

## **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ЖАРОПРОЧНЫХ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ <001> ВЫСОКОРЕНИЕВОГО НИКЕЛЕВОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННОГО В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

*Изучено влияние направленной кристаллизации с высоким температурным градиентом на фронте роста на структуру, дендритную ликвацию, пористость и жаропрочность современного ренийсодержащего жаропрочного сплава с монокристаллической структурой <001>, разработанного для литья лопаток ГТД.*

**Ключевые слова:** *высокоградиентная направленная кристаллизация, жаропрочные сплавы, монокристаллическая структура, дендритная ликвация, пористость, длительная прочность, усталость.*

Развитие авиационного двигателестроения неразрывно связано с разработкой и внедрением новых жаропрочных материалов для деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД), а также с совершенствованием и созданием новых технологических процессов их изготовления.

В области никелевых жаропрочных сплавов, предназначенных для производства лопаток ГТД с монокристаллической структурой, в мировой практике (в России, США, Франции и др.) прослеживаются тенденции, связанные с дополнительным легированием сплавов рением. При этом рений, преимущественно растворяясь в никелевом твердом растворе ( $\gamma$ -фаза), тормозит диффузионные процессы, повышая тем самым сопротивление ползучести сплавов под воздействием высоких температур и напряжений. Использование рения в качестве легирующего элемента удорожает жаропрочные сплавы, однако это целесообразно вследствие заметного повышения их работоспособности и ресурса.

Следует указать, что при максимальном легировании современных жаропрочных сплавов упрочняющими элементами в количествах их предельной растворимости, в условиях неравновесной кристаллизации при получении лопаток ГТД повышается вероятность образования избыточных фаз, не участвующих в упрочнении: ( $\gamma/\gamma'$ )-эвтектики, ТПУ фаз,  $\alpha$ -фазы.

Для обеспечения уровня высоких жаропрочных свойств при изготовлении рабочих лопаток современных ГТД в России и за рубежом используется технология направленной кристаллизации, обеспечивающая получение в лопатках монокристаллической структуры (без границ зерен) с заданной кристаллографической ориентацией.

Однако даже эта современная технология не может решить всех проблем, связанных с формированием в отливках структуры с крупными дендритными и фазовыми составляющими, а также со значительной дендритной ликвацией и междендритной пористостью, вызванных низким температурным градиентом на фронте роста и невысокой скоростью охлаждения в условиях существующего промышленного оборудования.

В связи с этим для уменьшения дендритной ликвации при производстве монокристаллических лопаток ГТД используют сложную, связанную с возможным плавлением эвтектических фаз, длительную высокотемпературную гомогенизацию, что требует специализированного вакуумного оборудования. Для уменьшения пористости до-

полнительно используют энергозатратную, трудоемкую технологию газостатического прессования, также требующую применения дорогостоящего специализированного оборудования.

Тем не менее высокая химическая и структурная неоднородность монокристаллов жаропрочных сплавов, связанная с сегрегацией тугоплавких легирующих элементов (Re, W и др.) внутри дендритной ячейки, полностью не устраняется даже в процессе длительного высокотемпературного отжига [1]. Это может быть причиной выделения избыточных фаз даже в сплавах сбалансированного (в среднем) химического состава жаропрочного сплава.

Для существенного повышения качества структуры, обеспечения ее однородности, уменьшения дендритной ликвации, пористости, исключения образования литейных дефектов в виде струйчатой полосчатости, в ВИАМ разработан новый процесс высокоградиентной направленной кристаллизации жаропрочных сплавов (температурный градиент  $G \approx 150\text{--}200^\circ\text{C}/\text{см}$ ) [2].

Цель данной работы – исследование влияния процесса высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и свойства современного ренийсодержащего монокристаллического сплава ВЖМ1 для рабочих лопаток ГТД.

В качестве объекта исследований был выбран разработанный в ВИАМ высокожаропрочный никелевый сплав с повышенным содержанием рения, предназначенный для монокристаллического литья лопаток газовых турбин [1].

Процесс направленной кристаллизации монокристаллических  $\langle 001 \rangle$  заготовок образцов осуществляли на созданных в ВИАМ специализированных высокоградиентных установках: модульной УВНЭС-4 и опытно-промышленной УВНЭС-5. Главной особенностью этого технологического процесса является интенсивный подвод тепла в расплав выше фронта кристаллизации и активный отвод тепла ниже фронта кристаллизации, что и обеспечивает значительный перепад температур между зонами нагрева и охлаждения. Особенности технологии и конструкция теплового узла установок защищены патентами Российской Федерации [3].

