

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.191.33

УДЕЛЬНЫЕ ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА ОБРАЗОВАНИЕ И РОСТ ТРЕЩИНЫ В РОТОРНОЙ СТАЛИ ЭИ-415 НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

© В. И. Гладштейн¹

Статья поступила 11 февраля 2014 г.

Описана методика определения удельной энергии разрушения по величине раскрытия трещины, соответствующего окончанию каждой из трех стадий ползучести. Развитие трещины в образцах отслеживалось косвенно, по ее раскрытию во время испытания. Разработаны критерии и признаки, по которым определенные стадии ползучести можно связать с соответствующими фазами развития трещины. Временные границы основных стадий ползучести находились с помощью статистической оценки характерных особенностей кинетики раскрытия трещины. Проведено сравнение времени начала роста трещины, определенного по кривой раскрытия трещины и рассчитанного по соотношению длин трещин, образовавшихся в трех надрезах образца. Расчет трещиностойкости базировался на учете составляющих удельной энергии разрушения с использованием рекомендаций стандарта для статического нагружения при умеренной температуре. Значения J -интеграла и условной величины коэффициента интенсивности напряжений оценены по величинам раскрытия надреза в моменты начала роста трещины и перехода к стадии долома, а также длины трещины на изломе. Определены параметры зависимости трещиностойкости от температуры и времени нагружения, постоянные кинетического уравнения развития трещины. Результаты оценки трещиностойкости на цилиндрических образцах сопоставлены с ранее полученными на образцах типа СТ-1.

Ключевые слова: трещиностойкость; металл; ползучесть; образец; надрез; раскрытие трещины; долом; коэффициент интенсивности напряжений; J -интеграл; ротор.

Для обеспечения надежности высокотемпературных деталей энергооборудования необходимо создание системы безопасности, включающей оценку ресурса с учетом возможного ослабления несущего сечения дефектами [1]. В такой системе для оценки ресурса должны использоваться базовые характеристики конструкционных материалов, в первую очередь трещиностойкость в условиях ползучести. В то же время методика определения характеристик трещиностойкости металла в условиях ползучести в настоящее время не вполне отработана.

При оценке трещиностойкости в условиях ползучести следует учитывать, что значительный вклад в расход энергии может вносить работа внешних сил, реализуемая при накоплении деформации ползучести в нагруженном сечении. Работа же упругих напряжений, характеризуемая величиной КИН, — только часть энергии, требующейся для образования и развития трещины. Соотношение этих составляющих удельной энергии зависит от материала и условий нагружения, особенности напряженного состояния образца. В стандарте по определению характеристик

трещиностойкости [2], который разработан для статического нагружения в условиях умеренных температур, когда ползучесть отсутствует, значение J -интеграла вычисляют как сумму указанных выше составляющих удельной энергии.

Целью данного исследования явилась разработка методики определения удельных энергий по величинам раскрытия, соответствующим окончанию каждой из трех стадий разрушения (зарождения трещины, докритического роста и долома, и определение с их помощью соответствующих характеристик трещиностойкости.

Исследовали металл ротора из стали ЭИ-415², отработавшего 137 тыс. ч на одной из турбин К-160-130 Иркутской ТЭЦ-10. Из исследуемого материала изготовлены роторы высокого давления турбин мощностью 160 и 300 МВт. Рабочая температура ротора в зоне вырезки металла сравнительно небольшая (300 – 400 °С), поэтому фактор влияния наработки на

² Материал для исследования предоставлен докт. техн. наук В. Ф. Резинских, канд. техн. наук А. М. Клыпиной и инженером Л. Д. Чистяковой.

¹ ОАО «ВТИ», Москва, Россия; e-mail: resurtec@mail.ru

изменение прочностных характеристик, по-видимому, был несущественный.

Химический состав металла соответствовал техническим условиям (табл. 1), характер микроструктуры — принятой для этой стали термообработке: отпущенный бейнит при полном отсутствии структурно-свободного феррита. Размер зерна 4 балла, распределение карбидов в зерне и по границам равномерное, размер карбидов 0,2 – 1 мкм.

Механические свойства металла ротора при комнатной температуре (20 °С) соответствовали требованиям к металлу в состоянии поставки, за исключением немного превышенного (778 МПа) предела текучести (норма 736 МПа). Пластичность металла отвечала норме: относительное удлинение — 16,2 %; относительное сужение — 49,6 %, твердость — 269 – 285 НВ, в среднем — 274,3 НВ.

