

Н. Г. Шульженко,
д-р техн. наук,
П. П. Гонтаровский,
канд. техн. наук,
Ю. И. Матюхин,
канд. техн. наук

Институт проблем
машиностроения
им. А. Н. Подгорного
НАН Украины,
г. Харьков,
e-mail: shulzh@ikharkov.ua

Ключові слова: турбіна, ресурс,
повзучість, розсіяні пошкодження,
розвантажувальні отвори.

УДК 539.3, 621.165

РЕСУРС ДИСКА ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ С НАЧАЛЬНЫМИ ДЕФЕКТАМИ В ОБЛАСТИ РАЗГРУЗОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Розглядається вплив гіпотетичних дефектів (забоїни і подряпини) у зоні паророзвантажувальних отворів на ресурс диска ротора середнього тиску турбіни К-300-240-2 при повзучості. Розвиток ушкоджень диска розглядається в тривимірній постановці методу скінченних елементів при спільному розв'язанні зв'язаних рівнянь повзучості й розсіяної пошкоджуваності із феноменологічними параметрами: скалярним і векторним, що відповідають в'язкому й крихкому руйнуванню матеріалу. Показано, що за наявності дефектів скорочується час до зародження тріщини, але збільшується час її розвитку до критичного розміру. Незначні ушкодження в області розвантажувальних отворів можуть суттєво впливати на ресурс диска.

Введение

Одними из наиболее напряженных мест в высокотемпературных цельнокованых роторах паровых турбин являются диски в районе разгрузочных отверстий, где металл повреждается в основном по механизму ползучести на стационарных режимах работы [1, 2]. В [3], регламентирующем расчетные исследования по определению ресурса роторов паровых турбин, разгрузочные отверстия, напряженно-деформированное состояние в районе которых носит объемный характер, рассматриваются как концентраторы напряжений с коэффициентом запаса по длительной прочности, равным 1,35. Это связано, главным образом, с представлениями, что появление трещин на поверхности отверстий не будет иметь катастрофических последствий для всего ротора. Немаловажное значение имел и тот факт, что на момент создания конструкции [3] решение трехмерной задачи теории ползучести представляло значительные трудности.

Актуальность работы

В [1] показано, что для разгрузочных отверстий диска первой ступени ротора среднего давления (РСД) турбины К-300-240 ЛМЗ запасы прочности (в рамках концепции концентрации напряжений и деформаций для осесимметричного напряженно-деформированного состояния) существенно больше нормативных и длительная прочность обеспечена здесь более чем на $2 \cdot 10^5$ ч эксплуатации. Расчетные исследования ползучести РСД турбины К-300-240-2 ХТГЗ в районе первых двух дисков в трехмерной постановке [4, 5] показали, что металл поверхности отверстий повреждается даже интенсивнее, чем в районе осевого канала ротора, для которого устанавливаются предельные значения окружной деформации ползучести. При отсутствии начальных дефектов в материале длительная прочность за 400 тысяч часов работы здесь исчерпывается примерно на 35%. Приведенные данные позволяют теоретически исключить эту зону из разряда опасных. Однако при этом не учитывается тот факт, что поверхность отверстий может иметь начальные дефекты в виде царапин и забоин, материал может обладать ухудшенными характеристиками сопротивления накоплению повреждений, а также иметь другие несовершенства, возникшие в результате изготовления или эксплуатации ротора. В связи с этим определенный интерес представляют данные о влиянии возможных дефектов на ресурс по длительной прочности ротора в районе разгрузочных отверстий.

Постановка задачи

В данной работе впервые в трехмерной постановке рассматривается влияние начальных гипотетических трещиноподобных дефектов, а также различной степени поврежденности поверхностного слоя отверстий диска высокотемпературного ротора на его ресурс. Моделирование дефектов и их изменения во времени выполнено с помощью методического обеспечения [5], ориентированного на

© Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин, 2015

решение трехмерных нелинейных задач термомеханики. Начальная задача решается методом шагов по времени с использованием явных и неявных схем интегрирования, линеаризованная краевая задача – методом конечных элементов. Учет повреждаемости при ползучести основан на использовании концепции рассеянных повреждений с двумя феноменологическими параметрами: скалярным и векторным [6]. Совместное решение связанных уравнений ползучести и повреждаемости позволяет проследить во времени процесс скрытого разрушения материала вплоть до достижения одним из параметров критического значения в одном или нескольких конечных элементах. При этом считается, что имеет место разрушение материала и трещиноподобный дефект (в дальнейшем трещина) продвигается на размер этих конечных элементов [7]. В результате трещина имеет толщину, от которой зависит напряженное состояние в ее вершине.

Отметим, что данный подход практически не используется для расчета элементов конструкций ввиду сложностей, связанных с выбором математической модели, адекватно описывающей процессы ползучести и разрушения материала, и построением алгоритма решения задачи, позволяющего смоделировать эти процессы в исследуемом объекте.

