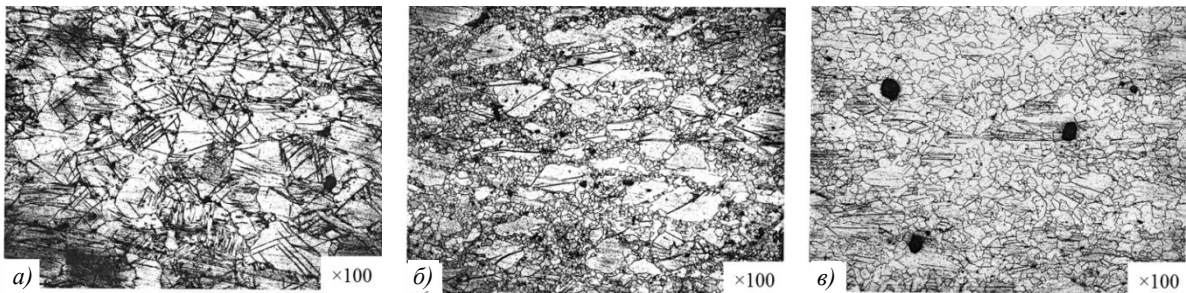


Рис. 4. Структура горячедеформированных образцов из сплава МА2 при величине деформации 50 % при температурах 250 (а), 375 (б) и 450 °С (в)

*Анализ закономерностей формирования структуры при горячей деформации жаропрочных никелевых сплавов ЭП742-ИД и ЭП975-ИД*

На рис. 5 представлены диаграммы структурных состояний никелевых сплавов ЭП975-ИД и ЭП742-ИД, из которых следует, что:

*для сплава ЭП975-ИД*

- при температуре 1050 °С и менее структура не рекристаллизована;
- в температурном интервале 1100–1150 °С имеет место частичная рекристаллизация;

*для сплава ЭП742-ИД*

- при температуре 1000 °С и менее структура не рекристаллизована;
- при температуре 1050 °С имеет место частичная рекристаллизация;
- при температуре 1100 °С структура почти полностью рекристаллизована;
- при температуре 1150 °С имеет место полная рекристаллизация.

Для подтверждения результатов, представленных на диаграммах структурных состояний, построенных методом рентгеновской дифрактометрии, проведены структурные исследования горячедеформированных образцов методом оптической металлографии (рис. 6).

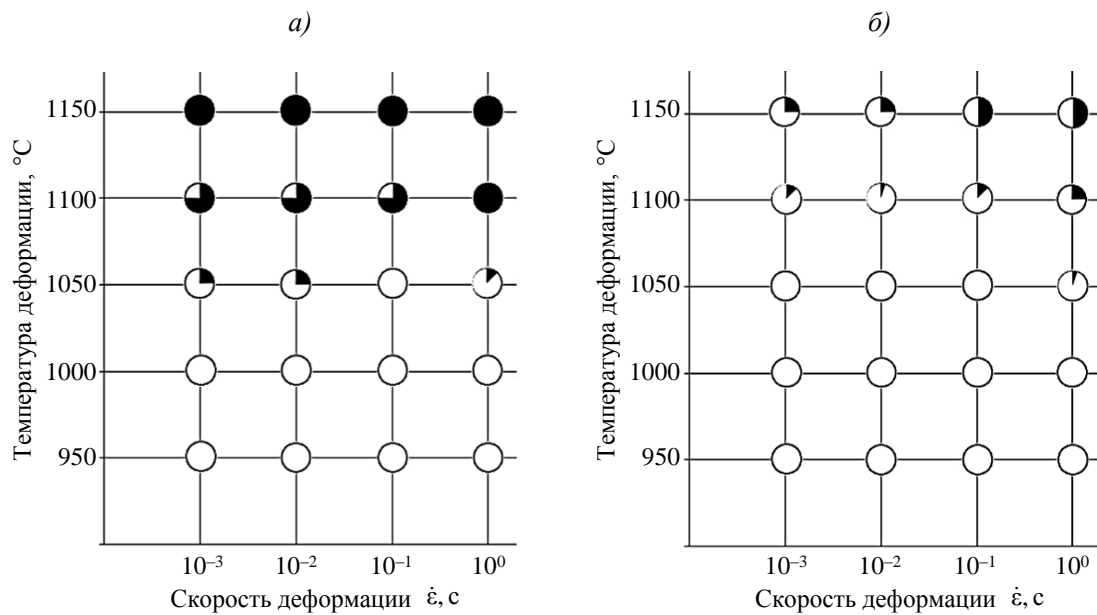


Рис. 5. Диаграммы структурных состояний никелевых сплавов ЭП742-ИД (а) и ЭП975-ИД (б)

