

Особенности формирования структуры лопаток турбин, отливаемых с заданной кристаллографической ориентацией

д.т.н. проф. Петухов А.Н.
ГНЦ ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Аннотация. В работе рассмотрены особенности формирования структуры монокристаллических лопаток турбин, отлитых с заданной кристаллографической ориентацией, позволяющие получать более высокие эксплуатационные свойства по сравнению с традиционной равноосной структурой.

Ключевые слова: кристаллографическая ориентация, границентрированная кристаллическая решётка, монокристаллическая структура; направленная кристаллизация, фактор Шмита, плоскость скольжения.

В современных ГТУ применяются лопатки, которые с заданной кристаллографической ориентацией отливаются методами высокоскоростной кристаллизации: направленной (НК) и монокристаллической (МОНО) [1, 2]. Это позволяет реализовать у материала конструкции более высокие эксплуатационные свойства по параметрам длительной прочности, термостойкости, сопротивления ползучести, повышенного сопротивления газовой коррозии и др.

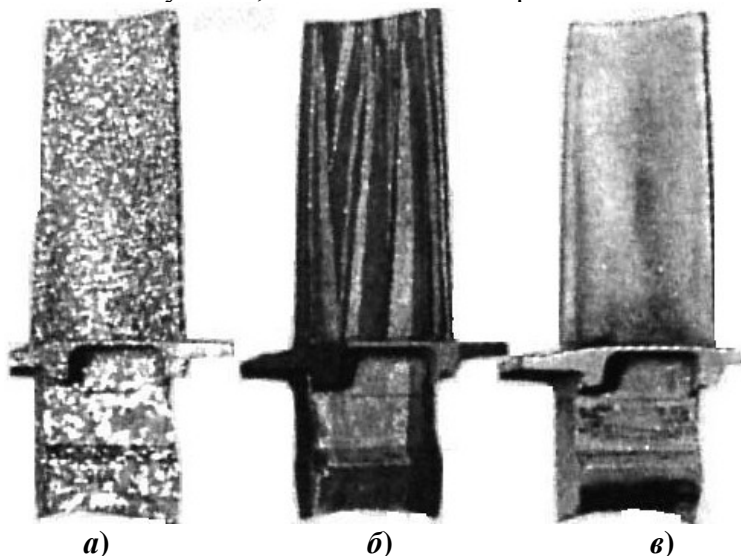


Рисунок 1. Виды структур современных литых лопаток: а – равноосная (РОС); б – направленная кристаллизация (НК); в – монокристаллическая (МОНО)

Однако в зонах с умеренной температурой отмечается некоторое снижение характеристик малоциклового (МЦУ), многоциклового (МнЦУ) усталости и наблюдается фреттинг-усталость в замковых соединениях.

В сплавах с границентрированной кристаллической решёткой (ГЦК) при кристаллизации и затвердевании в направлении теплоотвода равноосные зёрна в результате конкуренции могут вытягиваться в направлении $\langle 001 \rangle$, оттесняя, благодаря своей дендритной природе, менее благоприятно ориентированные дендриты [1, 2].

В слитке формируется монокристаллическая деталь практически с заданной аксиальной кристаллографической ориентацией за счёт размещения в литейной форме специальной заправки, связанной с холодильником и в меньшей степени с азимутальной.

В получаемых отливках легко провоцируется рекристаллизация за счёт возникновения внутренних напряжений в отливке или резкого изменения конфигурации детали, а тем более в пластически деформированном слое, возникающем при механической обработке отливок. Этот слой становится потенциальным источником деградации моно структуры в профильной части лопатки при термических обработках отливки и в условиях эксплуатации.

Особенности механических характеристик монокристаллов

В то же время следует иметь в виду, что, достигнув в отливке за счёт монокристаллической структуры максимальные характеристики прочности в направлении $\langle 001 \rangle$, сплав становится анизотропным, т.е. его механические характеристики, а также модули упругости E и G зависят от кристаллографических направлений, вдоль которых они определяются. Кроме того, в отличие от изотропных материалов, коэффициент Пуассона оказывается переменным не только по абсолютной величине, но и по знаку, принимая в разных направлениях как положительные, так и отрицательные значения [2].