Исследовали микроструктуру монокристаллических образцов сплава ВЖМ1, полученных при одинаковой скорости кристаллизации ( $\sim 5$  мм/мин) и различных температурных градиентах на фронте роста. Определяли коэффициент ликвации элементов в сплаве ВЖМ1 в процессе направленной кристаллизации при различном градиенте методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Оценивали жаропрочность и сопротивление усталости сплава.

На рис. 1 и 2 приведены результаты исследования микроструктуры монокристаллического сплава ВЖМ1. Показано, что повышение температурного градиента до  $G \approx 150\text{--}200^\circ\text{C}/\text{см}$  обеспечивает формирование более однородной тонкодендритной структуры с существенно меньшим междендритным расстоянием  $\lambda \approx 160\text{--}180$  мкм (см. рис. 1, а) по сравнению со структурой, полученной по промышленной технологии ( $G \approx 60^\circ\text{C}/\text{см}$ ,  $\lambda \approx 300$  мкм – см. рис. 1, б). При этом уменьшаются размеры частиц  $(\gamma/\gamma')$ -эвтектики, фрагментированные прожилками  $\gamma$ -фазы, что важно для последующей гомогенизации (см. рис. 1, в, г).

Повышение температурного градиента на фронте направленной кристаллизации жаропрочных сплавов способствует уменьшению размера жидко-твердой области, в кото-

рой формируется дендритная структура. Это вызывает уменьшение количества литейных пор, механизм образования которых связан с различием молярных объемов частиц жидкой и твердой фаз [3]. В структуре отливок сплава ВЖМ1, полученных в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации, были обнаружены лишь случайные поры вблизи наиболее крупных выделений частиц ( $\gamma/\gamma'$ )-эвтектики (см. рис. 2, *а*), которые формировались в междендритных участках в последний момент кристаллизации.

Результаты оценки коэффициента ликвации легирующих элементов в монокристаллах ренийсодержащего жаропрочного сплава ВЖМ1, полученных при различном температурном градиенте на фронте роста, показывают, что такие элементы, как Al, Ta, обогащают междендритные области, а W, Re – сегрегируют в оси дендритов (табл. 1).

