Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. П. Радченко, О. С. Афанасьева, Методика расчёта предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений при температурных выдержках в условиях ползучести, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 2(), 264–268

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu733>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 52.87.193.239

26 апреля 2023 г., 05:58:06

УДК 539.376+621.81:539.4

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ УПРОЧНЁННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВЫДЕРЖКАХ В УСЛОВИЯХ ПОЛЗУЧЕСТИ

*В. П. Радченко, О. С. Афанасьева*Самарский государственный технический университет,
443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

E-mails: radch@samgtu.ru, afa@pm.samgtu.ru

Предложен метод расчёта влияния температурных выдержек на приращение предела выносливости упрочнённых цилиндрических образцов с концентраторами напряжений. Для иллюстрации метода на модельных примерах показано, что релаксация остаточных напряжений вследствие ползучести при температурных выдержках приводит к снижению приращения предела выносливости упрочнённых образцов по отношению к неупрочнённым образцам на 20–40 %. Приведены результаты расчётов.

Ключевые слова: поверхностное упрочнение, остаточные напряжения, термоэкспозиция, ползучесть, релаксация, приращение предела выносливости.

Постановка задачи. Поверхностно пластическое деформирование цилиндрических изделий с концентраторами напряжений приводит к приращению предела выносливости по сравнению с пределом выносливости неупрочнённых образцов [1]. Это связывается с наличием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений. В качестве их критериальной характеристики в [1] предложено использовать зависимость

$$P_R = P_R^0 - \bar{\psi}_p \bar{\sigma}_{\text{ост}}, \quad (1)$$

где P_R — предел выносливости упрочнённой детали; P_R^0 — предел выносливости неупрочнённой детали; $\bar{\psi}_p$ — коэффициент влияния остаточных напряжений на предел выносливости по разрушению, который определяется экспериментально; $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$ — среднеинтегральное эквивалентное напряжение по толщине слоя во впадине концентратора, определяемое по формуле

$$\bar{\sigma}_{\text{ост}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\sigma_{\text{экв}}(\xi) d\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{экв}}(\xi)$ — эквивалентное остаточное напряжение в наименьшем сечении детали с концентратором; $\xi = y/t_{\text{кр}}$ — расстояние от дна надреза до текущего слоя; $t_{\text{кр}}$ — максимально возможная глубина нераспространяющейся усталостной трещины, возникающей при работе детали на пределе выносливости.

Таким образом, приращение предела выносливости упрочнённой детали в соответствии с (1) будет определяться формулой

$$\Delta P_R = \bar{\psi}_p |\bar{\sigma}_{\text{ост}}|. \quad (3)$$

Однако в процессе эксплуатации элементов конструкций при повышенных температурах происходит релаксация остаточных напряжений вследствие ползучести

Владимир Павлович Радченко (д.ф.-м.н., профессор), зав. кафедрой, каф. прикладной математики и информатики. *Ольга Сергеевна Афанасьева*, аспирант, каф. прикладной математики и информатики.

как для гладких изделий [2], так и для цилиндрических изделий с концентраторами [3]. В связи с этим становится актуальной задача оценки изменения остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое элементов конструкций при ползучести, так как кинетика компонент тензора остаточных напряжений во времени по толщине слоя приводит к изменению величины $\bar{\sigma}_{\text{ост}}$, определяемой согласно (2), и, как следствие, к дрейфу величины ΔP_R .

Методика расчёта релаксации остаточных напряжений в концентраторе. В работе используется разработанный в [4] метод решения такого рода задач. Задача о релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое элемента конструкции сводится к декомпозиции конструкции на два элемента: упрочнённый слой и конструкцию без этого слоя. Рассматривается гипотеза, согласно которой упрочнённый слой не влияет на жёсткость конструкции (играет роль тонкой «плёнки», наклеенной на поверхность конструкции) и деформируется вместе с конструкцией под действием внешних нагрузок (в режиме «жёсткого» нагружения).