Результаты исследований

Для численных исследований выбран фрагмент РСД турбины К-300-240-2 ХТГЗ с диском второй ступени, в наибольшей степени подверженный повреждению металла в процессе ползучести [4]. Расчетами установлено, что отброшенные части ротора практически не влияют на напряженное состояние в районе отверстий.

На рис. 1 показана рассчитываемая симметричная часть вала с диском, представляющая собой сектор с углом раствора $\varphi = \pi/7$ (диск имеет семь равномерно расположенных в окружном направлении отверстий). Условия симметрии заданы на меридиональных плоскостях $\varphi = 0$ и $\varphi = \pi/7$: перемещения в окружном направлении u_φ и касательные напряжения $\tau_{r\varphi}$, $\tau_{z\varphi}$ равны нулю, а также – на торцевой плоскости, рассекающей диск пополам: перемещения в осевом направлении u_z и касательные напряжения τ_{rz} , $\tau_{\varphi z}$ равны нулю.

Принято, что рассматриваемый фрагмент ротора равномерно нагрет до температуры 525°C , вращается с частотой 50 с^{-1} и подвержен воздействию центробежной нагрузки интенсивностью $40,13\text{ МПа}$ от лопаточного аппарата, приложенной к поверхности обода диска. Материал ротора – сталь 20Х3МВФ (ЭИ 415).

Расчеты ползучести и повреждаемости ротора без начальных дефектов до момента появления макротрещины в теле выполнены для двух видов разбивки ротора на конечные элементы (с крупной и мелкой сеткой), которые отличаются размерами элементов в районе отверстия более чем в два раза.

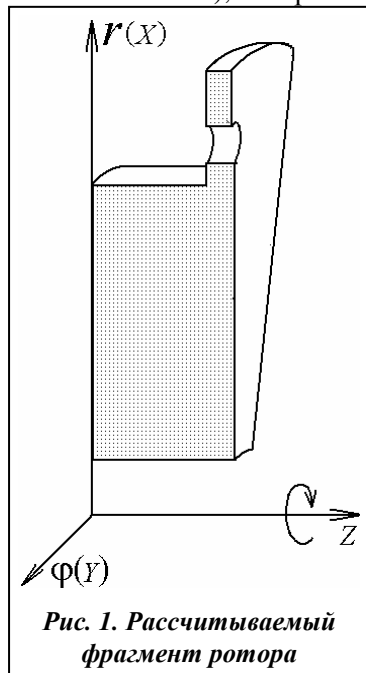


Рис. 1. Рассчитываемый фрагмент ротора

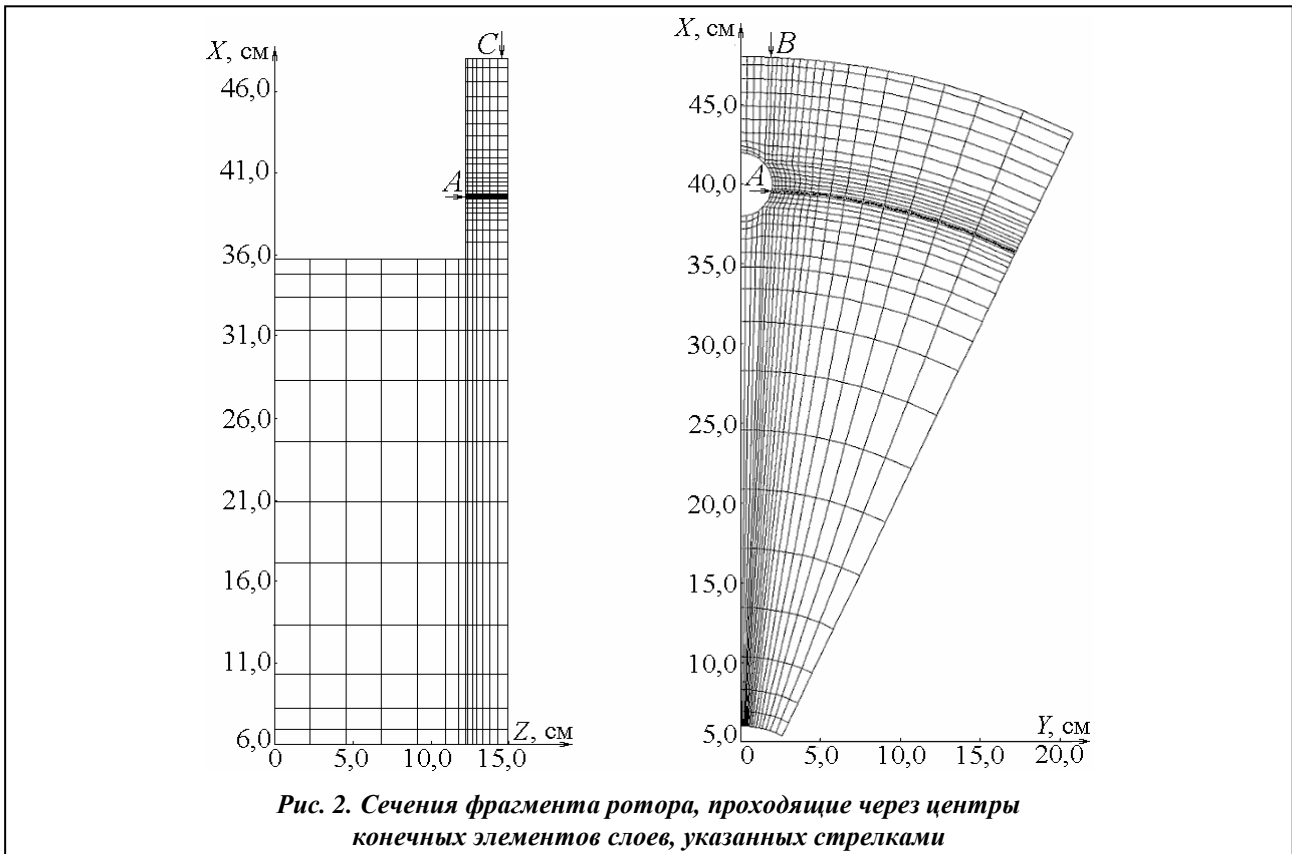
На рис. 2 показана крупная конечноэлементная сетка двух сечений ротора, проходящих через зону отверстия.

