

УДК 621.793.6:669.245

В.П. КУЗНЕЦОВ¹, В.П. ЛЕСНИКОВ², А.С. КОРЯКОВЦЕВ³, С.В. ХУДОРОЖКОВ²

¹Уральский государственный технический университет - УПИ, Екатеринбург, Россия

²ООО «ТУРБОМЕТ», Екатеринбург, Россия

³ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

СТРУКТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ЖС36ВИ ДЛЯ ЛИТЬЯ МОНОКРИСТАЛЬНЫХ ЛОПАТОК ТУРБИН

Сплав ЖС36ВИ предназначен для отливки охлаждаемых лопаток турбины методом монокристалльного литья с кристаллографической ориентацией [001] для современного двигателя ПС-90А2 с температурой газа на вход в турбину 1850 К.

лопатка турбины, безуглеродистый монокристалльный сплав, структурная стабильность, рафт-структура, кристаллографическая ориентация,

Введение

Повышение ресурса и надежности авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) усложняется в связи с непрерывным ростом температур, динамических и вибрационных нагрузок. Это обуславливает повышение требований к рабочим лопаткам турбин, работающим в условиях многокомпонентного нагружения в контакте с агрессивным высокоскоростным газовым потоком. В этой связи наиболее перспективным сплавом является ЖС36ВИ, предназначенный для лопаток современного двигателя ПС-90А2 с температурой газа на входе в турбину 1850 К.

1. Формулирование проблемы

Целью данной работы являлось оценка структурной стабильности и определение прочностных свойств сплава ЖС36ВИ для литья монокристалльных лопаток турбин современных ГТД.

2. Решение проблемы

2.1. Метод получения и термообработка

Отливка монокристаллических образцов и рабочих лопаток с кристаллографической ориентацией [001] из безуглеродистого сплава ЖС36ВИ осуществляется на установках типа УВНК-8П без жидко-

металлического охладителя. Кристаллографическая ориентация задается затравками из сплава Ni – W.

Термическая обработка монокристаллического безуглеродистого сплава ЖС36ВИ отличается высокотемпературным гомогенизирующим отжигом [1]:

1. (Закалка 1) Подъем температуры до $1320^{\pm 10^{\circ}\text{C}}$ и выдержка $\tau = 4$ часа. После гомогенизации проводится закалка с высокой скоростью ($>100^{\circ}\text{C}/\text{мин}$);
2. (Закалка 2) $T = 1030^{\pm 10^{\circ}\text{C}}$, $\tau = 4$ часа, охлаждение с ($V \geq 50^{\circ}\text{C}/\text{мин}$);
3. (Старение) $T = 870^{\pm 10^{\circ}\text{C}}$, $\tau = 32$ часа.

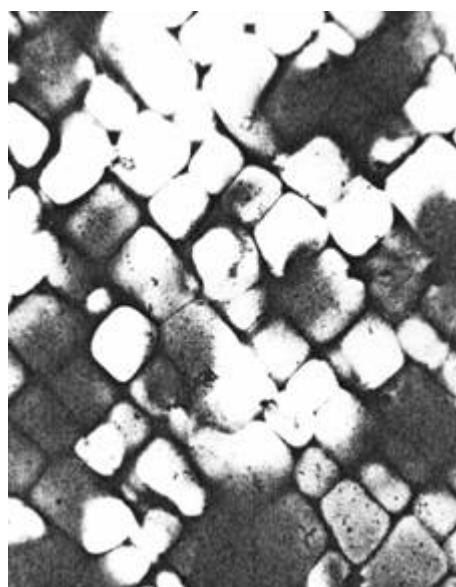
2.2. Структура

В результате такой термообработки структура сплава ЖС36ВИ состоит из равномерно и упорядоченно расположенных вдоль направлений [001] γ -матрицы кубических частиц упрочняющей γ' -фазы размером 0,3 ... 0,4 мкм. (рис. 1, а, б).

В результате термообработки получена однородная, дисперсная ($\gamma + \gamma'$) структура с очень высокой объемной долей γ' -фазы (75%). Частицы γ' -фазы (средний размер которых $\sim 0,3 \dots 0,4$ мкм.) имеют характерную кубоидную форму с легко закругленными ребрами, а грани соседних γ' -частиц практически сливаются друг с другом, т.е. остаточной γ -фазы очень мало.



а ×12000



б × 23000

Рис. 1. Тонкая структура сплава ЖС36ВИ [001] после термообработки

В межосных участках размеры γ' -фазы несколько крупнее, а отдельные частицы достигают размеров ~1 мкм. Каких-либо выделений (карбидов или ТПУ-фаз) обнаружено не было. Такая сложная термообработка сплава направлена не только на растворение упрочняющей γ' - фазы, но и на полное растворение крупных глобулей её эвтектических выделений ($\gamma'_{эвт.}$), а также максимальное уменьшение дендритной ликвационной неоднородности сплава.

