

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.169:629.10.061

ВЛИЯНИЕ МИКРОПОВРЕЖДЕНИЙ МЕТАЛЛА НА РЕСУРС ЛИТЫХ КОРПУСОВ АРМАТУРЫ

© В. И. Гладштейн¹

Статья поступила 22 марта 2016 г.

Проведено длительное старение под напряжением литой стали 15X1M1ФЛ и создана высокая степень поврежденности микропорами, определена зависимость остаточного ресурса от их количества. Испытаны на длительную прочность две серии цилиндрических образцов: с кольцевым надрезом и гладких. Расчетom установлена долговечность других серий образцов с надрезами меньшей глубины, чем у испытанных. Путем ее сравнения с долговечностью гладких образцов определен коэффициент ресурса K_t для рабочих диапазонов напряжений (50 – 80 МПа) и температур (520 – 560 °С). Результаты исследования порообразования позволили установить количественное соответствие между влиянием на ресурс микроповрежденности определенного балла и относительной поврежденности сечения цилиндрического образца кольцевым надрезом. На образцах с надрезом исследована зависимость K_t от температуры и напряжений в рабочем диапазоне условий нагружения. Определен вид повреждений, при котором следует прекратить эксплуатацию. Отмечено, что в стали 15X1M1ФЛ одну и ту же стадию поврежденности следует моделировать более глубоким надрезом, чем в стали 12X1МФ.

Ключевые слова: корпус; металл; ползучесть; микропоры; ресурс; моделирование; образец с надрезом; относительная поврежденность.

При определении возможности эксплуатации корпусов арматуры и других литых деталей паропроводов сверхнормативного срока (250 тыс. ч) необходимо проводить диагностику, включающую оценку микроповрежденности [1, 2]. Для элементов паропроводов из горячекатаных труб в таких случаях применяют шкалы, в которых указано пять – восемь баллов, характеризующих количество и относительное расположение микропор [2, 3]. Однако данных по порообразованию в литых сталях для диагностики недостаточно, поскольку до наработки 200 тыс. ч основное внимание при оценке надежности металла литых корпусов уделялось образованию трещин.

Традиционным считается способ построения шкалы повреждаемости, заключающийся в создании высокой степени поврежденности металла микропорами путем длительного старения под напряжением. Такой путь весьма трудоемок. Учитывая, что значительная часть оборудования тепловых электростанций отработала указанный нормативный срок, задача разработки более совершенных методик оценки остаточного ресурса особенно актуальна [4].

Для сокращения объема экспериментальных исследований в работах [5, 6] на основе модели исчер-

пания сплошности Л. М. Качанова [7] предложена экспрессная методика определения влияния напряжений и температуры на коэффициент ресурса гибов из стали 12X1МФ. Коэффициент ресурса непосредственно связан с остаточным ресурсом: $K_t = \tau_{op}/\tau_s$, где τ_s — наработка, τ_{op} — остаточный ресурс. Методика оценки K_t основана на гипотезе о примерном равенстве влияния на ресурс определенного балла микроповрежденности и соответствующего ему кольцевого надреза на цилиндрическом образце, для которого относительное уменьшение сечения

$$\omega_0 = 1 - (d/D)^2, \quad (1)$$

где d — диаметр в надрезе; D — диаметр гладкой части образца.

В отличие от трубной стали 12X1МФ структура литой стали имеет ряд особенностей, влияющих на порообразование. Цель данной работы — определение относительного диаметра надреза, моделирующего соответствующий балл микроповрежденности стали 15X1M1ФЛ, и оценка предельно допустимого вида ее поврежденности. Это позволит использовать менее трудоемкий метод моделирования для определения коэффициента ресурса металла литых корпусов арматуры, отработавших нормативный срок.

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

Материалом для исследования явились корпуса двух паровых задвижек Ду200, отработавших на паропроводе высокого давления одной из ТЭЦ Мосэнерго около 155 тыс. ч. Химический анализ показал, что содержание легирующих элементов в металле корпусов соответствует норме для стали 15X1M1ФЛ по ОСТ 108.961.02–85. Химический состав стали 15X1M1ФЛ следующий, % масс.: 0,14 – 0,20 C; 0,20 – 0,40 Si; 0,60 – 0,90 Mn; 1,2 – 1,7 Cr; 0,9 – 1,2 Mo; 0,25 – 0,40 V, не более 0,025 P, 0,025 S, 0,3 Ni, 0,3 Cu.

