

В.Н. Толорайя, Е.В. Филонова, Г.А. Остроухова, И.Н. Алешин

МИКРОРЫХЛОТА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВКАХ БЕЗУГЛЕРОДИСТЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Исследована микрорыхлота в монокристаллических отливках турбинных лопаток из безуглеродистых жаропрочных сплавов типа ЖС36, ВЖМ5, а также разработаны технологические приемы для снижения или полного устранения микрорыхлоты в процессе формирования структуры методом НК или ВНК.

Ключевые слова: *безуглеродистый жаропрочный сплав, направленная кристаллизация, монокристаллическая структура, микрорыхлота.*

Исследования возникновения микрорыхлоты в монокристаллических отливках безуглеродистых жаропрочных сплавов проводились на отливках турбинных лопаток и модельных образцах. На модельных образцах имитировался рост монокристаллической структуры в полках турбинных лопаток. Опытные плавки проводились на установке УВНК-9А по режимам технологии монокристаллического литья с применением затравок из сплавов системы Ni–W или Ni–W–C.

Микрорыхлота представляет собой несплошности в междендритной области структуры отливки. На отливках турбинных лопаток она преимущественно располагается на полках лопатки (рис. 1, а), выявляется при ЛЮМ-контроле и является литейным дефектом. Исследование структуры монокристаллических отливок турбинных лопаток из безуглеродистых ренийсодержащих жаропрочных сплавов, в частности из ЖСКС2, ЖС36, ВЖМ5, ВЖМ5У, показало, что эти сплавы имеют повышенную склонность к образованию микрорыхлоты, по сравнению с углеродсодержащими сплавами, такими как ЖС32 и ЖС26, т. е. склонность к образованию микрорыхлоты характерна именно для безуглеродистых сплавов.

Впервые микрорыхлота наблюдалась в опытных отливках турбинных лопаток двигателя НК-25 из сплава ЖС30М (первый отечественный безуглеродистый сплав), полученных на установке ПМП-2. Тогда как в отливках из сплава ЖС30, отличающегося от сплава ЖС30М наличием бора и углерода, микрорыхлота не наблюдалась или располагалась на поверхности отливки и легко удалялась механической обработкой.

Формирование монокристаллической структуры в турбинной лопатке можно проводить направленной кристаллизацией либо от замка, либо от пера лопатки [1]. Кристаллизация от замка более простая с точки зрения формирования структуры, поскольку в этом случае проще подвести структуру к краям полки лопатки. При росте от пера необходимы протяженные кристалловоды, установленные от стартового конуса к краям полки. Так, при кристаллизации лопаток по схеме «замок вниз» на поверхности замковой полки в междендритной области наблюдается микрорыхлота глубиной до 800–1000 мкм при длине отливки ~150 мм (рис. 1, б). Микрорыхлота представляет собой достаточно крупные поры неправильной формы размером ~100 мкм, соседствующие с эвтектическими выделениями (γ - γ'). В приповерхностных областях эти поры связаны друг с другом и выходят на поверхность полки, глубже они представляют собой отдельные несплошности. Такие несплошности, не связанные с поверхностью отливки, можно «закрыть», используя технологию горячего изостатического прессования (ГИП), но, учитывая их достаточно крупные размеры, необходимо корректировать температурный режим ГИП, чтобы избежать рекристаллизации.

Для некоторого снижения микрорыхлоты к краям или середине полки лопатки можно подводить питатели от прибыльной части формы. Однако их установка не дает существенного эффекта, так как микрорыхлота устраняется только в непосредственной близости от питателя, а на расстоянии ~2–3 мм остается на прежнем уровне, что отчетливо видно при ЛЮМ-контроле. Типичные размеры и расположение микрорыхлоты показано на рис. 1, в. Обычно при литье по схеме «замок вниз» на поверхности замковой полки предусматривают припуск и удаляют микрорыхлоту механической обработкой. Величина этого припуска на полке может достигать 1 мм.