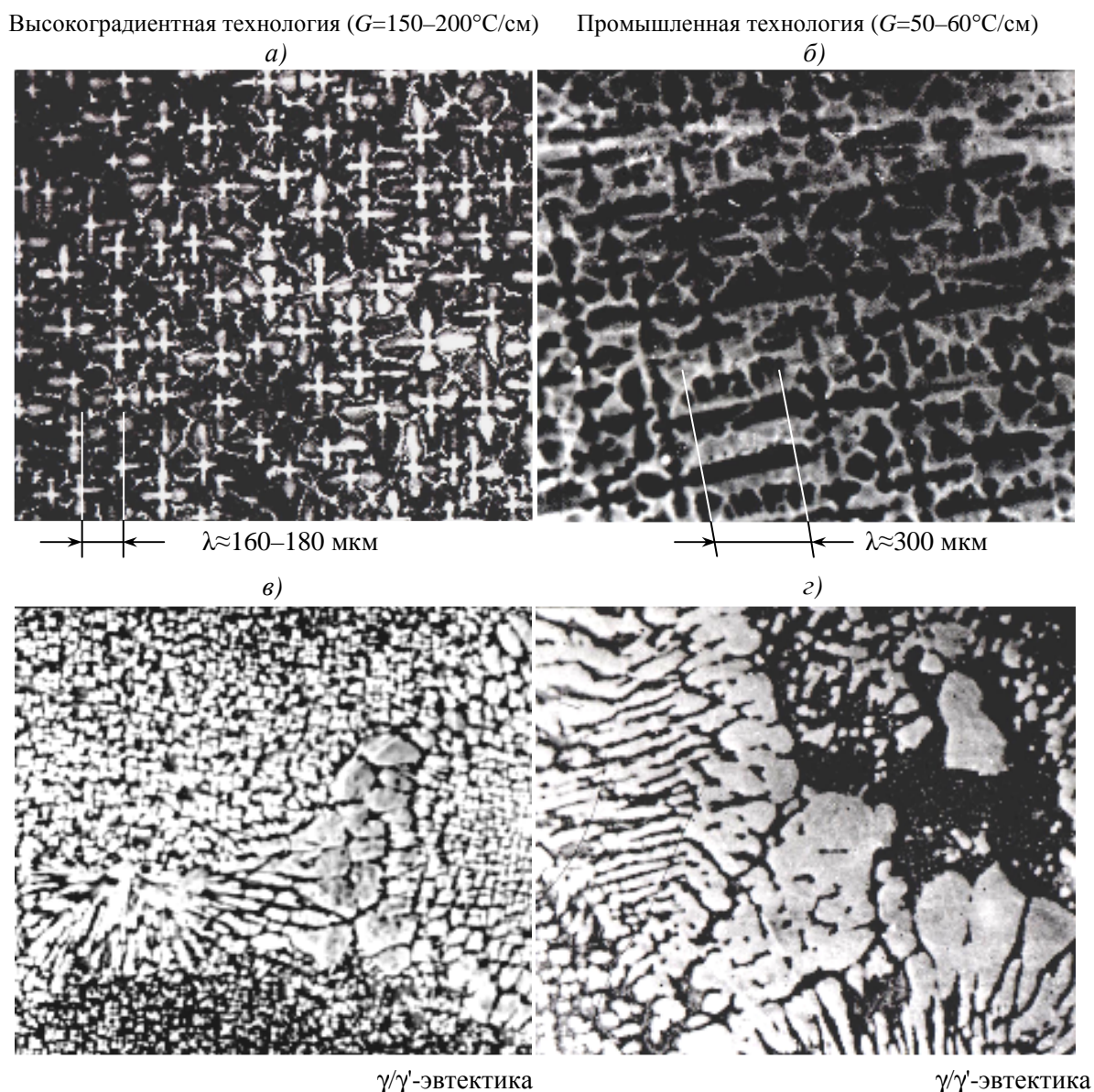


Рис. 1. Микроструктура (*а, б* –  $\times 50$ ; *в, г* –  $\times 2500$ ) ренийсодержащего жаропрочного сплава ВЖМ1, полученного методом направленной кристаллизации по различным технологиям ( $\lambda$  – междендритное расстояние)