2.3. Ликвационная неоднородность

Для сплава ЖС36ВИ характерна высокая ликвационная неоднородность, которая не устраняется при термообработке: такие элементы сплава, как W, Re, Cr, Co, концентрируются в осях дендритов ($\gamma+\gamma'$), а Al, Ta, Nb – в межосном пространстве и глобулях $\gamma'_{эвт.}$ (табл. 1)

Таблица 1

Содержание элементов в различных точках дендритной ячейки сплава ЖС36ВИ

Легирующий элемент	Al	W	Re	Cr	Co	Ti
Среднее содержание в сплаве, % масс.	5,42	12,70	2,23	2,31	8,55	1,00
Содержание в осях дендритной ячейки $C_{о.д.}$, % масс.	6,14	12,48	2,49	3,51	8,81	0,55
Содержание в межосном пространстве $C_{м.п.}$, % масс.	8,43	6,80	0,44	1,51	7,06	1,00
Коэф. ликвации элемента, $K_d = C_{о.д.}/C_{м.п.}$	0,77	1,78	2,33	2,05	1,30	0,54
Содержание в крупных глобулях $\gamma'_{эвт.}$, % масс.	8,03	7,56	0,46	1,48	7,27	1,10
Коэф. распределения $K_p = C_{о.д.}/C_{\gamma'_{эвт.}}$	0,81	1,56	5,41	2,05	1,26	0,50

2.4. Испытания

После проведения полной термообработки сплава проводились испытания по определению кратковременных механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , Ψ) при $T=20^\circ\text{C}$ и $T=975^\circ\text{C}$ (рис. 2), а также длительной прочности при $T = 975^\circ\text{C}$, (рис. 3).

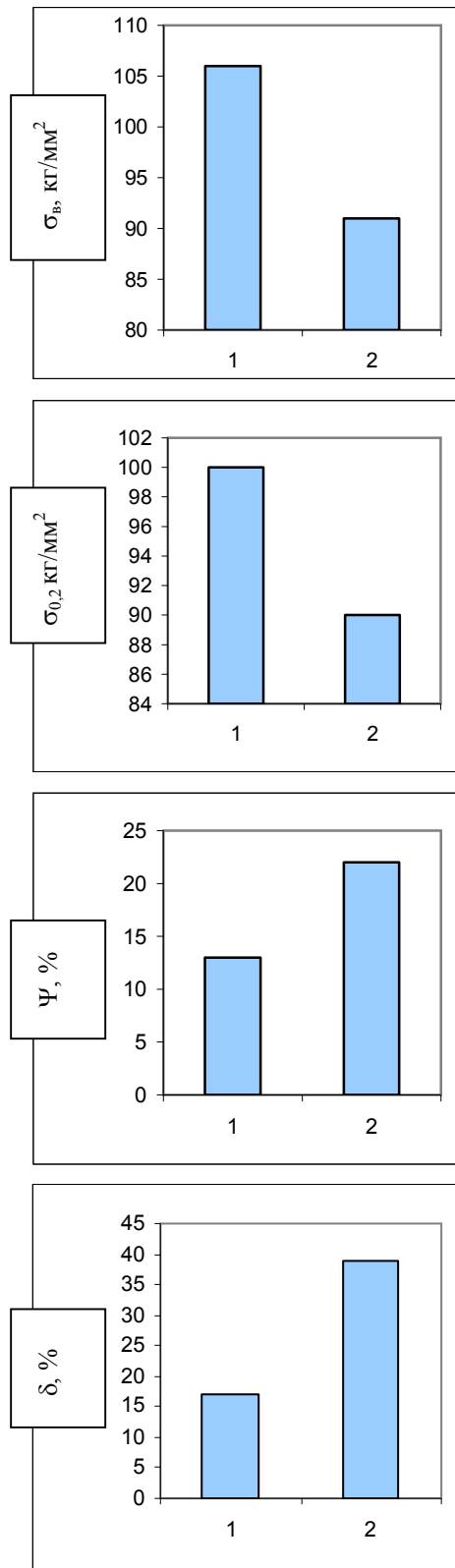


Рис. 2. Кратковременные механические свойства сплава ЖС36ВИ [001] при: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$, 2 – $T = 975^\circ\text{C}$

Среднее время до разрушения образцов при испытании на длительную прочность составило при

$\sigma = 30 \text{ кг/мм}^2 - 210 \text{ часов}$; $\sigma = 34 \text{ кг/мм}^2 - 110 \text{ часов}$,
 $\sigma = 36 \text{ кг/мм}^2 - 72 \text{ часа}$.