Механические свойства образцов из этой стали при испытании на растяжение при 20 °С представлены в табл. 1. Видно, что предел текучести металла корпуса № 1 немного (на 10 %) ниже, чем средние значения данной характеристики металла корпусов, отработавших свыше 150 тыс. ч; у металла корпуса № 2 они еще ниже (почти на 20 %); пластичность металла близка к средним значениям.

Для получения зависимости количества микроповреждений от выработанной доли ресурса традиционным методом образцы размером $\varnothing 19 \times 110$ мм с резьбовыми головками М18 подвергали статическому нагружению при четырех уровнях напряжений — 40, 60, 80 и 100 МПа — при температуре 590 – 610 °С в течение 2 – 15 тыс. ч. Образцы снимали для разрезки и определения количества микропор после испытания в течение от 0,1 до 0,9 ресурса, часть образцов разрушилась. Всего испытано 53 образца. Относительную долю ресурса, исчерпанную во время термосилового старения, определяли по кривым длительной прочности.

Для металлографического выявления пор ползучести образцы 5 – 6 раз полировали, подвергали электрохимическому и химическому травлению. Поры изучали на световом микроскопе при увеличении 500 на 20 – 25 полях каждого шлифа. Размер каждого поля составил $0,2 \times 0,2 = 0,04$ мм². Подсчитывали среднее число пор N_p на 1 мм². Для исключения из результатов литейных дефектов, подсчет проводили для пор размером не более 8 мкм. Результаты подсчета числа пор на единицу площади обрабатывали в координатах $N_p - \tau_s/\tau_k$, где τ_s — время нагружения, τ_k — время до разрушения; аналогичную обработку проводили для данных по размеру пор и их объемной доле.

От некоторых образцов на электроискровом станке отрезали пластинки для изучения тонкой структуры. После местного утонения путем электрохимического травления фольги исследовали под электронным микроскопом «на просвет» при увеличении 30 000 и 50 000 для выявления характерных особенностей мест зарождения начальных пор.

Для определения коэффициента ресурса путем моделирования образцами с надрезом выбирали металл корпуса № 1 (см. табл. 1).

Использование надрезанных образцов для моделирования основано [5, 6] на определении отношения долговечности гладкого и надрезанного образцов при заданных условиях: температуре и напряжениях в гладкой части. На длительную прочность при 510 – 610 °С и напряжении в гладкой части в диапазоне 50 – 80 МПа испытывали 20 цилиндрических образцов ($D = 16$ мм) с острым ($r_n \leq 0,05$ мм) кольцевым надрезом, глубина которого обеспечивала соотношение $\omega_0 = 1 - (d/D)^2 = 0,35 \pm 0,01$, а также серию стандартных гладких образцов с диаметром рабочей части 10 мм.

Долговечность надрезанных образцов с другой величиной ω_0 и при других условиях нагружения определяли расчетным путем. Исходя из условий эксплуатации корпусов из стали 15X1M1ФЛ (не выше 570 °С), выбрали следующие три температуры t_n для расчетов: 520, 540 и 560 °С. Напряжения для оценки K_t взяты близкими к величине номинальных допускаемых напряжений для стали 15X1M1Ф [8] при указанной температуре на расчетный ресурс $4 \cdot 10^5$ ч: 50, 65 и 80 МПа соответственно. Методика моделирования оказалась проще, чем приведенная в [5, 6], и включала следующие этапы.

1. Построение двух кривых в координатах $P_{дп} - \lg(\sigma_{бр})$ для гладких образцов и образцов с надрезом, где $P_{дп} = T(\lg \tau - 2 \lg T + 25)$, и получение путем статистической обработки соответственно двух аналитических зависимостей вида $P_{дп.г}$ (или $P_{дп.0,65}$) = $A(\lg \sigma_{бр})^B$, где A и B — постоянные, зависящие от поврежденности ω_0 сечения (у гладкого образца $\omega_0 = 0$).

2. Определение по указанным аналитическим зависимостям серий величин $P_{дп.\omega_0}$ для заданных уровней $\sigma_{бр}$ (50, 65 и 80 МПа) и относительной поврежденности надрезанного сечения ω_0 , равной 0,2,

Таблица 1. Механические свойства (при 20 °С) металла исследованного корпуса из стали 15X1M1ФЛ

Металл	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Корпуса № 1	257 – 280	479 – 516	18,8 – 24	61,0 – 67,0
	269 *	499	18,7	65,0
Корпуса № 2	226 – 249	481 – 490	20,7 – 30,0	48,6 – 75,0
	236	486	24,7	58,8
Корпусов, отработавших свыше 150 тыс. ч (обобщенные данные ВТИ)	212 – 391	452 – 616	15 – 30	37 – 81
	301	534	22	59

Примечание. Числитель — разброс результатов; знаменатель — среднее значение.