Для ГЦК монокристаллов в условиях умеренных температур и действии переменных напряжений, когда ответственные за усталостные разрушения касательные напряжения достигают максимальных значений $\tau_{кр}$, наиболее критической является система скольжения, по которой могут реализовываться октаэдрические или кубические скольжения.

По закону Боаса-Шмида величина $\tau_{кр}$ – постоянная для сплава и его структурного состояния, не зависит от ориентации монокристаллов, но входящий в $\tau_{кр}$ множитель F – фактор Шмида зависит от ориентации монокристалла. Поэтому для каждой ориентации будет возникать та система скольжения (октаэдрическая или кубическая), для которой окажется максимальным фактор F [2].

В лопатках к таким зонам относятся прикорневые сечения, ножка, хвостовик и внутренняя полость, но на практике прогнозировать координаты этих систем очень сложно, так как, даже при допустимом уровне переменных напряжений, в критических плоскостях скольжения разрушения могут инициироваться макро- и микродефектами литья, технологическими методами обработки (термическими, способом нанесения покрытия, получения перфорации и т.д.), скоплением карбидов, а также конструктивными и эксплуатационными концентраторами напряжений и др., попадающими в эту зону. Поэтому при проектировании лопаток из моносплавов, в отличие от равноосных лопаток из изотропных материалов, учитываются анизотропия свойств кристаллов как по главным, так и по вторичным осям ориентации [9].

Изменение осей ориентации материала может происходить как в процессе изготовления, так и под воздействием эксплуатационных нагрузок. Отклонение основных осей может превышать номинальное значение 10° , а вторичных – ещё больших величин.

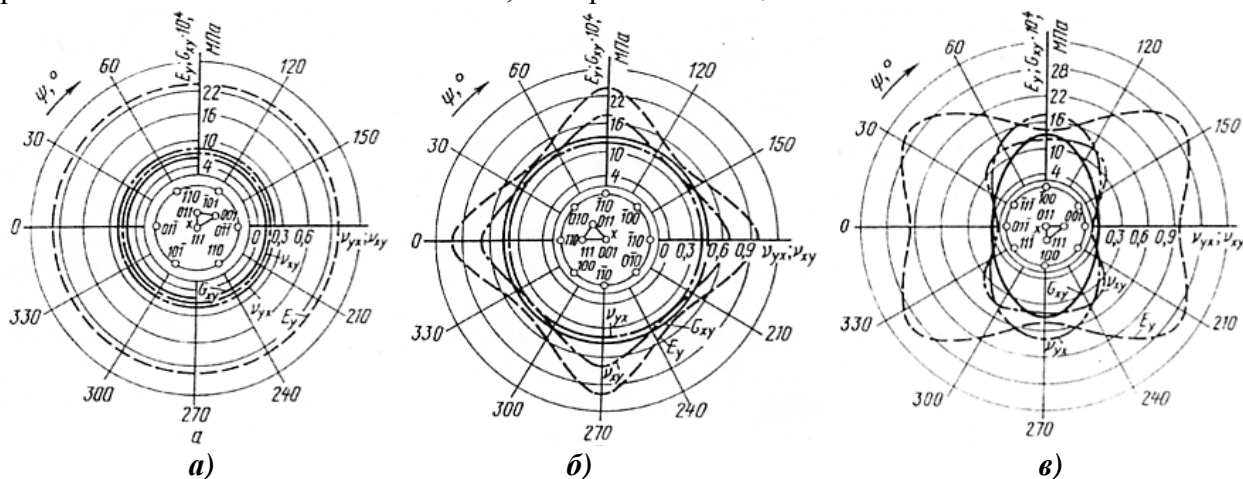


Рисунок 2. Азимутально-ориентационная зависимость поперечного модуля Юнга E_y , модуля сдвига G_{xy} , а также коэффициента Пуассона ν при 20°C для аксиально ориентированных монокристаллов $\langle 111 \rangle$ (а), $\langle 001 \rangle$ (б) и $\langle 011 \rangle$ (в). В центре – стандартная стереографическая проекция (стереографический треугольник)

С кристаллографической точки зрения упругие свойства материалов однозначно описываются компонентами матриц упругих жесткостей $C_{11}, C_{12}, \dots, C_{66}$ или упругих податливостей [7]. Но в инженерных расчётах традиционно используют модули нормальной упругости

Юнга E и сдвига G , а также коэффициент Пуассона μ .

