

УДК 669.245:669.018.44

А.А. Буякина¹, М.Н. Летников¹, М.М. Бакрадзе¹, С.А. Шугаев¹**ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВА ВЖ177**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-2-2

Исследовано влияние параметров термомеханической и термической обработки на изменение структурно-фазового состояния сплава на всех этапах технологического процесса изготовления плоских штамповок – от гомогенизационного отжига слитка до полной термической обработки – из нового деформируемого жаропрочного сплава ВЖ177 на никелевой основе. Представлены результаты сравнительных испытаний на растяжение, ударную вязкость и жаропрочность штамповок, изготовленных по различным технологическим схемам. Исследовано влияние высокотемпературных выдержек, имитирующих наработку в изделиях, на структуру и механические свойства сплава.

Ключевые слова: сплав на основе никеля, гомогенизационный отжиг, изотермическая штамповка, термическая обработка, механические свойства.

The effect of parameters of thermomechanical and heat treatment on microstructure and phase composition change of alloy at all the stages of flat forgings production of new superalloy VG177 including ingot homogenization, isothermal forging and heat treatment is studied. The comparative tests results of tensile strength, impact strength and high-temperature strength are presented. The effect of long high temperature exposures simulating operation time on microstructure and mechanical properties of the item is investigated.

Keywords: Ni-base superalloy, homogenizing, isothermal forging, heat treatment, mechanical properties.

¹Федеральное 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

Увеличение ресурса авиационных двигателей требует создания материалов с высоким уровнем физико-механических свойств. Новые материалы должны превосходить аналоги по рабочей температуре, удельным прочностным характеристикам, не иметь чувствительности к концентраторам напряжений [1]. Разработка современных конкурентоспособных материалов для ГТД нового поколения основана на неразрывности концепции «материал–технология–конструкция» [2].

Одной из проблем металловедения современных деформируемых жаропрочных никелевых сплавов является создание материала с высокой жаропрочностью при температурах $>650^{\circ}\text{C}$ без потери кратковременной прочности. Среди отечественных дисковых сплавов наибольшим значением жаропрочности при 750°C обладает отечественный гранулируемый сплав разработки ВИЛС марки ВВ750П – $\sigma_{100}^{750} = 755$ МПа (при прочности $\sigma_{\text{в}}^{20} = 1501$ МПа), однако его рабочая температура без защитного покрытия ограничена 650°C из-за неудовлетворительной стойкости к сульфидно-оксидной коррозии при 750°C . Высокий уровень кратковременной прочности при 20°C имеет отечественный деформируемый сплав марки ВЖ175, разработанный во ФГУП

«ВИАМ»: $\sigma_B^{20^\circ} = 1600$ МПа, однако его жаропрочность при 750°C несколько ниже: $\sigma_{100}^{750^\circ} = 638$ МПа. Перспективным зарубежным аналогом является гранулированный никелевый сплав марки LSHR с характеристиками: $\sigma_B^{20^\circ} = 1700$ МПа и $\sigma_{34}^{750^\circ} = 680$ МПа [3–7].

Для изготовления дисков турбин малоразмерных ГТД из высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов во ФГУП «ВИАМ» разработана технология изотермической штамповки, обеспечивающая формирование регламентированной структуры материала штампанных заготовок. Отличительной особенностью новой комплексной энерго- и ресурсосберегающей технологии, по сравнению с зарубежными, является то, что высокотемпературная деформация заготовок производится на воздухе, а не в вакуумных установках с молибденовыми штампами [8–11].

Известно, что структурно-фазовое состояние во многом определяет свойства жаропрочных поликристаллических никелевых сплавов. Структура современных высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов весьма чувствительна к термомеханической и термической обработке – например, температуру закалки необходимо подбирать индивидуально для каждой плавки, так как температура полного растворения основной упрочняющей γ' -фазы ($T_{п,\gamma'}$) может сильно меняться в пределах паспортного химического состава сплава [12–16].