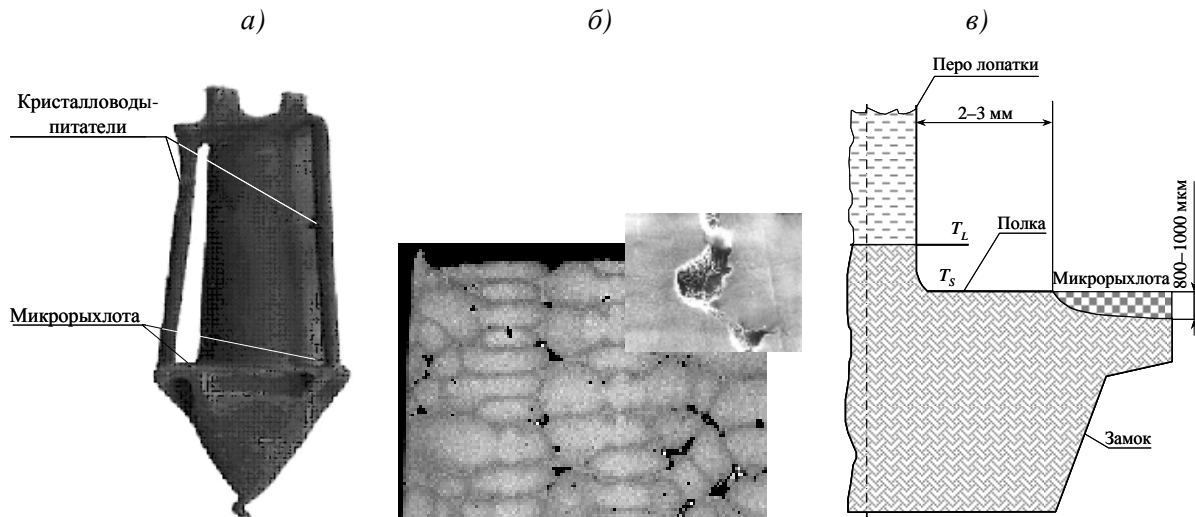


Рис. 1. Микрорыхлота в отливке рабочей турбинной лопатки с кристаллографической ориентацией [001], сформированной с помощью высокоградиентной направленной кристаллизации «от замка»:

a – расположение микрорыхлоты в отливке лопатки; *б* – микроструктура ($\times 100$) материала в зоне микрорыхлоты (сплав ВЖМ5, долевой шлиф); *в* – типичные размеры и расположение микрорыхлоты

Наиболее простым способом устранения микрорыхлоты является кристаллизация лопаток по схеме «замок вверх». Однако такой вариант полностью оправдывает себя только при литье небандажированных лопаток. При литье «замком вверх» бандажированной лопатки микрорыхлота появляется на поверхности бандажной полки со стороны газового тракта и удалить ее зачисткой достаточно сложно. Кроме того, данная схема кристаллизации требует сложной системы кристалловодов для формирования монокристаллической структуры в полках. Поэтому при литье бандажированных лопаток предпочтительней вариант «замок вниз», с использованием питателей на замковой полке в качестве кристалловодов к бандажной полке.

Склонность сплава к образованию микропор можно связать с величиной параметра Δp , характеризующего сопротивление, которое создается в жидко-твердой зоне на высоте x , потоку расплава, компенсирующего объемную усадку в процессе направленной кристаллизации. Увеличение параметра Δp приводит к ухудшению питания в жидко-твердой зоне и, соответственно, к увеличению объемной доли пор [2].

Параметр Δp определяется зависимостью

$$\Delta p = \frac{M \cdot \beta \cdot R}{\gamma \cdot \rho_L \cdot g} \cdot x,$$

где M – вязкость расплава; β – коэффициент объемной усадки; R – скорость роста кристалла; γ – коэффициент, зависящий от структуры дендритов в жидко-твердой зоне; ρ_L – плотность расплава; g – ускорение свободного падения; x – высота жидко-твердой зоны, которая отсчитывается от вершины дендритов (L – высота всей жидко-твердой зоны).

При $x=0$ параметр $\Delta p=0$, а при $x=L$ параметр Δp – максимален.