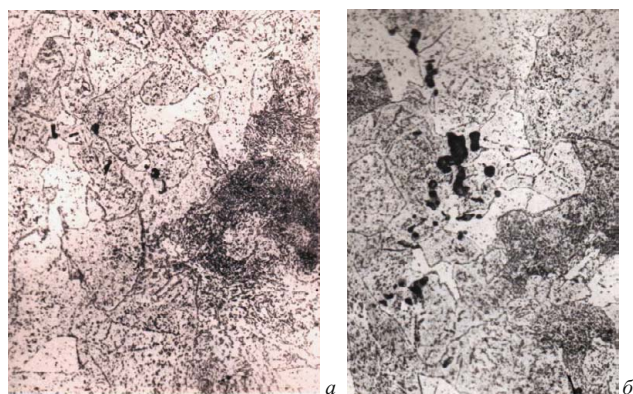


Рис. 1. Микрповреждения от ползучести в стали 15X1M1ФЛ при увеличении 500: а — единичные поры; б — цепочки пор

0,35 и 0,5. Уровни ω_0 выбирали с учетом ранее установленного [5, 6] примерного соотношения между числом микропор в стали 12X1МФ и относительной поврежденностью сечения образца надрезом (табл. 2).

Для расчета $P_{дп.\omega_0}$ применяли ранее экспериментально полученную линейную зависимость $P_{дп.\omega_0}$ от $\lg \omega_0$ для заданного напряжения $\sigma_{бр}$ на участке от $P_{дп.г}$ ($\omega_0 = 0$) до $P_{дп.0,65}$. При этом для каждого уровня ω_0 использовали следующее соотношение:

$$P_{дп.\omega_0} = P_{дп.г} \left[1 - \frac{\lg(1-\omega_0)}{\lg(0,35)} \right] + P_{дп.0,65} \frac{\lg(1-\omega_0)}{\lg(0,35)}. \quad (2)$$

3. Расчет логарифма долговечности образца с надрезом $\lg \tau_{к.н}$ для заданного уровня относительной поврежденности по формуле

$$\lg \tau_{к.н} = \frac{P_{дп.\omega}}{(t_{и} + 273) + 21 \lg(520 + 273) - 25} \cdot 1000. \quad (3)$$

4. Расчет логарифма долговечности гладкого образца $\lg \tau_{к.г}$ по формуле

$$\lg \tau_{к.г} = \frac{P_{дп.г}}{t_{и} + 273 + 21 \lg(t_{и} + 273) - 25} \cdot 1000. \quad (4)$$

5. Расчет коэффициента относительной живучести χ [5, 6], равного отношению времени до разрушения надрезанного ($\tau_{в.н}$) и гладкого ($\tau_{в.г}$) образцов, ис-

пытанных при одинаковой температуре и напряжении в гладкой части:

$$\chi = 10^{\lg(\tau_{в.н}) - \lg(\tau_{в.г})}. \quad (5)$$

6. Определение коэффициента ресурса по коэффициенту относительной живучести:

$$K_{\tau} = \chi / (1 - \chi). \quad (6)$$

Исследование структуры после длительного нагружения показало, что поры распределены крайне неравномерно — их число существенно меняется (в 3–5 раз) в различных участках образца, причем в некоторых образцах поры обнаруживали при одном просмотре и не обнаруживали при последующих. Возможно, это объяснялось несовершенством методики исследования, поскольку шлифы изготавливали из средней части образцов, подвергшихся старению.

Сравнение со шкалами для горячекатаных труб [2, 3] показывает, что повреждения до 300 пор на мм^2 можно классифицировать как единичные поры (рис. 1, а), до 700 пор на мм^2 — как множественные поры, до 900 пор на мм^2 — как цепочки пор (рис. 1, б). Характерно, что цепочки пор развиваются в дальнейшем в микротрещины. Таким образом, можно считать оправданной рекомендацию [2], согласно которой предельное состояние для металла корпусов арматуры возникает при наличии трех цепочек пор в одном поле зрения при увеличении 500.

Максимальное количество пор на одном шлифе не превосходило 1000 шт/ мм^2 . Из работ [5, 6] следует, что такую плотность расположения пор можно моделировать образцом с относительной поврежденностью сечения $\omega_0 = 0,5$.