Методика определения удельных энергозатрат на образование и рост трещины заключалась в испытании на длительную прочность цилиндрических образцов с острым надрезом, регистрации раскрытия надреза до разрушения образца, определении приращенного раскрытия на каждой из стадий разрушения и расчете удельной энергии с учетом величины напряжений и размера образовавшейся трещины. На образце, кроме основного, имелись еще два вспомогательных надреза меньшей глубины, у основания которых после испытания металлографическим путем определяли длину трещин для расчета времени начала их роста. Особенность методики оценки трещиностойкости состояла в том, что развитие трещины в образцах контролировалось косвенно: по ее раскрытию во время испытания и после испытания — по соотношению длин трещин (l_m), образовавшихся в трех ($m = 1, 2, 3$) надresaх образца. Кроме того, априорно принимался ряд допущений, в частности, предполагалось, что образование трещины у дна надresa происходило к окончанию стадии уменьшающейся скорости раскрытия, а момент начала долома сопровождается мгновенным увеличением скорости раскрытия. В процессе проведения работы были получены результаты, подтверждающие указанные предположения.

Испытание цилиндрических образцов на длительную прочность осуществлялось при температурах t , равных 517, 550 и 594 °С, диаметр гладкой части образцов $D = 16$ мм, диаметр основного надresa $d_0 = 9,4 \pm 0,05$ мм с относительной начальной полнотой в сечении $\varphi_0 = d_0/D = 0,585$, радиус притупления надresa — менее 0,05 мм.

Диаграмма раскрытия, полученная с помощью датчика, прикрепленного к основанию самого глубокого надresa, анализировалась для определения продолжительности τ_n периода перехода от первой стадии (с уменьшающейся скоростью раскрытия) ко второй — ускоренной и соответствующей ей величины раскрытия δ_n ; продолжительности ускоренной стадии τ_p и прироста раскрытия $\Delta\delta_p$, длительности стадии долома $\tau_{кр}$ и прироста раскрытия на этой стадии $\Delta\delta_d$; критической величины δ_c в момент разрушения.

Для количественной обработки весь период испытания делился на примерно равные промежутки времени τ_{i+1} и τ_i , для которых устанавливалась скорость изменения раскрытия $\dot{\Delta}_i = (\delta_{i+1} - \delta_i)/(\tau_{i+1} - \tau_i)$ или ее логарифм.

Длительность начальной стадии ползучести τ_n , когда в координатах $\lg \dot{\Delta} - \tau$ скорость раскрытия $\lg \dot{\Delta}$ убывает, сравнивалась с временем τ_{a1} зарождения трещины, рассчитанной по соотношению длин трещин, определенных металлографически и по излому у окончания трех надresaх образца [3]. За время долома $\tau_{кр}$ принимался период резкого увеличения скорости раскрытия $\lg \dot{\Delta}$, установленный также по зависимости $\lg \dot{\Delta} - \tau$. В качестве критерия перехода ползучести в другую стадию использовалась величина $\delta_i \tau_i / \delta_c \tau_b$ [4].

Средняя скорость роста трещины v_1 в сечении главного надresa определялась из соотношения

$$v_1 = l_1 / (\tau_b - \tau_n). \quad (1)$$

Критическое значение $J_{сн}$ [2] оценивалось по двум составляющим:

$$J_{сн} = J_{Ani} + J_{K_n^*}, \quad (2)$$

где J_{Ani} — критическое значение, соответствующее работе A_{nc} , потребовавшейся для продвижения трещины на определенной стадии ($J_{Ani} \approx A_{nc} \approx \sigma_n \delta$ [5]); $J_{K_n^*}$ — удельная работа упругих сил, которая определяется по величине K_n^* при начале роста трещины, докритическом росте и доломе соответственно. По полученным значениям $J_{сн}$ вычислялись $K_{сн}$:

$$K_{сн} = \sqrt{\frac{J_{сн} E}{1 - \mu^2}}. \quad (3)$$

Расчетные соотношения для определения указанных величин на каждой стадии ползучести приведены в табл. 2.

Таблица 1. Химический состав металла ротора (сталь ЭИ-415) с наработкой 137 тыс. ч

Источник	Содержание элементов, %										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	W
Анализ металла ротора	0,19	0,23	0,50	0,017	0,011	2,8	0,50	—	0,83	0,83	0,40
ТУ 108.1029-81	0,17 – 0,24	≤0,40	0,25 – 0,60	≤0,025	≤0,022	2,40 – 3,30	0,35 – 0,55	≤0,50	≤0,20	0,60 – 0,85	0,30 – 0,50

На начальной стадии и на стадии долома нетто-напряжения в сечении надреза (трещины) считались постоянными. На стадии роста трещины эти напряжения непрерывно возрастали. Поскольку непосредственное наблюдение за ростом трещин отсутствовало, средняя скорость в самом глубоком надрезе сопоставлялась с условным эффективным значением КИН (K_p^*) для стадии докритического роста трещины, которое рассчитывалось по формуле [6]

$$K_p^* = PD^{-3/2}Y_{эф}, \tag{4}$$

где

$$Y_{эф} = (1,72/\varphi_{эф}) - 1,27. \tag{5}$$

В свою очередь, для оценки $\varphi_{эф}$, по аналогии с определением эффективного напряжения при релаксации напряжений использовалось соотношение

$$\varphi_{эф} = \frac{\varphi_{01} \varphi_{кр}}{\sqrt{0,33\varphi_{01}^2 + 0,67\varphi_{кр}^2}}, \tag{6}$$

где $\varphi_{кр} = \sqrt{ab}/D$; a и b — оси зоны долома, имеющей очертания эллипса.

