

УДК. 621.438. 452.3

В.Н. Толорай¹, А.Н. Петухов², М.Е. Колотников³, С.В. Харьковский²,
Г.А. Остроухова¹¹ «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»² ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»³ ФГУП «НИЦ турбостроения «Салют»», Москва, Россия

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК НА ПРИМЕРЕ БЕЗУГЛЕРОДИСТОГО СПЛАВА ВЖМ5

Рассмотрены особенности формирования монокристаллических отливок из жаропрочных безуглеродистого сплава типа ВЖМ5 и основные характеристики прочности в сравнении с традиционными углеродсодержащими сплавами типа ЖС32. Сформулированы требования, регламентирующие отклонения по кристаллографической ориентации КГО и условия допустимости в отливках посторонних кристаллов и субзерен, их размеры и морфологию, зоны в отливках, где такие отклонения могут допускаться. Приведены сравнительные характеристики прочности (длительной статической и многоциклового усталости) жаропрочных безуглеродистых сплавов отечественного ВЖМ5 и зарубежного SMSX-4.

Ключевые слова: монокристаллические сплавы, субзерна, безуглеродистые сплавы, осевая кристаллографическая ориентация (КГО), термические напряжения, полосчатость, рекристаллизация, дендритная ликвация.

Создание энергетических установок, отвечающих мировому уровню невозможно без применения современных материалов, обладающих высокими характеристиками прочности, обладающими высокой эксплуатационной надежностью на заданный ресурс. Это достижимо лишь при применении монокристаллических конструкционных материалов с внедрением совершенных технологических процессов, минимизирующих влияние субъективных факторов [1.2].

1. Требования к структуре монокристаллических отливок из безуглеродистых никелевых сплавов

Требования к макроструктуре отливки детали формулируются в зависимости от условий эксплуатации конструкции, ее напряженности, а также от типа или класса применяемого сплава. Основными для монокристаллических отливок ответственных деталей являются требования, регламентирующие кристаллографическую ориентацию и допустимость в отливке посторонних кристаллов и субзерен, их размеры и морфологию, разориентацию, а также зоны, где эти отклонения могут допускаться без отрицательных последствий.

Если в отливках из углеродсодержащих сплавов, например ЖС-32, наличие посторонних кристаллов допускается в отдельных зонах, то в отливках из безуглеродистых жаропрочных сплавов, например, ВЖМ5 посторонние кристаллы не допускаются, за исключением субзерен (блоков) в зонах, удаляемых при механической обработке. Субзерна представляют локальные учас-

тки в отливке с относительно малой разориентацией от основного кристалла, и выглядят на протравленной поверхности как зерна с нечеткими границами. Скопление столбчатых субзерен называют полосчатостью («striation»). Субзерна разделяются по уровню их разориентации $\Delta\alpha_{\langle\text{HKL}\rangle}$ (обычно, $\Delta\alpha_{\langle 001 \rangle}$) от основного кристалла образуя в отливке малоугловые ($\Delta\alpha_{\langle 001 \rangle} \leq 3^\circ$) и среднеугловые ($\Delta\alpha_{\langle 001 \rangle} 3,0 \dots 5,0^\circ$) границы.

Зона, где допускаются только малоугловые границы, т.е. субзерна с $\Delta\alpha_{\langle 001 \rangle} \leq 3^\circ$, означает, что угол между любым направлением $\langle 001 \rangle$ субзерна и основного кристалла должен быть меньше 3° . Такие заготовки допускают для механических испытаний при паспортизации безуглеродистых жаропрочных сплавов, например, ВЖМ5. Кроме того, допускаются зоны с малоугловыми границами $\Delta\alpha_{\langle 001 \rangle} = 3^\circ \dots 5^\circ$ и зоны с субграницами с разориентацией $\Delta\alpha_{\langle 001 \rangle}$ до 5° . В зонах 2, 3 допускаются и регламентируются по размерам и количеству мелкие равноосные зерна. Например, посторонние равноосные зерна $\leq 0,5$ мм в количестве 2 шт. на расстоянии ≥ 10 мм друг от друга; «прострелы» длиной 5...6 мм до 2 шт. Крупные посторонние кристаллы не допускаются.