Высота жидко-твердой зоны L при направленной кристаллизации связана с аксиальным температурным градиентом \vec{G}_z соотношением $L=\Delta T_{кр}/\vec{G}_z$ ($\Delta T_{кр}$ – интервал кристаллизации), постоянная $\gamma=k/\eta$, где η – плотность расплава в подводящих каналах; k – параметр, характеризующий структуру дендритов в жидко-твердой зоне.

Нетрудно показать, что плотность расплава η будет равна плотности расплава в осях первого порядка и, следовательно, $\eta=1/\lambda^2$, где λ – расстояние между осями дендритов первого порядка. С учетом приведенных соотношений

$$\Delta p = \frac{M \cdot \beta}{k \cdot \rho_L \cdot g \cdot \lambda^2} \cdot \frac{\Delta T_{кр} \cdot R}{\vec{G}_z}.$$

Отсюда следует, что склонность к порообразованию при направленной кристаллизации пропорциональна скорости роста кристалла R и обратно пропорциональна температурному градиенту \vec{G}_z . Однако зависимость между указанными величинами более сложная. По-видимому, следует учитывать, что междендритное расстояние λ также существенно зависит от условий кристаллизации, в частности, от скорости охлаждения $\lambda=a(\vec{G} \cdot R)^{-n}$ (a – коэффициент, пропорциональный интервалу кристаллизации $\Delta T_{кр}$). Кроме того, величина k , характеризующая структуру дендритов в жидко-твердой зоне, зависит от морфологии и плотности осей дендритов второго порядка, что определяется параметрами \vec{G} и R . Величина k зависит также от количества эвтектических выделений в сплаве, т. е. от состава сплава. Эта зависимость проходит через максимум при среднем количестве эвтектики. Так, содержание микропор в монокристаллах сплава ВКНА-1В меньше, чем в сплаве ВЖМ5, поскольку в первом сплаве большая объемная доля эвтектики $\gamma-\gamma'$ и каналы питания (междендритные области) более свободны, поскольку в меньшей степени перекрыты осями дендритов второго порядка.

Все вышеприведенное относится к проницаемости жидко-твердой зоны в направлении роста, т. е. в аксиальном направлении. Образование микрорыхлоты связано с

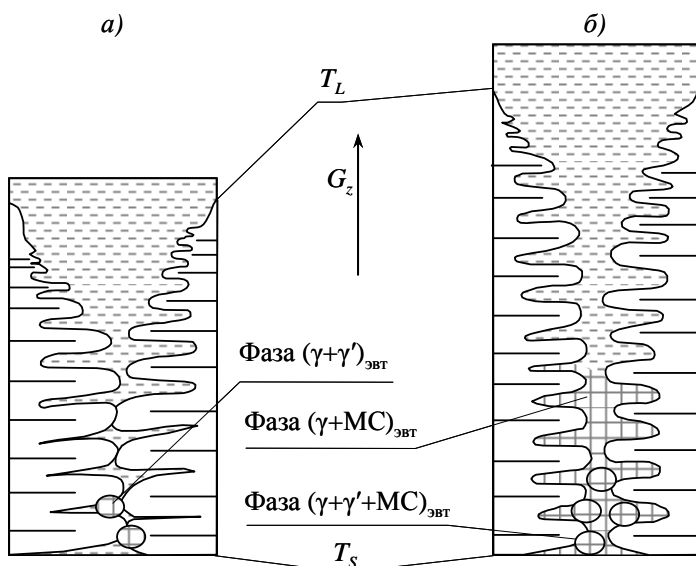


Рис. 2. Строение жидко-твердой зоны (G_z – аксиальный температурный градиент; T_L и T_S – температура ликвидус и солидус; МС – карбидная фаза) в безуглеродистом (а) и углеродистом сплаве (б)

проницаемостью этой зоны в радиальном, относительно роста кристалла, направлении (рис. 1, в). Однако образование микрорыхлоты также можно связать с характеристиками морфологии жидко-твердой зоны, точнее – с величиной k . В безуглеродистых сплавах как в радиальном, так и в аксиальном направлениях каналы перекрыты осями дендритов 2-го порядка, в то время как углеродсодержащие сплавы с большой долей эвтектики (γ -МС') имеют каналы питания более свободные, т. е. величина параметра k для безуглеродистых сплавов меньше, чем для углеродсодержащих. Строение жидко-твердых зон таких сплавов показано на рис. 2.