Для описания условия начала роста трещины с учетом возможности немонотонной зависимости энергозатрат от длительности нагружения величина $K_{сн}$ была представлена в виде полиномиальной зависимости от параметра жаропрочности $P_{дп}$, соответствующего времени начала роста трещины при температуре испытания:

$$\lg K_{сн} = \alpha_1 P_{дп}^2 + \alpha_2 P_{дп} + \alpha_3, \tag{7}$$

$$P_{дп} = T(\lg \tau_n - 2 \lg T + A_1). \tag{8}$$

Линейная часть левой ветви зависимости (7)

$$\lg K_{сн} = \alpha P_{дп} + \beta, \tag{9}$$

где $K_{сн}^t$ — коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м^{0,5}; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha$ и β — постоянные материала; T — температура, К; $A_1 = 25$ — постоянная материала.

Вязкость разрушения $K_{сд}$ анализировалась в зависимости от параметра жаропрочности $P_{дп}$ по аналогии с выражениями (7) – (9).

Определялась зависимость температурно-скоростного параметра $P(v, T)$ от эффективного значения КИН — K_p :

$$P(v, T) = \gamma \lg K_p + \lambda, \tag{10}$$

$$P(v, T) = T(A_2 - \lg v - 2 \lg T), \tag{11}$$

где v — средняя скорость роста трещины за период, взятый с окончания начальной стадии, мм/ч; γ и λ — постоянные материала; $A_2 = 16$ — постоянная материала.

По формуле (11) путем подстановки значений температуры устанавливалась кинетическая зависимость типа

$$v = 10^{R_1} (K_p)^r, \tag{12}$$

где R_1 и r — постоянные материала и температуры. Эти постоянные определяются по следующим соотношениям:

$$R_1 = -\lambda/T - 2 \lg T + A_2, \tag{13}$$

$$r = -\gamma/T. \tag{14}$$

Формулы, приведенные в табл. 2, пригодны лишь для условий относительно хрупкого разрушения образца. Поэтому пределом их применимости является граница возможности рассмотрения длительной прочности на основе моделей вязкого и хрупкого разрушения растягиваемого стержня в условиях ползучести.

В связи с этим в качестве критерия было принято отчетливое проявление на изломе зоны докритического роста трещины. Относительная величина этой зоны определяется по разности $\psi_0 - \psi_{кр}$, где $\psi_0 = \varphi_0^2$ и $\psi_{кр} = \varphi_{кр}^2$. Соответственно, в качестве критерия отбраковки результатов испытаний образцов, рассматриваемых по формулам табл. 2, до накопления опыта была принята следующая пограничная величина этой разности:

$$\psi_0 - \psi_{кр} \geq 0,2. \tag{15}$$

Таблица 2. Расчетные формулы для определения удельных энергозатрат на развитие трещины на разных стадиях ползучести

Стадия ползучести	От упругих сил		От деформации ползучести	
	J_K	Расчетное соотношение	A_C	Расчетное соотношение
Начальная	$J_{K_n}^*$	$K_n^* = PD^{-3/2}Y_0$, где $Y_0 = 1,72/\sqrt{\varphi_0} - 1,27$	A_{C_n}	$J_{A_n} = \sigma_n \delta_n / 1000$
Ускоренная	$J_{K_p}^*$	$K_p^* = PD^{-3/2}Y_{эф}$, где $Y_{эф} = 1,72/\sqrt{\varphi_{эф}} - 1,27$, $\varphi_{эф} = \frac{\varphi_0 \varphi_{кр}}{\sqrt{0,33\varphi_0^2 + 0,67\varphi_{кр}^2}}$	A_{C_p}	$J_{A_p} = \Delta \delta_p \varphi_{эф} / 1000$, где $\varphi_{эф} = P/(\varphi_{эф})^2$
Долом	$J_{K_d}^*$	$K_d^* = PD^{-3/2}Y_{кр}$, где $Y_{кр} = 1,72/\sqrt{\varphi_{кр}} - 1,27$	A_{C_d}	$J_{A_d} = \sigma_{кр} \Delta \delta_d / 1000$