С целью создания материала для дисков ГТД, рассчитанных на длительную эксплуатацию при температурах $750\text{--}800^\circ\text{C}$, во ФГУП «ВИАМ» выполнена НИР по разработке нового жаропрочного деформируемого сплава (ВЖ177) с уровнем жаропрочности $\sigma_{100}^{750^\circ} \geq 765$ МПа и пределом прочности при растяжении $\sigma_B^{20^\circ} \geq 1500$ МПа. Для определения оптимальных технологических параметров получения заготовок дисков проведено исследование влияния термомеханической и термической обработки на структуру и характеристики длительной (σ_τ^T) и кратковременной (σ_B) прочности нового сплава ВЖ177.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 9.7. «Высокотемпературные деформируемые сплавы и композиционные материалы, упрочненные тугоплавкими металлическими волокнами и частицами, карбидами, нитридами и др., истираемые уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Материал для исследования – новый высокожаропрочный деформируемый сплав ВЖ177 на основе никеля системы легирования Ni–Co–Cr–W–Mo–Ta–Al–Ti–Nb–C. Сплав получали путем вакуумно-индукционной выплавки с последующим переплавом в слитки методом высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК).

Микроструктуру сплава ВЖ177 в различных состояниях исследовали на протравленных микрошлифах с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51 и растрового электронного микроскопа JSM-6490LV. Локальный химический состав определяли методом количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на аппарате «Суперпроб-733».

Температуры фазовых превращений в литом состоянии определяли методом дифференциального термического анализа на установке для измерения теплоемкости DSC404F1.

Фазовый состав сплава исследовали методом, основанным на электрохимическом изолировании фаз, с последующим рентгеноструктурным анализом изолятов на дифрактометре D/MAX-2500 фирмы Rigaku в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении. Обработку дифракто-

грамм проводили с помощью специализированной программы Jade 5 и базы данных PDF-2.

Испытания при растяжении выполнены в соответствии с ГОСТ 1497–84 на цилиндрических образцах с рабочей частью $\varnothing 5$ мм. Испытания на длительную прочность проводили на аналогичных образцах по ГОСТ 10145–81 при температуре 750°C с постоянным напряжением 765 МПа. Испытания на ударную вязкость (КСУ) проводили по ГОСТ 9454–78.

Результаты и обсуждение

Комплексная технология получения заготовок дисков из никелевых жаропрочных сплавов включает: вакуумно-индукционную выплавку слитков с последующим переплавом методом высокоградиентной направленной кристаллизации (ВГНК)→гомогенизационный отжиг→изотермическую штамповку слитков→термическую обработку заготовок дисков. Далее представлены результаты исследований – начиная с гомогенизации слитка и заканчивая термической обработкой деформированных заготовок.

Микроструктура сплава в исходном состоянии и после гомогенизационного отжига

В литом состоянии сплав ВЖ177 имеет типичную дендритную структуру с большой долей эвтектики в междендритных областях и карбидами типа MeC, а также небольшое количество избыточной фазы на основе системы Ni–Co–Cr–Nb–Mo (рис. 1, а). Большой объем эвтектики в сплаве ВЖ177 (по сравнению с другими деформируемыми жаропрочными сплавами) обусловлен повышенным суммарным содержанием γ' -образующих и тугоплавких легирующих элементов. Для обеспечения длительной работоспособности при высоких температурах сплав ВЖ177 максимально легирован танталом и вольфрамом, их сумма (8,4% (по массе)) существенно выше, чем у всех современных зарубежных и отечественных дисковых сплавов:

Сплав	Содержание Ta+W, % (по массе)
LSHR	5,9
Alloy 10	7,1
ВЖ175	3,1
ВВ751П	3,0.

Наличие эвтектики отрицательно сказывается при последующей деформации и, как правило, приводит к образованию трещин вдоль границ фазового раздела, поэтому процессу гомогенизации сплава ВЖ177 необходимо уделить особое внимание.

По данным дифференциального термического анализа (ДТА) температура сольвуса сплава ВЖ177 находится несколько выше 1220°C, при этом металлографические исследования показали, что активное растворение эвтектики происходит при температурах $\geq 1210^\circ\text{C}$ (рис. 1, б). С учетом столь узкого температурного интервала гомогенизации, в работе исследовали влияние продолжительности выдержки (от 6 до 12 ч) при температуре отжига $1220 \pm 5^\circ\text{C}$ (рис. 1 в, г). Максимальное растворение эвтектической составляющей происходит после отжига в течение 12 ч (рис. 1, г), однако после гомогенизации в сплаве все же остается небольшое ее количество.

