

5. Frety N., Taylor A., Lewis M.H. Microstructure and Crystallization Behavior of Sol-Gel Derived $\text{SrO}_{0,5}\text{-BaO}_{0,5}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-2SiO}_2$ Glass-Ceramic //J. of non-crystalline solids. 1996. V. 195. №1–2. P. 28–37.
6. Schmidt H., Jonschker G., Goedicke S., Mennig M. The sol-gel process as a basic technology for nanoparticle-dispersed inorganic-organic composites. //J. of Sol-Gel Sci. and Techn. 2000. V. 19. P. 39–51.
7. Максимов А.И., Мошников В.А., Таиров Ю.М., Шилова О.А. Основы золь-гель технологии нанокompозитов. СПб.: ЛЭТИ. 2008. 254 с.
8. Turner C.W. Sol-gel process – principles and applications //Amer. Ceram. Soc. Bull. 1991. V. 70. №9. P. 1487–1490.
9. Haas P.A. Gel process for preparing ceramics and glasses //Chem. Eng. Progr. 1989. V. 25. №4. P. 44–52.
10. Павлушкин Н.М., Сентюрин Г.Г., Хадаковская Р.Я. Практикум по технологии стекла и ситаллов. М. 1970. 512 с.

УДК 669.245.018.44:629.7

Б.С. Ломберг, М.М. Бакрадзе, Е.Б. Чабина, Е.В. Филонова

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ВЫСОКОЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Представлены основные направления развития жаропрочных сплавов для дисков газотурбинных двигателей, сформулированы требования к дисковым материалам, показаны тенденции развития жаропрочных сплавов для дисков современных и перспективных ГТД. Установлено влияние химической, фазовой и структурной неоднородности, а также технологических факторов на свойства сплавов. Обоснованы, разработаны и реализованы принципы получения регламентированной микроструктуры в штамповках сложнолегированных жаропрочных дисковых сплавов, обеспечивающей необходимый комплекс эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: *диски турбин, состав, структура, ликвация, фаза, свойства.*

Требования к дисковым материалам

В большинстве современных ГТД диски турбины и последних ступеней компрессора подвергаются неравномерному, часто нестационарному нагреву (ободная часть: 550–800°C, ступичная: 300–550°C).

Пределы прочности, текучести, ползучести и малоцикловая усталость являются основными контролируемыми свойствами дисков; подчеркнем, что сопротивление малоцикловой усталости особенно лимитирует долговечность диска. Таким образом, создание дисков, способных работать в условиях резкого возрастания значений параметров для двигателей V и VI поколений, является сложной и ответственной задачей. Механизмы упрочнения, ответственные за предел прочности и длительную прочность, имеют разную природу. Поэтому одновременное достижение их высоких значений представляет самостоятельную, весьма сложную проблему.

Для обеспечения работоспособности дисков из никелевых сплавов к материалу предъявляются следующие основные требования:

– высокий уровень длительной и кратковременной прочности во всем диапазоне рабочих температур;

- низкая чувствительность к концентрации напряжений при статическом нагружении;
- высокая пластичность при длительном и кратковременном нагружении;
- достаточно высокое сопротивление малоциклового усталости;
- стабильность структуры и фазового состава;
- хорошая технологичность.

Основные направления развития жаропрочных сплавов для дисков современных и перспективных ГТД

Анализ особенностей структуры и фазового состава жаропрочных сплавов на никелевой основе позволил сформулировать основные металловедческие направления для получения необходимого комплекса свойств применительно к материалу дисков [1]:

- упрочнение твердого раствора – γ -фазы;
- увеличение объемного содержания γ' -фазы;
- исключение ТПУ фаз;
- контроль выделения карбидов и γ' -фазы по границам зерен;
- микрولةгирование поверхностей раздела (границ зерен и фаз).