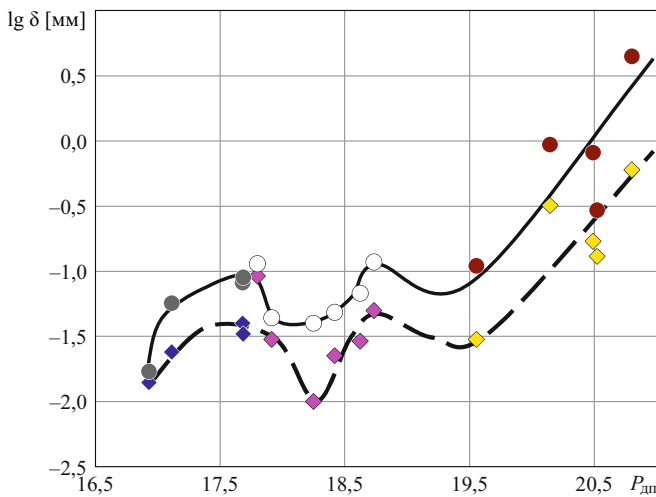


Рис. 1. Зависимости раскрытия надреза от величины параметра жаропрочности: $\blacklozenge, \blacklozenge, \blacklozenge$ — начальная стадия при температурах 517, 550 и 594 °С; \bullet, \circ, \bullet — стадия разрушения при тех же температурах

Всего было испытано больше десяти образцов, максимальная длительность испытаний достигла 73 тыс. ч. Установлено, что по особенностям изменения раскрытия надреза в зависимости от величины параметра жаропрочности можно выделить две зоны (рис. 1). Для первой зоны ($P_{дп} = 16,8 - 19,5$) характерно волнообразное изменение δ_c преимущественно в пределах 0,08 – 0,12 мм, при $P_{дп} > 19,5$ происходит быстрый рост критического раскрытия, возможно, указывающий на изменение механизма разрушения.

На рис. 2 показаны кривые ползучести двух образцов с надрезом, испытанных в двух указанных диапазонах $P_{дп}$. Здесь обозначены три участка, напоминающие картину кривой ползучести гладкого образца. Хорошо заметны отличительные особенности кинетики роста раскрытия в зависимости от величины $P_{дп}$.

При температуре 550 °С, когда $P_{дп} = 16,8 - 19,5$, на начальном этапе (примерно 25 % долговечности) раскрытие достигло 0,1 мм (более 80 % от величины δ_c), затем темп его увеличения резко уменьшился (см. рис. 2, а). В области значений $P_{дп} > 19,5$ (температура 594 °С) пропорция обратная — на начальной стадии (~30 % от τ_b) раскрытие составило не более 20 % от δ_c , затем постепенно увеличивалось (см. рис. 2, б). Стадия долома в обоих случаях почти не просматривается, возможно, из-за ее скоротечности — менее 6 – 8 ч.

На рис. 3 показана зависимость скорости раскрытия от времени нагружения. При температуре 550 °С (см. рис. 3, а) разброс скорости на начальном участке гораздо больше ($R^2 = 0,0044$, т.е. очень мал), чем на участке развития ($R^2 = 0,0116$, т.е. в три раза больше). Кроме того, происходит изменение знака зависимости скорости раскрытия от времени: на начальном этапе — минус, на стадии развития — плюс.

При 594 °С (см. рис. 3, б) наблюдается скачок изменения скорости раскрытия при окончании начального периода. В пределах начального периода до

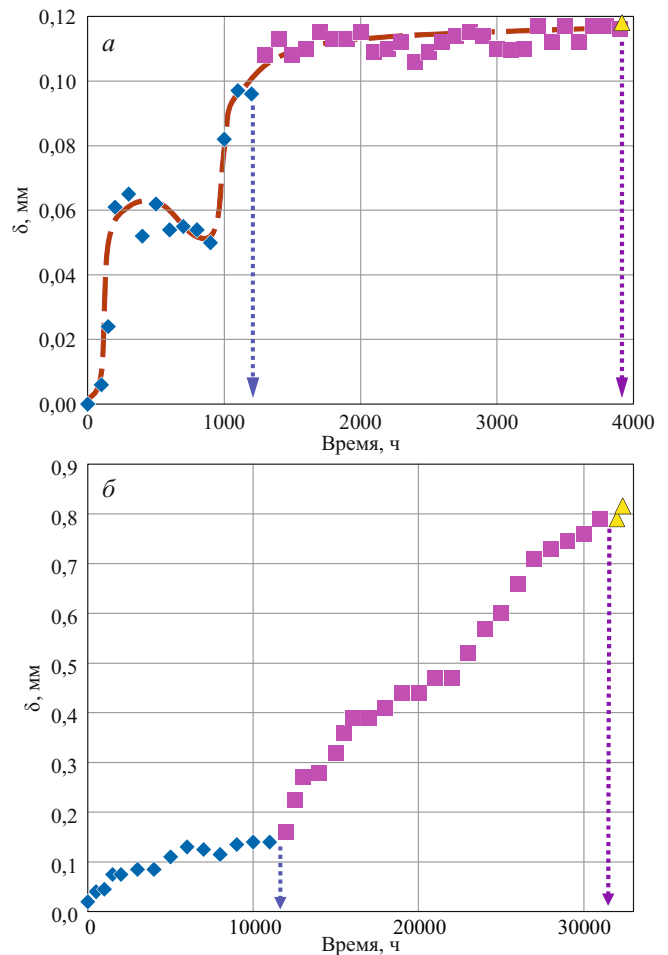


Рис. 2. Раскрытие надреза (трещины) в процессе испытания образцов с надрезом из стали ЭИ-415: а — 550 °С ($\sigma_n = 198$ МПа, $\tau_b = 3915$ ч); б — 594 °С ($\sigma_n = 118$ МПа, $\tau_b = 32352$ ч); $\blacklozenge, \blacksquare, \blacktriangle$ — начальная стадия, развитие, долом соответственно

