

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-9-52-60>**ОЦЕНКА РЕСУРСА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
РОТОРОВ ТУРБИН ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ УМЕНЬШЕНИЯ
СПЛОШНОСТИ МЕТАЛЛА**

© Владимир Исаакович Гладштейн*, Артем Александрович Любимов

ОАО «Всероссийский теплотехнический научно-исследовательский институт», Россия, 115280, Москва, Автозаводская ул., 14; *e-mail: resurstec@mail.ru

*Статья поступила 17 июля 2018 г. Поступила после доработки 26 сентября 2018 г.
Принята к публикации 26 декабря 2018 г.*

Проведены расчетно-экспериментальные оценки остаточного ресурса сталей Р2М и ЭИ415 двух уровней прочности (Н и В) по двум методикам — новой и традиционной. Нагружение проводили в течение 300 тыс. ч в условиях, аналогичных тем, в которых работает металл в зоне крепления лопаток в обод диска первой ступени роторов среднего давления турбин К-300-240 ЛМЗ и ХТЗ. При оценке ресурса учитывали постепенное уменьшение напряжений из-за ползучести путем выделения нескольких этапов с условно постоянными напряжениями. По новой методике остаточный ресурс оценивали по изменению на каждом из этапов суперсплошности металла $\Psi = \psi^{n+1}$, где ψ — сплошность, n — показатель трещинообразования; по традиционной — путем определения относительной поврежденности Π по принципу линейного суммирования поврежденности (ЛСП). Установлено, что зависимости от времени Π и Ψ подчиняются логарифмическому закону, при этом металл поковок В (более прочных) во всех случаях имел больший ресурс, чем поковок Н (менее прочных). Впервые процесс исчерпания ресурса рассмотрен путем анализа суммы двух функций: $\Psi + \Pi = 1$. Показано, что у стали Р2М эта сумма меньше единицы; у стали ЭИ415 она равна единице или превышает ее. Исходя из литературных данных о различиях, которые дает правило ЛСП применительно к относительно вязкому и хрупкому металлу, было предположено, что отклонения от единицы связаны с погрешностью оценки ресурса по принципу ЛСП. Поэтому результат, полученный по новой методике, следует признать более точным. С учетом применения по предлагаемой методике образцов с особо глубоким острым надрезом, в котором гарантировано хрупкое развитие трещин, новый принцип расчета ресурса может быть полезен при определении ресурса у любого вида деталей, металл которых подвержен хрупким разрушениям в процессе эксплуатации в условиях ползучести.

Ключевые слова: паровая турбина; ротор; обод диска; металл; ползучесть; трещина; ресурс; образец; надрез; сплошность; длительная прочность.

**ASSESSMENT OF THE RESIDUAL LIFE OF THE HIGH-TEMPERATURE
ELEMENTS OF THE TURBINE ROTORS THROUGH MODELING
THE REDUCTION OF THE METAL CONTINUITY**

© Vladimir I. Gladshtein*, Artem A. Liubimov

JSC «All-Russia Thermal Engineering Research Institute», Avtozavodskaya ul., 14, Moscow, 115280, Russia;
*e-mail: resurstec@mail.ru*Received July 17, 2018. Revised September 26, 2018. Accepted December 26, 2018.*

Calculation and experimental estimates of the residual life of steels P2M and EI415 of two strength levels (H and B) are carried out using two methods, the new one and the traditional. The loading was carried out for 300 thousand hours under conditions similar to those in which the metal operates in the zone of blade attachment in the rim of the disk of the first stage of medium-pressure rotors of K-300-240 LMZ and KhTZ turbines. When evaluating the residual life, a gradual decrease in stresses due to creep was taken into account by distinguishing several stages with conditionally constant stresses. According to the new methodology, the residual life was estimated by a change in the metal super-continuity at each stage $\Psi = \psi^{n+1}$, where ψ is the continuity, n is the crack formation index; whereas in the traditional method

the relative damage P is estimated according to the principle of linear summation of damage (LSP). It is shown that the time dependences P and Ψ obey the logarithmic law, while the metal of the forgings B (high strength) in all cases had a greater resource compared to the forgings H (low strength). For the first time, the process of resource depletion was considered by analyzing the sum of two functions: $\Psi + P = 1$. It is shown that for R2M steel this amount is less than unity; for steel EI415 it is equal to or greater than unity. Proceeding from the literature data on the differences that follows from using LSP rule for a relatively viscous and brittle metal, we suggested that deviations from unity are attributed to the error in estimating the resource according to the LSP principle. Therefore, the result obtained by the new method should be recognized as more accurate. Taking into account the use of samples with a particularly deep sharp notch in which the brittle crack development is guaranteed by the proposed methodology, the new principle of calculating the residual life can be used in determination of the resource for any type of the parts made of the metal subjected to brittle fracture during operation under creep conditions.

Keywords: steam turbine; rotor; disk rim; metal; creep; crack; resource; sample; notch; continuity; long-term strength.

Введение

В настоящее время в эксплуатации находится значительное количество конденсационных турбин мощностью 300 МВт, многие из которых достигли наработки 300 тыс. ч. Наиболее тяжелые условия работы испытывает металл ободов дисков первой ступени роторов среднего давления (РСД) этих турбин из-за высоких температур и напряжений [1].

Конструкции ободов дисков высокотемпературных ступеней и применяемые стали для изготовления цельнокованых роторов турбин производства АО ЛМЗ (далее — ЛМЗ) и ОАО «Турбоатом» (далее — ХТЗ) различаются. В роторах ЛМЗ используют Т-образное хвостовое соединение, в РСД турбин ХТЗ — двухопорное грибовидное соединение (рис. 1), при этом изготавливают их из стали марок Р2М и ЭИ415 соответственно [1, 2].