Исследования структуры на тонких фольгах на просвет при увеличениях 30 000 и 50 000 показали зернограничное расположение пор (рис. 2), при этом их форма была различная — круглая со слабыми признаками огранки (рис. 2, а) или вытянутая (рис. 2, б).

На рис. 3 показана зависимость числа пор от степени выработки ресурса в условиях ползучести. Несмотря на значительный разброс результатов установлено, что поле экспериментальных точек в координатах $N_{п} - \tau_{з}/\tau_{к}$ занимает область, по форме напоминающую трапецию. Слева эта трапеция ограничена долей

Таблица 2. Значения балла микрповрежденности стали 12X1МФ и относительная поврежденность сечения модельного образца в плоскости надреза [5, 6]

Характер микрповрежденности	Балл микрповрежденности	Плотность расположения пор, шт/ мм^2	Относительная поврежденность от надреза
Воздействие ползучести без микропор	1	Нет	0–0,2
Заметное воздействие ползучести, отдельные микропоры	2	До 300	0,35
Сильное воздействие ползучести, многочисленные неориентированные поры	3	До 700	—
Серьезные повреждения от ползучести, цепочки пор	4	До 1000	0,5
Серьезные повреждения от ползучести, цепочки пор и разъединение по отдельным границам	5	До 2000	0,65

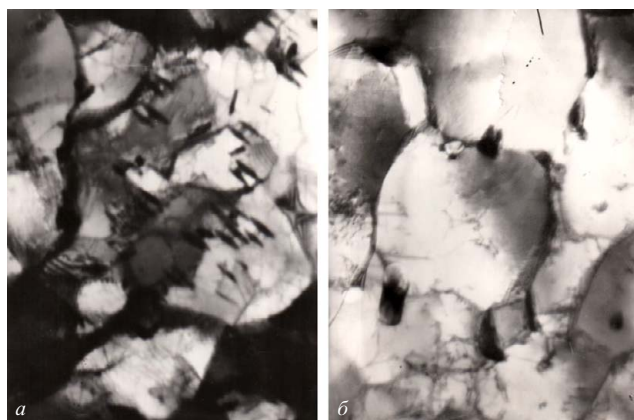


Рис. 2. Зернограничные поры, наблюдаемые на фольгах при увеличении 30 000 (а) и 50 000 (б)

ресурса, равной 0,6, когда обнаружены первые поры. Наклонная линия, ограничивающая трапецию сверху, показывает предельное число пор, которое может быть в детали, металл которой выработал соответствующую долю ресурса. Пунктирная линия в правой части диаграммы обозначает край зоны образования цепочек пор.

Как уже отмечалось, предельное число пор ползучести, которое можно наблюдать в металле отливок из стали 15X1M1FL при напряжении 40 – 100 МПа и температуре 590 – 610 °С, составляет около 1000 шт./мм², что в 2 – 4 раза меньше, чем количество пор, образующихся в аналогичных условиях в горячекатаных трубных сталях. Таким образом, подтверждается мнение о том, что особенности литой структуры — наличие дендритной ликвации, влияние границ первичных аустенитных зерен, обогащенных примесными атомами, отсутствие первичной рекристаллизации — затрудняют образование пор и ускоряют возникновение микротрещин при относительно небольшом количестве пор.

С учетом результатов статистической обработки верхняя граница зависимости числа пор от доли ресурса на рис. 3 аппроксимируется выражением

$$N_{\text{п}} = \alpha(\tau_3/\tau_k)^\beta, \quad (7)$$

где $\alpha = 931,05$; $\beta = 2,2363$. Достоверность зависимости высокая — $R^2 = 0,999$.

С учетом соотношения между $K_{\text{т}}$ и τ_3/τ_k , а также формулы (7) установлена зависимость коэффициента ресурса от числа пор на единицу площади:

$$K_{\text{т}} = (\alpha/N_{\text{п}})^{1/\beta} - 1. \quad (8)$$

Результаты расчета по (8) с учетом количества пор для различных баллов повреждаемости представлены в табл. 3. Из нее следует, что при наличии 300 пор на мм² коэффициент ресурса равен 0,66. Если же образовалось 700 пор на мм², то он составляет 0,14, т.е. снижается более чем в четыре раза. При увеличении коли-

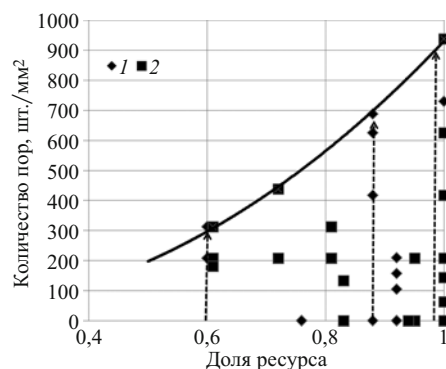


Рис. 3. Зависимость количества пор от выработанной доли ресурса в стали 15X1M1FL после 155 тыс. ч работы: Е — единичные поры; М — множественные поры; Ц — цепочки пор; 1 и 2 — номера корпусов

чества пор до 900 на мм² коэффициент ресурса до образования макротрещины уменьшается в 10 раз — до 0,015.