12 тыс. ч логарифм скорости раскрытия $\dot{\Delta}$ убывает по закону

$$\lg \dot{\Delta} = -3 \cdot 10^{-5} \tau - 4,6031. \quad (16)$$

Малая величина квадрата коэффициента корреляции ($R^2 = 0,4194$) свидетельствует о случайности структурных процессов локального наклепа металла. В период развития трещины скорость раскрытия также убывает, но ее величина больше почти на порядок:

$$\lg \dot{\Delta} = -3 \cdot 10^{-5} \tau - 3,7931. \quad (17)$$

Возможно, прирост трещины идет неодинаково по окружности надреза, что понижает коэффициент корреляции: $R^2 = 0,131$.

Несмотря на различное поведение рассмотренных зависимостей выделить начальную стадию на кривой раскрытия технически не сложно.

Учитывая, что напряжения разрушения монотонно убывают с ростом параметра жаропрочности, можно ожидать, что удельная энергоёмкость, соответствующая началу роста трещины и долома, и пред-

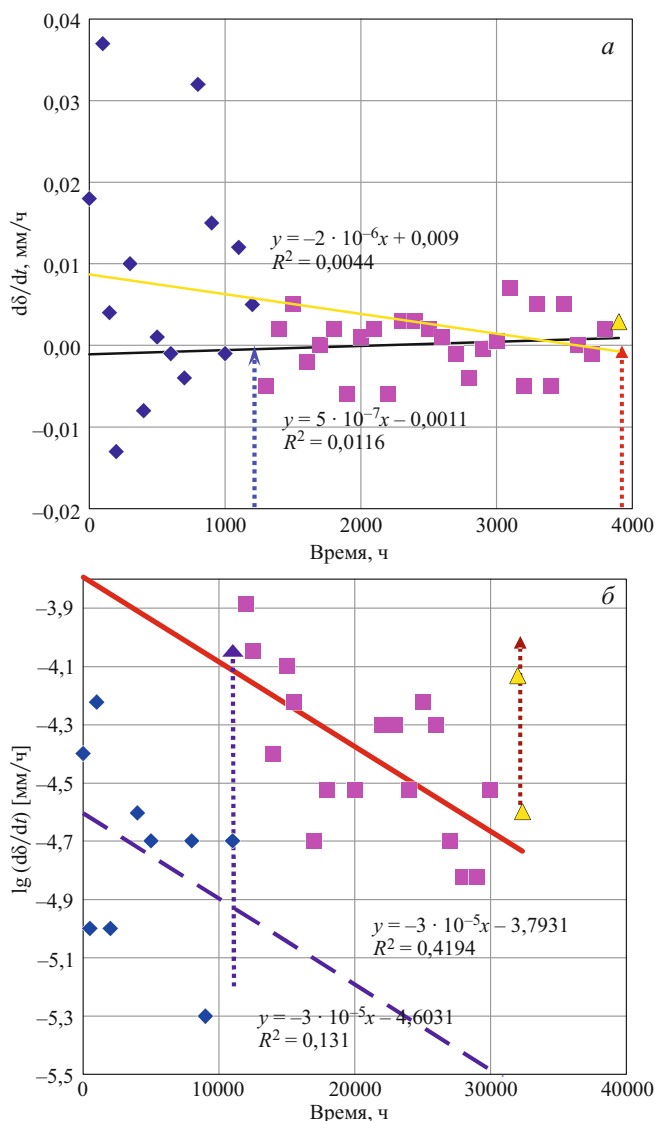


Рис. 3. Скорость раскрытия трещины в образцах из стали ЭИ-415 в зависимости от времени нагружения: *a* — 550 °С ($\sigma_n = 196$ МПа, $\tau_b = 3915$ ч); *б* — 594 °С ($\sigma_n = 118$ МПа, $\tau_b = 32352$ ч); \blacklozenge , \blacksquare , \blacktriangle — начальная стадия, развитие, долом соответственно

ставляющая собой произведение раскрытия на нетто-напряжение, будет иметь минимум примерно при $P_{дп} \approx 19,5$.