Следует отметить, что безуглеродистые сплавы более склонны к образованию микрорыхлоты несмотря на то, что интервал кристаллизации $\Delta T_{кр}$, а значит и протяженность каналов питания, у них меньше (при равных значениях \vec{G}_z), чем у углеродсодержащих сплавов.

Если при отливке монокристаллических рабочих лопаток турбины возможно устранение микрорыхлоты при использовании схемы кристаллизации от пера к замку, то для монокристаллических сопловых лопаток, которые также могут отливаться из безуглеродистых сплавов, например, из ВКНА-1В [111], такой прием практически бесполезен, поскольку сопловые лопатки имеют почти одинаково развитые верхние и нижние полки. Направленная кристаллизация сопловых лопаток вдоль вертикальной оси Z (так обычно кристаллизуют рабочие лопатки) приводит к образованию микрорыхлоты на полках, со стороны обращенной к нагревателю, что сразу выявляется при ЛЮМ-контроле отливок, вне зависимости от какой полки ведется кристаллизация.

Ранее было показано (см. рис. 1, в), что величина области питания в радиальном направлении на замковой полке лопатки составляет всего 2–3 мм. Если представить, что полка (условно) имеет поверхность в виде ступеней шириной 2–3 мм и высотой 0,8–1,0 мм, то на ней микрорыхлота возникать не будет. Другими словами, если наклонить полку на угол, тангенс которого равен отношению максимальной ширины зоны микрорыхлоты (1,0 мм) к минимальной протяженности области питания в радиальном направлении (2 мм), то образование микрорыхлоты будет подавлено.

Для проверки этого предположения были изготовлены экспериментальные блоки цилиндрических заготовок образцов, на которых были расположены пластины размером 25×10×3 мм, плоскости которых располагались под углами 90, 65, 55 и 45 град к оси роста, точнее – к вектору основного (аксиального) температурного градиента \vec{G}_z . Результаты опытных плавов показали, что в пластине, расположенной под углом 90 град к оси роста, образуется микрорыхлота с шириной зоны микрорыхлоты ~1,0 мм и протяженностью зоны питания 3 мм от края цилиндрической заготовки. В пластинах, выполненных под углом <65 град к оси роста (или \vec{G}_z), микрорыхлота не наблюдалась (рис. 3).

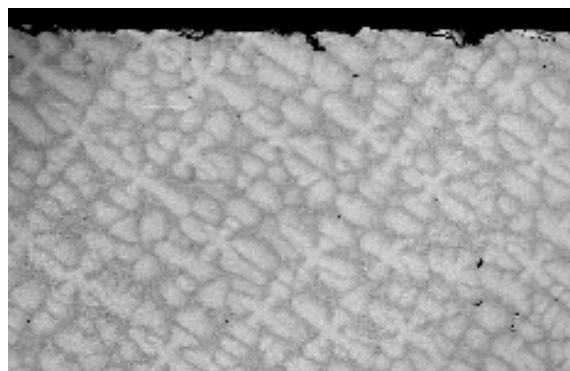


Рис. 3. Структура пластины (×50, долевой шлиф), расположенной под углом 35 град к оси роста $Z (G_z)$

С учетом вышесказанного, было принято решение использовать в конструкции блока сопловых лопаток 1 ступени двигателя ПС-90А2 (направление кристаллизации от верхней полки лопатки) наклон лопатки под углом 45 град к ее оси Z [4]. Следует отметить, что затравки из тугоплавких сплавов системы Ni–W или Ni–W–С можно располагать практически под любым углом к направлению роста, при этом требуемая кристаллографическая ориентация сохраняется. Поэтому выбранный наклон отливки легко реализуется. Рост в данном случае происходит от затравки по верхней полке к перу и через кристалловод к нижней полке (рис. 4, а).