Эти характеристики, имеющие простой физический смысл, экспериментально определяются, являясь производными от первых [2, 7].

Для изотропных тел, имеющих две независимые упругие константы (S_{11} , S_{12} и $S_{44} = 2(S_{11} - S_{12})$), связь между ними и инженерными характеристиками определяется соотношениями $S_{11} = 1/E$; $S_{12} = \nu/E$; $2(S_{11} - S_{12}) = 1/G$, откуда находится значение модуля сдвига: $G = E/2(1 + \nu)$.

Анизотропия свойств монокристаллов наиболее ярко выражается при умеренных температурах, что в первую очередь проявляется в смешанном характере разрушений, так как наиболее слабым звеном в кристалле оказываются плоскости скольжения, по которым происходит ускоренный рост усталостных трещин. Такие разрушения наблюдаются как и при испытаниях на МнЦУ при симметричном изгибе [4 – 7] стандартных образцов из моносплавов (ЖС30 и др.), так и при растяжении - сжатии (сплав *In100*) [5], соответственно при повышенных температурах $T_{исп} \geq 650^\circ\text{C}$.

При отклонении осей кристалла от заданных аксиальных ориентаций происходит изменение упругих и прочностных характеристик, характеристик ползучести, включая предел выносливости и скорости роста трещины.

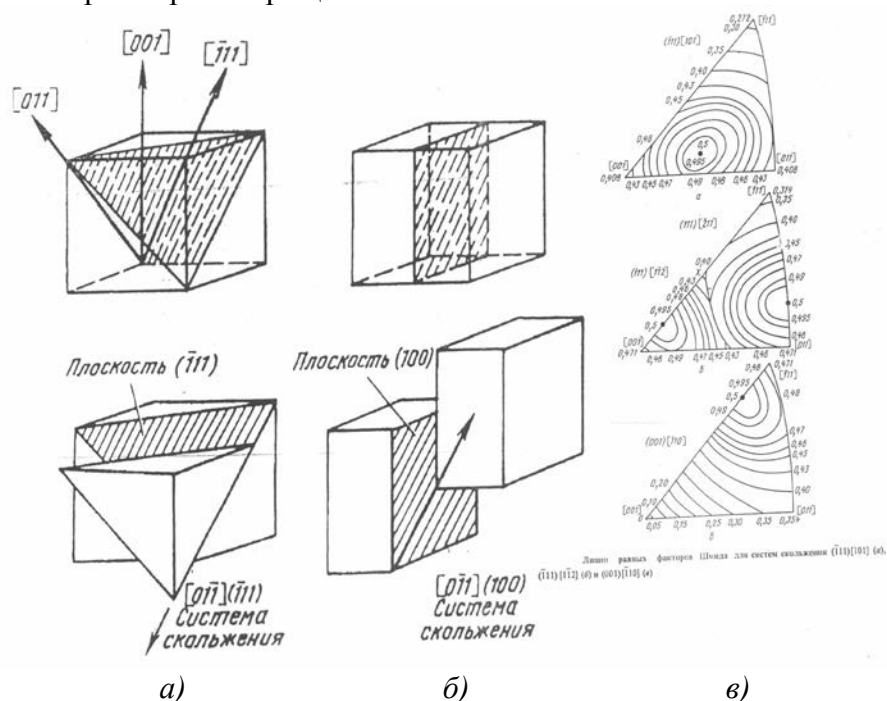


Рисунок 3. Схемы трансляционного скольжения в ГЦК- монокристаллах никелевых сплавов: а –октаэдрическое скольжение; б–кубическое скольжение; в –линии равных факторов Шмида для систем скольжения [2]

С отклонением от заданной ориентации растут отклонения упругих и прочностных характеристик. Поэтому ориентация первичных и вторичных осей должна одинаково тщательно контролироваться, а при проектировании детали следует учитывать возможность получения дополнительного превышения допустимых отклонений за счёт процесса изготовления. Анизотропия свойств монокристаллов наиболее ярко выражается при умеренных температурах, что в первую очередь проявляется в смешанном характере разрушений, так как наиболее слабым звеном в кристалле оказываются плоскости скольжения, по которым происходит ускоренный рост усталостных трещин.