Данные по сопротивлению началу роста трещины, рассчитанные по соотношению из табл. 2, аппроксимируются в координатах $\lg K_{сн} - P_{дп}$ полиномиальной зависимостью (7) с экстремумом; коэффициенты

Таблица 3. Значения сопротивления началу роста трещины $K_{сн}$, МПа \cdot м^{0,5} стали ЭИ-415

Температура, °С		
506	525	535
41/35/33	36/31/29	34/29/27

Примечание. Коэффициенты уравнения (9): $\alpha = -0,1245$; $\beta = 3,8664$; $R^2 = 0,3711$. Через косые приведены значения $K_{сн}$, соответствующие длительностям нагрузки 10^4 , $5 \cdot 10^4$ и 10^5 ч.

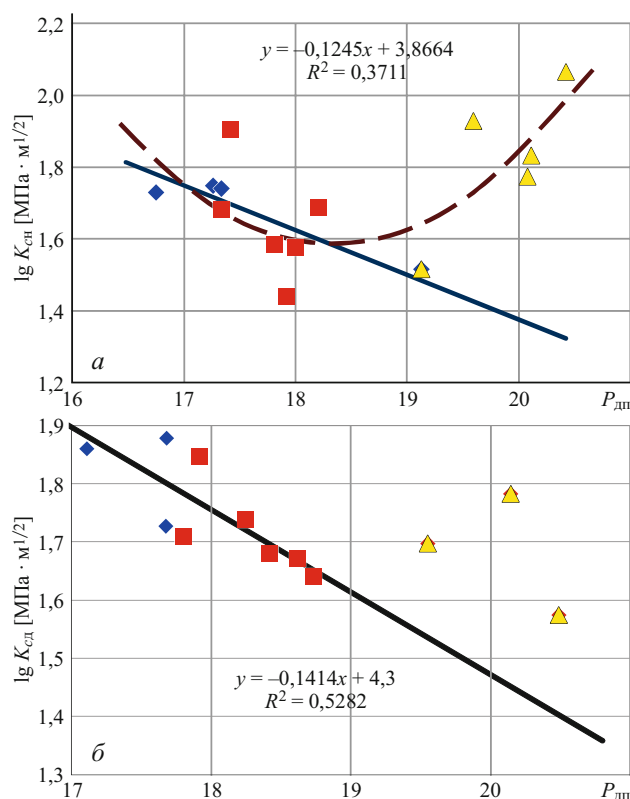


Рис. 4. Зависимости сопротивления началу роста трещины (*a*) и вязкости разрушения (*б*) стали ЭИ-415 от параметра жаропрочности; \blacklozenge , \blacksquare , \blacktriangle соответствуют температурам испытания 517, 550, 594 °С

$\alpha_1 = 0,0935$, $\alpha_2 = 3,4326$; $\alpha_3 = 33,114$, $R^2 = 0,5173$ (рис. 4).

В связи с образованием у образцов, разрушившихся при $P_{дп} \geq 19,5$, вязкого излома практически без образования межзеренной трещины условие (15) соблюдается только на нисходящей части зависимости на рис. 4, *a*. Поэтому расчет КИН имеет физический смысл только для образцов, точки от которых находятся на нисходящей ветви трещиностойкости. В пределах $P_{дп} = 18,0 - 19,3$ нисходящую левую ветвь этой зависимости можно представить линейным соотношением с коэффициентами $\alpha = -0,1245$; $\beta = 3,8664$; $R^2 = 0,3711$.

Учитывая, что роторы из стали ЭИ-415 установлены на турбинах К-300-240 ХТЗ, работающих при температуре 545 °С и давлении 24 МПа свежего пара, представляют интерес значения $K_{сн}$ на периоды 10^4 , $5 \cdot 10^4$ и 10^5 ч при температуре 506 °С, которую имеет металл на ободке диска регулирующей ступени высокого давления; они равны 41,35 и 33 МПа \cdot м^{0,5} соответственно (табл. 3). Без учета деформации ползучести сопротивление началу роста трещины (только упругая составляющая) будет более чем в три раза меньше: примерно $10 - 13$ МПа \cdot м^{0,5}.

Зависимость вязкости разрушения $K_{сд}$ от $P_{дп}$ также имеет ожидаемый минимум при $P_{дп} \approx 19,5$. В связи с условием (15) физический смысл имеют

