

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-10-13

*Е.В. Филонова<sup>1</sup>, М.М. Бакрадзе<sup>1</sup>, А.Я. Кочубей<sup>1</sup>, Н.Л. Вавилин<sup>1</sup>***ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ СПЛАВА ВЖ175 В ПРОЦЕССЕ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

*Установлено влияние термомеханических параметров деформации (температуры и скорости), а также термической обработки на процесс рекристаллизации структуры жаропрочного сплава на никелевой основе ВЖ175. Построена структурная диаграмма и определены условия формирования в сплаве однородной рекристаллизованной мелкозернистой микроструктуры.*

**Ключевые слова:** деформация, температура, скорость, термическая обработка, рекристаллизация, зерно, структура.

*The effect of thermomechanical deformation parameters (temperature and speed) and heat treatment on the recrystallization process of nickel-based superalloy VZh175 has been investigated in this article. The structural diagram and the conditions for the formation a recrystallized homogeneous fine-grained alloy microstructure were obtained.*

**Keywords:** deformation, temperature, speed, heat treatment, recrystallization, grain, structure.

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Жаропрочные никелевые сплавы в ближайшем будущем будут оставаться одними из основных материалов для деталей горячего тракта газотурбинных двигателей, они в значительной мере определяют эксплуатационные характеристики и конкурентоспособность силовой установки летательных аппаратов [1, 2].

Структура жаропрочных сплавов, в том числе деформируемых, наряду с химическим составом, является одним из основных факторов, обуславливающих их свойства, такие как прочность, жаропрочность, пластичность, сопротивление усталости и другие. Поэтому получение оптимальной для данного сплава структуры является важным условием обеспечения требуемых свойств и высокой работоспособности материала [3, 4].

Структурные диаграммы горячедеформированных сплавов отражают качественные и количественные зависимости характеристик структуры от параметров деформационного и термического воздействия [5–7]. Значение этих диаграмм состоит в возможности прогнозирования получения заданной структуры в материале. Изменяя основные параметры деформации (степень, скорость, температура), можно получить полный набор структур – от нерекристаллизованной до полностью рекристаллизованной.

В данной работе для нового жаропрочного сплава на никелевой основе марки ВЖ175 исследовали изменения структурно-фазового состояния в процессе горячей деформации и термической обработки (закалки). Задачей работы являлось

построение структурной диаграммы для оптимизации технологических параметров производства штамповок дисков турбины из этого материала.

**Материалы и методы**

Исследования проводили на модельных цилиндрических образцах из сплава ВЖ175 диаметром 15 мм, высотой 20 мм, прошедших горячую осадку в изотермических условиях по различным режимам на универсальной испытательной машине MTS 50. Температурный интервал деформации (1100–1160°C) установлен в двухфазной области, что обусловлено необходимостью получения мелкозернистой структуры после окончательной термической обработки для обеспечения высоких прочностных характеристик сплава. При этом максимальная температура деформации не должна превышать температуры закалки и полного растворения  $\gamma'$ -фазы.

Для выбора параметров деформации проведен анализ публикаций и технической документации по сплаву ВЖ175 и технологии его производства [8–17]. Установлено, что в процессе изготовления заготовок дисков из сплава ВЖ175 разовая степень деформации на операциях осадки и штамповки должна составлять ~30%. В этих условиях формируется равномерная макро- и микроструктура, материал деформируется без образования трещин. Интервал скоростей деформации  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  с<sup>-1</sup> выбран с учетом возможностей существующего промышленного прессового оборудования металлургических заводов отрасли и на основании опыта производства штамповок дисков из трудноде-