Дисковые жаропрочные сплавы (ЭК151-ИД, ЭП975-ИД, ВЖ175-ИД), применяемые для обеспечения повышенных параметров новых поколений ГТД, представляют собой сложнолегированные системы на никелевой основе, трудноподдающиеся деформации (табл. 1).

Таблица 1

Количество упрочняющей γ' -фазы в современных деформируемых жаропрочных дисковых сплавах на никелевой основе

Сплав	Содержание фазы γ' , % (по массе)	Легирующие компоненты
ЭИ698-ВД	20,5	Cr, Al, Ti, Nb, Mo
ЭП742-ИД	33,6	Cr, Al, Ti, Nb, Mo, Co
ЭК151-ИД	52,0	Cr, Al, Ti, Nb, Mo, Co, W
ВЖ175-ИД	54,0	Cr, Al, Ti, Nb, Mo, Co, W

В указанных композициях содержание основных легирующих элементов является практически предельным из-за ограниченных возможностей существующих способов выплавки слитков, а также оборудования для деформации. Поэтому для повышения свойств дисковых сплавов, помимо традиционных методов, используются новые технологические процессы, с помощью которых удастся реализовать уровень эксплуатационных свойств, обусловленный системой легирования.

Влияние химической, фазовой и структурной неоднородности на свойства сплавов

Диски современных ГТД изготавливаются из крупногабаритных поковок сложнолегированных труднодеформируемых жаропрочных сплавов. В связи с этим технология их производства состоит из многих сложных операций. Отклонения от установленной технологии могут приводить к возникновению в материале дисков различных видов структурной неоднородности и дефектов.

Основные виды структурных дефектов, наиболее часто встречающиеся в заготовках дисковых жаропрочных сплавов, – инородные включения («корона», «королевки», шлак), зональная ликвация (пятнистая и внеосевая), ликвация упрочняющей γ' -фазы, карбидная и карбонитридная ликвация.

Неоднородность распределения γ' -фазы в жаропрочных сплавах на никелевой основе – следствие дендритного характера кристаллизации слитков, что сильно затрудняет управление процессами выделения и характером распределения γ' -фазы на всех этапах

технологического процесса получения штамповок дисков. Установлено, что выделения γ' -фазы в литом материале весьма неоднородны по составу, а сама γ' -фаза сильно обогащена γ' -образующими элементами. Наличие в структуре сплава γ' -фазы, образовавшейся в процессе кристаллизации, в количестве $>3\%$ (объемн.) снижает длительную прочность материала при испытании как гладких образцов, так и образцов с концентратором напряжения (рис. 1).