Далее уточняли величину поврежденности от надреза, моделирующую заданную поврежденность от порообразования. При анализе порообразования от выдержки под нагрузкой в ранее проведенных исследованиях роль температуры и напряжений не рассматривалась. Долговечность же образцов существенно зависит от этих параметров. В то же время отношение долговечности каждой пары гладких и надрезанных образцов, испытанных при одинаковом $\sigma_{\text{бр}}$, довольно слабо зависит от условий испытания.

Сопоставим результаты исследования порообразования с моделированием повреждаемости образцами с надрезом. На рис. 4 и в табл. 4 представлены экспериментальные зависимости долговечности гладких и надрезанных образцов ($P_{\text{дл.г}}$ и $P_{\text{дл.0,65}}$) от $\lg \sigma_{\text{бр}}$. Видно, что разброс результатов для гладких образцов больше, однако коэффициент корреляции достаточно высок ($R^2 = 0,7442$).

По формулам (2) – (5) вычисляли значения коэффициентов ресурса для образцов с разной начальной поврежденностью при трех уровнях напряжений: 50, 65 и 80 МПа. Результаты вычислений для напряжений 80 МПа представлены на рис. 5 и в табл. 5. Видно, что различия в температуре в пределах 520 – 560 °С практически не оказывают влияния на $K_{\text{т}}$. Расчет с использованием величины $K_{\text{т}}$ показывает, что при наличии

Таблица 3. Коэффициент ресурса деталей из стали 15X1M1FL с микроповреждениями, определенный по количеству пор на мм²

Вид повреждений	Балл по [2]	Количество пор на мм ² ($N_{\text{п}}$)	Коэффициент ресурса по количеству пор на мм ² ($K_{\text{т}}$)
Единичные поры	2	300	0,66
Множественные поры	3	700	0,14
Цепочки пор	4	900	0,015
Слившиеся поры	5	1000	0,00

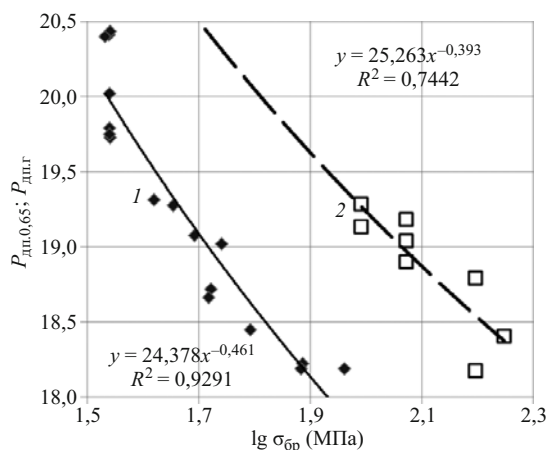


Рис. 4. Кривые длительной прочности металла корпуса № 1 задвижки из стали 15X1M1ФЛ после 155 тыс. ч эксплуатации: 1 и 2 — образцы с надрезом и гладкие

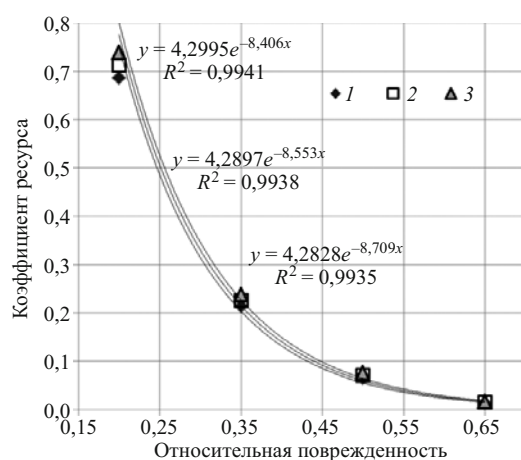


Рис. 5. Зависимость коэффициента ресурса от относительной поврежденности сечения для образцов из стали 15X1M1ФЛ при температурах 520 (1), 540 (2) и 560 °C (3) и напряжении 80 МПа

балла 3 (множественные поры) деталь, отслужившая 250 тыс. ч до появления трещины, может проработать еще 53 – 59 тыс. ч.