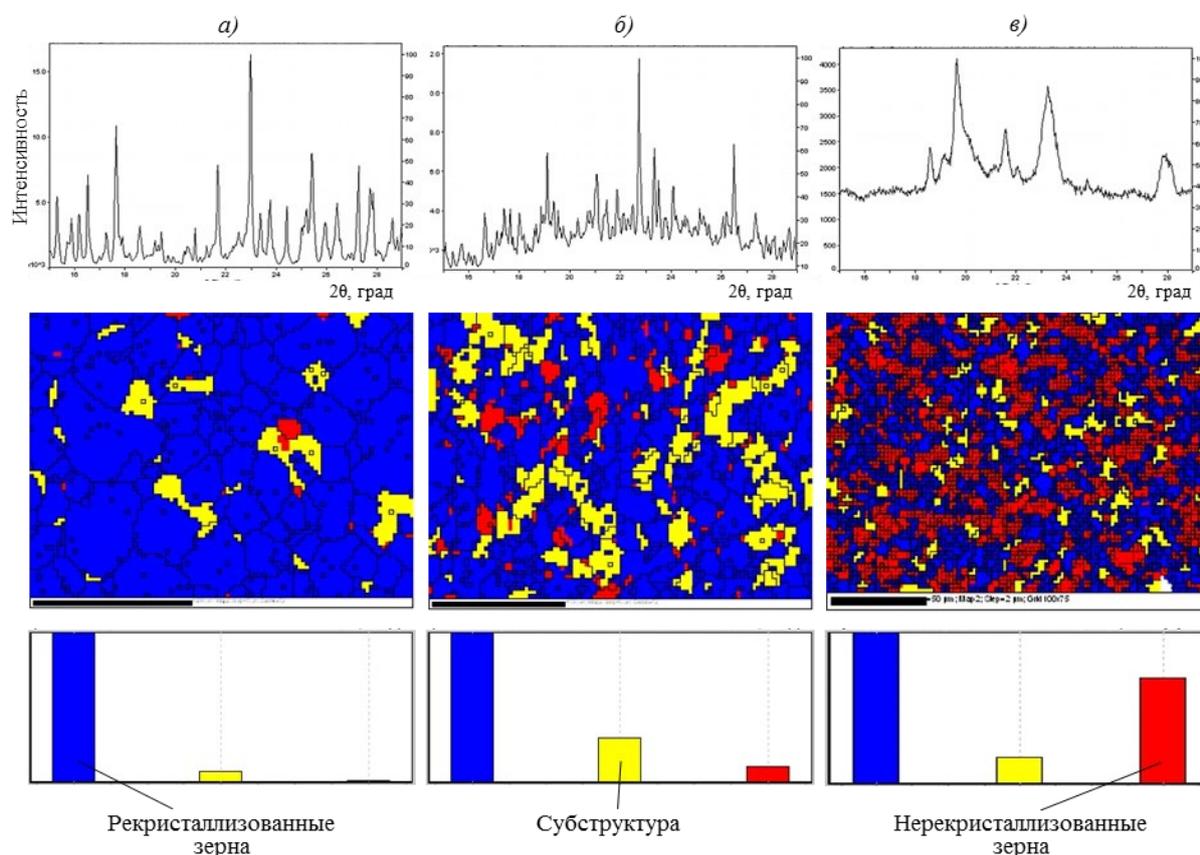


Рис. 1. Дифрактограммы, структуры и данные EBSD-анализа образцов из сплава ВЖ175 после деформации (скорость  $3,3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , разовая степень деформации  $\varepsilon_{\text{деф}}=30\%$ ) при температуре деформации 1160 (а), 1140 (б) и 1120°C (в)

формируемых жаропрочных сплавов ЭК151, ЭП975 и др.

Осаженные по выбранным режимам цилиндрические образцы из сплава ВЖ175 разрезали пополам вдоль оси деформации электроискровой резкой на установке АРТА-120.

Структура образцов изучалась в параллельной оси деформирования плоскости в состоянии после деформации и охлаждения с печью, а также после закалки по стандартному режиму: предварительный отжиг перед нагревом под закалку при температуре  $T_{\text{п.р.}}-40^\circ\text{C}$ +закалка в двухфазной области с температуры  $T_{\text{п.р.}}-20^\circ\text{C}$  [8].

Исследование проводили методами рентгеноструктурного анализа на дифрактометре D/MAX-2500 с применением  $\omega$ -сканирования и растровой электронной микроскопии, включая метод дифракции обратноотраженных электронов (EBSD-анализа), на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV с HKL Channel 5.

### Результаты

На рис. 1 представлена структура образцов из сплава ВЖ175 после деформации. В структуре образцов, продеформированных при высоких температурах (1140 и 1160°C) со скоростью в диапа-

зоне  $10^{-2}-10^{-1} \text{ с}^{-1}$ , зерна почти полностью рекристаллизованы (см. рис. 1, а, б). При этом их доля в образцах, осаженных при 1160°C, составляет ~95%, в образцах, осаженных при 1140°C: 80%. Наблюдается существенное укрупнение структуры при температуре деформации 1140°C – средний размер зерна составляет 20 мкм, при температуре 1160°C: 40–60 мкм.

На дифрактограммах образцов, продеформированных при 1140°C, наблюдается небольшое количество дискретных пиков высокой интенсивности, в отличие от дифрактограммы при температуре осадки 1160°C, где пики начинаются не от нулевого уровня, а от некоторого уровня фона, что обусловлено наличием в структуре незначительного остаточного наклепа.