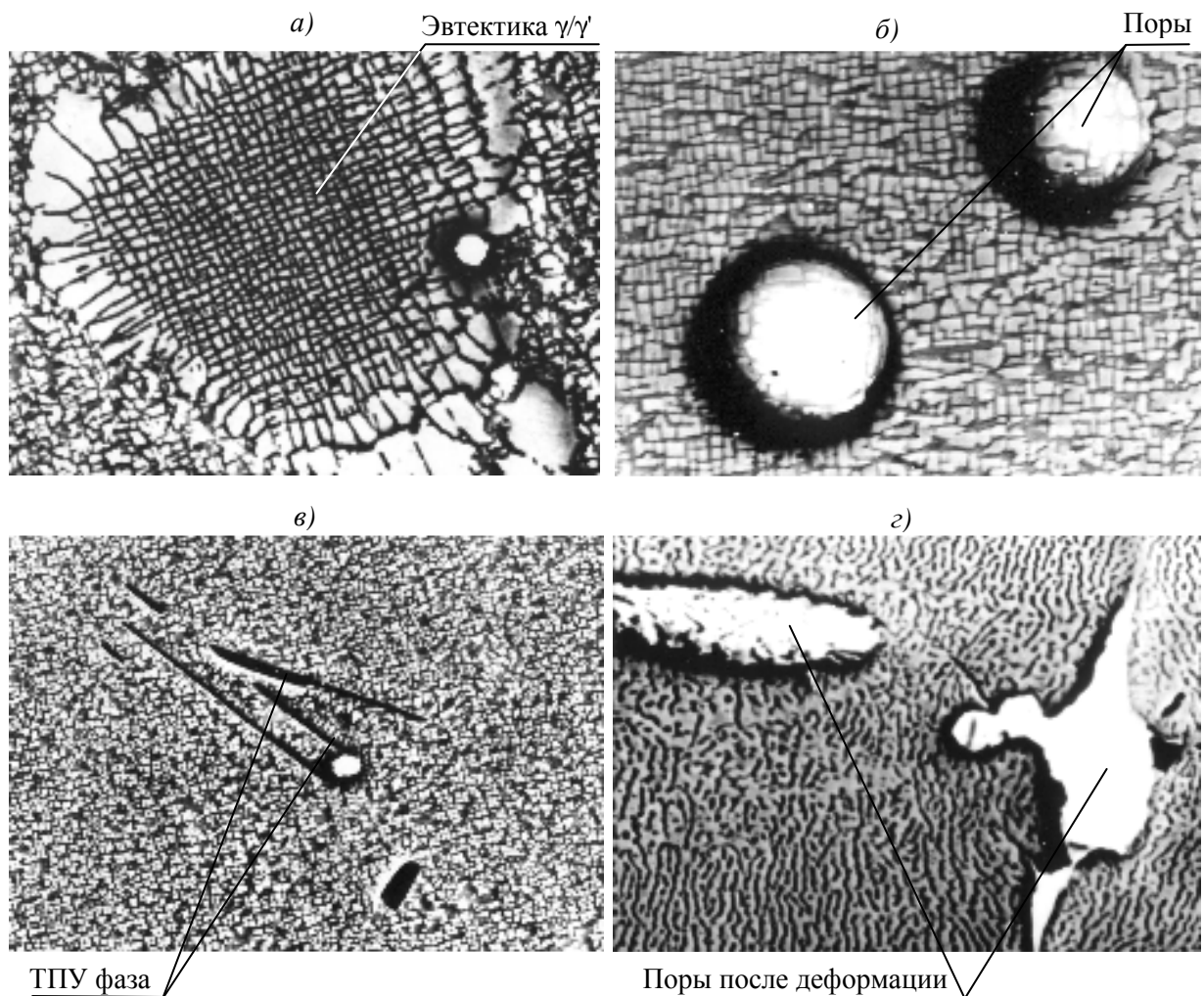


Рис. 2. Эвтектика  $\gamma/\gamma'$  с порой в структуре сплава ВЖМ1:  
 а – пора вблизи эвтектики  $\gamma/\gamma'$  в литом состоянии ( $\times 5000$ ); б – поры после высокотемпературной гомогенизации ( $\times 3500$ ); в – пластины ТПУ фазы ( $\times 3500$ ); з – поры в зоне разрушения после испытаний на жаропрочность ( $\times 2000$ )

Таблица 1

**Зависимость коэффициента ликвации элементов литого сплава ВЖМ1 с монокристаллической структурой от температурного градиента на фронте кристаллизации**

G, °C/см	Состояние сплава	Коэффициент ликвации элементов*						
		Al	Cr	Mo	W	Ta	Co	Re
50–60	Литое	0,7	1,2	1,2	2,1	0,5	1,1	3,4
	Гомогенизированное + отжиг	0,75	1,0	1,0	1,3	0,9	1,0	1,8
150–200	Литое	0,8	1,0	0,9	1,5	0,6	1,1	2,4
	Гомогенизированное + отжиг	0,9	1,0	1,0	1,0	0,9	1,0	1,5

\*Коэффициент ликвации элементов определяли по формуле  $K_{л} = C_{о,д}/C_{м,д}$ , где  $C_{о,д}$ ,  $C_{м,д}$  – концентрация легирующего элемента в оси дендрита и межсосновом пространстве соответственно.

Повышение температурного градиента заметно уменьшает неоднородность химического состава, вызванную дендритной ликвацией в литых образцах. Это особенно важно для жаропрочного сплава с повышенным содержанием рения, имеющего малую диффузионную подвижность в никелевом твердом растворе. В сплаве ВЖМ1 даже длительная многоступенчатая высокотемпературная гомогенизация (в интервале температур 1285–1335°C в течение 26 ч + двухступенчатый отжиг) с общим временем обработки ~72 ч не устраняет химической неоднородности внутри дендритных ячеек.

Высокотемпературная гомогенизация, проведенная на образцах сплава ВЖМ1, полученных при  $G \approx 150\text{--}200^\circ\text{C}/\text{см}$ , обеспечивает выравнивание состава внутри дендритной ячейки для большинства элементов. Исключением является Re, коэффициент ликвации которого удается уменьшить до  $K_{\text{Re}}=1,5$  (при  $G \approx 60^\circ\text{C}/\text{см}$  –  $K_{\text{Re}}=1,8$ ). Однако процесс высокотемпературной гомогенизации сопровождается растворением частиц  $(\gamma/\gamma')$ -эвтектики. При этом в структуре наблюдается значительное увеличение (в 10 раз) объемной доли пор (см. рис. 2, б).