В результате расчетов установлено, что опасным слоем, в котором под действием в основном радиальной нагрузки развивается гипотетический трещиноподобный дефект, является затемненный слой, указанный стрелкой А на рис. 2. Рост трещины в нем моделируется «выбрасыванием» предельно поврежденных элементов в направлениях z и y .

На рис. 3 показано сечение, указанное стрелкой А (рис. 2), с мелкой (а) и крупной (б) конечноэлементной сеткой.

В начальный момент времени ($t = 0$) максимальные радиальные напряжения σ_x возникают в центрах конечных элементов, затемненных на рис. 3. При мелкой разбивке они равны $143,2\text{ МПа}$, при грубой – $140,0\text{ МПа}$ (осевые и окружные напряжения здесь малы). Интенсивность напряжений σ_i в первом случае равна $140,0\text{ МПа}$, во втором – 135 МПа .

Изолинии радиальных напряжений в рассматриваемом сечении при двух типах разбивки приводятся на рис. 4. Из рисунка видно, что грубая разбивка дает достаточно хорошее представление σ_x в рассмат-

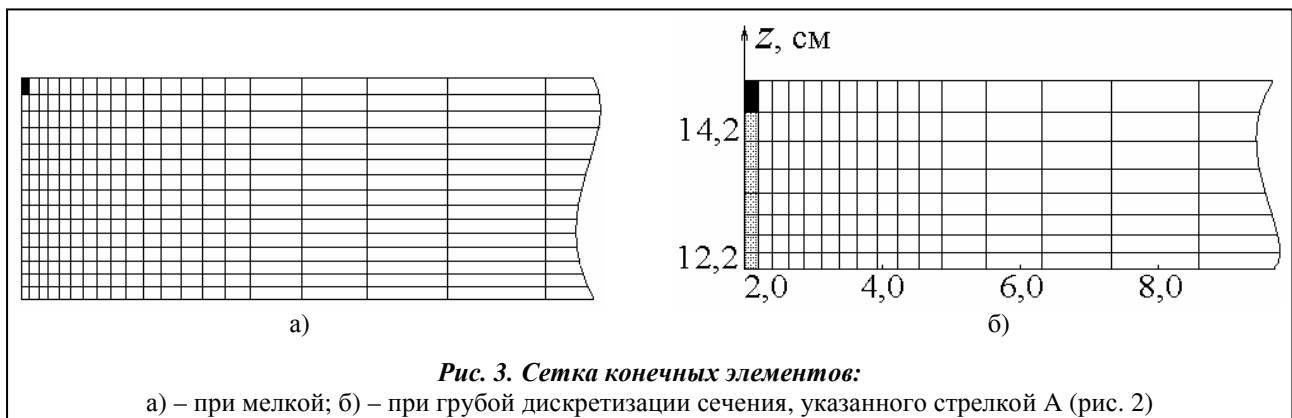


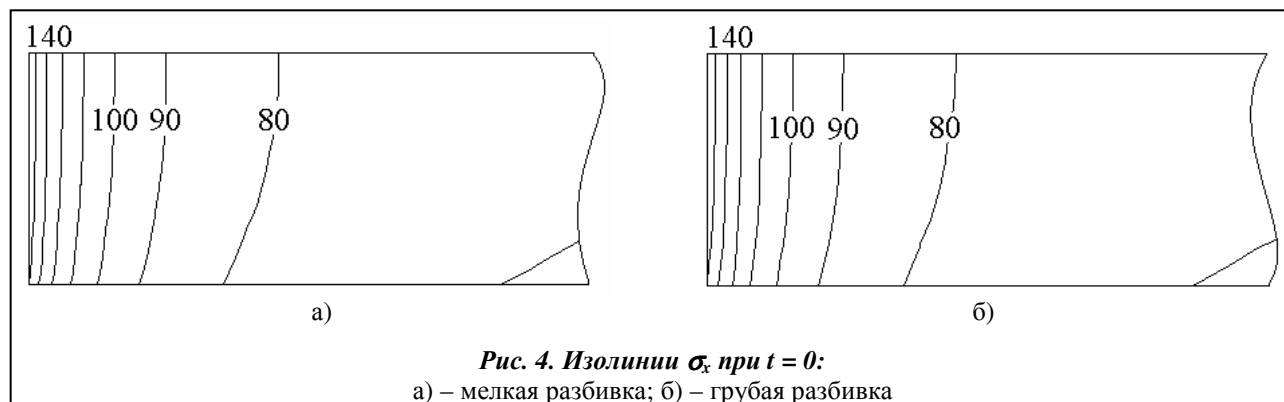
риваемом сечении диска в начальный момент времени.

Сгущение сетки конечных элементов по толщине диска от плоскости симметрии к свободной поверхности сделано для того, чтобы учесть изменение напряженного состояния от плоского деформированного к плоскому напряженному, а также точнее описать геометрию растущей трещины.