Образование эксплуатационных микроповреждений и трещин в ободах с Т-образным пазом наиболее вероятно в зоне концентратора напряжения в месте сопряжения верхней полки паза со стороны внутренней поверхности паза. В ободе с грибовидным креплением лопаток повреждения могут образоваться в углах концентраторов под грибками и в защелках (см. рис. 1).

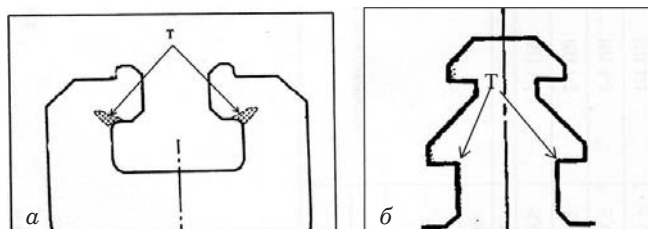


Рис. 1. Зоны микроповреждаемости и образования трещин (Т) в ободе диска регулирующей ступени ротора среднего давления турбин мощностью 300 МВт: а — Т-образный паз; б — грибовидное двухопорное соединение

Fig. 1. Areas of the microdamage and cracking (T) in the rim of the disk of the regulating rotor stage of a medium-pressure turbine of 300 MW: T-shaped groove (a); mushroom-shaped double-seat connection (b)

Расчет остаточного ресурса элементов длительно работающих роторов при продлении срока эксплуатации проводится путем учета вклада различных механизмов в исчерпание ресурса [1]. На практике наиболее широко применяют принцип линейного суммирования повреждений (ЛСП) [5]:

$$\Pi = \Pi_{\text{ст}} + \Pi_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где $\Pi_{\text{ст}}$ и $\Pi_{\text{ц}}$ — статическая и циклическая поврежденность.

Однако доля ресурса в условиях ползучести, при которой наблюдается удовлетворительная сходимость расчета по принципу ЛСП и эксперимента, весьма ограничена: анализ кривых ползучести позволяет заключить [3], что правило ЛСП справедливо только до $\tau_i/\tau_{ki} = 0,4 - 0,6$ (τ_i — время нагружения, τ_{ki} — время до разрушения). Ре-

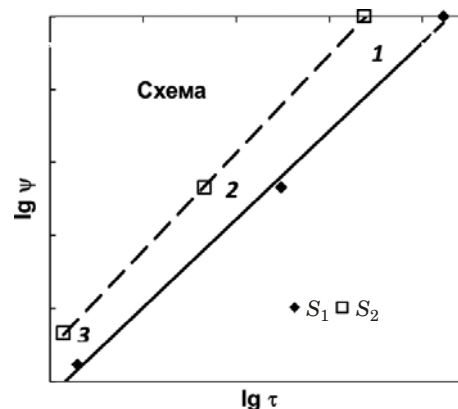


Рис. 2. Диаграмма сплошности в условиях хрупкого разрушения при ползучести стали 15Х1М1ФЛ при 560 °С: 1 — образцы с начальной сплошностью $\psi_0 = 1$ (гладкие); 2 — образцы с глубоким острым надрезом, $\psi_0 = \psi_n$; 3 — образцы в условиях долома; $S_1 < S_2$ — уровни напряжений

Fig. 2. Diagram of the continuity under brittle fracture in creep conditions at 560°C (steel 15Kh1M1FL): 1 — smooth sample $\psi_0 = 1$; 2 — sample with a sharp deep notch; 3 — break conditions; $S_1 < S_2$ — stress levels

зультат оценки ресурса по принципу ЛСП зависит и от уровня пластичности материала [4].

В настоящей работе для повышения точности оценки ресурса предлагается методика, отчасти базирующаяся на представлениях Л. М. Качанова [6], согласно которой результаты испытания обрабатывают [7, 11] с помощью линейной диаграммы сплошности в координатах $\lg \tau - \lg \psi$ (рис. 2). На диаграмме показана долговечность металла в трех состояниях: исходном — при полной сплошности; ускоренного разрушения — сплошность уменьшена почти втрое из-за глубокого и острого надреза; финального разрушения (долома) — сплошность уменьшилась до критической величины. Сплошность металла ψ является безразмерной величиной, показывающей долю живого сечения от геометрического сечения, которая уменьшается в условиях ползучести, благодаря чему растет максимальное растягивающее напряжение $\sigma_{\max}$. Скорость уменьшения сплошности зависит от напряжения по степенному уравнению [6]

$$d\psi/dt = -A(\sigma_{\max}/\psi)^n, \quad (2)$$

где A и n — постоянные материала и температуры.

Экспериментальное подтверждение линейности диаграммы сплошности в координатах $\lg \tau - \lg \psi$ для трех упомянутых состояний (начального, ускоренного повреждения и критического) получено на сталях разных классов: низколегированных, высокохромистых, аустенитных [11].

В образцах 2 (см. рис. 2) сплошность сечения в надрезе может быть в пределах $0,5 \geq \psi \geq 0,25$, где $\psi = (d/D)^2$, d — диаметр в надрезе, D — диаметр гладкой части; оптимальное значение $\psi = 0,35$ [10].

Критерием правильности методики является неравенство

$$\lg \psi_{\text{кр}} / \lg \psi_{\text{исх}} \geq 0,5. \quad (3)$$

При доломе происходит кардинальное изменение механизма разрушения — от хрупкого межзеренного к вязкому внутризеренному [8]. Согласно [7] условиями долома являются величина $\psi_{\text{кр}}$, не зависящая от приложенного напряжения [9], и время $\tau_{\text{кр}}$ (см. рис. 2, точка 3).