Следует отметить, что эти требования более жесткие по сравнению с зарубежными: по техническим условиям фирмы Ролс-Ройс допускаются области с разориентацией до 6° . Контроль величины разориентации в отливках проводится рентгеноструктурным методом съемкой в «белом» излучении по методу Лауэ в дифрактометрах типа

«Скорпио» (Роллс-Ройс) или «Галакси» (фирма Зайферд, Германия).

В общем случае кристаллографическая ориентация (КГО) задается указанием кристаллографических направлений $[h_1k_1l_1]$, $[h_2k_2l_2]$ и $[h_3k_3l_3]$, совпадающие с геометрическими осями лопатки XYZ или углов, образуемые кристаллографической системой координат, обычно [001] с геометрической системой XYZ.

Часто для отливок задают только аксиальную (осевую) ориентацию [001]. Выбор кубической ориентации связан с тем, что в этом направлении у монокристалла минимальный нормальный модуль упругости из всех возможных ориентировок и более высокая длительная прочность. В случаях, если при эксплуатации конструкции термонапряжения не являются лимитирующими, задается аксиальная ориентация [111], по которой некоторые жаропрочные сплавы имеют и максимальную длительную прочность. Например, у сплава ВЖМ5 [001] $\sigma_{100}^{1000} [001] = 275$ МПа, а для ориентации [111] $\sigma_{100}^{1000} [111] = 320$ МПа.

Для отечественной технологии монокристалльного литья величина допустимых отклонений аксиальной ориентации [001] или [111] от оси Z $\alpha_{hkl} \leq 10^\circ$. При этом, не оговаривается направление этого отклонения, т. е. не требуется определение конкретной ориентации в стандартном стереографическом треугольнике. Поэтому вышеуказанным требованиям ТУ удовлетворяют все кристаллографические направления, лежащие внутри конуса с центральной осью Z и конусностью 10° .

В зарубежных монокристалльных лопатках допуски по отклонению ориентации [001] более расширены: $\alpha_{[001]} \leq 20^\circ$.

С целью снижения уровня термических напряжений в зонах, имеющих аксиальную ориентацию [001] используют также ориентацию монокристалльной структуры относительно осей X, Y, т. е. в плоскости, перпендикулярной оси Z - азимутальной ориентацией. Если задается аксиальная и азимутальная ориентация, то получают отливки с заданной пространственной КГО. Допуск на отклонение азимутальной ориентации, как правило, задается на том же уровне, что для аксиальной ориентировки: $\alpha_{[001]} \approx \alpha_{[100]} \leq 10^\circ$. Следует отметить, что отливки с заданной аксиальной и азимутальной ориентациями можно получать только методом затравочной технологии, применяя для затравки сплавы системы Ni-W-C, изготовленные методом ориентированной вырезки из монокристалльных заготовок произвольной ориентации. В отливках с аксиальной ориентацией [111] азимутальная ориентация не задается (все направления лежащие в плоскости октаэдра имеют одинаковый модуль упругости E).

Таким образом отечественные отливки: $\alpha_{[111]}^{акс} \leq 10^\circ \rightarrow \alpha_{[100]}^{азм} \leq 10^\circ$, т.е. $\Delta\alpha \leq 3^\circ$; зару-

бежные отливки: $\alpha_{[111]}^{акс} \leq 20^\circ \rightarrow \alpha_{[100]}^{азм}$ не задается, т.е. $\Delta\alpha \leq 6^\circ \dots 8^\circ$.

2. Монокристаллы безуглеродистых жаропрочных сплавов

Разработка специальных «безуглеродистых» сплавов для монокристалльного литья позволила значительно повысить прочностные характеристики монокристаллов [001]. Для этого из состава сплава исключены зернограницные упрочнители C, Zr, B, что повысило температуру солидуса до 1365°C и позволило реализовать композиции с более высокой $T_{пр}$ γ' -фазы. Удаление из структуры карбидов MeC, часто являющихся очагами усталостных трещин, значительно повысило характеристики MnЦУ.