Методом МРСА исследовали состав легирующих элементов в осях дендритов первого порядка (C_d) и в межосном пространстве ($C_{м.д}$) образцов в литом и гомогенизированном состоянии. Как видно из данных табл. 1, коэффициенты ликвационной неоднородности ($K_L = C_d / C_{м.д}$) после отжига в течение 12 ч при $1220 \pm 5^\circ\text{C}$ равны $1 \pm 0,2$, что свидетельствует о завершении процесса гомогенизации. Увеличение продолжительности отжига более 12 ч не приводит к дополнительным изменениям в микроструктуре.

Для проведения дальнейших исследований слитки, выплавленные методом ВГНК, термически обрабатывали по режиму: при $1220 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 12 ч.

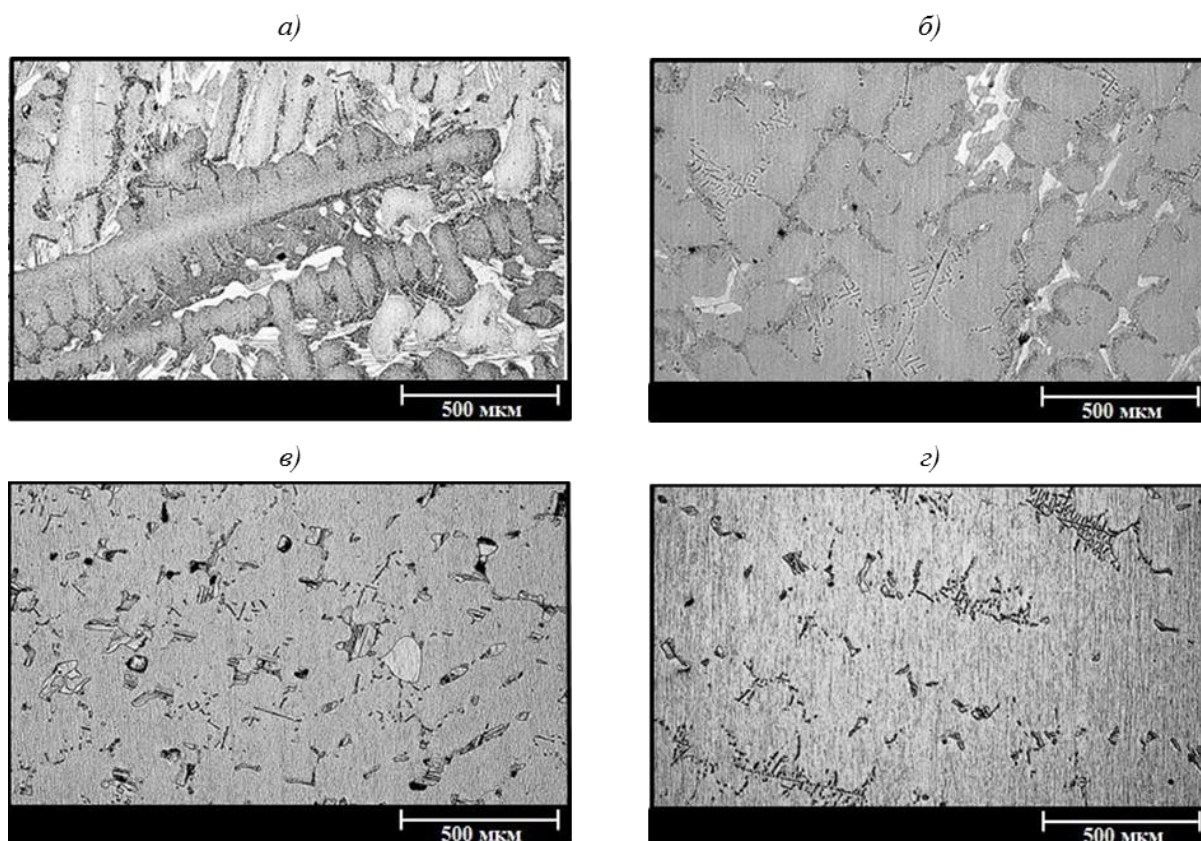


Рис. 1. Микроструктура образцов из сплава ВЖ177 в литом состоянии после ВГНК-переплава (а) и после гомогенизационного отжига, проведенного по режимам: 1210°C , 8 ч (б); $1220 \pm 5^\circ\text{C}$ с выдержкой 6 (в) и 12 ч (з)