Влияние на сопротивление усталости температуры испытаний

Такие разрушения наблюдаются как при испытаниях на МнЦУ стандартных образцов при симметричном изгибе [5] из моносплавов (типа ЖС30 и др.), так и при растяжении - сжатии (сплав *In100*) [4-7], соответственно при температурах 650°C .

Сплавы с направленной структурой в целом благоприятно ориентированы для развития скольжения в плоскостях упаковки $\langle 111 \rangle$, что обеспечивает возможность «рассеивания» скольжения, т. е. распространения его по большому числу параллельных плоскостей. В сплавах с равноосной структурой (РОС) развитие такого процесса в больших масштабах невозможно ввиду их меньших размеров, случайной ориентации зерен относительно оси приложения нагрузки. Поэтому при нормальной температуре сплавы с направленной кристаллизацией имеют более высокий предел выносливости гладких образцов.

В образцах НК с концентратором напряжений процесс циклического деформирования локализуется у надреза, что приводит к большему снижению предела выносливости, чем у образцов с равноосной структурой.

Предел выносливости лопаток, отлитых НК или ВСНК, при симметричном цикле нагружения несколько ниже, чем для лопаток с поликристаллической равноосной структурой. В диапазоне температур 20...950°C он не столько зависит от температуры, сколько от совершенства технологического процесса.

Для получения современных охлаждаемых лопаток ТВД применяется монокристаллическое литьё (МОНО), обеспечивающее полное отсутствие границ зёрен и достижение высоких характеристик длительной прочности и ползучести. Тем не менее изготовление лопаток с НК позволяет повысить сопротивление длительному статическому или термоциклическому разрушению по сравнению с лопатками РОС. В таблице 1 приводятся результаты испытания при отнулевом цикле нагружения $R=0$ (изгибе с изгибом) и температуре $T_{\text{исп}} \geq 900^\circ\text{C}$.

Таблица 1

Результаты испытаний лопаток ТВД методом ступенчатого повышения нагрузки

Сплав, технология лопатки	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	Начальное напряжение, σ_n	Степенька перегрузки $\Delta\sigma$	Число лопаток шт.,	Разрушающее напряжение σ_p	Условный предел выносливости $\sigma_{\text{усл}}$	Число разрушенных лопаток, шт.	Вероятность разрушения P
		МПа			МПа			
ЖС26ВСНК №1	950	160	20	18	160	150	10	0.55
				10	180	170	6	0.60
				3	220	210	2	0.68
				1	240	230	1	1.0
ЖС26ВСНК №2	900	220	20	11	220	210	1	0.09
				10	240	230	5	0.50
				5	260	250	4	0.8
				1	280	270	1	1.0

В таблице 2 приводятся результаты контроля собственных частот лопаток турбин, отлитых методами НК и МОНО.

Таблица 2

Результаты контроля собственных частот лопаток турбин

Вид литья	Лопатки, шт.	$f_{\text{ср}}, \text{Гц}$	с.к.о., Гц	Коэффициент вариации $\nu = \text{с.к.о.}/f_{\text{ср}}$
НК	239	1334	70.4	5.28
МОНО	217	1228	31.3	2.55

По результатам контроля собственных частот лопаток близких по объёму выборок, представленных в таблице 2, следует, что большей стабильностью отличаются лопатки МОНО, имеющие вдвое меньшие значения с.к.о. и коэффициента вариации ν .

Результаты испытаний стандартных образцов из сплава ЖС26ВСНК при частотах нагружения $f = 100$ и $f = 200 \text{ Гц}$ на изгиб с вращением при нормальной температуре показали примерно одинаковые результаты и почти вдвое выше при $T_{\text{исп}} = 900^\circ\text{C}$, что практически

идентично результатам испытаний натуральных лопаток. На рисунках 4 и 5 представлены результаты испытаний на усталость лопаток турбины высокого давления (ТВД) при асимметричном цикле нагружения при двух температурах испытаний $T_{исп}$ и приведены кривые распределения $\lg N$. Испытания проводились методом ступенчатого повышения напряжений.