Термообработка (ТО) монокристалльных отливок из безуглеродистых сплавов при повышенных температурах и большей длительности позволяет практически полностью растворить эвтектическую γ' -фазу, значительно снизить дендритную ликвационную неоднородность. После ТО - гомогенизации закалка отливок проводится с высокой скоростью ступенчатого старения. В результате такой термообработки в сплаве образуется структура из равномерно и упорядочено расположенных по направлению [001] в γ -матрице частиц упрочняющей γ' -фазы правильной кубической формы с оптимальными размерами (0,4-0,5) мкм и величиной мисфита D. Все это значительно повысило практически все прочностные характеристики по сравнению с монокристаллами сплавов традиционного легирования.

Вышесказанное отчетливо проявляется при сравнении характеристик прочности для близких по системе легирования монокристаллов сплавов традиционного легирования ЖС-32 и ЖС-36, а также безуглеродистых ВЖМ5 с ориентацией [001] и американского сплава CMSX-4 (см. табл.)

Таблица

Параметры	ЖС32	ЖС36	CMSX-4	ВЖМ5
$\sigma_{t, \sigma}^T$, МПа				
σ_{100}^{900}	475	485	485	525
σ_{500}^{900}	370	390	390	430
σ_{100}^{1000}	240	255	260	275
σ_{500}^{1100}	175	185	190	210
σ_{100}^{1100}	120	140	140	150
σ_{500}^{1100}	90	100	100	115
$\sigma_{0,5t}$, МПа				
σ_{100}^{1000}	195	200		215
σ_{500}^{1000}	120	120		140
$T_{исп}^0$, $^\circ\text{C}$	σ_{-1}	МПа	$N = 2 \cdot 10^7$	ц
$\sigma_{-1}^{20}, \alpha_\sigma=1,0$	210	290	-	420
$\sigma_{-1}^{20}, \alpha_\sigma=2,3$	280	350	-	410
$\sigma_{-1}^{900}, \alpha_\sigma=1,0$	110	190	-	240
$\sigma_{-1}^{900}, \alpha_\sigma=2,3$	250	280	-	320

Следует отметить, что повышенные значения пределов выносливости МнЦУ у сплава ВЖМ5 связаны с применением горячего изостатического прессования (ГИП) в комбинации с термовакуумной обработкой (ТВО), снижающего объемную долю микропористости практически до нуля. Однако получение монокристалльных отливок из безуглеродистых сплавов имеет ряд существенных особенностей:

- отливки из этих сплавов требуют контроля макроструктуры, т.к. большеугловые границы зерен как при комнатной, так и при высоких температурах имеют близкие к нулевой прочность.

- в процессе направленной кристаллизации могут возникать посторонние кристаллы, в виде полосчатости, которая наблюдается только в монокристаллах безуглеродистых сплавов.

Полосчатость представляет собой конгломерат столбчатых зерен, направленных вдоль оси роста и возникающие из субзерен основного кристалла за счет увеличения их разориентации по мере роста как в осевом, так и в азимутальных направлениях. При разориентации $\Delta\alpha$ более $5...7^\circ$, можно говорить о возникновении зерен, хотя очага зарождения они не имеют, а возникают из монокристалльной структуры (рис. 1 а, б).

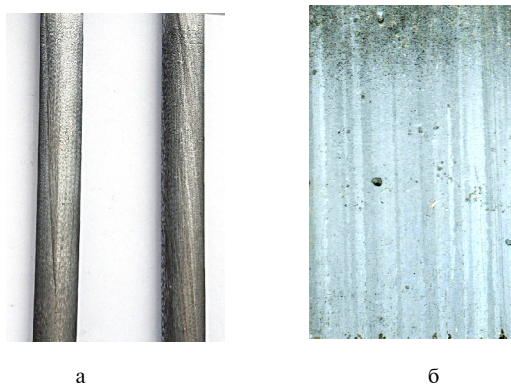


Рис.1. Структура полосчатости в цилиндрической монокристалльной заготовке [001]: а) общий вид; б) увеличение $\times 50$

Образование такого дефекта имеет инкубационный период: полосчатость возникает не с момента роста слитка, а при достижении им порогового размера, ответственного за образование дефекта. Обычно для этого нужен слиток в 30...50 мм. В то же время в слитках [001], полученных в одном блоке с монокристаллами [001], такой дефект не наблюдается. Это можно связать с тем, что в кристаллах [001] оси 1-го порядка прорастают на всю длину слитка, которая превышает инкубационное расстояние, тогда как в монокристаллах [111] дендритные оси выходят на поверхность раньше, чем произошло пороговое накопление дефектов.