Для определения времени нагружения до разрушения вводят новую переменную — суперсплошность

$$\Psi = \psi^{n+1}. \quad (4)$$

Пределы изменения Ψ такие же, как у сплошности ψ : в начальный момент времени $\Psi = 1$, при разрушении $\Psi = 0$. Кинетическое

уравнение (2) принимает вид, при котором в правой части нет переменной ψ :

$$d\Psi/dt = -A(n+1)(\sigma_{\max})^n. \quad (5)$$

В соответствии с [6] получаем

$$\int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\tau_{\text{кр}}(\tau)} = 1 - \Psi, \quad (6)$$

где $\tau_{\text{кр}}$ — время до разрушения.

Если [6] при ступенчатом изменении нагрузки $\tau < \tau_{\text{кр}}$, то уровень поврежденности можно охарактеризовать величиной $1 - \Psi_j$, где $0 \leq \Psi_j \leq 1$ — суперсплошность, зависящая от времени, убывающая по мере увеличения суммы относительных долговечностей $\Sigma \Delta \tau_j / (\tau_{\text{кр}})_j$ и равная нулю к моменту разрушения. Примечательно, что левая сторона соотношения (6) представляет собой статическую составляющую поврежденности Π , оцениваемую по принципу ЛСП. Согласно [5], при количестве пусков, меньшем 300, циклическая составляющая поврежденности при оценке остаточного ресурса обода диска может не учитываться. Таким образом, в случае хрупкого разрушения от ползучести

$$\Psi + \Pi = 1. \quad (7)$$

Из-за неправильной оценки поврежденности с помощью Π на каждом этапе нагружения эта сумма может значительно отклоняться от единицы, что может привести к погрешностям при оценке остаточного ресурса [3]. Цель работы — оценка ресурса в условиях хрупкого разрушения металла в ободах дисков РСД из сталей Р2М и ЭИ415 турбин мощностью 300 МВт по суперсплошности и сравнение результатов с полученными по принципу ЛСП.

Материал и методика исследования

Исследовали поковки из сталей Р2М (25Х1М1Ф) и ЭИ415 (ХЗМВФ) в двух состояниях, отличающихся уровнем предела текучести относительно уровня требований технических условий: в пределах нормы, но ближе к нижней границе (поковки Н); несколько выше верхней границы (поковки В). Структура штатной поковки из стали Р2М в состоянии поставки и после лабораторной термообработки — бейнитная. После заводской термообработки структура стали ЭИ415 — бейнитная с небольшим (5–8 %) количеством свободного феррита, после лабораторной термообработки — чисто бейнитная (размер зерна заметно увеличился).

Химический состав металла поковок из стали Р2М следующий (%): 0,29 С, 0,59 Мн, 0,24 Si, 1,54 Cr, 0,94 Мо, 0,30 V; поковок из стали

ЭИ415 — 0,18 С, 0,40 Мн, 0,34 Si, 3,15 Cr, 0,53 Мо, 0,75 V, 0,50 W. Такой состав соответствует требованиям ТУ 108.1029–81 [2] для этих марок сталей.

Механические свойства при растяжении (20 °С) металла поковки Н из сталей Р2М и ЭИ415 отвечают требованиям указанных ТУ. Предел текучести поковки В, как и планировалось, оказался выше нормы на ~150 МПа. Кроме того, относительное удлинение металла поковки В из стали Р2М составило 11,3 % при норме 16 %, что не должно служить препятствием для дальнейших исследований.

Уровень интенсивности напряжений σ_i в ободах РСД определяли путем оценки термонапряженного состояния роторов в стационарный период работы [1]. Для описания закономерностей длительной прочности материалов при сложно-напряженном состоянии широко применяется [12] эквивалентное напряжение $\sigma_{э.с.}$, предложенное В. П. Сдобыревым:

$$\sigma_{э.с.} = 0,5(\sigma_1 + \sigma_i), \quad (8)$$

где σ_1 — главное растягивающее напряжение; σ_i — интенсивность напряжений.

Подмена $\sigma_{э.с.}$ на σ_i , по-видимому, не должна кардинально изменить результаты из-за сравнительного характера исследования.

Для того чтобы оценить рабочие напряжения, время эксплуатации условно разбивали на $n = 6$ периодов, в каждом из которых наблюдалась близкая к линейной зависимость напряжений от наработки (тыс. ч): 0 – 1,5; 1,5 – 7,5; 7,5 – 50; 100 – 200; 200 – 250; 250 – 300. Для каждого из периодов по известному соотношению определяли эффективную интенсивность напряжений:

$$\sigma_{i.эф} = \sigma_{i(j+1)} + 0,33[\sigma_{ij} - \sigma_{i(j+1)}], \quad (9)$$

где σ_{ij} и $\sigma_{i(j+1)}$ — начальные и конечные напряжения для рассматриваемого периода j .

Часть диаграммы сплошности для поковки Р2М (В) (рис. 3), заключенная между точками от гладких образцов 1 и образцов с надрезом 2, представляет отрезок линейной зависимости $\lg \Psi$ от $\lg \tau_{к\psi}$ для каждого j -го уровня действующих напряжений (210, 190, 153, 115, 94, 90 МПа) и задается выражением

$$\lg \Psi = \alpha_j \lg \tau_{к\psi} + \beta_j, \quad (10)$$

где α_j и β_j — постоянные для j -го этапа, зависящие от материала, температуры и напряжений.