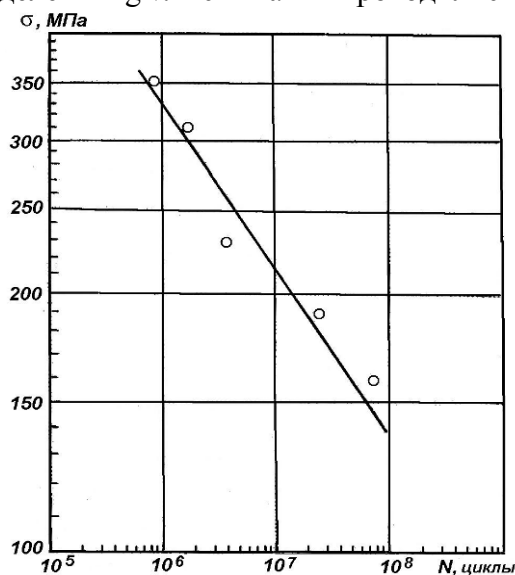
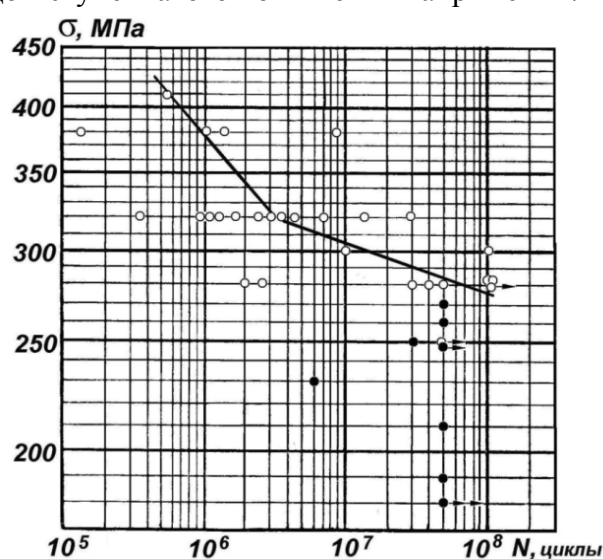


Рисунок 4. Кривая усталости гладких образцов из сплава ЖС26ВСНК, $T_{исп}=20^{\circ}\text{C}$, симметричный изгиб с вращением, $f = 100\text{ Гц}$



**Рисунок 5. Кривая усталости для образцов из сплава ЖС26ВСНК симметричный изгиб с вращением $f = 200\text{ Гц}$:
-●- $T_{исп} = 20^{\circ}\text{C}$; -○- $T_{исп} = 900^{\circ}\text{C}$**

Лопатки ТВД отливались методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВСНК), наружная поверхность лопаток имела многокомпонентное защитное покрытие системы Ni-Cr-Al-Y, а внутренняя – подвергалась хромоалитированию. Испытания проведены при отнулевом цикле нагружения ($T_{исп} = 950^{\circ}\text{C}$). Можно отметить, что с уменьшением амплитуды напряжений разброс результатов по $\lg N$ увеличивается (кривая 3). Предел выносливости лопаток ТВД двигателя А ($T_{исп} = 950^{\circ}\text{C}$) на базе $5 \cdot 10^7$ циклов при отнулевом цикле нагружения составил 140 МПа (отливка НПО) и 180 МПа (отливка МПО), а лопаток ТВД двигателя Б ($T_{исп} = 900^{\circ}\text{C}$) на базе $5 \cdot 10^7$ циклов предел выносливости составил $\sigma_0 = 200$ МПа. Величина S_{lgN} для лопаток с направленной кристаллизацией (сплав ЖС26ВСНК) при $\sigma_a = \text{const}$ может составлять 0.4...0.5 с тенденцией некоторого снижения S_{lgN} при росте σ_a .

Метод ступенчатого увеличения нагрузки позволил при ограниченном объеме испытаний получить распределение долговечностей.

Наибольшая величина предела выносливости $\sigma_{T-1} = 120$ МПа получена для ориентации $\langle 111 \rangle$, а минимальная величина для КГО $\langle 112 \rangle$ составила $\sigma_{T-1} = 96$ МПа.

Различия в пределах выносливости для КГО $\langle 001 \rangle$ и $\langle 011 \rangle$ практически нет, значения пределов выносливости составили $\sigma_{T-1} \approx 100$ МПа.

Качественно схожие результаты описаны в работе [16] для лопаток из сплава ЖС30МОНО, испытанных методом ступенчатого повышения нагрузки. База испытаний составляла $N_6 = 2 \cdot 10^7$ циклов. Для расчёта величины напряжений принято осреднённое значение модуля упругости $E = 2.1 \cdot 10^5$ МПа.