Показано, что в монокристалльных отливках $\langle 001 \rangle$, полосчатость, помимо высокого уровня

G_Z , возникает на радиальных составляющих G_{XY} , т. е. при росте с вогнутым фронтом роста. В частности, в блоке по четыре полосчатость возникает на стороне слитка, обращенной к нагревателю, в зоне с максимальным искривлением фронта роста. Полосчатость увеличивается вместе с ростом объема слитка за счет поглощения объема основного кристалла.

Образование полосчатости или возникновение разориентации $\Delta\alpha$, можно связать с возникновением термических напряжений при росте, вызванного высокими градиентами $\Delta\alpha \sim f(G_X G_Y G_Z) \sim f(s_T)$, где G_{XYZ} - градиент температуры на фронте роста.

Этот постоянно действующий фактор в процессе роста слитка, где затвердевшая часть слитка играет роль затравки, способствуя росту $\Delta\alpha$. Сплавы с повышенным содержанием W и Re , например ЖС-36 (12% W , 2% Re), менее склонны к образованию полосчатости по сравнению, например, со сплавом SC-83 (7% W , 0% Re). Сплав ВЖМ5 имеет меньшую склонность к образованию данного дефекта. Наиболее эффективным для устранения полосчатости является снижение величины ростового градиента G_Z . Это было показано при проведении плавки на одной и той же установке при градиентах $G = 15^\circ/\text{мм}$ и $G = 5...7^\circ/\text{мм}$. Во втором случае полосчатость в кристаллах сплава SC-83 $\langle 001 \rangle$ отсутствовала полностью.

Исследование структуры монокристаллических отливок из ЖС36, ВЖМ5, ВЖМ5У, показало повышенную склонность этих сплавов к образованию микрорыхлоты, по сравнению с углеродсодержащими ЖС32 и ЖС26. Микрорыхлота представляет собой несплошности в междендритной области структуры отливки, преимущественно располагаясь в местах резкого изменения конфигурации детали, относится к литейным дефектам и выявляется при ЛЮМ-контроле. Небольшие несплошности, не выходящие на поверхность отливки, можно «закрыть», применяя горячее изостатическое прессование (ГИП). Для крупных несплошностей и избежания рекристаллизации требуется корректировка режима ГИП. Кроме того, с целью уменьшения микрорыхлоты применяют систему кристалловодопитателей для критических зон отливки и предусматривают припуски, удаляемые механической обработкой.

Вторым источником возникновения посторонних кристаллов в отливках из безуглеродистых сплавов является процесс гомогенизирующего отжига при температуре выше $T_{\text{пр}} \gamma'$ -фазы.

Исследования структуры монокристаллов на разных стадиях гомогенизирующего отжига показали, что в большинстве случаев объемная рекристаллизация начинается из слоя поверхност-

ной рекристаллизации толщиной 100-150 мкм, который в свою очередь возникает от пескоструйной обработки, зачистки или выбивки отливки из формы. Несколько зерен из этого слоя начинают быстро расти в глубь монокристалла, прорастая на все сечение так, что в монокристаллическая отливка может превратиться в равноосную. Рекристаллизованные зерна могут возникнуть в лопатке в результате механического воздействия на нее при выбивке отливки из формы. Образование таких зерен в монокристалле из безуглеродистого сплава грозит потерей жаропрочности.

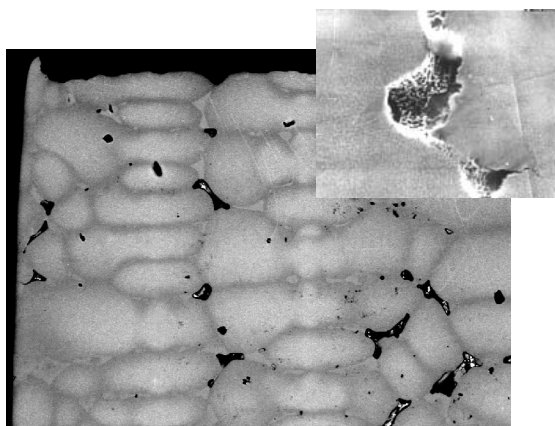


Рис. 2. Микроструктура микрорыхлоты в отливке рабочей лопатки турбины (сплав ВЖМ5) с кристаллографической ориентацией [001]