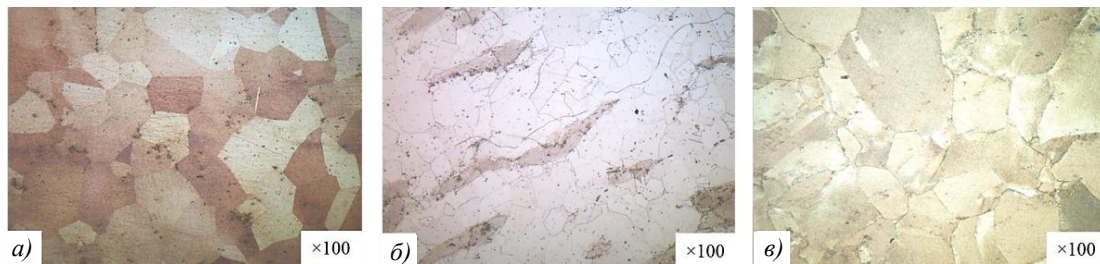


Рис. 6. Структура горячедеформированных образцов из сплава ЭП742-ИД при скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ c}^{-1}$  и температурах 1150 (а), 1100 (б) и 1000 °С (в)

Анализ результатов металлографических структурных исследований, полученных методом рентгеновской дифрактометрии ( $\omega$ -сканирование), показал полное соответствие выводов относительно типа структуры.

### Заключения

Разработан метод построения диаграмм структурных состояний жаропрочных никелевых и магниевых сплавов, основанный на осуществлении эксперимента по горячей деформации с применением испытательной машины, настроенной на сжатие, и дифрактометрическом изучении структуры.

Дифрактометрический метод – экспрессный, поэтому съемка сокращается до нескольких минут и исключается необходимость применения фотографической регистрации отражений. Этот метод также более информативный, что позволяет отделить спонтанную рекристаллизацию от динамической по ширине рентгеновских рефлексов (при динамической рекристаллизации часть рекристаллизованных зерен испытывают дальнейшую деформацию).

С применением испытательной машины MTS-50 и рентгеновского дифрактометра по разработанной методике построены диаграммы структурных состояний жаропрочных никелевых сплавов ЭП742-ИД и ЭП975-ИД, а также магниевых сплавов МА2 и МА3.

Рентгеновский дифрактометр и испытательная машина MTS-50 представляют собой единый высокоэффективный исследовательский комплекс для изучения процессов горячей деформации – в частности, для построения диаграмм структурных состояний, что позволяет:

- регламентировать структуру на каждом этапе обработки давлением;
- прогнозировать структуру для заданных режимов деформации;
- выбирать вид операции обработки давлением.

Разработанный дифрактометрический метод предназначен для изучения рекристаллизации и построения диаграмм структурных состояний сплавов на различной основе, которые могут быть применены при разработке и оптимизации параметров технологии горячей обработки давлением с целью получения заготовок с регламентированной структурой.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
2. Каблов Е.Н., Акинина М.В., Волкова Е.Ф., Мостяев И.В., Леонов А.А. Исследование особенностей фазового состава и тонкой структуры литейного магниевых сплава МЛ19 в литом и термообработанном состояниях // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Тез. докладов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб., 2019. Т. 4. С. 24.
5. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // Труды ВИАМ. 2017. № 10 (58). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
6. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Летников М.Н., Мазалов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
7. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 167–182.
8. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
9. Блохин Н.Н., Овечкин Б.И. Структура и диаграммы структурных состояний деформируемых магниевых сплавов // Цветные металлы. 1992. № 11. С. 56–59.
10. Филонова Е.В., Бакрадзе М.М., Кочубей А.Я., Вавилин Н.Л. Исследование изменений структурно-фазового состояния сплава ВЖ175 в процессе горячей деформации и термической обработки // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 3 (32). С. 10–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-10-13.
11. Вайнблат Ю.М. Диаграммы структурных состояний и карты структур алюминиевых сплавов // Известия АН СССР. Металлы. 1982. № 2. С. 82–89.
12. Бубнов М.В., Скляренко В.Г. Формирование регламентированной структуры при деформации гранулированного сплава ЭП741НП // Технология легких сплавов. 2007. № 2. С. 54–55.
13. Разуваев Е.И., Лебедев Д.Ю., Бубнов М.В. Формирование ультрамелкозернистой и наноразмерной структуры в металлах и сплавах методами деформации // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 3 (16). С. 3–8.