На схеме рис. 3 показана лестница перехода от одного этапа к другому для определения изменения сплошности на каждом из шести этапов. Начало отсчета сплошности — от точки $\lg \Psi = 0,00$, принадлежащей гладкому образцу, испы-

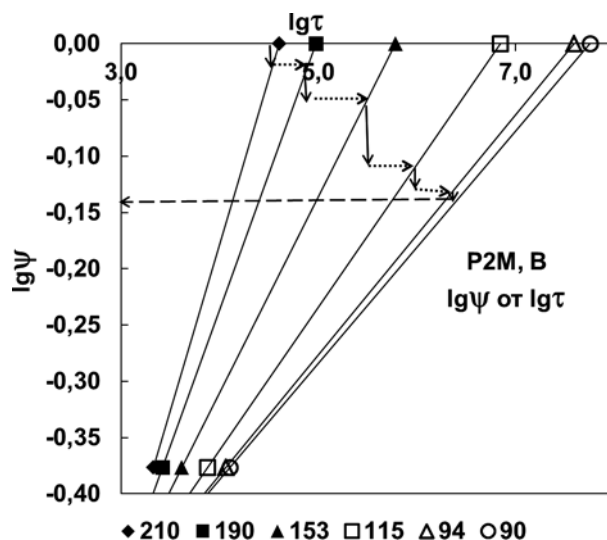


Рис. 3. Схема уменьшения сплошности гладких образцов из поковки Р2М-В при каждом этапе нагружения

Fig. 3. Scheme of reducing the continuity of smooth samples (forging R2M-V) at each loading stage

танному при максимальном напряжении. На каждом j -м этапе нагружения сплошность уменьшается по зависимости

$$\Delta \Psi_j = \alpha_j \Delta \lg \tau_{к\psi} + \beta_j. \quad (11)$$

Спускаясь по каждой наклонной линии, в результате расчетов по (11) последовательно определяли величину конечной сплошности на каждом из этапов. Как упоминалось выше, конечная сплошность на каждом из этапов Ψ_j является аргументом суперсплошности $\Psi = \Psi^n + 1$, которая последовательно убывает, являясь антагонистом функции П.

Для вычислений согласно (4) при каждом уровне напряжений $n_j + 1 = 1/\alpha_j$.

На каждом этапе нагружения процесс уменьшения сплошности моделируется зависимостью (10) по двум образцам: гладкому образцу (координаты $\Psi = 1$, $\tau_{к\tau}$) и образцу с особо глубоким острым надрезом (координаты Ψ_n , $\tau_{кн}$), в котором гарантировано хрупкое развитие трещин ползучести. Коэффициенты зависимости (10) для каждого уровня напряжений определяли по формулам

$$\alpha_j = (-\lg \Psi_n) / (\lg \tau_{к\tau} - \lg \tau_{кн}), \quad (12)$$

$$\beta_j = (\lg \tau_{к\tau} \lg \Psi_n) / (\lg \tau_{к\tau} - \lg \tau_{кн}). \quad (13)$$

Расчет снижения сплошности за заданное время на каждом этапе нагружения начинали с определения коэффициентов α_j и β_j по формулам (12) и (13).

Долговечность $\tau_{к\tau}$ находили путем обработки результатов испытания стандартных гладких образцов на длительную прочность при 550 °С.

Для этого из каждой поковки были разрушены по 6 – 7 стандартных гладких образцов с диаметром рабочей части 10 мм, максимальная длительность испытаний составила 6000 ч.

Величину $\tau_{\text{кн}}$ получали путем испытания образцов с надрезом. Диаметр гладкой части образцов $D = 14$ мм, что близко к толщине щеки обода диска с Т-образным пазом (≈ 20 мм), кольцевой надрез выполняли максимально острым ($r_n \leq 0,05$ мм), его глубина обеспечивала соотношение $\psi_n = 0,58 \pm 0,02$. Испытания надрезанных образцов (по 4 – 5 образцов из металла поковок Н и В) проводили также при температуре 550 °С, напряжения в гладкой части находились в диапазоне 124 – 197 МПа, длительность испытаний — до 2020 ч.

После построения для каждой поковки пары зависимостей в координатах $\lg \tau_{\text{к}} - \lg \sigma$ получали аналитические зависимости вида

$$\lg \tau_{\text{кг}} (\lg \tau_{\text{кн}}) = \gamma \lg \tau_{\text{кн}} + \delta, \quad (14)$$

где γ и δ — постоянные.

Оценку ресурса проводили при максимальных рабочих температурах металла ободов РСД (при температуре пара 540 °С): у турбин ЛМЗ — 520 °С, у турбин ХТЗ — 506 °С [1]. Поскольку испытания образцов проводили при температуре 550 °С, для определения долговечности при рабочей температуре использовали параметр длительной прочности

$$P_{\text{дп}} = T(\lg \tau_{\text{к}} - 2 \lg T + 25) \cdot 10^{-3}, \quad (15)$$

где T — температура Кельвина.

Методика оценки ресурса по поврежденности заключалась в использовании соотношения (1):

$$\Pi = \sum_{j=1}^n \frac{\tau_j}{\tau_{\text{кг},j}}, \quad (16)$$

где τ_j — время этапа нагружения при интенсивности напряжений σ_{ij} и температуре металла t_m ; $\tau_{\text{кг},j}$ — время до разрушения при тех же σ_{ij} и t_m . Значения интенсивностей напряжений σ_{ij} в каждой зоне при номинальном режиме эксплуатации (температура пара промперегрева 540 °С) приведены на рис. 4. Остаточный ресурс ротора τ_{Ψ} и τ_{Π} определяли как разницу времени, когда $\Psi = 0$ и $\Pi = 1$ соответственно, и наработкой τ_3 , принятой равной 300 тыс. ч:

$$\tau_{\Psi} = \tau_{\Psi=0} - \tau_3, \quad (17)$$

$$\tau_{\Pi} = \tau_{\Pi=1} - \tau_3. \quad (18)$$

Результаты исследования

На рис. 4 представлены результаты определения эффективной интенсивности напряжений