При температуре 1120°C во всех образцах основная доля зерен не рекристаллизована, что подтверждается присутствием на дифрактограммах сплошного фона с отдельными пиками (см. рис. 1, в).

По результатам исследования процесса рекристаллизации в интервале температур 1100–1160°C и скоростей деформации  $10^{-2}-10^{-1} \text{ с}^{-1}$  построена структурная диаграмма сплава ВЖ175, отражающая зависимость характеристик структуры от температуры и скорости деформации в условиях



Рис. 2. Структурная диаграмма сплава ВЖ175 с областями без рекристаллизации (I), с частичной (II) и полной рекристаллизацией (III); C–C и C<sup>l</sup>–C<sup>l</sup> – границы между областями; D – размер зерна

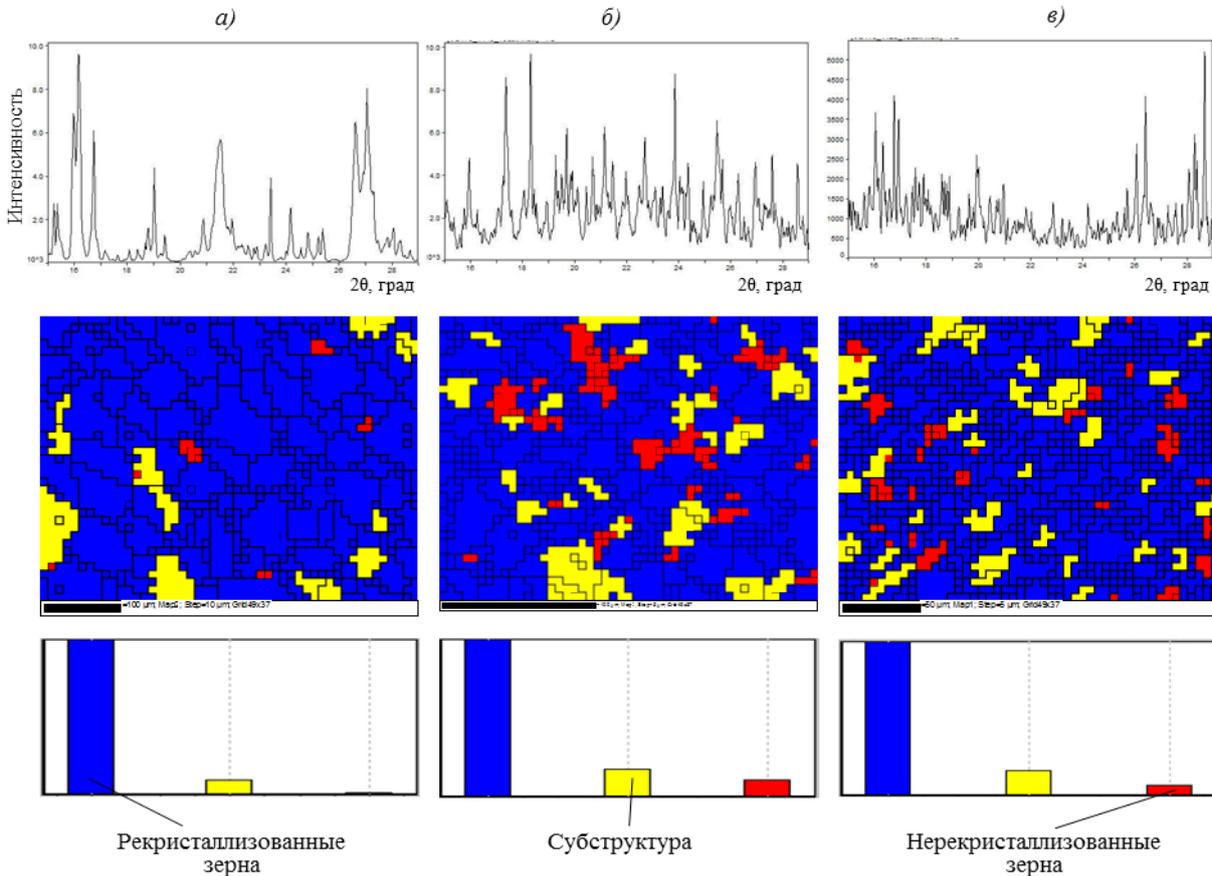


Рис. 3. Дифрактограммы, структуры и данные EBSD-анализа образцов из сплава ВЖ175 после деформации (скорость  $3,3 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ , разовая степень деформации  $\epsilon_{\text{деф}}=30\%$ ) и последующей термической обработки (закалка по стандартному режиму) при температуре деформации 1160 (а), 1140 (б) и 1120°C (в)