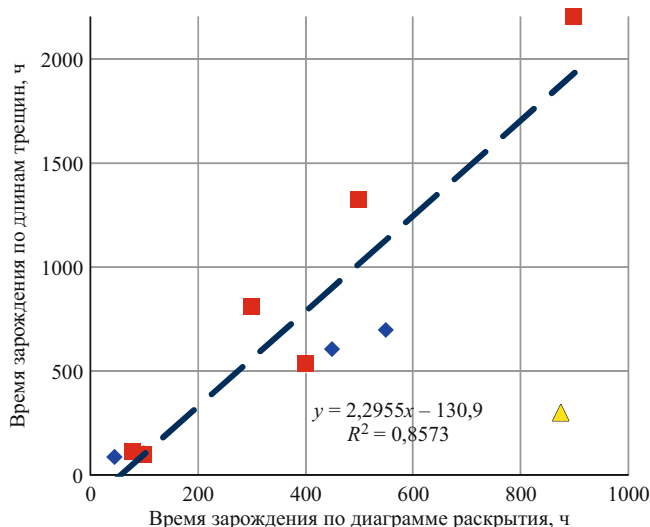


Рис. 5. Соотношение длительностей инкубационного периода до начала роста трещины, определенных по диаграмме раскрытия и по соотношению длин трещин в надрезах образцов из стали ЭИ-415; \blacklozenge , \blacksquare , \blacktriangle соответствуют температурам испытания 517, 550 и 594 °С

величины на прямой, представляющей левую ветвь этой зависимости (рис. 4, б). Коэффициенты соответствующего линейного выражения следующие (табл. 4): $\alpha = -0,1414$; $\beta = 4,3$; $R^2 = 0,5282$. На периоды 10^4 , $5 \cdot 10^4$ и 10^5 ч при температуре 506 °С значения $K_{сд}$ равны 55, 46 и 43 МПа · м^{0,5} соответственно.

При определении средней скорости роста трещины в сечении самого глубокого надреза из общей долговечности образца вычиталась продолжительность начальной стадии раскрытия τ_n , принятой за время зарождения трещины. Время до начала роста трещины определялось также (как упоминалось выше) по соотношению длин трещин в надрезах по величине КИН — τ_{a1l} . Соотношение продолжительностей инкубационного периода, определенных двумя способами, показано на рис. 5. Видно, что при температурах 517 и 550 °С эти продолжительности закономерно отличаются: в среднем τ_n в 2,3 раза меньше, чем τ_{a1l} ($\tau_{a1l} = 2,2955\tau_n - 130,9$; $R^2 = 0,8573$). Такой результат, по-видимому, можно трактовать в пользу определения момента зарождения трещины по кривой раскрытия как более чувствительного метода. Им вполне можно заменить более трудоемкое определение этого момента по соотношению длин трещин, образовавшихся у надрезов разной глубины образца. Учитывая, что начальная стадия занимает 25 – 30 % от долговечности, влияние указанных различий на среднюю скорость роста трещины находится в пределах ± 15 %.

Результаты оценки сопротивления докритическому развитию трещины представлены на рис. 6 и в табл. 5. Как и ожидалось, температурно-скоростной параметр $P(v, T)$ согласно уравнению (10) линейно зависит от величины $\lg K_{ср}$, причем $\gamma = -3,8164$; $\lambda = 16,258$, $R^2 = 0,3317$. Коэффициент корреляции $R = 0,576$ показывает, что двусторонние границы раз-

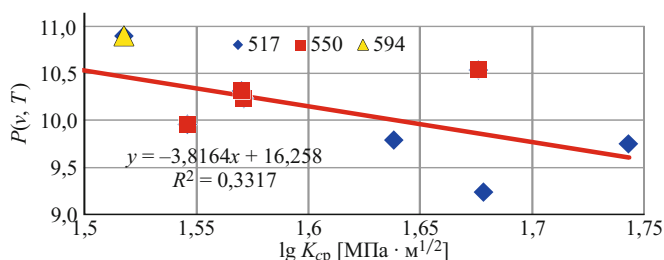


Рис. 6. Зависимость температурно-скоростного параметра $P(v, T)$ от логарифма эффективного значения КИН в образцах из стали ЭИ-415 при температурах 517 (\blacklozenge), 550 (\blacksquare), 594 °С (\blacktriangle)

броса отстоят от генеральной линии на 5 %, что можно признать допустимым.

В табл. 5 указаны постоянные кинетического уравнения для температур 506, 525 и 535 °С. При 506 °С значения $K'_{10^{-3}} = 40$ и $K'_{10^{-5}} = 29$ МПа · м^{0,5}, т.е. самые большие. При температурах 525 и 535 °С эти величины заметно ниже: $K'_{10^{-3}}$ равны 38 и 37 МПа · м^{0,5}; $K'_{10^{-5}}$ равны 28 и 27 МПа · м^{0,5} соответственно.

Если при рассмотрении удельной работы при росте трещины не учитывать вклад от деформации ползучести, то значения сопротивления росту трещины будут заметно меньше: при 506 °С $K'_{10^{-3}} = 20,5$ МПа · м^{0,5}, $K'_{10^{-5}} = 8,8$ МПа · м.

Коэффициенты кинетического уравнения (12) в рассмотренном диапазоне (506 – 535) изменяются следующим образом (см. табл. 5): множитель 10^{R_1} увеличивается с $2,22 \cdot 10^{-11}$ до $8,63 \cdot 10^{-10}$, показатель степени r уменьшается с 4,90 до 4,72.