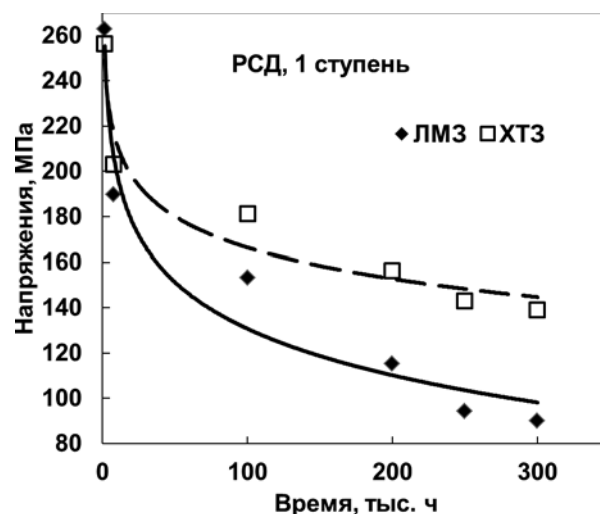


Рис. 4. Изменение интенсивности эффективных напряжений в зоне обода диска первой ступени ротора среднего давления в процессе эксплуатации турбин К-300-240, изготовленных ЛМЗ и ХТЗ

Fig. 4. Change in the intensity of the effective stresses in the zone of the rim of the disk of the first stage of the medium-pressure rotor during operation of K-300-240 turbines manufactured by LMZ and KhTZ

в зоне крепления лопаток ободов дисков турбин ЛМЗ и ХТЗ в течение каждого периода, в пределах которого напряжения примерно линейно зависели от времени. Видно, что после 250 тыс. ч эффективные напряжения в роторах из стали ЭИ415 составляли 143 МПа, что почти в 1,5 раза выше, чем в роторах из стали Р2М (94 МПа). Причиной тому, помимо особенностей конструкции, является разница в сопротивлении релаксации этих сталей [2].

Особенностью кривых длительной прочности образцов с надрезом из стали Р2М является изменение наклона при напряжениях более высоких, чем 283 МПа у металла поковки Н ($\tau_{\text{кн},\text{М}} \leq 162$ ч) и 331 МПа у поковки В ($\tau_{\text{кн},\text{М}} \leq 138$ ч). Возможно, это происходит из-за перехода от хрупкого межзеренного к вязкому разрушению, описываемому моделью Хоффа [6]. У стали ЭИ415 такого перелома не обнаружено, видимо, повреждаемость во всем диапазоне напряжений идет по механизму развития межзеренных трещин.

Множители γ из зависимостей (14) для гладких и надрезанных образцов из поковок Н и В из стали Р2М попарно близки, так же, как и множители δ . У стали ЭИ415, напротив, наблюдается большая разница в значениях γ для гладких и надрезанных образцов из поковок Н и В и большая разница в величинах δ для Н и В. Квадрат коэффициентов корреляции — не ниже 0,77.

Предел длительной прочности стали Р2М-Н и Р2М-В, определенный с помощью коэффициентов γ и δ на гладких образцах при 520 °С, составил 171 и 189 МПа соответственно. У металла

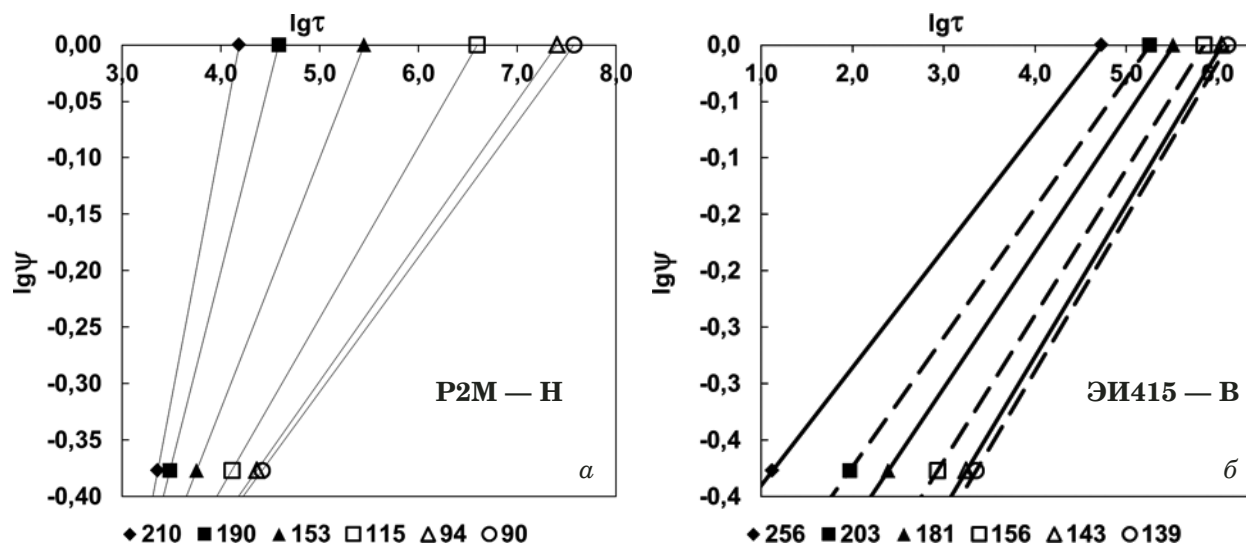


Рис. 5. Диаграммы сплошности при рабочей температуре образцов из сталей Р2М (а) и ЭИ415 (б) с различным уровнем прочности (Н и В); напряжения при испытаниях указаны под диаграммой

Fig. 5. Diagrams of the continuity at the operating temperature of steel samples R2M (a) and EI415 (b) with different strength levels (H and B), values of the test stresses are indicated below the diagram