Далее анализировали влияние напряжений на величину K_τ (рис. 6, табл. 6). Видно, что на K_τ более заметно влияют напряжения, чем температура. Зависимость K_τ от напряжения — степенная, с показателем степени в пределах 0,238 – 0,231 (см. табл. 6). Однако если рассмотреть ординаты крайних точек на рис. 6 (0,214 – 0,264), то видно, что разброс не превышает $\pm 12\%$. Поскольку он небольшой, вместо девяти величин K_τ для заданного значения ω_0 , определенных

Таблица 4. Аналитические зависимости долговечности гладких и надрезанных образцов от напряжений

Тип образцов	Уравнение корреляции $P_{дл}$ и $\lg \sigma_{ср}$	R^2
Гладкие	$P_{дл.г} = 25,263 \lg \sigma_{ср}^{-0,393}$	0,7442
С надрезом	$P_{дл.0,65} = 24,378 \lg \sigma_{ср}^{-0,461}$	0,9291

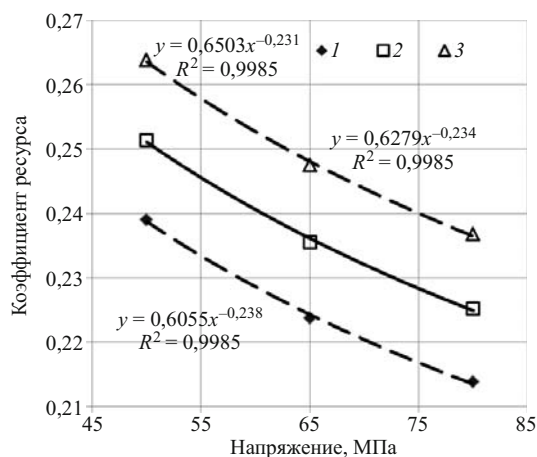


Рис. 6. Зависимость коэффициента ресурса от напряжений для образцов из стали 15X1M1ФЛ с относительной поврежденностью сечения $\omega_0 = 0,35$ при температурах 520 (1), 540 (2) и 560 °C (3)

для напряжений 50, 65 и 80 МПа, а также температур 520, 540 и 560 °C, рассматривали только одно значение — среднее. По усредненным данным получена обобщенная зависимость K_τ от относительной поврежденности сечения надрезом ω_0 (рис. 7). Она аппроксимируется с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,9942$) экспонентой

$$K_\tau = 4,2902e^{-8,39\omega_0}. \quad (9)$$

По этой зависимости, приравняв K_τ от пор и надреза, получено соотношение, позволяющее более точно установить ω_0 , а значит, геометрию образцов, моделирующих поврежденность порами в стали 15X1M1ФЛ:

$$\omega_0 = -\frac{1}{8,39} [\ln(K_\tau) - \ln(4,2902)]. \quad (10)$$

Расчет по (10) показал (табл. 7), что поврежденность, равная 2, 3 и 4 баллам, в стали 15X1M1ФЛ моделируется более глубокими надрезами, чем в стали 12X1МФ. Так, балл 2 моделируется надрезом с $\omega_0 = 0,22$ против 0,20 [5, 6]; балл 3 — 0,41 против 0,35, балл 4 — 0,64 против 0,5.

Иногда трудно различить литейные рыхлоты и поры ползучести. Тем не менее на снимках пор на фольгах, полученных при больших увеличениях

Таблица 5. Зависимости K_τ образцов с надрезом от относительной поврежденности сечения и результаты расчета ресурса при $\omega_0 = 0,35$

Температура, °C	Уравнение для расчета K_τ	R^2	K_τ	Ресурс, тыс. ч
520	$4,2828e^{-8,709\omega_0}$	0,9935	0,214	53
540	$4,2897e^{-8,553\omega_0}$	0,9938	0,225	56
560	$4,2995e^{-8,406\omega_0}$	0,9941	0,237	59

Примечание. Время эксплуатации $t_3 = 250$ тыс. ч; $\sigma_{ср} = 80$ МПа.

(30 000 – 50 000), ясно видно зернограницное расположение несплошностей, характерное для пор ползучести.

Сравнение вида микроповреждений в литой стали 15X1M1ФЛ и в горячекатаных трубах показывает, что технология производства весьма существенно влияет на количество и взаимное расположение пор. В литой стали поры располагаются реже, наблюдается большая неравномерность их распределения от образца к образцу. Но общая картина, показывающая увеличение количества пор с ростом выработанной доли ресурса, весьма схожа.