Согласно такой декомпозиции основная задача разбивается на три самостоятельные: 1) определение напряжённо-деформированного состояния конструкции при ползучести без учёта поверхностного упрочнённого слоя; 2) восстановление начального напряжённо-деформированного состояния (НДС) после процедуры поверхностного пластического упрочнения (далее ППД) в поверхностно упрочнённом слое по одной из экспериментально замеренной компоненте тензора остаточных напряжений по толщине слоя; 3) расчёт релаксации остаточных напряжений в поверхностно упрочнённом слое, при этом слой считается единым целым, деформирующимся в режиме «жёсткого» нагружения при заданных значениях компонент тензоров деформаций на поверхности конструктивного элемента, которые определяются из решения первой задачи.

В настоящей работе исследуется влияние температурной выдержки на релаксацию остаточных напряжений упрочнённого цилиндра с кольцевой выточкой, при этом предполагается, что релаксация остаточных напряжений вследствие ползучести на дне концентратора происходит так же, как в сплошном гладком цилиндре минимального радиуса, методика расчёта для которого детально изложена в [4].

В процессе решения первой задачи определяется кинетика тензора деформаций ε_{ij} от времени на поверхности. Компоненты ε_{ij} являются входными для решения третьей задачи о релаксации остаточных напряжений вследствие ползучести в тонком поверхностном слое, при этом компоненты ε_{ij} для цилиндра с концентратором определялись из численного решения соответствующей краевой задачи ползучести на основе МКЭ.

Полностью методика восстановления напряжённо-деформированного состояния после процедуры упрочнения и метод решения задачи о релаксации остаточных напряжений в упрочнённом слое в условиях ползучести приведены в работе [4] и вследствие громоздкости в данной работе не представлены.

Для сопоставимости результатов полагалось, что начальные эпюры остаточных напряжений на дне концентратора после процедуры упрочнения одинаковы при различных значениях H (см. рис. 1).

Численное моделирование процесса релаксации остаточных напряжений. Рассчитывался цилиндр с кольцевой выточкой, расположенной в среднем сечении ци-

Рис. 1. Схема нагружения и основные характеристики концентратора

Рис. 2. Эпюры остаточных напряжений σ_θ для образца с концентратором ($H = 0,75$ мм) в процессе ползучести при термоэкспозиции для сплава ЖС6КП при 1000°C : 1 – $t = 0 - 0$; 2 – $t = 0 + 0$; 3 – $t = 10$; 4 – $t = 50$; 5 – $t = 100$ ч

Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений σ_z для образца с концентратором ($H = 0,75$ мм) в процессе ползучести при термоэкспозиции для сплава ЖС6КП при 1000°C : 1 – $t = 0 - 0$; 2 – $t = 0 + 0$; 3 – $t = 10$; 4 – $t = 50$; 5 – $t = 100$ ч

Рис. 4. Эпюры остаточных напряжений σ_r для образца с концентратором ($H = 0,75$ мм) в процессе ползучести при термоэкспозиции для сплава ЖС6КП при 1000°C : 1 – $t = 0 - 0$; 2 – $t = 0 + 0$; 3 – $t = 10$; 4 – $t = 50$; 5 – $t = 100$ ч

ме. По результатам разбиения для данного случая получено 2500 конечных элементов.

Поскольку в данном случае решалась задача ползучести при температурных выдержках без нагрузки (термоэкспозиция), то растягивающее напряжение $\sigma = 0$ (см. рис. 1), и значения компонент тензора деформаций от растягивающего напряжения в любой точке образца $\varepsilon_{ij} = 0$, т.е. ползучесть развивается только за счёт самоуравновешенных остаточных напряжений.

цилиндра. Геометрические характеристики цилиндров выбирались с учётом стандартных концентраторов напряжений на валах с кольцевой выточкой по справочнику [5]. Расчётная схема нагружения цилиндра и основные характеристики выточки представлены на рис. 1.