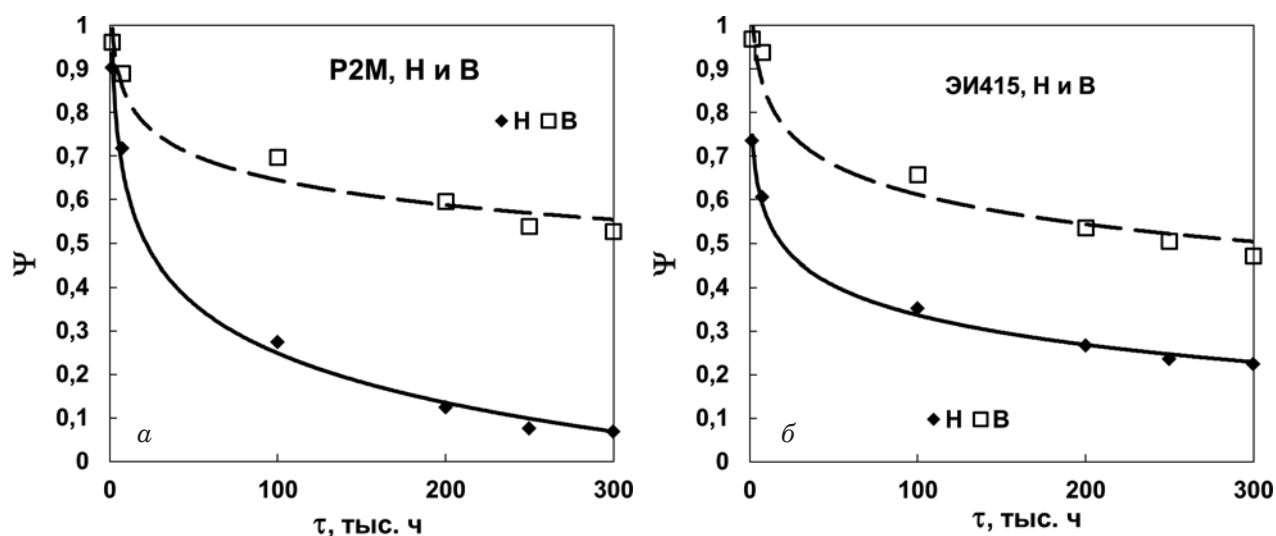


Рис. 6. Изменение сплошности Ψ от времени нагружения образцов из сталей Р2М (а) и ЭИ415 (б) в условиях реального силового цикла

Fig. 6. Change in the relative continuity Ψ as a function of the loading time for steels samples R2M (a) and EI415 (b) in conditions of the real power cycle

обеих поковок из стали ЭИ415 при 506 °С он находился в пределах 203 – 227 МПа. Это заметно меньше, чем указано в [2], но вполне соответствует данным эксплуатации диска РСД из стали ЭИ-415, разрушившегося после 80 тыс. ч [13].

Диаграмму сплошности для каждого уровня напряжений строили по величинам $\lg \tau_{\text{кр}}$ и $\lg \tau_{\text{кн}}$ (рис. 5). Значения α_j и β_j , полученные по соотношениям (12) и (13), были сведены в таблицы — по две для поковок из каждой марки стали. Оказалось, что для стали ЭИ415-Н величина $\alpha_j \approx 0,13 - 0,25$, $\beta_j \approx -0,97$; для стали ЭИ415-В — $\alpha_j \approx 0,10 - 0,13$, $\beta_j \approx -0,49 - (-0,83)$. Для образцов

из стали Р2М-Н значение $\alpha_j \approx 0,11 - 0,45$, $\beta_j \approx -0,9 - (-1,9)$, из стали Р2М-В — $\alpha_j \approx 0,10 - 0,29$, $\beta_j \approx -0,8 - (-1,3)$.

Из рис. 5 следует очевидный результат: чем больше напряжения и меньше начальная сплошность, тем ниже долговечность образца. В результате использования данных по коэффициентам α_j и β_j была поэтапно определена убыль суперсплошности Ψ .

Установлено (рис. 6), что в среднем сталь ЭИ415 имеет некоторое преимущество по сохранению сплошности (0,22 – 0,43), в то время как у стали Р2М-Н сплошность падает. Соответствен-

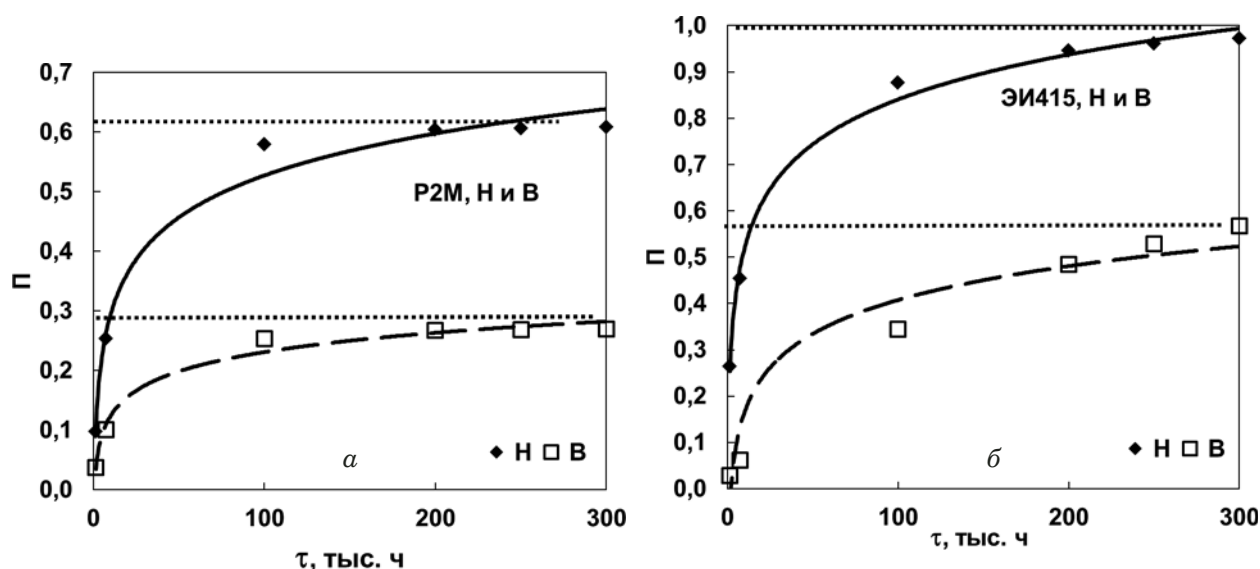


Рис. 7. Зависимости относительной поврежденности от времени нагружения сталей Р2М (а) и ЭИ415 (б) в условиях реального силового цикла