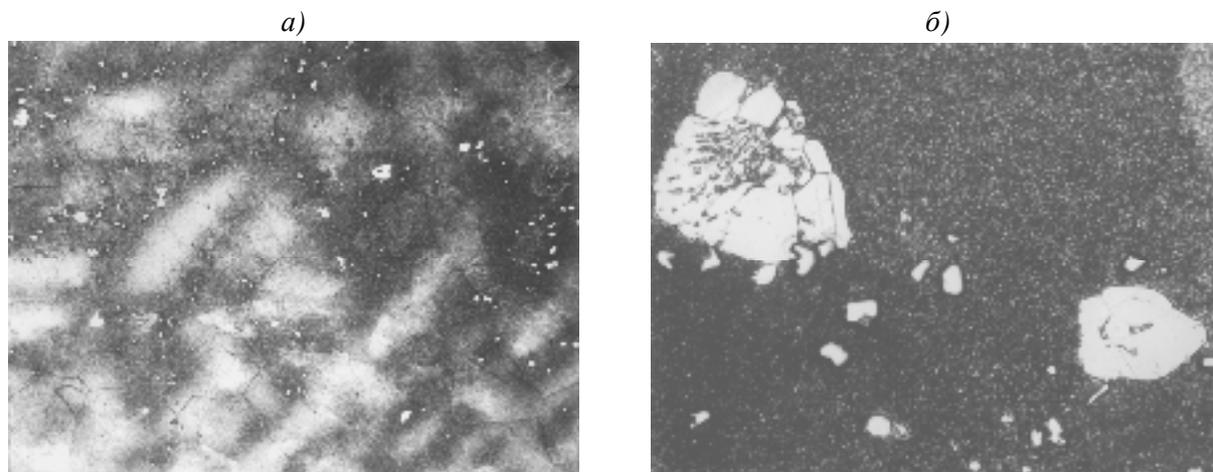


Рис. 1. Микроструктура (*a* – $\times 100$; *б* – $\times 1000$) сплава ЭК151-ИД с избыточной эвтектической γ' -фазой

Изучение взаимосвязи структуры и свойств промышленных штамповок дисковых сплавов ЭИ698-ВД, ЭП742-ИД и др. показало, что дендритная неоднородность приводит к полосчатому распределению частиц γ' -фазы, а последующая неудовлетворительная технология получения деформированных заготовок под штамповку (цикл: нагрев–ковка) может вызвать образование областей в околোগраничных зонах, не содержащих выделений частиц γ' -фазы. Такой материал чувствителен к надрезу при испытаниях на длительную прочность и имеет низкую технологичность.

Карбидная и карбонитридная ликвация оказывает значительное влияние на большинство эксплуатационных свойств сплавов. Первичные карбиды или карбонитриды (типа MC или MCN) выделяются в процессе затвердевания в виде эвтектических составляющих в межосных участках. При горячей деформации они ориентируются в направлении течения металла и образуют скопления строчечных включений, количество и размер которых зависят от содержания углерода в сплаве и режимов его (сплава) последующей термомеханической обработки.

С ростом содержания углерода (даже в пределах марочного состава) увеличивается содержание карбидной фазы в сплаве, а также возрастают размеры и количество первичных выделений (рис. 2). Так, при увеличении содержания углерода в сплаве ЭИ698-ВД с 0,025 до 0,085% суммарное количество карбидов и боридов выросло с 0,45 до 0,65%; при этом количество γ' -фазы уменьшилось с 18,4 до 16,2%.

При повышенном содержании в металле углерода и высокой скорости наплавления слитка, а также при недостаточной степени деформации карбидные строчки, вытягивающиеся в направлении течения металла, ослабляют его прочность. При этом резко повышается чувствительность металла к надрезу. Излом такого материала имеет слоисто-шиферный характер (степень слоистости оценивается по специально разработанной пятибалльной шкале).

Наиболее часто разрушение материалов, чувствительных к надрезу, связано с характером вторичных карбидных выделений, расположенных на границах зерен.

Исследования дисковых сплавов, проведенные с помощью активационной радиографии под руководством С.З. Бокштейна, показали, что границы зерен материала как чувствительного, так и нечувствительного к надрезу, обогащены углеродом и бором. Только в первом случае карбиды выделяются в виде сеток, а во втором – имеют дискретный характер.