Для построения объёмной конечно-элементной модели в расчётах было принято (обозначения — на рис. 1): $L = 30$ мм, $D = 2R = 10$ мм, $r = 0,75$. Величина H принимала значения от $H = 0,75$ до $H = 1,65$ мм с шагом $0,15$ мм, тогда $H/R \in [0,15; 0,33]$. Расчёт и построение модели проводился в пакете ANSYS 12. Направление образующей цилиндра совпадает с осью Oz . Плоскость xOy совмещалась с плоскостью поперечного сечения образца (для цилиндра с концентратором — она совмещалась с сечением минимальной площади), центр системы координат расположен в центре сечения.

При расчётах в качестве модельного материала использовался сплав ЖС6КП с модулем Юнга $E = 1,226 \times 10^5$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu = 0,3$. Расчёт осуществлялся для температуры $T = 1000^\circ\text{C}$.

Для решения задачи реологии была выбрана теория установившейся ползучести с законом (в одноосном случае)

$$\dot{\varepsilon} = c\sigma^n,$$

где $\dot{\varepsilon}$ — скорость деформации ползучести, σ — растягивающее напряжение, c и n — константы материала, значения которых для $T = 1000^\circ\text{C}$ приведены в [6]: $c = 5,7 \cdot 10^{-33}$ (МПа) $^{-n}$, $n = 3,11$.

Для разбиения объёма цилиндра на конечные элементы выбран конечный элемент в форме тетраэдра (SOLID95) с восемью узлами (четыре в вершинах, четыре в ребрах), позволяющий проводить расчёт НДС с учётом ползучести. Объём цилиндра разбивался на конечные элементы в автоматическом режиме.

В качестве примера на рис. 2–4 приведены рассчитанные эпюры остаточных напряжений по глубине слоя в различные моменты времени для случая $H = 0,75$ мм, из которых видно, что наблюдается существенная релаксация напряжений в упрочнённом слое по временной координате вследствие ползучести.

Численное исследование зависимости приращения предела выносливости от длительности термоэкспозиции. Расчётные зависимости $\sigma_i(y, t)$ ($i \equiv r, \theta, z$), где y — глубина слоя, использовались при вычислении $\sigma_{\text{экв}}$, которое, в конечном итоге, является функцией времени, и, как следствие этого, $\sigma_{\text{ост}}$, определяемое (2), также зависит от времени. Поэтому и приращение предела выносливости ΔP_R , задаваемое формулой (3), будет зависеть от времени. Тогда влияние термоэкспозиции на приращение предела выносливости можно определить при помощи величины

$$K = \frac{\Delta P_R(t)}{\Delta P_R^0}, \quad (4)$$

где $\Delta P_R(t)$ — текущее значение приращения предела выносливости в процессе термоэкспозиции, а $\Delta P_R^0 = \Delta P_R(0)$ — значение приращения предела выносливости при $t = 0$, т. е. после процедуры упрочнения (до термоэкспозиции).

В настоящей работе в качестве эквивалентных напряжений были использованы следующие комбинации остаточных напряжений:

$$\sigma_{\text{экв}}^1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_{\text{экв}}^2 = |\sigma_{\text{max}}|, \quad \sigma_{\text{экв}}^3 = |\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}|. \quad (6)$$

На рис. 5 представлена кинетика относительного изменения величины приращения предела выносливости K , вычисленного согласно (2)–(4), от времени термоэкспозиции для различных зависимостей $\sigma_{\text{экв}}$, задаваемых (5)–(6). Как следует из этих данных, происходит снижение приращения предела выносливости для всех трёх зависимостей во времени, что свидетельствует об отрицательном влиянии термоэкспозиции на приращение предела выносливости и снижении эффективности поверхностного пластического деформирования. При этом резкое падение величины K наблюдается в первые 10–20 часов, а далее происходит стабилизация величины K во времени. Абсолютная величина падения приращения предела выносливости вследствие ползучести составляет для данного примера около 40 % для $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}^{(1)}$ и $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}^{(3)}$ и около 20 % — для величины $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}^{(2)}$.