Fig. 7. Dependence of the relative damage on the loading time of steels R2M (a) and EI415 (b) under real power cycle conditions

но, ресурс стали Р2М-Н составил 150 тыс. ч, остальных поковок — более 1000 тыс. ч.

При статистической обработке данных (см. рис. 6) видно подобие в кинетике убывания суперсплошности Ψ . Во всех случаях по мере роста длительности она уменьшается по логарифмической кривой, квадрат коэффициента корреляции $R^2 \geq 0,97$.

На рис. 7 приведены результаты определения ресурса по методике оценки поврежденности по принципу ЛСП по соотношению (16). Все зависимости поврежденности Π от времени, как и Ψ от времени, логарифмические. Достоверность всех соотношений высокая — $R^2 \geq 0,93$. Видно, что взаимное расположение зависимостей Н и В обеих сталей одинаково: Н выше, чем В, что указывает на большую стойкость металла с повышенным уровнем прочности. Поврежденность к 300 тыс. ч у стали Р2М ниже (у Н — 0,62, у В — 0,28), чем у стали ЭИ415 (у Н — 0,99, у В — 0,57).

Из рис. 7 следует, что по оценкам Π сталь ЭИ415-Н к 300 тыс. ч почти выработала ресурс (остаточный ресурс 20 тыс. ч). У остальных изученных состояний металла с такой наработкой остаточный ресурс превысил 1000 тыс. ч.

Обсуждение результатов

Остаточный ресурс оценивали по изменению на каждом из этапов нагружения двух функций: суперсплошности $\Psi = \psi^{n+1}$, где n — показатель трещинообразования, и относительной поврежденности Π , определяемой по принципу ЛСП. На основании соотношения (8) в работе впервые предложено рассмотреть процесс исчерпания ре-

сурса путем одновременного анализа двух функций — $\Psi + \Pi = 1$.

Из таблицы следует, что для стали Р2М значение $\Psi + \Pi = 0,68 - 0,80$, т.е. меньше единицы на 0,20 – 0,32. Для стали ЭИ415-Н эта сумма превышает единицу на 0,19. Исходя из литературных источников [4], можно предположить, что отклонения суммы от единицы связаны с погрешностью оценки ресурса по принципу ЛСП.

В [4] экспериментально исследовано соотношение ожидаемой и фактической остаточной долей ресурса в испытаниях, рассчитанных по правилу ЛСП для двух состояний CrMoV-стали — относительно пластичного и относительно хрупкого. Показано, что применительно к вязкому металлу (в нашем случае — сталь Р2М) это правило дает неконсервативный прогноз остаточного ресурса — превышение в 2 – 4 раза. В то же время для относительно хрупкого материала (здесь — сталь ЭИ415) значение $\Pi = 1$ является консервативным критерием, поэтому для прогноза ресурса такого металла рекомендовано [4] вводить повышающий коэффициент, равный двум.

Проведенные в работе сравнительные испытания и расчеты показали, что работоспособность материала обода диска РСД в значительной мере зависит от сочетания невысоких напряжений, сниженных в процессе ползучести, с достаточной длительной прочностью. Поэтому оценка времени уменьшения сплошности в образцах применительно к условиям работы металла в зоне крепления лопаток в ободах диска первой ступени РСД турбин 300 МВт показала отсутствие преимуществ у менее жаропрочной стали

P2M, несмотря на более низкие рабочие напряжения, чем в стали ЭИ415, у которой более высокая длительная прочность.

По предлагаемой методике на каждом этапе нагружения процесс уменьшения сплошности металла моделировали зависимостью долговечности от изменения сплошности для двух образцов: гладкого и образца с особо глубоким острым надрезом, в котором гарантировано хрупкое развитие трещин ползучести. Достоинство такой зависимости, названной диаграммой сплошности, состоит в том, что она может быть получена при каждом уровне действующего напряжения. В связи с этим данный принцип расчета ресурса может применяться для любого вида детали, у которой материал может иметь хрупкие разрушения в условиях ползучести в процессе эксплуатации.

Одновременный анализ величин Ψ и Π для числа пусков менее 300 полезен, поскольку позволяет вносить поправки в оценку ресурса с помощью Π . Расчет ресурса по Π сравнительно прост, поэтому на практике применяется для длительно работающего оборудования. В то же время прогноз по Ψ более правилен — в условиях, когда наблюдается хрупкое разрушение, его можно моделировать образцом с надрезом.

Выводы

Проведена сравнительная расчетно-экспериментальная оценка остаточного ресурса сталей P2M и ЭИ415 двух уровней прочности (Н и В), нагружаемых в течение 300 тыс. ч в условиях, аналогичных тем, в которых работает металл в зоне крепления лопаток в ободе диска первой ступени роторов среднего давления турбин К-300-240 ЛМЗ и ХТЗ, по двум методикам — новой, по которой определяется уменьшение суперсплошности металла Ψ , и традиционной, учитывающей накопление относительной поврежденности (Π).