Анализ полученных результатов испытаний на усталость позволил кроме того выявить особенности усталостных разрушений монокристаллических лопаток и образцов. Разрушения происходили в зоне максимальных напряжений, однако минимальные значения пределов выносливости были получены на лопатках, разрушавшихся сколом по плоскостям скольжения.

Основным видом усталостного разрушения при повышенных температурах является смешанный (в очаге скол, а затем смешанное разрушение).

Проблема разрушения лопаток в зонах с умеренной температурой

Как уже говорилось, наиболее критичным для монокристаллических лопаток может быть не только внутренняя полость лопатки, но также полка, ножка и хвостовик. Массовых испытаний на МНЦУ замковых соединений монокристаллических лопаток практически не проводилось, что в первую очередь связано с экономическими проблемами. О наличии проблемы фреттинг-усталости в замковых соединениях свидетельствуют испытания образцов в нашей стране и за рубежом [5 – 7].

При нормальной и умеренных до 700°C температурах основную площадь разрушения занимает разрушение сколом, а в очаге может быть дефект, карбид или повреждение фреттингом в зоне контакта лопатки с захватом.

В качестве примера на рисунке 6 приведены виды разрушения лопатки ТВД при испытаниях ($T_{исп} = 20^\circ\text{C}$) на воздушном вибростенде со стороны спинки и корыта. Разрушение начинается с выходной кромки от небольшого скола и носит смешанный характер (рисунок 6а). Далее трещина в среднем поперечном сечении развивается по ломаной траектории, но примерно в центральной части пера разрушение переходит в скол под углом $\sim 60^\circ$ к продольной оси лопатки, длина которого составляет примерно 1/3 высоты профильной части лопатки.

Налево, несколько ниже развилки в верхней трети лопатки, новая трещина распространяется вверх под углом 45° , но вправо. От скола несколько трещин ветвятся в разные стороны. Это свидетельствует о том, что в лопатке-оболочке одновременно с разной интенсивностью проявляются разные формы колебаний. Особенно ярко это проявляется со стороны корыта, где формы колебаний существенно отличаются от форм со стороны спинки.



а)



б)

Рисунок 6. Вид разрушений лопатки ТВД после испытаний на воздушном вибростенде: а) вид со стороны спинки; б) вид со стороны корыта

Обращает на себя внимание некоторый сдвиг относительно друг друга частей оболочки со стороны спинки в поперечном сечении а) на выходной кромке. Последнее может быть результатом дополнительного воздействия статической составляющей от объёмных остаточных напряжений, сформировавшихся в лопатке при литье в зоне, где резко меняется геометрия лопатки.

Начальная трещина от фреттинга, достигнув одну из продольных плоскостей скольжения, вызвала лавинный процесс разрушения сколом по ряду пересекающихся в разных направлениях. Аналогичный тип разрушения наблюдался в эксплуатации (рисунок 9).

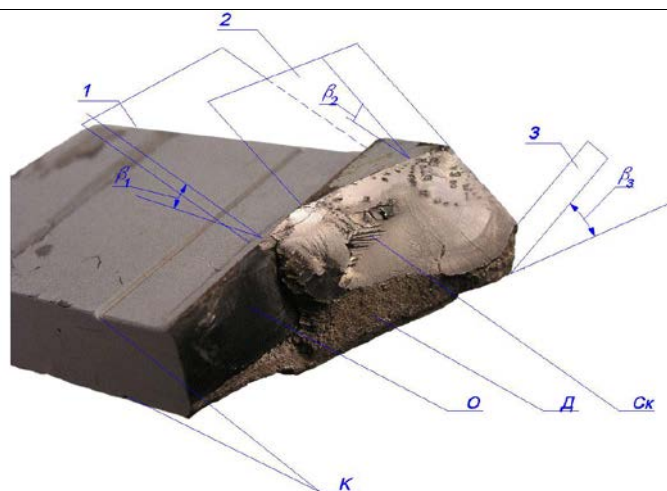


Рисунок 7. Вид разрушения сколом плоского образца (сплав ЖС6ФМОНО) с концентратором – K - ($\alpha_0 = 3.5$). Очаг разрушения – O в заделке, площадь повреждённая фреттинггом ($\sim 4\text{мм}^2$); $Д$ - поверхность долома; 1, 2, 3 – ступеньки плоскостей скольжения – $Ск$ и скопление карбидов на плоскости скольжения 2