Для описания ползучести, сопровождающейся накоплением рассеянных повреждений, использовались уравнения теории типа течения с анизотропным упрочнением, дополненные кинетическими уравнениями повреждаемости материала со скалярным ω и векторным $\vec{\psi}$ параметрами, отвечающими, соответственно, за вязкое и хрупкое разрушение материала. Соответствующие уравнения и константы материала для стали ЭИ415 при температуре 525 °С приводятся в [4], где показано, что в районе разгрузочных отверстий межзеренные повреждения развиваются почти вдвое интенсивнее, чем внутризеренные, и здесь следует ожидать появления межзеренных макротрещин и хрупкого разрушения диска.

В результате проведенных численных исследований получено, что в материале без дефектов модуль векторного параметра поврежденности достигает критического значения $|\vec{\psi}| = 0,99$ (99%) в





центрах элементов, граничащих с плоскостью симметрии (на рис. 3 выделены черным). При мелкой разбивке это происходит за 1014480, а при грубой – за 824244 часов. К моменту появления макротрещины изолинии $|\dot{\psi}|$ в рассматриваемом сечении при двух вариантах разбивки распределяются, как показано на рис. 5.

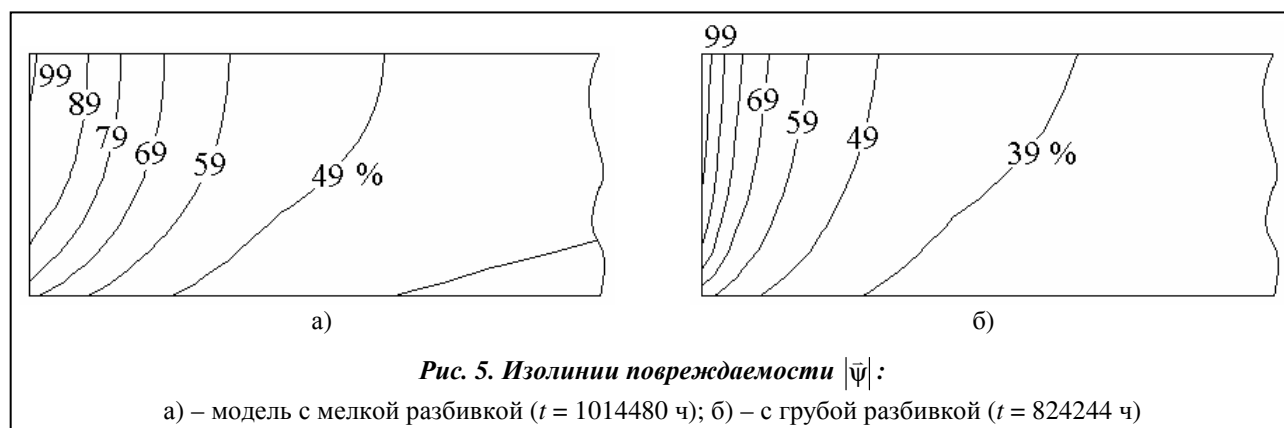
Наблюдаемое можно объяснить релаксацией радиальных напряжений со временем. На рис. 6 приводятся линии равных уровней радиальных напряжений в исследуемом сечении в момент зарождения макротрещины для моделей с мелкой и грубой разбивкой.