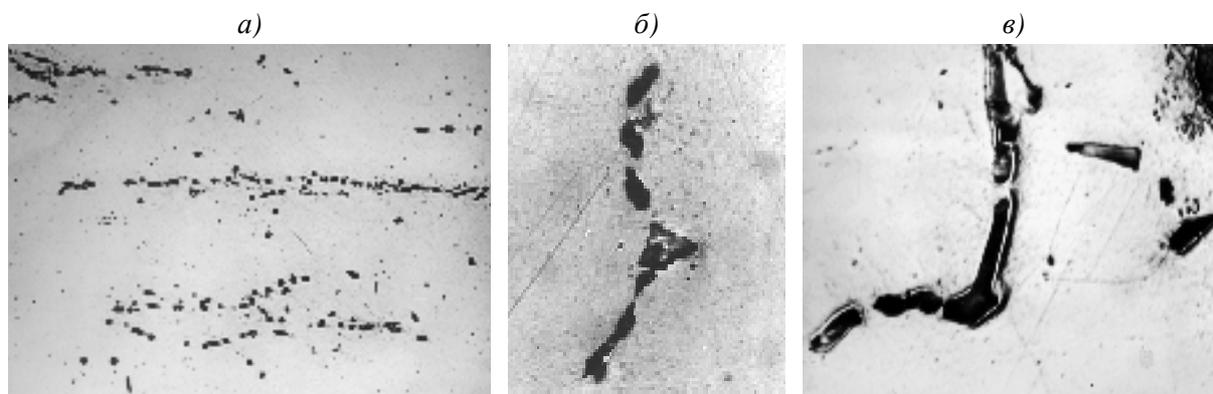


Рис. 2. Карбиды в структуре (а – $\times 100$; б, в – $\times 1000$) сплава ЭП742-ИД (нетравленный микрошлиф) при содержании углерода 0,035 (а, б) и 0,05% (в)

Влияние технологических факторов на структуру и свойства сплавов

Сложные по составу дисковые сплавы в состоянии после литья имеют многофазную гетерогенную структуру, а в большинстве случаев низкую пластичность и малую способность подвергаться деформации.

Обработка давлением жаропрочных никелевых сплавов и последующая термообработка связаны с рядом проблем, решение которых в значительной степени определяет качество металла, свойства и выход годного. Сложность этих проблем возрастает с увеличением степени легирования сплавов и размеров слитка.

Проведенные исследования позволили разработать концепцию управления микроструктурой для достижения нужного комплекса свойств новых материалов.

В связи с большими трудностями проведения начальной обработки дисковых материалов давлением в промышленных условиях в однофазном состоянии были разработаны технологические процессы деформации сплавов в двухфазном состоянии, обеспечивающие повышение технологической пластичности и снижение их сопротивления деформации путем формирования оптимальной структуры. Этот процесс включает получение заготовок с контролируемыми размерами зерен твердого раствора и определенным характером распределения частиц упрочняющей γ' -фазы, карбидов, боридов и т. п. Формирование такой структуры достигается предварительной гомогенизацией литого материала, последующей деформацией и промежуточными отжигами в процессе деформации.

Повышение однородности структуры и пластичности заготовок перед штамповкой вследствие улучшения условий деформации положительно сказывается на стабильности механических свойств поковок дисков после окончательной термической обработки. В табл. 2 приведены средние значения характеристик при температуре 20°C (испытано по 12 образцов для каждого состояния шайб).

Для производства штамповок дисков из сложнолегированных сплавов, содержащих $>40\%$ упрочняющей γ' -фазы, необходим перевод материала заготовок для штамповки в сверхпластичное состояние. При этом значения относительного удлинения составляют до 800%.

**Механические свойства поковок дисков из сплава ЭП742-ИД
после стандартной термической обработки, изготовленных из шайб
без отжига и с отжигом при 1140°С (охлаждение со скоростью 1°С /мин до 800°С)**

Состояние шайб	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, Дж/см ²
	МПа		%		
Без отжига	1170	770	18,0	18,0	54
После отжига и выдержки, ч:					
4	1230	815	19,2	18,3	59
12	1240	832	20,2	20,4	60

Реализация эффекта сверхпластичности при формообразовании заготовок диска осуществляется в процессе изотермической штамповки. Однако и при традиционных схемах штамповки заготовки в состоянии сверхпластичности выдерживают однократную осадку на промышленных гидравлических прессах со степенью деформации до 80% без образования трещин. Этим методом при более высоких экономических показателях (по сравнению с обычной технологией) изготовлены и серийно поставляются диски сложной формы с однородной структурой и стабильными механическими свойствами из сложнолегированных сплавов типа ЭК79, ЭК151 и ЭП975.

Важным звеном реализации идеи управления микроструктурой и получения оптимальных свойств сплавов явилось изучение процессов структурообразования после окончательной штамповки и упрочняющей термической обработки. Процессы структурообразования и изменения фазового состава, зависящие от параметров окончательной деформации и последующей упрочняющей термической обработки, оказывают существенное влияние на комплекс механических свойств жаропрочных дисковых сплавов.