14. Мазалов И.С., Филонова Е.В., Ломберг Б.С. Формирование структуры при деформации и термической обработке заготовок деталей из никелевого высокопрочного свариваемого сплава ВЖ172 // Труды ВИАМ. 2013. № 12. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.10.2021).
15. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: Metallurgy, 1978. 568 с.
16. Уманский Я.С., Скаков Ю.А., Иванов А.Н., Расторгуев Л.Н. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия. М.: Metallurgy, 1982. 632 с.
17. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. М.: Metallurgy, 1978. 392 с.
18. Кочубей А.Я., Медведев П.Н. Применение прямых полюсных фигур в исследованиях процессов структурообразования при нагревах деформированных металлов и сплавов // Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 5 (23). Ст. 02. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 01.10.2021).
19. Давыдов В.Г., Бер Л.Б., Кочубей А.Я. Влияние размера зерна на диаграммы структурных состояний сплава МА2-1 // Технология легких сплавов. 2003. № 2–3. С. 28.

### References

1. Kablov E.N. Materials of a new generation and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
2. Kablov E.N., Akinina M.V., Volkova E.F., Mostyaev I.V., Leonov A.A. The research of aspects of phase composition and fine structure of magnesium alloy ML9 in the as-cast and heat-treated conditions. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 17–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-17-24.
3. Kablov E.N. VIAM: new generation materials for PD-14. *Krylya Rodiny*, 2019, no. 7–8. pp. 54–58.
4. Kablov E.N. The role of fundamental research in the creation of new generation materials. *Reports of the XXI Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*: in 6 vols. St. Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
5. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V. The ways of rising of wrought magnesium alloys main mechanical characteristics. *Trudy VIAM*, 2017, no. 10 (58), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 1, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-2-2.
6. Lomberg B.S., Ovsepjan S.V., Bakradze M.M., Letnikov M.N., Mazalov I.S. The application of new wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 116–129. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-116-129.
7. Antipov V.V. Strategy of development of titanium, magnesium, beryllium and aluminum alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 157–167.
8. Antipov V.V. Prospects for development of aluminium, magnesium and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 186–194. DOI: 10.18577/2107-9140-2017-0-S-186-194.
9. Blokhin N.N., Ovechkin B.I. Structure and diagrams of structural states of deformable magnesium alloys // *Tsvetnye metally*, 1992, no. 11, pp. 56–59.
10. Filonova E.V., Bakradze M.M., Kochubey A.Ya., Vavilin N.L. Structural-phase evolution of VZH175-alloy during hot deformation and heat treatment. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2014, no. 3, pp. 10–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-10-13.
11. Weinblat Yu.M. Diagrams of structural states and maps of the structures of aluminum alloys. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, 1982, no. 2, pp. 82–89.
12. Bubnov M.V., Sklyarenko V.G. Formation of a regulated structure during deformation of the granular alloy EP741NP. *Tekhnologiya legkikh spлавov*, 2007, no. 2, pp. 54–55.
13. Razuvaev E.I., Lebedev D.Yu., Bubnov M.V. Forming of ultrafine grained and nanodimensional structure in metals and alloys deformation methods. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2010, no. 3, pp. 3–8.
14. Mazalov I.S., Filonova E.V., Lomberg B.S. Formation of microstructure of nickel weldable VGH172 superalloy in process of deformation and heat treatment of semi-finished products. *Trudy VIAM*, 2013, no. 12, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 1, 2021).

15. Gorelik S.S. *Recrystallization of metals and alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 568 p.
16. Umansky Ya.S., Skakov Yu.A., Ivanov A.N., Rastorguev L.N. *Crystallography, radiography and electron microscopy*. Moscow: Metallurgiya, 1982. 632 p.
17. Novikov I.I. *Theory of heat treatment of metals*. Moscow: Metallurgy, 1978. 392 p.
18. Kochubey A.Ya., Medvedev P.N. The use of direct pole figures in the study of structure formation processes during heating of deformed metals and alloys. *News of Materials Science. Science and technology*, 2016, no. 5 (23). Art. 02. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: October 1, 2021).
19. Davydov V.G., Ber L.B., Kochubey A.Ya. Influence of grain size on diagrams of structural states of alloy MA2-1. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2003, no. 2–3, pp. 28.

### *Информация об авторах*

**Кочубей Александр Яковлевич**, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
**Журавлева Полина Леонидовна**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

### *Information about the authors*

**Alexander Ya. Kochubey**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
**Polina L. Zhuravelva**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 09.11.2021; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.11.2021.  
The article was submitted 09.11.2021; approved and accepted for publication after reviewing 25.11.2021.