Микросегрегация элементов внутри дендритных ячеек в современных ренийсодержащих сплавах, предельно легированных тугоплавкими элементами, может приводить к образованию топологически плотноупакованных фаз (ТПУ фаз), которые разупрочняют материал. Высокоградиентная направленная кристаллизация вследствие уменьшения дендритной ликвации может способствовать уменьшению вероятности образования микросегрегаций элементов внутри дендритной ячейки, являющихся благоприятной средой для выделения ТПУ фаз при эксплуатации и высокотемпературном отжиге [4]. Детальные исследования методами физико-химического фазового анализа позволили выявить в изоляте сплава ВЖМ1 лишь следы частиц ТПУ фазы. По кристаллографической структуре ее можно отнести к  $\mu$ -фазе с составом, соответствующим формуле  $\text{Co}_7\text{W}_6\text{--}(\text{Co}, \text{Ni})_7(\text{Re}, \text{W}, \text{Mo})_6$ . После высокотемпературной термической обработки в структуре удалось обнаружить незначительное присутствие этой фазы (см. рис. 2, в).

На полученных в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации монокристаллических  $\langle 001 \rangle$  образцах сплава ВЖМ1 после термообработки (высокотемпературная гомогенизация + отжиг – общая продолжительность ~72 ч) были проведены испытания на длительную прочность, которые показали высокие результаты (табл. 2). Сопротивление усталости образцов сплава ВЖМ1 также было высоким:  $\sigma_{-1}^{20^\circ} = 200$  МПа,  $\sigma_{-1}^{900^\circ} = 370$  МПа (испытания на базе  $N=2 \cdot 10^7$  цикл).

Таблица 2

**Длительная прочность при 1000°C монокристаллических образцов  $\langle 001 \rangle$  сплава ВЖМ1 после литья и термообработки**

$\sigma$ , МПа	$\tau_p$ , ч
320	121,0
330	86,0
330	114,0
250	362,0
270	248,5

Исследования микроструктуры разрушенных монокристаллических образцов сплава ВЖМ1В позволили наблюдать образование «рафт»-частиц  $\gamma'$ -фазы перпендикулярно оси нагрузки, а также отметить, что важную роль в процессе разрушения играют поры (см. рис. 2, б), возникшие при высокотемпературной гомогенизации в местах растворения ( $\gamma/\gamma'$ )-эвтектики. При испытании на длительную прочность в процессе ползучести поры, обычно имеющие вид «сферы», деформируются и принимают форму «чечевицы» (см. рис. 2, в). На их стенках зарождаются микротрещины. Далее микротрещины объединяются в магистральные трещины, которые вызывают разрушение образца.

В связи с тем, что высокоградиентная направленная кристаллизация (по сравнению с промышленной технологией) обеспечивает получение в литом состоянии более однородной тонкодендритной структуры с меньшими дендритной ликвацией и пористостью, в рамках данной работы оценили жаропрочные свойства сплава ВЖМ1, не подвергавшегося высокотемпературной гомогенизации (была проведена кратковременная термообработка для снятия термических напряжений – отжиг 1 ч) (табл. 3).

Таблица 3

**Длительная прочность при 1000°C монокристаллических образцов <001> сплава ВЖМ1 после литья**

$\sigma$ , МПа	$\tau_p$ , ч
330	75,5
330	72,5
250	328,5
250	290,0

Полученные результаты (см. табл. 3) свидетельствуют о том, что длительная прочность образцов, полученных методом высокоградиентной направленной кристаллизации без проведения последующей высокотемпературной гомогенизации, практически совпадает с результатами, полученными на образцах после высокотемпературной гомогенизации + отжига, что открывает возможность разработки более простой и экономичной технологии получения лопаток ГТД. Сопrotивление усталости литых образцов сплава ВЖМ1 также было высоким:  $\sigma_{-1}^{900} = 360$  МПа (испытания на базе  $N=2 \cdot 10^7$  цикл).