Результаты проведенных исследований целесообразно проиллюстрировать на примере нового сплава ВЖ175, превосходящего по комплексу свойств (прочность, жаропрочность, малоцикловая усталость) все известные отечественные и зарубежные сплавы для дисков ГТД.

На рис. 3 приведены данные из литературных источников, где отражается зависимость механических свойств дискового сплава Udimet 720 от размера зерна [2]. Видно, что получение высоких прочностных характеристик и значений МЦУ при высокой жаропрочности и ползучести – взаимоисключающие задачи.

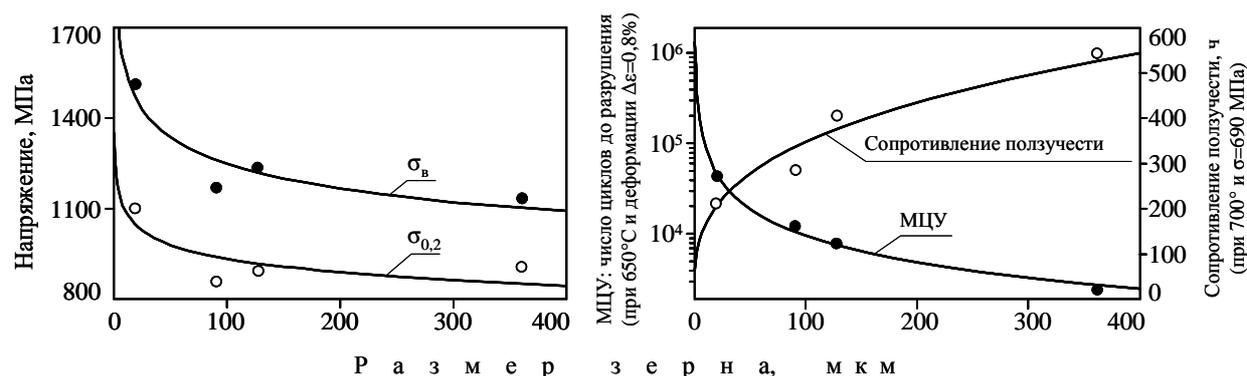


Рис. 3. Влияние размера зерна на свойства сплава Udimet 720 при закалке выше и ниже температуры полного растворения γ' -фазы

В работе [3] приведены данные по исследованию влияния режима двухступенчатой закалки на размер микроструктуры сплава ВЖ175. Показано, что только однородная мелкозернистая структура в сочетании с оптимальным легированием обеспечивает уникаль-

ный комплекс механических свойств: $\sigma_B^{20^\circ} \geq 1600$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20^\circ} \geq 1200$ МПа, $\sigma_B^{650^\circ} = 1300$ МПа, $\sigma_{100}^{650^\circ} = 1070$ МПа (рис. 4).