охлаждения с печью после осадки (рис. 2). На диаграмме показаны области без рекристаллизации (I), с частичной (II) и полной (III) рекристаллизацией, приведены значения размеров зерен (D). Линия C–C представляет собой границу между областями с нерекристаллизованной и частично рекристаллизованной структурами, линия C<sup>l</sup>–C<sup>l</sup> – границу между областями частичной и полной рекристаллизации.

Температура деформации, при которой происходит переход от нерекристаллизованной структуры к рекристаллизованной, находится в интервале от 1120 до 1140°C. В исследованном температурно-скоростном интервале изменение скорости деформации при медленном охлаждении по-

сле осадки оказывает меньшее влияние на размер зерен, чем изменение температуры деформации.

В области полностью рекристаллизованной структуры размер зерен при температуре 1160°C равен 40–60 мкм, а при температуре 1140°C: 15–20 мкм. В области частично рекристаллизованной структуры размер рекристаллизованных зерен ~5 мкм.

После закалки во всех образцах формируется рекристаллизованная структура с равномерным распределением зерен матрицы (рис. 3). Сравнение дифрактограмм деформированного и термообработанного металла показывает, что для температур деформации >1130°C после закалки структура образцов полностью рекристаллизована

(см. рис. 3, а, б). Уровень наклепанного слоя на образце, продеформированном при 1140°C, существенно снизился, а на образце, продеформированном при 1160°C, полностью отсутствует. В образцах, осаженных при более низких температурах (1100, 1120°C), после закалки количество рекристаллизованных зерен увеличилось и уровень наклепанного слоя снизился (см. рис. 3, в).

Размер зерен в образцах после закалки зависит от температуры деформации. Так, в заготовках после осадки при 1100, 1120°C и последующей закалки размер зерен ~10 мкм, после осадки при 1140°C и закалки – составляет ~25 мкм, после деформации при 1160°C: 60 мкм.

### Обсуждение и заключения

По результатам исследований процессов рекристаллизации сплава ВЖ175 построена структурная диаграмма, отражающая переход от нерекристаллизованной структуры к рекристаллизованной в заданном интервале температур и скоростей деформации.

По диаграмме установлен температурно-скоростной интервал деформации, при котором в образцах из сплава ВЖ175 с после закалки по стандартному режиму формируется требуемая для получения высокого уровня свойств однородная рекристаллизованная микроструктура с размером зерен ~25 мкм.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34.
3. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
4. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
5. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов и сплавов. М.: Металлургия. 1982. 392 с.
6. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. М.: МИСиС. 2005. 432 с.
7. Вайнблат Ю.М., Шаршагин Н.А., Варфаломеева Э.А. Диаграммы структурных состояний и механизмов деформации алюминиевых сплавов. М.: ВИЛС. 1985. 123 с.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.
9. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) //Материаловедение. 2010. №7. С. 24–28.
10. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2365657 Рос. Федерация; опубл. 27.08.2009 Бюл. №24.
11. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
12. Ovsepyan S., Lomberg B., Bakradze M., Mazalov I. New nickel-base wrought superalloys for high temperature rotor and stator parts of gas turbine engines /In: Materials Science and Engineering Conference. 2012. <http://www.dgm.de/tagungen>.
13. Рынденков Д.В., Перевозов А.С., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М. Первый опыт производства крупногабаритных штамповок из сплава ВЖ175-ИД в ОАО «СМК» /В сб. тезисов докл. конф. «Современные деформируемые жаропрочные сплавы и стали для деталей ГТД». М.: ВИАМ. 2013 (CD-диск).
14. Бакрадзе М.М., Ломберг Б.С., Овсепян С.В. и др. Разработка нового жаропрочного деформируемого сплава на никелевой основе для дисков ГТД /В сб. тезисов докл. Международной науч.-технич. конф. «Актуальные вопросы авиационного материаловедения». М.: ВИАМ. 2007. С. 146.
15. Ломберг Б.С., Бубнов М.В., Бакрадзе М.М., Арбина В.П. Изготовление поковок дисков газотурбинных двигателей из сплава ВЖ175 //Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. №9. С. 21–23.
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 129–141.
17. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.