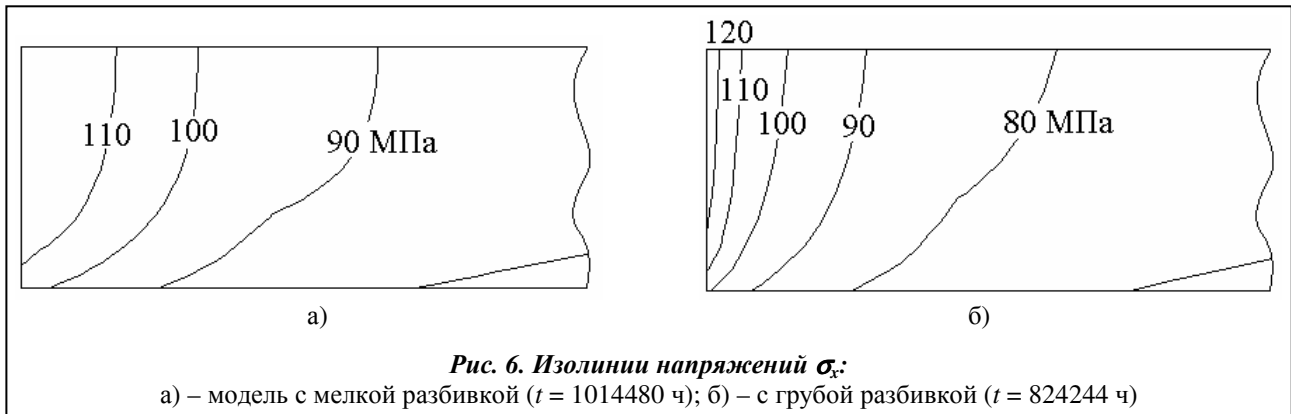
Процессы ползучести и перераспределения напряжений интенсивнее развиваются в системе с мелкой разбивкой. В первом случае радиальные напряжения существенно релаксируют в районе отверстия (что замедляет процесс накопления повреждений) и заметно возрастают вдали от него. В результате время до появления макротрещины при мелкой разбивке заметно больше, чем при грубой. При достижении поврежденностью критического значения в центре элемента, выделенного черным цветом, наблюдается следующее. При мелкой разбивке максимальное значение σ_x уменьшается с 143,2 до 107,0 МПа, а при грубой – со 140,0 до 122,0 МПа. При этом для мелкой разбивки $\omega = 0,52$, а интенсивность деформаций ползучести $\epsilon_i^c = 0,14\%$, для грубой – $\omega = 0,47$, $\epsilon_i^c = 0,13\%$.

Отметим, что интенсивность напряжений σ_i в центрах указанных элементов к моменту появления трещины в обоих вариантах разбивки уменьшается примерно на одну и ту же величину (в отличие от σ_x) и достигает, соответственно, 92,0 и 90 МПа. Если оценивать длительную прочность по значению $\sigma_i = 92$ МПа, то по разным источникам получается следующее время до разрушения: $1,8 \cdot 10^6$ [8]; $1,5 \cdot 10^6$ ч [9]. В одномерном случае при напряжении 92 МПа в расчетах по уравнениям ползучести и повреждаемости материала определяется время до разрушения $1,7 \cdot 10^6$ ч.

Далее трещиноподобный дефект развивается, что моделируется «выбрасыванием» конечных элементов с предельной поврежденностью. «Выброшенным» элементам присваивается 100%-я поврежденность.

При $t = 899337$ ч (через 75093 ч после возникновения) при грубой разбивке и при $t = 1034440$ ч (через 19960 ч) при мелкой разбивке трещина выходит на поверхность диска (освобо-





дается первый элемент, граничащий с боковой поверхностью). При этом изолинии модуля векторного параметра поврежденности в рассматриваемом сечении имеют вид (рис. 7).

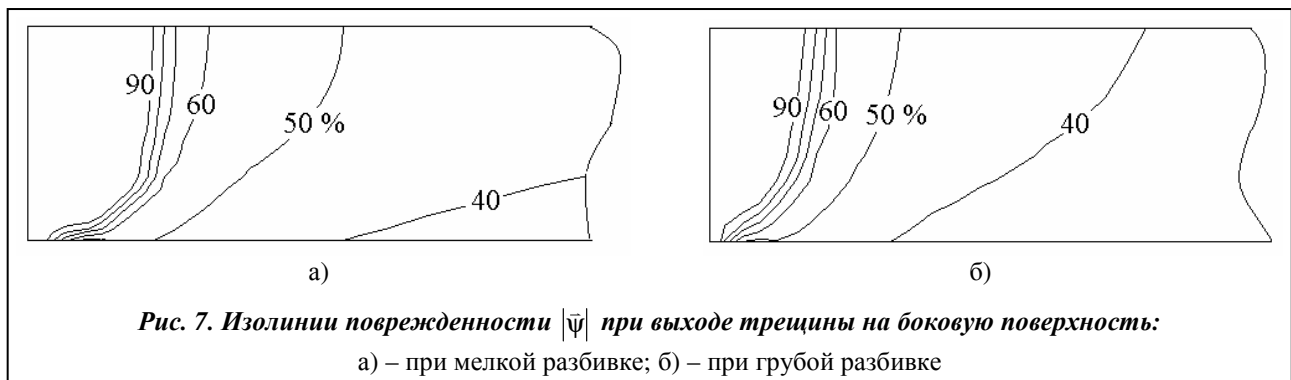
Трещина приобретает полуэллиптическую форму и при мелкой разбивке оказывается более глубокой, чем при грубой, что объясняется большей поврежденностью металла (рис. 5) на момент ее образования.