Таблица 1

Коэффициенты ликвации легирующих элементов в литом и гомогенизированном состоянии образцов из сплава ВЖ177

Состояние образцов	Коэффициент ликвации K_L^* для элементов						
	Al	Ti	Cr	Co	Nb	Ta	W
Литое	1,1	0,8	0,6	1,0	0,3	1,1	1,8
После гомогенизационного отжига при $1220 \pm 5^\circ\text{C}$ в течение 12 ч	1,1	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	1,2

* $K_L = C_d / C_{м.д.}$

Микроструктура сплава после деформации

Для достижения высоких и стабильных характеристик механических свойств в поликристаллических жаропрочных никелевых сплавах необходимо на этапе деформации сформировать однородную мелкозернистую рекристаллизованную структуру.

С учетом высокого уровня легирования сплава ВЖ177, исследовали влияние высокотемпературных отжига между деформациями для рекристаллизации металла по двум режимам:

– режим 1 – многостадийная деформация при постоянной температуре с промежуточными отжигами по режиму $T_{отж} = T_{деф} + (20 \div 40)^\circ\text{C}$;

– режим 2 – многостадийная деформация при постоянной температуре с отжигами между первыми операциями осадки при температуре гомогенизации и отжигами между окончательными операциями деформации, как в режиме 1.

Деформацию заготовок из сплава ВЖ177 проводили на гидравлических прессах в условиях, близких к изотермическим (температура нагрева штампового инструмента составляла 950–980°C), общая степень деформации для обоих режимов: ~80% по высоте.

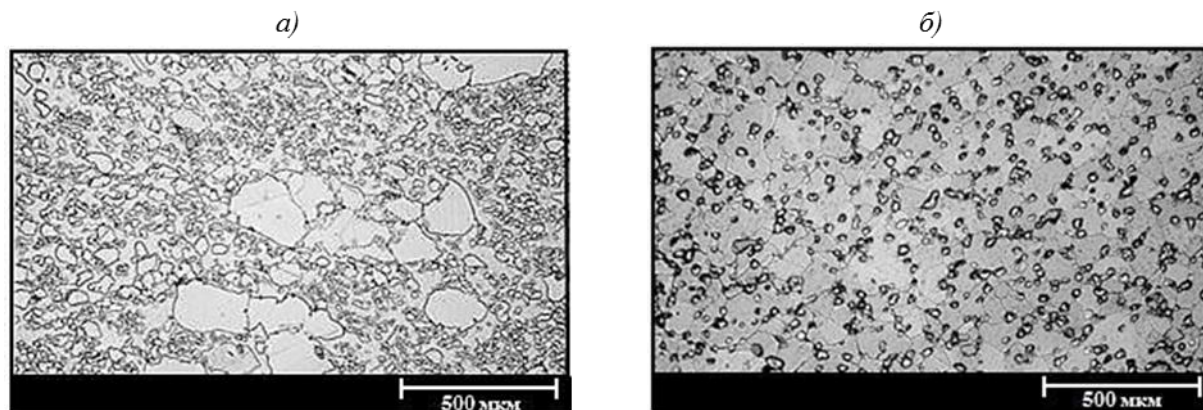


Рис. 2. Микроструктура после деформации по режиму 1 (а) и 2 (б)

Микроструктурные исследования показали, что после деформации формируется однородное микрзерно 10 балла по ГОСТ 5639–82 (рис. 2). В структуре видны равномерно распределенные выделения γ' -фазы различной дисперсности. Кроме того, по сравнению с режимом 1, в процессе термомеханической обработки по режиму 2 остатки эвтектической фазы практически полностью устраняются (рис. 2, б).

Микроструктура и механические свойства сплава после закалки с последующим старением

Окончательное формирование структуры происходит в процессе термической обработки – закалки с последующим старением. В данной работе исследовано влияние температуры закалки на микроструктуру и свойства образцов из сплава ВЖ177, обработанных по режиму 2. Старение для всех вариантов закалки проводили по одинаковому режиму. Выбраны температуры закалки (1190–1215°C), обеспечивающие в процессе термической обработки получение структуры с различным размером микрзерна: мелким – от 20 до 30 мкм (7–8 балл), средним – от 40 до 60 мкм (5–6 балл) и крупным – от 100 до 180 мкм (2–3 балл).