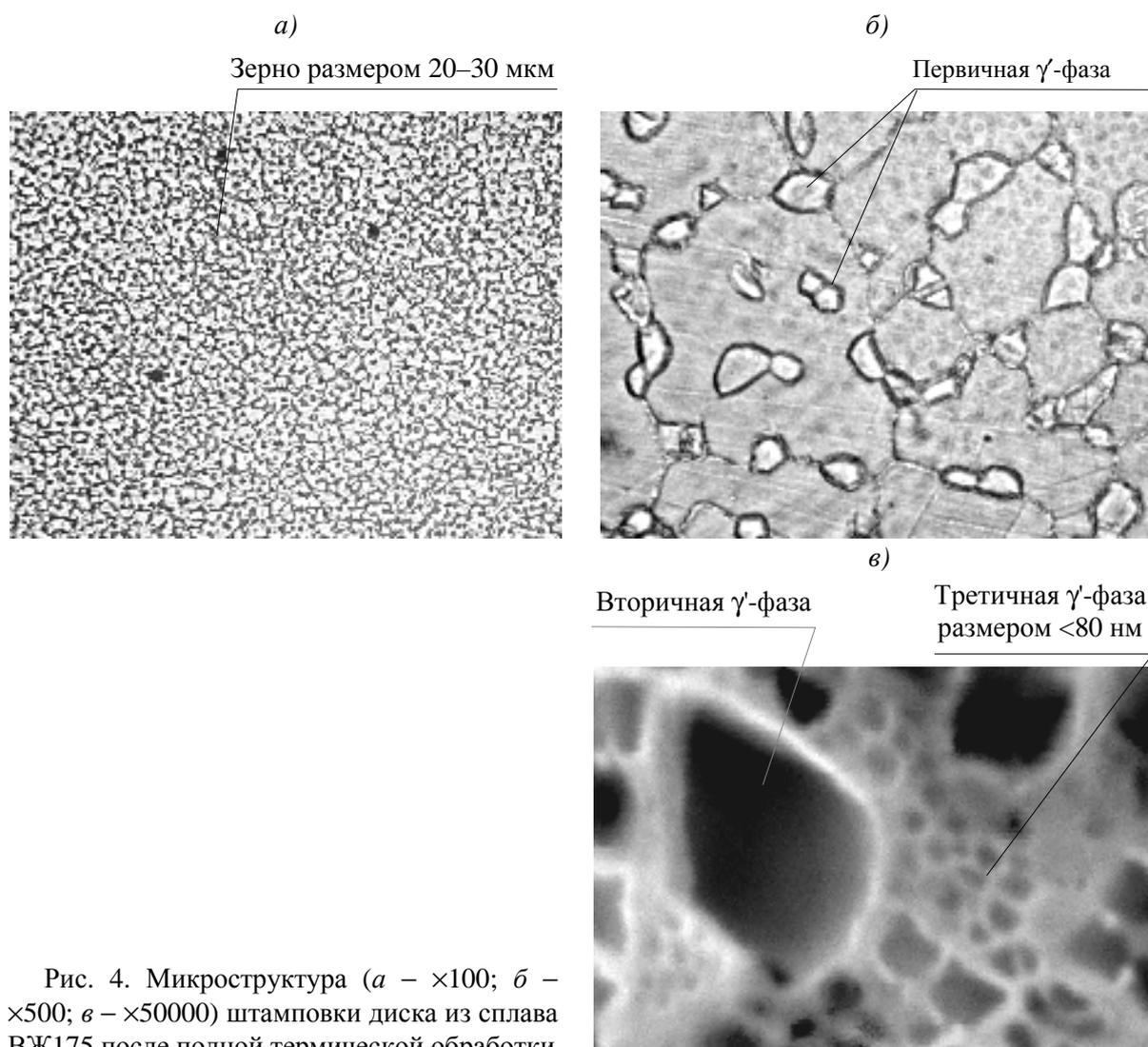


Рис. 4. Микроструктура (а – $\times 100$; б – $\times 500$; в – $\times 50000$) штамповки диска из сплава ВЖ175 после полной термической обработки

Таким образом, в результате проведенной работы были обоснованы, разработаны и реализованы принципы получения регламентированной микроструктуры в штамповках сложнолегированных жаропрочных дисковых сплавов, обеспечивающей необходимый комплекс эксплуатационных свойств для серийных материалов (ЭК79, ЭК151, ЭП975) и особенно нового сплава ВЖ175.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ломберг Б.С. Жаропрочные сплавы для высоконагруженных дисков газотурбинных двигателей (ГТД): Автореф. докт. дис. 1988. 50 с.
2. Bain K.R., Gambone M.L., Hyzakand J.M., Thomas M.C. Development of Damage Tolerant Microstructures in Udimet 720: Superalloys 1988. Warrendale. PA //The Metallurgical Society. 1988. P. 13–22.
3. 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.