Характерно, что цепочки пор развиваются в дальнейшем в микротрещины. Поэтому можно принять рекомендацию [2] считать предельным состоянием для металла корпусов арматуры наличие трех цепочек пор в одном поле зрения при увеличении 500.

При анализе влияния микроповрежденности на ресурс обычно не принимается в расчет уровень напряжений и температуры, при которых получены данные по количеству и расположению пор. Можно полагать, что большинство исследователей считают влияние этих условий на образование пор несущественным и ориентируются главным образом на общий вид повреждений и выработанную долю ресурса. Моделирование образцами с надрезом подтверждает несущественное влияние температуры на коэффициент ресурса.

Однако эксперименты и расчеты показывают, что уровень напряжений может сказаться на относительной долговечности образцов с надрезом в пределах $\pm 12\%$ для рассмотренного диапазона напряжений — 50 – 80 МПа. Учитывая, что точность оценок K_t примерно такого же порядка, получена его усредненная зависимость от начальной относительной поврежденности сечения надрезом (см. рис. 7). Эта зависимость построена по четырем точкам (ромбы), обозначающим соотношение K_t и ω_0 для четырех баллов повреждаемости (2, 3, 4, 5), аналогично тому как это наблюдается для стали 12X1МФ. Особенность порообразования в стали 15X1M1ФЛ позволяет установить для нее такое соотношение (квадраты) только для трех баллов повреждаемости (2, 3, 4). При балле 5 наблюдаются «серьезные повреждения от ползучести, цепочки пор и разъединения по отдельным границам». Характерно, что все три квадратные точки смещены

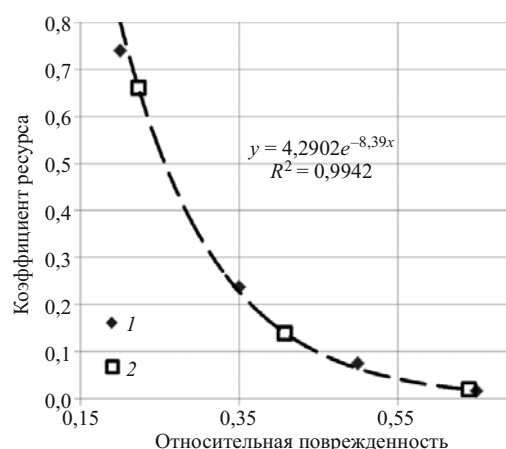


Рис. 7. Соотношение усредненного коэффициента ресурса моделирующего образца из стали 15X1M1ФЛ и относительной поврежденности сечения надрезом (1) и порами (2)

на рис. 7 вниз и вправо по сравнению с ромбами. Это означает, что одну и ту же стадию поврежденности в стали 15X1M1ФЛ моделирует более глубокий надрез, чем в стали 12X1МФ. В частности, моделирующая поврежденность от надреза для 4-го балла микроповрежденности равна 0,65 у стали 15X1M1ФЛ и 0,5 у стали 12X1МФ.

Таким образом, путем исследования порообразования в стали 15X1M1ФЛ установлено, что при контроле микроповрежденности металла корпусов арматуры, работающих в условиях ползучести, за предельное состояние следует принимать появление цепочек пор.

Моделирование микроповреждаемости цилиндрическими образцами с кольцевым надрезом показало практическое отсутствие влияния температуры на коэффициент ресурса при 520 – 560 °С, в то же время

Таблица 6. Зависимости K_t образцов с надрезом от напряжений при относительной поврежденности сечения $\omega_0 = 0,35$ и результаты расчета ресурса

Температура, °С	Уравнение для расчета K_t	R^2	K_t	Ресурс, тыс. ч
520	$0,6055\sigma_{\text{бр}}^{-0,238}$	0,9985	0,214	53
540	$0,6279\sigma_{\text{бр}}^{-0,234}$	0,9985	0,225	56
560	$0,6503\sigma_{\text{бр}}^{-0,231}$	0,9985	0,237	59

Примечание. Время эксплуатации 250 тыс. ч; $\sigma_{\text{бр}} = 80$ МПа.