Рисунок 8. Вид плоскостей скола и очаг начальной трещины $l_{тр}^{фр}$ - фреттинг-усталости у границы контакта образца с заделкой, которая инициировала разрушения по продольным плоскостям скольжения

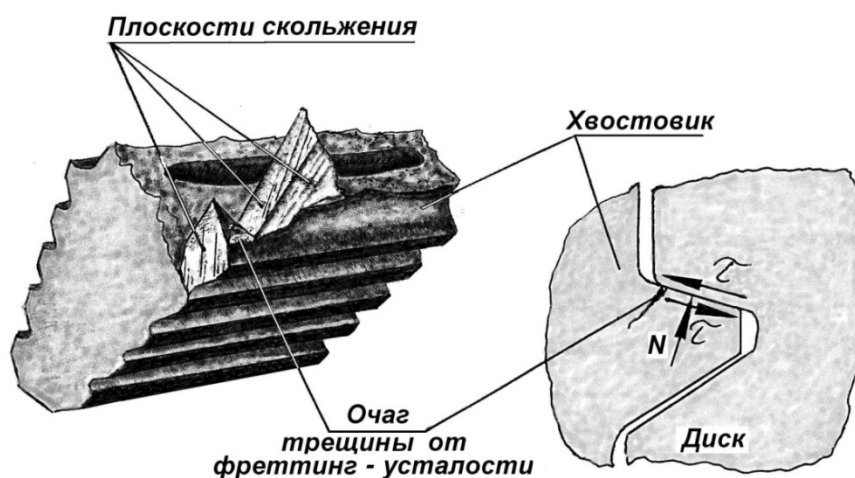


Рисунок 9. Характер разрушения сколом пера лопатки по продольным плоскостям скольжения начавшегося от повреждения фреттинггом площадки контакта зуба хвостовика замкового соединения

Заключение

Выполненный анализ результатов исследования сопротивления МнЦУ рабочих лопаток турбин и образцов, полученных литьём по выплавляемым моделям с заданной кристаллографической ориентацией при нормальной и повышенных температурах, с одной стороны, показал: применение метода литья с заданными кристаллографическими ориентациями обладает дополнительными резервами повышения эксплуатационной надёжности лопаток турбин. Однако он требует более строгого отношения к процессу доработки отливок и более тщательной проработки конструкции лопаток с точки зрения недопущения пластических деформаций [1, 2] на рабочей поверхности в отливках монокристаллических деталей лопаток, более строгого отношения к операциям обдувки, термообработки, нанесения покрытий. Кроме того, обнаружена [3–7] более высокая чувствительность моносплавов к фреттингу, на который ранее в лопатках турбин не обращали внимание.

Литература

1. Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД (Под ред. С.И. Яцыка) М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
2. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. – М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
3. Петухов А.Н. Вопросы многоциклового усталости литых жаропрочных никелевых сплавов с заданной кристаллографической структурой // Вісник двигунобудування. Вестник двигателестроения. Herald of aeroenginebuilding № 2, 2004, Запорожье: ОАО «Мотор Сич», с. 129 – 131.
4. Петухов А.Н. Особые требования к технологии изготовления лопаток турбин из сплавов с заданной кристаллографической ориентацией // Новые материалы и технологии НМТ-2004. Тезисы докл. Всероссийской научно-технической конференции. Т. 1. 17 – 19 ноября 2004 г. М., МАТИ, с. 86 – 88.
5. Петухов А.Н. Физические, технологические и конструктивные аспекты сопротивления многоциклового усталости литых деталей из жаропрочных никелевых сплавов с заданной кристаллографической структурой // Вибрації в техніці та технологіях, № 5 (37), Киев, 2004, с. 6 – 9.
6. Петухов А.Н. Многоцикловая усталость материалов и деталей газотурбинных двигателей // Проблемы прочности. 2005, № 3 (375). С. 5 – 21.
7. Петухов А.Н. Специальные требования к технологии изготовления лопаток турбин из сплавов с заданной кристаллографической ориентацией // Научные труды. Выпуск 9 (81), ИЦ МАТИ, Москва, 2005, с. 107 – 111.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том 7. «Теория упругости», М.: Наука, 1965, 204 с.