Аналогичные данные получены и для других концентраторов напряжений (других значений величины H). В качестве замечания следует отметить, что при вычислении интеграла (2) для величины $t_{\text{кр}}$ использовалось рекомендованное в [1] значение $t_{\text{кр}} = 0,0216D$, где D — диаметр цилиндрического образца в наименьшем сечении концентратора.

Таким образом, разработанная методика позволяет расчётным путём прогнозировать кинетику изменения приращения предела выносливости упрочнённых цилиндрических изделий с концентраторами напряжений и количественно выполнять

Рис. 5. Кинетика относительного изменения величины приращения предела выносливости в зависимости от длительности термоэкспозиции для различных вариантов $\sigma_{\text{экв}}$: 1 — $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}^{(1)}$; 2 — $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}^{(2)}$; 3 — $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_{\text{экв}}^{(3)}$

оценку отрицательного влияния термоэкспозиции на предел сопротивления усталости.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по образованию (проект РНП 2.1.1/3397, государственный контракт № П818) и РФФИ (проект № 07-01-00478-а).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов В. Ф., Кирпичёв В. А., Иванов В. Б.: Остаточные напряжения и сопротивление усталости упрочнённых деталей с концентраторами напряжений. — Самара: СНЦ РАН, 2008. — 64 с.
2. Саушкин М. Н., Кирпичёв В. А., Афанасьева О. С., Иванов Д. В. Расчётно-экспериментальное исследование устойчивости остаточных напряжений в упрочнённом слое цилиндрического изделия к температурным нагрузкам // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009. — № 1(18). — С. 101–113.
3. Афанасьева О. С., Просвиркина Е. А., Саушкин М. Н. Влияние термоэкспозиции и нагрузки на релаксацию остаточных напряжений в концентраторах напряжений цилиндрического образца в условиях ползучести / В сб.: *Труды шестой Всероссийской научной конференции с международным участием. Часть 1: Математические модели механики, прочности и надёжности элементов конструкций / Математическое моделирование и краевые задачи*. — Самара: СамГТУ, 2009. — С. 35–41.
4. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочнённых конструкциях. — М.: Машиностроение-1, 2005. — 226 с.
5. Савин Г. Н., Тульгин В. И. Справочник по концентрации напряжений. — Киев: Вища школа, 1976. — 412 с.
6. Радченко В. П., Ерёмин Ю. А. Реологическое деформирование и разрушение элементов конструкций. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 264 с.

Поступила в редакцию 08/VII/2009;
в окончательном варианте — 13/VIII/2009.

MSC: 74A10, 74S30

CALCULATION PROCEDURE OF A FATIGUE POINT FOR STRENGTHENED CYLINDRICAL SPECIMEN WITH PRESSURE CONCENTRATORS AT TEMPERATURE ENDURANCES IN THE CREEP CONDITIONS

V. P. Radchenko, O. S. Afanas'eva

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100.
E-mails: radch@samgtu.ru, afa@pm.samgtu.ru

Calculation procedure of influence of temperature endurances on an increment of a fatigue point for strengthened cylindrical specimen with pressure concentrators is proposed. In order to illustrate the method on modelling examples it is demonstrated that residual pressure relaxation leads to decrease in an increment of a fatigue point of strengthened specimen in relation to non strengthened specimen of 20–40 % due to creep at temperature endurances Results of calculations are quoted.

Key words: *superficial hardening, residual pressure, thermoexposition, creep, relaxation, increment of a fatigue point.*

Original article submitted 08/VII/2009;
revision submitted 13/VIII/2009.

Vladimir P. Radchenko (Dr. Sci (Phys. & Math.)), Head of Dept., Dept. of Applied Mathematics & Computer Science. *Ol'ga S. Afanas'eva*, Postgraduate Student, Dept. of Applied Mathematics & Computer Science.