Таблица 7. Коэффициент ресурса у деталей из стали 15X1M1ФЛ с микроповреждениями, определенный по относительной живучести образцов с надрезом и по количеству пор на мм²

Вид повреждений	Балл [2]	Моделирующая поврежденность от надреза		Коэффициент ресурса моделирующего образца с надрезом	
		для стали 12X1МФ [5, 6]	для стали 15X1M1Ф (уточненная по количеству пор)	для стали 12X1МФ [5, 6]	для стали 15X1M1ФЛ (уточненный по количеству пор)
Единичные поры	2	0,20	0,22	0,74	0,66
Множественные поры	3	0,35	0,41	0,24	0,14
Цепочки пор	4	0,50	0,64	0,08	0,015
Слившиеся поры	5	0,65	—	0,02	0,00

напряжения влияли в пределах $\pm 12\%$, что позволило получить путем усреднения зависимость K_t от начальной относительной поврежденности сечения надрезом для реальных баллов микроповрежденности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Типовая инструкция по контролю и продлению срока службы металла основных элементов котлов, турбин и трубопроводов тепловых электростанций (РД 10-577-03). Сер. 10. Вып. 30. — М.: Науч.-тех. центр по безопасности в промышленности Гостехнадзора России, 2003. — 128 с.
2. Основные элементы котлов, турбин и трубопроводов ТЭС. Контроль состояния металла. Нормы и требования (СТО 70238424.27.100.005–2008). — М.: РАО «ЕЭС России», 2008. — 657 с.

3. Guideline for the Assessment of Microstructure and Damage Development of Creep Exposed Materials for Pipes and Boiler Components — VGB-TW 507/TW 507 e. 1992.
4. Махутов Н. А. Управление ресурсом безопасной эксплуатации объектов техносферы / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 12. С. 5 – 7.
5. Гладштейн В. И. Прогнозирование работоспособности металла гибов паропроводов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 5. С. 47 – 52.
6. Гладштейн В. И. Микроповреждаемость металла высокотемпературных деталей энергооборудования. — М.: Машиностроение, 2014. — 340 с.
7. Качанов Л. М. Основы механики разрушения. — М.: Наука, 1974. — 250 с.
8. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды (РД 10-249–98.). — М.: ЦКТИ, 1999. — 227 с.

Materials mechanics: strength, durability, safety

UDC 620.169:629.10.061

THE IMPACT OF METAL MICRO-DAMAGES ON THE LIFETIME OF CAST CASING OF THE VALVE IN CREEP CONDITIONS

© V. I. Gladshtein

Submitted March 22, 2016.

Dependence of the residual resource on the amount of micropores formed in conditions of prolonged ageing of cast steel 15Kh1M1FL under stress conditions and high degree of damage with micropores is determined. Two series of cylindrical specimens are also tested for long-term strength: circumferentially notched and smooth specimens. The resource factor K_t is determined for operation conditions [stress (50 – 80 MPa) and temperatures (520 – 560°C)] by comparison of the calculated durability of the notched specimens of other series with a lower depth of the notches than that in tested specimens and durability of the smooth specimens. Using the results of studying pore formation we revealed a quantitative correlation between the impact of the microdamage severity on the lifetime and relative damage of the section of a circumferentially notched cylindrical specimen. Temperature and stress dependence of K_t in the working range of loading conditions is studied for notched specimens. The type of damage at which further operation should be terminated is determined. It is found that the same stage of damage of steel 15Kh1M1FL must be simulated by a deeper notch than that in steel 12Kh1MF.

Keywords: casing; metal; creep; micropore; lifetime; simulation; notched sample; relative damage.

REFERENCES

1. Standard instruction on control and extending the life of the metal of the main elements of boilers, turbines and pipelines of heat power plants (RD 10-577-03) [in Russian].
2. Main elements of boilers, turbines and pipelines of TPS. The control state of the metal. Regulations and requirements (SRT 70238424.27.100.005–2008). — Moscow: Izd. RAO «EES Rossii», 2008. — 657 p. [in Russian].
3. Guideline for the Assessment of Microstructure and Damage Development of Creep Exposed Materials for Pipes and Boiler Components — VGB-TW 507/TW 507 e. 1992.

4. Makhutov N. A. Resource Management of the safe operation of those objects of the noosphere / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. No. 12. P. 5 – 7 [in Russian].
5. Gladshtein V. I. Forecasting capacity of metal bends paro-wires / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. No. 5. P. 47 – 52 [in Russian].
6. Gladshtein V. I. The microdamage of high-temperature metal parts of power station. — Moscow: Mashinostroenie, 2014. — 340 p. [in Russian].
7. Kachanov L. M. Fundamentals of fracture mechanics. — Moscow: Nauka, 1974. — 250 p. [in Russian].
8. The rules for calculating the strength of stationary boilers and steam and hot water pipelines (RD 10-249–98). — Moscow: Izd. TsKTI, 1999. — 227 p. [in Russian].