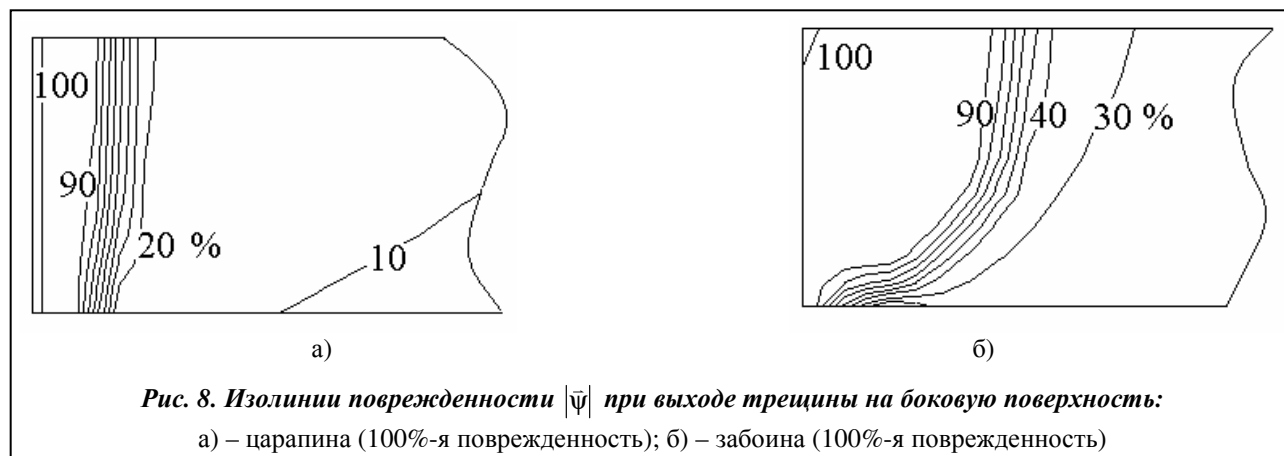
После выхода трещины на боковую поверхность диска ее рост осуществляется так. При грубой разбивке второй элемент, принадлежащий боковой поверхности диска, устраняется через 2305 ч, третий – через 2982, четвертый – через 3853 ч. Увеличение времени подрастания связано с увеличением размеров конечных элементов по мере удаления от поверхности отверстия (рис. 3, б). При мелкой разбивке трещина вначале очень быстро растет, и за 20 ч она охватывает следующие четыре элемента. При этом в последних элементах происходит скачкообразное увеличение $|\bar{\psi}|$ до предельного значения (осуществляется «долом» этих элементов). После того как трещина приобретает форму полуэллипса, ее рост несколько замедляется.

Таким образом, в материале без начальных дефектов трещина появляется в центре диска примерно через $1 \cdot 10^6$ ч при мелкой разбивке (через $8 \cdot 10^5$ ч при грубой), растет в течение $2 \cdot 10^4$ ч ($7 \cdot 10^4$ ч) до выхода на боковую поверхность диска, а затем начинает быстро увеличиваться. Последней стадией роста трещины при оценке ресурса можно пренебречь и считать ресурс близким $1 \cdot 10^6$ ч ($9 \cdot 10^5$ ч). Учитывая относительно небольшой разброс данных по времени, дальнейший анализ роста трещин при наличии дефектов на поверхности разгрузочного отверстия осуществлялся при грубой конечно-элементной разбивке обода.

Начальный дефект поверхностного слоя металла отверстия задается в виде одного или нескольких конечных элементов по толщине диска (направление z), глубине (направление y) и высоте (направление x) с заданной степенью поврежденности (от 0 до 1,0).

На рис. 3, б отмечен элемент, моделирующий забоину, лежащую в слое А. Если элемент, моделирующий забоину, имеет 100%-ю начальную поврежденность, то трещина начинает развиваться через 296247 ч и выходит на поверхность при $t = 560346$ ч, т. е. растет в течение 264099 ч. При этом предельно поврежденными (выброшенными) оказываются 52 элемента, а сама трещина оказывается более глубокой (рис. 6, а), чем в случае, когда материал не имеет дефектов (рис. 5, б).