Исследование микроструктуры разрушенных образцов (после термообработки 1 ч) показало, что микротрещины в зоне разрушения зарождаются в междендритном пространстве вблизи частиц ( $\gamma/\gamma'$ )-эвтектики (рис. 3, а). В осях дендритов наряду с появлением ( $\gamma/\gamma'$ )-«рафт» структуры, ориентированной перпендикулярно оси нагрузки, обнаружены пластинчатые выделения новой  $\gamma_k$ -фазы (рис. 3, б) с повышенным содержанием рения – до ~30% (по данным микрорентгеноспектрального анализа – МРСА). Пластинки  $\gamma_k$ -фазы окружены оболочкой из  $\gamma$ -фазы, а особенность их расположения предполагает их образование по октаэдрическим плоскостям {111} в ГЦК решетке никелевого твердого раствора. Образование  $\gamma_k$ -фазы не оказывает отрицательного влияния на длительную прочность монокристаллов <001> сплава ВЖМ1, а, возможно, способствует снижению внутренних напряжений и тормозит процессы разрушения монокристаллов сплава ВЖМ1, что обеспечивает ему достаточно высокие жаропрочные свойства.

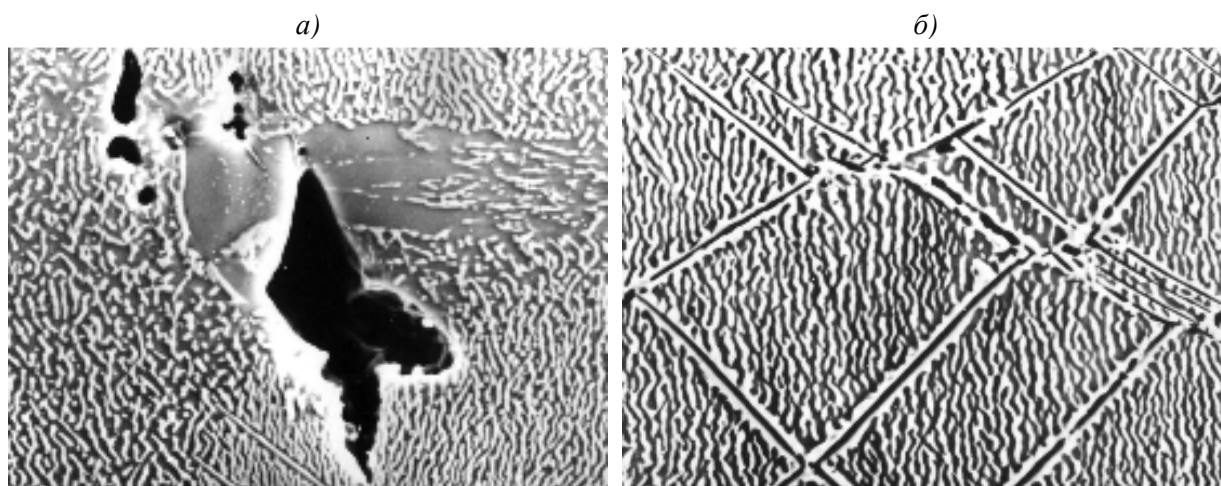


Рис. 3. Микроструктура (*a* –  $\times 2500$ ; *b* –  $\times 3500$ ) образцов монокристаллов  $\langle 001 \rangle$  ренийсодержащего сплава ВЖМ1 после испытаний на длительную прочность при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$ , нагрузке 250 МПа; время до разрушения 328,5 ч

Проведенный комплекс исследований позволил разработать опытную технологию литья рабочих охлаждаемых лопаток ГТД из высокожаропрочного ренийсодержащего сплава ВЖМ1 с монокристаллической структурой на установке УВНЭС-5 с компьютерной системой управления.

Разработка высокоградиентной технологии и создание специализированного вакуумного промышленного оборудования делает возможным применение ренийсодержащих высокожаропрочных сплавов при производстве наиболее нагруженных рабочих лопаток ГТД перспективных авиационных двигателей V поколения.

Высокоградиентная направленная кристаллизация ренийсодержащего жаропрочного сплава ВЖМ1 (по сравнению с промышленной технологией литья лопаток ГТД) обеспечивает получение более однородной тонкодендритной структуры с меньшими дендритной ликвацией и пористостью, а также высоких характеристик жаропрочности и сопротивления усталости без длительной высокотемпературной гомогенизации и отжига в течение  $\sim 72$  ч.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой // *Материаловедение*. 1997. № 4. с. 32–38. № 5. С. 14–17.
2. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А. Новое в технологии производства лопаток ГТД // *Аэрокосмический курьер*. 1999. № 2. С. 60–62.
3. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // *МиТОМ*. 2002. № 7. С. 20–23.
4. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Морозова Г.И. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и фазовый состав жаропрочного сплава типа Rene N5 // *МиТОМ*. 1999. № 2. С. 15–18.