На рис. 3 показаны микроструктуры с различным размером зерна в зависимости от режима термообработки. Исследование образцов методами РЭМ и МРСА показало, что после полной термической обработки во всех образцах наблюдаются зерна γ -твердого раствора с дисперсными частицами интерметаллидной γ' -фазы (рис. 3, е). По границам зерен наблюдаются более крупные, по сравнению с телом зерна, частицы γ' -фазы, а также карбиды (рис. 3, з, д).

С помощью МРСА исследован локальный химический состав. Состав γ -матрицы и γ' -фазы типичен для такого класса сплавов. По результатам физико-химического фазового анализа (ФХФА) после термической обработки не обнаружены карбиды на основе соединений Me_6C и $Me_{23}C_6$, отрицательно влияющие на свойства, в первую очередь – на пластичность.

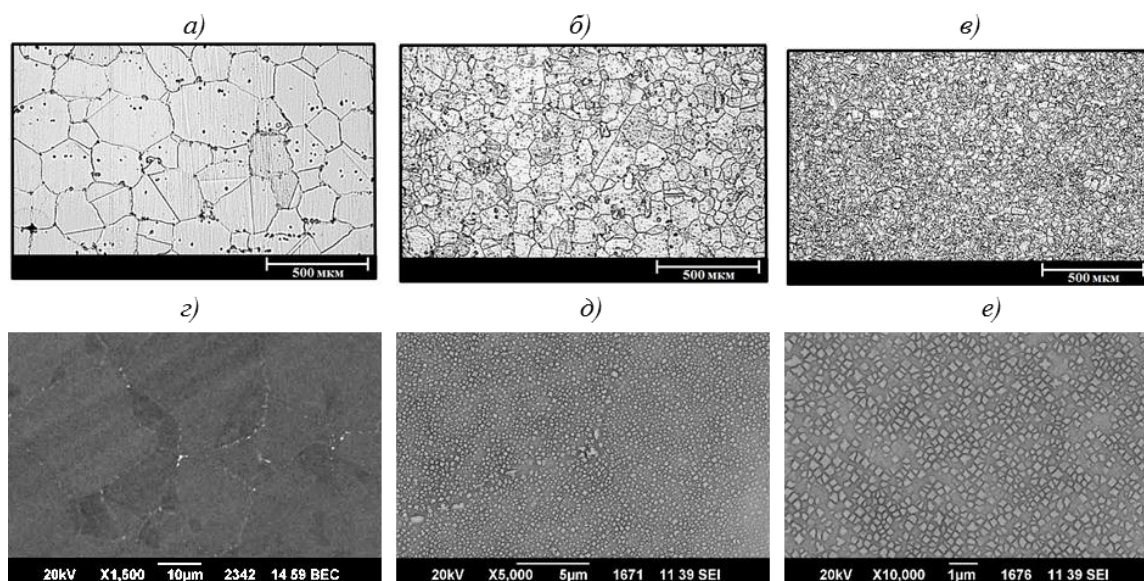


Рис. 3. Микроструктуры:

a, б, в – общий вид (*a* – крупное зерно, *б* – среднее, *в* – мелкое); *г* – вторичные карбиды; *д* – границы зерен; *е* – упрочняющая γ' -фаза

Сравнительные исследования основных механических свойств проводили на образцах, прошедших термомеханическую обработку по режиму 2. Статистические данные собраны по десяти образцам для каждого исследования. Результаты испытаний (средние значения) представлены в табл. 2.

Таблица 2

Механические свойства после различных режимов полной термической обработки

Термообработка на зерно, балл	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, кДж/см ²	Жаропрочность (при 750°C, $\sigma=765$ МПа) – время до разрушения, ч
	МПа		%			
2–3	1370	1020	13,8	14,3	290	128
5–6	1550	1120	14,3	15,3	290	105
7–8	1595	1205	11,5	12,0	255	46

Наибольшее значение жаропрочности получено на образцах с крупнозернистой микроструктурой, однако при этом заметно сильное снижение кратковременной прочности и пластичности, что типично для сплавов данного класса. Оптимальным комплексом свойств обладают образцы со средним баллом зерна – они показали высокую жаропрочность при высоких значениях предела прочности и текучести при комнатной температуре.