Царапина на поверхности отверстия, проходящая по всей толщине диска, моделируется первым рядом конечных элементов, выделенных на рис. 3, для которых задается начальная поврежденность. При 100%-й поврежденности указанных элементов трещина продвигается на один элемент в центральной части диска через 141010 ч, а на боковой поверхности – через 32594 ч после этого (при $t = 173604$ ч). Распределение изолиний $|\psi|$ в сечении А (рис. 3) к началу движения трещины показано на рис. 8.

Скорость роста трещины далее возрастает. Если на величину второго элемента на поверхности диска трещина продвигается за 53456 ч, то на длину третьего – за 27226, а четвертого – за 15564 ч.

При 80%-й поврежденности элементов, моделирующих царапину, трещина начинает расти через 188988 ч, начиная с затемненного элемента, и на боковую поверхность выходит через 41893 ч после начала ее роста. Далее она ускоренно прорастает.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1, где Δt – время, за которое трещина выходит на боковую поверхность диска (освобождается первый элемент боковой поверхности): $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ – время, за которое трещина подрастает на величину, соответственно, второго, третьего и четвертого элементов боковой поверхности.

В седьмой строке таблицы над чертой указано полное время роста трещины, под чертой – время подрастания трещины на три элемента боковой поверхности диска, а в восьмой строке дан его ресурс (над чертой – с учетом, под чертой – без учета времени подрастания трещины на боковой поверхности диска).

Таблица 1. Характеристики роста трещин ползучести и ресурс диска при наличии дефектов на поверхности разгрузочных отверстий

Стадии развития трещины	Время, ч			
	Материал без дефектов	Материал с начальным дефектом		
		забоина, 100%-я поврежденность	царапина, 100%-я поврежденность	царапина, 80%-я поврежденность
появление трещины	824244	296247	141010	188988
выход на поверхность	899337	560346	173604	230881
Δt	75093	264099	32594	41893
Δt_1	2305	235	53456	121790
Δt_2	2982	332	27226	36355
Δt_3	3853	75	15564	18988
рост трещины	<u>84233</u>	<u>264741</u>	<u>128840</u>	<u>219026</u>
	9140	642	96246	177133
ресурс	<u>900000</u>	<u>550000</u>	<u>250000</u>	<u>400000</u>
	900000	550000	170000	230000

В материале с дефектами дольше всего зарождавшаяся трещина растет до выхода на поверхность при наличии забоины, которая служит локальным концентратором напряжений. Рассеянные повреждения начинают накапливаться в районе концентратора, а после появления трещины распространяются по диску. В материале с царапиной источник концентрации более протяженный, и вначале повреждается материал вдоль царапины по всей толщине диска. В материале без дефектов до момента зарождения трещины повреждается обширная область в районе отверстия, и образовавшаяся трещина растет быстрее, чем при наличии забоины.

Из табл. 1 следует, что для материала без начальных дефектов и для материала с забоиной (100%-я поврежденность – рис. 8, б) время роста трещины после ее выхода на боковую поверхность мало по сравнению со временем до момента выхода. Поэтому за полный ресурс ротора можно принять время появления трещины на боковой поверхности диска. Для царапины время роста трещины после ее выхода на боковую поверхность весьма значительно, и его можно включить в полный ресурс после соответствующей корректировки, связанной с тем, что на рост трещины существенное влияние оказывают циклические нагрузки, вызываемые пусками-остановами турбины. Поэтому полным ресурсом ротора все же целесообразно считать время появления трещины на боковой поверхности диска. В [2] при расчетной оценке времени живучести роторов и корпусных деталей турбин критическим размером трещины считается размер, при котором трещина становится сквозной или начинается лавинообразное разрушение конструкции. При определении допустимого времени роста трещины от начальной глубины до критических размеров как один из критериев используется время живучести с учетом коэффициента запаса по времени, изменяющегося от 2,5 до 5,0.

Если за критическое время принять время выхода трещины на боковую поверхность, а коэффициент запаса по времени принять равным 2,5 (учитывая невысокую опасность разрушения этой зоны), то величины Δt в таблице примут следующие значения: 30037; 105640; 13038; 92352 ч.

Воспользовавшись временной зависимостью коэффициента запаса по повреждениям от ползучести [2], можно определить допустимое время до зарождения трещин ползучести. Согласно [2] значения времен, указанные в первой строке табл. 1, должны быть уменьшены соответственно в 4,1; 4,7; 6,2; 5,6 раза и станут равными: 201035; 63031; 22743; 33748 ч. Допустимое время зарождения и роста трещин в роторе при наличии различных дефектов поверхностного слоя разгрузочных отверстий диска приводится в табл. 2.

Таблица 2. Допустимый ресурс ротора с дефектами поверхности разгрузочных отверстий

Стадии развития трещины	Допустимое время, ч			
	Материал без дефектов	Материал с начальным дефектом		
		забоина, 100 %-я поврежденность	царапина, 100 %-я поврежденность	царапина 80 %-я поврежденность
зарождение или страгивание	201035	63031	22743	33748
рост	30037	105640	13038	92352

Округленно полные допустимые значения ресурса ротора могут быть приняты равными 231000; 170000; 36000; 125000 ч.