Как показали исследования структурного совершенства, рекристаллизованные зерна имеют разориентацию блоков $\Delta\alpha \leq 0,1-0,15^\circ$, то есть они почти на порядок совершеннее основных монокристаллов, получаемых методом направленной кристаллизации ($\Delta\alpha = 1,0-2,0^\circ$). Разница в структурном совершенстве интенсифицирует процесс рекристаллизации.

Объемная рекристаллизация при кристаллизации отливки возникает из-за:

- наклепа отливки при ее механической обработке;
- возникновения пластических деформаций в зоне повышенной жесткости формы, затрудняющей усадку отливки.

Для предотвращения возникновения объемной рекристаллизации необходимо исключать любые механические воздействия на отливку до проведения всех высокотемпературных термообработок с температурами выше $T_{пр}$ γ' -фазы (ГИП, пайки заглушек, нанесения защитного покрытия и др.).

Как и в случае полосчатости, к объемной рекристаллизации менее склонны безуглеродистые сплавы, имеющие повышенное содержание W и Re . Этот эффект, в отличие от полосчатости, не зависит от ориентации отливки.

Заключение

Таким образом, применение монокристаллов безуглеродистых жаропрочных сплавов позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики турбинных лопаток ГТД, однако, технология их изготовления имеет ряд принципиальных отличий от технологии жаропрочных сплавов традиционного легирования.

Перечень ссылок

1. Талараия В.Н., Современные технологии получения отливок лопаток ГТД и ГТУ/ В.Н. Талараия, Е.Н. Каблов, И.М. Димонис. Авиационные материалы; под ред. Е.Н. Каблова. М. ВИАМ. 2007. 440 с.
2. Петухов А.Н. Исследование прочностных характеристик монокристаллов никелевых сплавов и монокристаллических лопаток турбин./ Сб.:Вторая международная конференция «Деформация и разрушение материалов» DFM-2007.М.ИМЕТ им.А.А. Байкова РАН, т.1, 2007. С.215-218.

Поступила в редакцию 14.06.2011

В.Н. Толорайя, А.Н. Петухов, М.Е. Колотников, С.В. Харьковський, Г.А. Остроухова. Деякі особливості формування монокристалічних відливок на прикладі безуглецевого сплава ВЖМ5

Розглянуто особливості формування монокристалічних відливок з жароміцного безуглецевого сплаву типу ВЖМ5 і основні характеристики міцності в порівнянні з традиційними вуглецевмісними сплавами типу ЖС32. Сформульовані вимоги, що регламентують відхилення по кристалографічній орієнтації КГО і умови прийнятності в відливках сторонніх кристалів і субзерен, їх розміри і морфологію, зони у відливках, де такі відхилення можуть допускатися. Наведено порівняльні характеристики міцності (тривалої міцності і багаточислової втоми) жароміцних безуглецевих сплавів вітчизняного ВЖМ5 і закордонного SMSX-4.

Ключові слова: монокристалічні сплави, субзерна, безуглецеві сплави, осьова кристалографічна орієнтація (КГО), термічні напруження, смужчатість, перекристалізація, дендритна ліквіація.

V.N. Talaraja, A.N. Petukhov, M.E. Kolotnikov, S.V. Kharkjvski, G.A. Ostrouhova. Some features of formation of single crystal castings by the example of carbon-free alloy VJZM5

Typical defects of a macrostructure single-crystal castings shovels from carbon-free heat resistant nickel-base alloys and ways of elimination of these defects are described. Requirements to growth are stated structure of domestic and foreign turbine shovels, ways of the task and a substantiation of a choice of crystallographic orientation single-crystal castings shovels, and the requirement on off-orientation to the set crystallographic orientation.

Features of formation of single crystal castings from carbon-free heat resistant nickel-base alloy VJZM5 as compared with traditional carbon-bearing heat resistant alloys of JZS32 type are considered.

Key words: *single crystal, carbon-free, castings, thermal stress, striation.*