Новая методика показала, что после 300 тыс. ч работы остаточный ресурс элементов из стали P2M-Н, относительно менее прочной, но более пластичной, составил 150 тыс. ч, у остальных состояний обеих сталей ресурс был более 1000 тыс. ч. В то же время по традиционной методике относительно большая выработка ресурса определена у менее пластичной стали ЭИ415-Н — остаточная долговечность всего 20 тыс. ч, у остальных состояний обеих сталей — более 1000 тыс. ч.

Рассмотрение процесса исчерпания ресурса путем одновременного анализа величины суммы двух функций — $\Psi + \Pi = 1$ — показало, что отклонения ее от единицы связаны с погрешностью оценки ресурса по принципу ЛСП, а следова-

тельно, результат по новой методике следует признать более точным.

Принцип расчета ресурса, когда на каждом этапе нагружения процесс уменьшения сплошности металла моделируют с применением образцов с особо глубоким острым надрезом, в котором гарантировано хрупкое развитие трещин ползучести, может применяться для тех деталей, у которых материал имеет хрупкие разрушения в условиях ползучести в процессе эксплуатации.

Марка стали	Уровень прочности	Ψ	τ_{Ψ} , тыс. ч	Π	τ_{Π} , тыс. ч	$\Psi + \Pi$
P2M	Н	0,07	150	0,61	≥ 1000	0,68
	В	0,53	≥ 1000	0,27		0,80
ЭИ415	Н	0,22		0,97	20	1,19
	В	0,43		0,57	≥ 1000	1,00

тельно, результат по новой методике следует признать более точным.

Принцип расчета ресурса, когда на каждом этапе нагружения процесс уменьшения сплошности металла моделируют с применением образцов с особо глубоким острым надрезом, в котором гарантировано хрупкое развитие трещин ползучести, может применяться для тех деталей, у которых материал имеет хрупкие разрушения в условиях ползучести в процессе эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Резинских В. Ф., Гладштейн В. И., Авруцкий Г. Д. Увеличение ресурса длительно работавших паровых турбин. — М.: Издательский Дом МЭИ, 2007. — 296 с.
2. Кокина Н. Н., Плотинский Л. Е., Голуб Л. В. и др. Марочник стали и сплавов. — М.: ЦНИИТМАШ, 1971. — 484 с.
3. Вебер Х. Ползучесть и особенности повреждения теплоустойчивых ферритных сталей / Сб. Докладов конф. «Продление ресурса ТЭС». — М.: ВТИ, 1994. С. 1 – 30.
4. Viswanathan R., Gehl S. M. Life-Assessment Technology for Power-Plant Components / JOM. 1992. February. P. 34 – 42.
5. СТО 70238424.27.100.005–2008. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования. — М.: ИНВЭЛ, 2008. — 685 с.
6. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. — 311 с.
7. Гладштейн В. И. Методика прогнозирования длительной прочности сталей и сплавов с помощью диаграммы изменения сплошности при длительном нагружении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1996. Т. 62. № 4. С. 55 – 60.
8. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов. — М.: Мир, 1987. — 302 с.
9. Шестериков С. А. Длительная прочность и ползучесть металлов. — В сб.: Вопросы долговременной прочности энергетического оборудования. Вып. 230. — Л.: ЦКТИ, 1986. — 123 с.
10. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. — М.: Мир, 1972. — 245 с.
11. Гладштейн В. И. Микроповреждаемость металла высокотемпературных деталей энергооборудования. — М.: Машиностроение, 2014. — 364 с.
12. Гольденблатт И. И. Длительная прочность в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1977. — 248 с.
13. Бугай Н. В., Березина Т. Г., Трунин И. И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 270 с.

REFERENCES

1. **Rezinskikh V. F., Gladshtein V. I., Avrutskii G. D.** Increase the resource long-term working of steam turbines. — Moscow: Izd. MEI, 2007. — 296 p. [in Russian].
2. **Kokina N. N., Plotinsky L. E., Golub L. V., et al.** Steel and alloy grades reference. — Moscow: TsNIITMASH, 1971. — 484 p. [in Russian].
3. **Weber H.** Creep and peculiarities of damage to teploteknik ferritic steels / Coll. of Reports of conf. "The life extension of thermal power plant". — Moscow: VTI, 1994. P. 1 – 30 [in Russian].
4. **Viswanathan R., Gehl S. M.** Life-Assessment Technology for Power-Plant Components / JOM. 1992. February. P. 34 – 42.
5. STO 70238424.27.100.005–2008. The main elements of boilers, turbines and piping TPP: Control of a condition of metal. Norms and requirements. — Moscow: INVÉL, 2008. — 685 p. [in Russian].
6. **Kachanov L. M.** Fundamentals of fracture mechanics. — Moscow: Nauka, 1974. — 311 p. [in Russian].
7. **Gladshtein V. I.** Method of forecasting long-term strength of steels and alloys by means of the diagram of change of continuity at long-term loading / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 1996. Vol. 62. N 4. P. 55 – 60 [in Russian].
8. **Chadeck Y.** Creep of metal materials. — Moscow: Mir, 1987. — 302 p. [Russian translation].
9. **Shesterikov S. A.** Long-term strength and creep of metals / In the collection: Issues of long-term strength of power equipment. Vol. 230. — Leningrad: TsKTI, 1986. — 123 p. [in Russian].
10. **Brown W., Srawley G.** Testing of high-strength metal materials for fracture toughness at plane deformation. — Moscow: Mir, 1972. — 245 p. [Russian translation].
11. **Gladstein V. I.** Micro-Damage of metal of high-temperature details of power equipment. — Moscow: Mashinostroenie, 2014. — 364 p. [in Russian].
12. **Goldenblatt I. I.** Long-term strength in engineering. — Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 248 p. [in Russian].
13. **Bugay N. V., Berezina T. G., Trunin I. I.** Serviceability and durability of metal power equipment. — Moscow: Énergoatomizdat. 1994. — 270 p. [in Russian].