Выводы

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что наличие начальных дефектов на поверхности разгрузочных отверстий значительно сокращает время до зарождения трещины и выхода ее на боковую поверхность диска. Наличие забоины на оси симметрии диска может более чем в два раза уменьшить время до начала роста трещины, а царапина, проходящая по всей толщине диска, почти в шесть раз сокращает процесс зарождения трещины. При этом, чем протяженнее по толщине диска дефект, тем более вытянутой становится трещина. Приведенные результаты служат сравнительной оценкой влияния на ресурс диска начальных дефектов на поверхности разгрузочных отверстий, что необходимо учитывать при прогнозировании ресурса роторов с указанными возможными начальными дефектами.

Литература

1. Костюк, А. Г. Прочность цельнокovaných роторов турбин мощностью 200, 300 и 800 МВт производства ЛМЗ при длительном статическом нагружении / А. Г. Костюк, А. Д. Трухний // Теплоэнергетика. – 2004. – № 10. – С. 45–52.
2. *Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін: СОУ-Н МЕНВ 40.1-21677681-52:2011.* – К.: М-во енергетики та вугільної пром. України, 2011. – 42 с. – (Нормативний документ Міненерговугілля України. Методичні вказівки).
3. *Турбины паровые стационарные. Расчет на статическую прочность дисков и роторов: ОСТ 108.020.109-82.* – Взамен ОСТ 108.020.109-76. – Л.: НПО ЦКТИ, 1983. – 22 с.
4. *Расчетная оценка длительной прочности дисков ротора паровой турбины / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин, Н. Г. Гармаш // Пробл. прочности.* – 2010. – № 4. – С. 77–86.
5. *Шульженко, Н. Г. Задачи термочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований): монография / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Б. Ф. Зайцев.* – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co.KG, 2011. – 370 с.
6. *Шульженко, Н. Г. Оценка длительной прочности роторов паровых турбин на основе анализа рассеянных повреждений / Н. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровский, Ю. И. Матюхин // Пробл. машиностроения.* – 2007. – Т. 10, № 4. – С. 71–81.
7. *Розрахункова оцінка живучості пластин при повзучості з використанням параметрів розсіяного пошкодження. В 2 ч. Ч. 1 / М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Ю. І. Матюхін, С. І. Панасенко // Вісн. Тернопіль. нац. техн. ун-ту. Спец. випуск.* – 2011. – С. 47–54.
8. *Резинских, В. Ф. Увеличение ресурса длительно работающих паровых турбин / В. Ф. Резинских, В. И. Гладштейн, Г. Д. Авруцкий.* – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 296 с.
9. *Анализ и обобщение служебных характеристик роторной стали 25X1M1ФА (P2MA) в исходном состоянии. Работа № 510-1917 / ПО турбостроения «Ленинградский металлический завод».* – Л.: ПО ЛМЗ, 1986. – 102 с.

Поступила в редакцию 25.05.15

Ш. Г. Гасанов,

д-р. техн. наук

Азербайджанский

технический

университет

Азербайджан,

г. Баку,

e-mail: iske@mail.ru

УДК 539.375

ВОЗДЕЙСТВИЕ МАЛЫХ ВЫТОЧЕК И УТОЛЩЕНИЙ НА РОСТ КОГЕЗИОННОЙ ТРЕЩИНЫ В ПЛАСТИНЕ, РАСТЯГИВАЕМОЙ ДВУМЯ СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ СИЛАМИ

Розглядається тонка ізотропна пластина постійної товщини повсюди, за винятком деяких областей $S1$ та $S2$ поблизу кінців наскрізної прямолінійної тріщини зі зв'язками між берегами на продовженні тріщини. Пластина розтягується двома зосередженими силами. Вважається, що процес руйнування локалізовано в кінцевій зоні, що розглядається як частина тріщини і може порівнюватися з розміром тріщини. Досліджується плоска задача механіки руйнування відносно гальмування когезійної тріщини малими змінами товщини матеріалу на шляху її зростання. Крайова задача відносно рівноваги когезійної тріщини в пластині під впливом зовнішніх розтягувальних сил зводиться до розв'язання нелінійного сингулярного інтегрального рівняння. Із розв'язання цього рівняння знайдено напруження в зв'язках. Розглянуто найбільші поширені на практиці форми виточок та стовщень.

Введение

В механике хрупкого разрушения проблема «залечивания» существующей в материале трещины получила особое внимание. Проблема торможения трещин имеет научное и важное практическое значение, так как ее решение позволяет продлить срок эксплуатации разнообразных конструкций и изделий практически во всех областях современной техники, а главное избежать катастроф, связанных с внезапным разрушением [1]. Вызывает интерес оценка эффективности использования локальных изменений в толщине вблизи конца трещины на ограничения роста трещин в тонкостен-