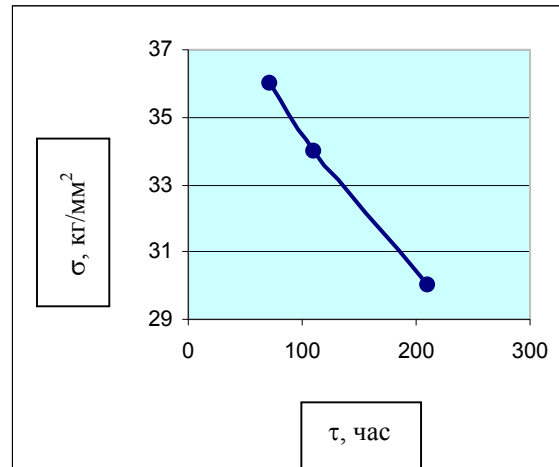


Рис. 3. Кривая длительной прочности сплава

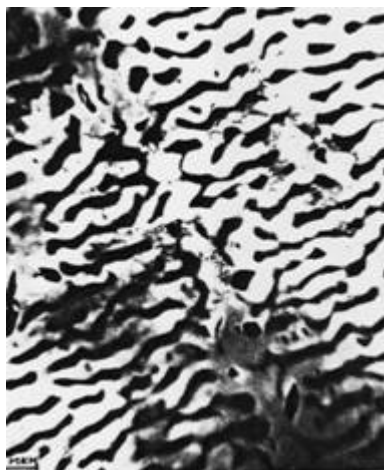
При испытаниях на длительную прочность происходит окисление поверхностных слоев сплава ЖС36ВИ. В образующемся при окислении поверхностном слое, состоящем из γ' -фазы, под действием напряжения образуются микротрещины, которые развиваются во внутренние объемы сплава.

Во внутренних объемах сплава ЖС36ВИ при испытаниях на длительную прочность зарождение микротрещин происходит на микропорах в межосном пространстве, возникших после растворения $\gamma'_{вт.}$ при гомогенизации сплава. С ростом пластической деформации при ползучести микротрещины растут перпендикулярно приложенному напряжению, а затем развиваются в междендритном пространстве вдоль приложенного напряжения.

В процессе испытаний на длительную прочность в сплаве ЖС36ВИ [001] происходит формирование рафт-структуры, перпендикулярно оси растяжения (рис. 4, а, б, в).

Формирование рафт-структуры происходит на первой стадии ползучести путем сращивания кубоидов γ' -фазы торцевыми гранями, параллельными оси нагружения. Рафт-структура при испытаниях на длительную прочность формируется в направлении, перпендикулярном приложенному напряжению. При переходе от второй стадии ползуче-

сти к третьей (ускоренной) происходит огрубление рафт-структуры: подслои γ' -фазы превращаются из прямолинейных в зигзагообразные, расположение их становится хаотическим.



а × 8000



б × 13000



в × 30000

Рис. 4. Рафт-структура сплава

Формирование рафт-структуры обусловлено перераспределением легирующих элементов в матрице (γ -твердый раствор) под действием напряжений, обогащением γ' -образующими элементами сплава граней кубоидной γ' -фазы, параллельных оси растяжения. В результате этого происходит сращивание γ' -фазы и образование рафт-структуры, перпендикулярной оси растяжения.

Движущей силой такого изменения морфологии γ / γ' -структуры под влиянием напряжений и температуры является несоответствие параметров решеток и модулей упругости γ - и γ' -фаз. Возникшая рафт-структура обладает высокой термической стабильностью и будет определять долговечность рабочих лопаток турбины в процессе эксплуатации.

Заключение

1. Монокристаллический сплав ЖС36ВИ [001] после проведения полной термообработки имеет очень высокие прочностные свойства.
2. Кристаллографическая ориентировка монокристалла ЖС36ВИ [001] вдоль оси растяжения не нарушается вплоть до разрушения. Наблюдаются локальные азимутальные развороты участков $\gamma/\gamma' \leq 5^\circ$;
3. При высоких температурах и напряжениях в сплаве формируется рафт-структура, которая и будет определять долговечность рабочих лопаток при эксплуатации.

Литература

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б., Голованя В.Н., Гаврилин О.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.

Поступила в редакцию 12.04.2004

Рецензент: д-р. техн. наук, проф. М.А. Филиппов, Уральский государственный технический университет «УПИ», Екатеринбург.