Имитация наработки для оценки структурно-фазовой стабильности сплава

Оценку структурно-фазовой стабильности (табл. 3) сплава ВЖ177 проводили на образцах со средним баллом зерна – имитацией наработки при рабочей температуре (выдержка 1050 ч при 750°C).

Таблица 3

Свойства после термической обработки* и последующей выдержки в течение 1050 ч при 750°C (средние значения)

Состояние сплава	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	Жаропрочность (при 750°C, $\sigma=765$ МПа) – время до разрушения, ч
	МПа		%		
Исходное (после термообработки)	1550	1120	14,3	15,3	105
Исходное+выдержка 1050 ч при 750°C	1525	1020	12,5	13,5	118

* Режим термомеханической обработки 2, термообработка на 5–6 балл зерна.

Видно, что после длительной имитации наработки (1050 ч) при рабочей температуре 750°C прочность снижается незначительно – на 2%, предел текучести – на 9%, пластичность уменьшается не более чем на 13%. Время до разрушения при испытаниях на длительную прочность сохраняется на уровне исходного состояния.

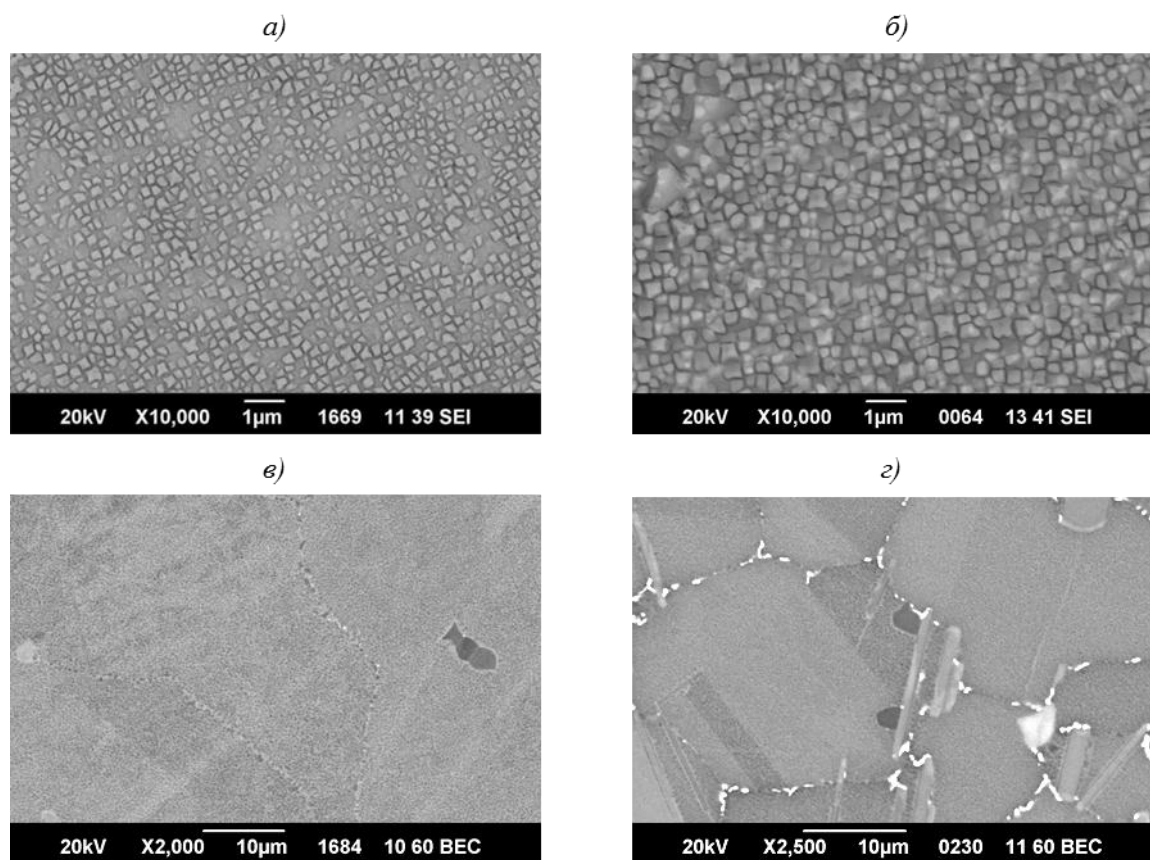


Рис. 4. Микроструктура образцов после термической обработки (а) и выдержки 1050 ч при 750°C (б); первичные карбиды по границам зерен после термообработки (в) и выдержки (г)