Проведенный ЛЮМ-контроль полученных отливок лопаток (см. рис. 4, б) показал, что микрорыхлота в них отсутствует, в отличие от контрольного блока с направлением кристаллизации вдоль оси Z , где на всей поверхности верхней полки наблюдалась микро-

рыхлота, в отдельных местах – сквозная. Контроль ростовой структуры показал, что отливки лопаток имеют монокристаллическую структуру с ориентацией $\alpha_{\{111\}} \leq 10$ град.

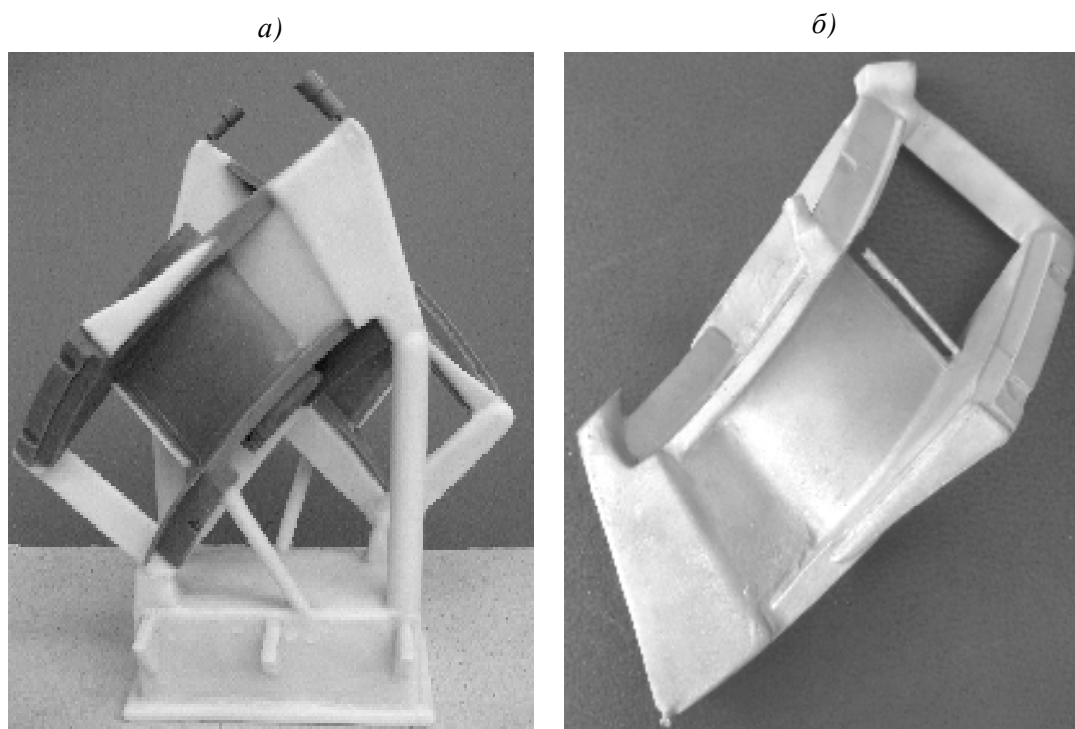


Рис. 4. Модельный блок (а) и отливка (б) сопловой лопатки 1 степени двигателя ПС-90А2, полученная на установке УВНК-9А

Существенным преимуществом предложенной конструкции, помимо устранения микрорыхлоты, является то, что стартовым конусом-кристалловодом становится один из углов полки сопловой лопатки. Это значительно снижает расход металла на литниковую систему, так как при кристаллизации вдоль оси Z масса отливки стартового конуса получается больше, чем масса самой отливки.

Применить в конструкции литейного блока наклон отливки для устранения микрорыхлоты, в частности на замковой полке, можно и для рабочих лопаток.

Работа проводилась при финансовой поддержке Департамента государственной научно-технической и инновационной политики Министерства образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-техн. сб. /Под. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука. 2006. 272 с.
2. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Толорайя В.Н. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1997. 336 с.