Таблица 4. Значения вязкости разрушения ($K_{сд}$, МПа · м^{0,5}) стали ЭИ-415

Температура, °С		
506	525	535
55/46/43	48/40/37	45/37/34

Примечание. Коэффициенты управления (9): $\alpha = -0,1414$; $\beta = 4,3$; $R^2 = 0,5282$. Через косые приведены значения $K_{сд}$, соответствующие длительностям нагрузки 10^4 , $5 \cdot 10^4$ и 10^5 ч.

Таблица 5. Значения сопротивления докритическому росту трещины в стали ЭИ-415

Температура, °С	КИН, МПа · м ^{0,5}	Коэффициенты кинетического уравнения (12), мм/ч		
		множитель 10^R		r
506	40/29	2,22	10^{-11}	4,90
525	38/28	1,50	10^{-11}	4,78
535	37/27	8,63	10^{-10}	4,72

Примечание. Коэффициенты уравнения (10): $\gamma = -3,8164$; $\lambda = 16,258$; $R^2 = 0,3317$. Через косые приведены КИН, соответствующие скоростям роста трещины 10^{-3} и 10^{-5} мм/ч.

Как правило, в ранее проведенных исследованиях трещиностойкости не учитывалась составляющая удельной энергии, связанная с деформацией ползучести. Однако в образцах СТ-1 она гораздо меньше, чем в цилиндрических образцах с надрезом, поэтому можно ожидать, что полученные в настоящем исследовании условные величины КИН будут к ним близки. Это подтверждается сравнением с результатами по трещиностойкости металла этого же ротора, полученными на образцах СТ-1 [9]. В частности, в монографии [7] пороговый КИН, при котором скорость роста трещины составляет 10^{-5} мм/ч при $506\text{ }^{\circ}\text{C}$, имеет величину $25\text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, в то время как в данной работе он составляет $29\text{ МПа} \cdot \text{м}$ (см. табл. 5). По-видимому, дополнительный учет работы разрушения по диаграмме раскрытия позволяет устранить отмечаемую многими авторами заметную консервативность значений, полученных при испытаниях на ползучесть цилиндрических образцов.

Однако установленные на цилиндрических образцах условные величины вязкости разрушения $K_{сд}$ с учетом работы внешних сил в процессе ползучести при $506\text{ }^{\circ}\text{C}$, составляют $43 \div 55\text{ МПа}$, что примерно в три раза ниже указанных в [7] минимально возможных значений $K_{1с}$ при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (около 140 МПа).

Таким образом, проведенные расчетно-экспериментальные исследования по методике, при которой удельная работа зарождения и роста трещины в условиях ползучести оценивалась с учетом раскрытия трещины при ползучести, показали следующее.

1. На кривой раскрытия надреза у образцов, испытанных на ползучесть, можно выделить путем анализа скорости раскрытия минимум три участка, которые приходятся на время до начала роста трещины, время докритического роста и время долома.

2. Подтверждено, что трещиностойкость на разных стадиях ползучести можно оценить, используя результаты определения раскрытия в процессе испытания, измерения длины трещины и относительного

размера зоны долома на изломе образца с помощью расчетных соотношений, базирующиеся на рекомендациях стандарта по оценке трещиностойкости при статическом нагружении.

3. Показано, что результаты, полученные на цилиндрических образцах с учетом величины раскрытия, определенного в процессе ползучести, близки к данным по трещиностойкости металла этого же ротора, полученным на образцах СТ-1.

4. Новая методика, позволяющая определить трещиностойкость металла в условиях ползучести на трех основных стадиях разрушения, может послужить базой для создания системы обеспечения надежности высокотемпературных деталей энергооборудования на основе оценки характеристик конструкционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Махутов Н. А.** Базовые характеристики конструкционных материалов при комплексной оценке прочности, ресурса и живучести опасных объектов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 1. Ч. 1. С. 62 – 70.
2. ГОСТ 25.506–85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. — М.: Изд-во стандартов, 1985. — 61 с.
3. **Гладштейн В. И.** Экспериментальная методика исследования сопротивления металла началу роста малых трещин и живучести образцов с надрезом в условиях ползучести / Заводская лаборатория. 1994. Т. 60. № 4. С. 52 – 57.
4. **Гладштейн В. И.** Сравнительная оценка вязкости разрушения теплоустойчивых сталей в условиях ползучести / Заводская лаборатория. 1985. Т. 51. № 8. С. 61 – 64.
5. **Тайра С., Отани Р.** Теория высокотемпературной прочности материалов. — М.: Металлургия, 1986. — 280 с.
6. **Браун У., Сроули Дж.** Испытание высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. — М.: Мир, 1972. — 293 с.
7. **Резинских В. Ф., Гладштейн В. И., Авруцкий Г. Д.** Увеличение ресурса длительно работающих турбин. — М.: Издательский дом МЭИ, 2007. — 300 с.