По сравнению с исходным (термообработанным) состоянием после длительной выдержки в течение 1050 ч при температуре 750°C в микроструктуре наблюдается коагуляция частиц вторичной γ' -фазы (рис. 4, а, б), а также увеличение вторичных карбидов по границам зерен и границам (γ/γ')-фаз (рис. 4, в, г), что является причиной снижения пластичности. Выделений ТПУ фаз не обнаружено.

Заключение

Для нового высоколегированного жаропрочного сплава ВЖ177 исследовано влияние параметров термомеханической и термической обработок на структуру и механические свойства. Определены оптимальные режимы гомогенизационного отжига, изотермической штамповки, промежуточных рекристаллизационных отжигов, а также окончательной термической обработки.

Для получения равномерной рекристаллизованной структуры без избыточных фаз необходимо проводить многостадийную изотермическую штамповку с отжигами при температуре $1220 \pm 5^\circ\text{C}$ на первых этапах.

Высокий уровень механических свойств материала при комнатной и рабочей температурах обеспечивает термическая обработка, состоящая из закалки при температуре $T_{п.р} - 10^\circ\text{C}$ и двойного старения. Структура после обработки равномерная, размер зерен матрицы 30–50 мкм.

Исследования обработанного по оптимальному режиму сплава ВЖ177 (после выдержки в течение 1050 ч при 750°C в качестве имитации наработки) показали структурно-фазовую стабильность и длительную работоспособность материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. 2013. №10. С. 23–32.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. Locq D., Caron (Onera) P. On Some Advanced Nickel-Based Superalloys for Disk Applications // *High Temperature Materials AL03-01*. 2011. November. Issue 3. P. 1–9.
5. Huron E.S., Bain K.R., Mourer D.P., Gabb T.P. Development of High Temperature Capability P/M Disk Superalloys // *Superalloys-2008, TMS*. 2008. P. 181–189.
6. Gabb T.P., Gayda J., Telesman J. Thermal and Mechanical Property Characterization of the Advanced Disk Alloy // *NASA/TM-2005-213645*. June, 2005.
7. Gabb T.P., Gayda J., Telesman J., Kantzos P.T. Realistic Subscale Evaluations of the Mechanical Properties of Advanced Disk Superalloys // *NASA/TM-2003-212086*. January, 2003.
8. 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. №5. С. 129–141.
9. Tian G., Zou J., Wang Y., Wang W. Hot Deformation Behaviors and Microstructure Evolution in a New PM Nickel-Base Superalloy // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 278. P. 411–416.
10. Пономаренко Д.А., Моисеев Н.В., Скугорев А.В. Эффективная технология изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // *Кузнечно-штамповое производство*. 2013. №10. С. 13–17.
11. Филонова Е.В., Бакрадце 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. С. 10–13. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-3-10-13.
12. Ломберг Б.С., Бакрадце 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.
13. Овсепян С.В., Ломберг Б.С., Бакрадце М.М., Летников М.Н. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP2. С. 122–130.
14. Gayda J. Alloy 10: A 1300F Disk Alloy // *NASA/TM-2000-210358*. August, 2000.
15. Gabb T.P., Gayda J., Kantzos P. The Grain Size-Temperature Response of Advanced Nickel-Base Disk Superalloys During Solution Heat Treatments // *NASA/TM-2007-214912*. December, 2007.
16. Ovsepyan S.V., Lomberg B.S., Alalyikin A.A., Gerasimov D.E., Gromova A.A. Methods of structure preparing of superalloy for disc turbin applications for superplastic deformation // *Material Science Forum*. 1994. Vol. 170–172. P. 305–310.
17. Sharpe H.J., Saxena A. Effect of Microstructure on High-Temperature Mechanical Behavior of Nickel-Base Superalloys for Turbine Disc Applications // *EuroSuperalloys-2010 / Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 278. P. 259–264.
18. Жаропрочный деформируемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2280091 Рос. Федерация; заявл. 21.12.04; опубл. 20.07.06.