

## Учет циклической деградации материала и аномалии механических свойств поверхностного слоя в расчете живучести пластины с отверстием\*

В. И. Миронов<sup>а</sup>, А. В. Кузнецов<sup>а</sup>, И. Г. Емельянов<sup>а,б</sup>

<sup>а</sup> Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>б</sup> Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

*Моделируется процесс циклической деградации материала в элементе конструкции на основе представлений об аномалии механических свойств поверхностного слоя. Кинетика процесса устанавливается путем нестандартного эксперимента с построением полных равновесных диаграмм предварительно циклически нагруженных образцов. Приводятся согласующиеся с экспериментом результаты численного решения задачи о развитии усталостной трещины в пластине с отверстием.*

**Ключевые слова:** пластина с отверстием, усталостная трещина, циклическая деградация материала, полная диаграмма деформирования.

В описании усталостного разрушения элементов конструкций и деталей машин обычно различают стадии зарождения и развития усталостной трещины с разными физическими подходами, критериями разрушения и математической формализацией процесса накопления повреждений. Продолжительность стадий определяется долговечностью и живучестью, т.е. числом циклов нагружения до появления и развития трещины соответственно. Расчеты долговечности базируются на положениях классической теории усталости, основанной на эмпирической усталостной кривой и гипотезах суммирования повреждений, чаще всего на гипотезе линейного суммирования. Живучесть рассчитывается методами механики разрушения с использованием различных кинетических зависимостей, например уравнения Париса. Устранение искусственного разделения теоретических и экспериментальных исследований двух стадий процесса усталости в деформируемом теле является актуальным при разработке объединительной методики расчета усталостного ресурса конструкций. В настоящей работе данная проблема рассматривается с позиций феноменологического метода полных диаграмм деформирования.

Полная диаграмма деформирования – это условная диаграмма с падающей до нуля ветвью, которая отражает все физические процессы, протекающие в материале при нагружении. Такая диаграмма строится при испытаниях малых однократных образцов в жестком нагружающем устройстве и дает наиболее полное и логически завершенное представление о служебных свойствах материала [1, 2]. Прочность, располагаемая пластичность, упругость, трещиностойкость и энергоемкость материала оцениваются соответствующими параметрами диаграммы: высотой, длиной, углами наклона восходящей и падающей ветвей, площадью под кривой деформирования. Анализ указанных параметров, в отличие от сравнения пределов пластичности и сопротивления усталости, дает большую информацию при выборе и замене одного материала другим [3].

Перспективы практического использования полных диаграмм обусловлены описанием деградационных процессов в материале элементов конструкций, вызванных условиями эксплуатации. Рабочие детали механизмов и несущие металлоконструк-

\* Доклад на Международной научно-технической конференции “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, 2013).

ции, как правило, разрушаются хрупко. Процесс перехода пластичных конструкционных материалов в хрупкое состояние под действием низких температур, импульсных и циклических нагрузок, внешней среды предлагается связывать с изменением параметров диаграммы деформирования. Сначала от влияния какого-либо одного фактора, например циклической нагрузки, а затем и при их совместном действии.

На рис. 1 приведена предельная поверхность стали 20ГЛ, построенная по результатам испытания однократных образцов в исходном состоянии и после предварительной наработки до различного числа циклов на уровне максимального напряжения цикла  $\sigma_{\max} = 260$  МПа. Результаты испытаний дают наглядное представление об усталостном процессе как переходе пластичного материала в хрупкое состояние. Это согласуется с физическими представлениями о природе явления усталости металлов и, кроме того, позволяет описать усталостный процесс в категориях напряжений и деформаций. Например, в расчетах долговечности ряда конструкций опытные кинетические кривые циклической деградации материала  $S_B(\sigma_{\max}; n)$  были использованы в силовой модели многоциклового усталости [4–6]. Для аппроксимации опытных кривых использовалась степенная зависимость

$$S_B(\sigma_{\max}; n) = S_{B0} - k_\sigma n^m, \tag{1}$$

где  $m$  – опытная константа материала;  $n$  – текущее число циклов нагружения; параметр  $k_\sigma$  определяется из условия усталостного разрушения;  $S_{B0}$  – предел прочности;  $\sigma_{\max}$  – максимальные напряжения цикла;

$$S_B(\sigma_{\max}; N_{\max}) = \sigma_{\max}; \tag{2}$$

$N_{\max}$  – число циклов до разрушения образца. Для разного уровня максимального напряжения цикла кинетические кривые являются подобными, и показатель степени не меняется.

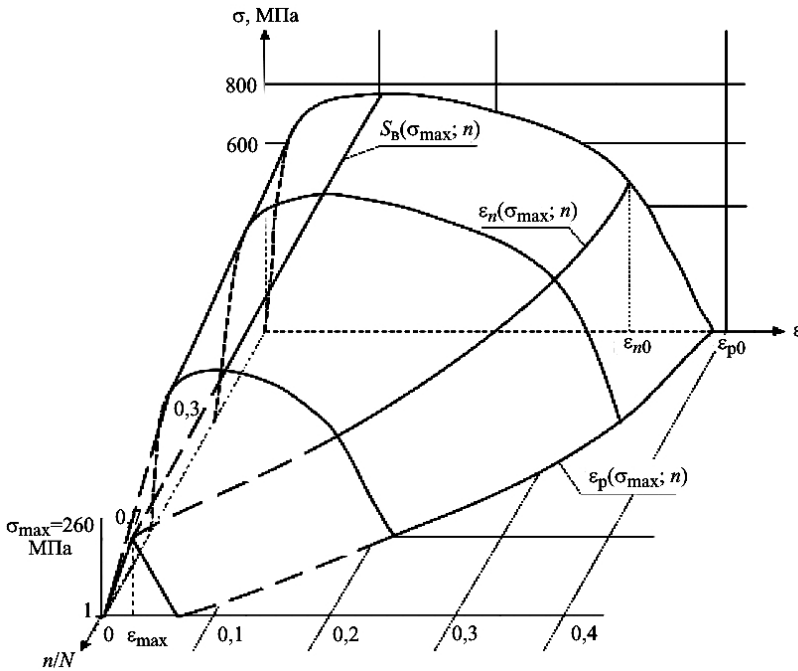


Рис. 1. Циклическая деградация стали 20ГЛ.

Смену уровня напряжений связывают с переходом с одной кинетической кривой на другую. Порядок перехода определяется из условия эквивалентности двух циклических состояний материала с разной историей нагружения по равенству значений контролирующего параметра (предел прочности). Такой прием, обоснованный при испытаниях литых сталей, позволяет рассчитать долговечность нерегулярно нагруженных конструкций без привлечения линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений.

В методе полных диаграмм взаимосвязь между статическими и циклическими свойствами материала представляется следующей. В случае квазистатического нагружения материал разрушается при увеличении интенсивности напряжений до уровня предела прочности. Полагается, что усталостное разрушение материала происходит при снижении предела прочности до уровня интенсивности напряжений в данной точке, отвечающей максимальному значению циклической нагрузки, т.е. под напряжением в выражениях (1) и (2) следует понимать его интенсивность. В целом вопрос выбора приведенного напряжения исследован недостаточно. Так, при усталостных испытаниях тонкостенных трубок второе главное напряжение не влияет на долговечность, если оно составляет менее 80% первого главного напряжения [7]. Это условие часто выполняется в опасных точках тонкостенных оболочечных конструкций [6]. Переход пластичного материала перед усталостным разрушением в хрупкое состояние (рис. 1) также свидетельствует о решающей роли первого главного напряжения.

При численном расчете живучести пластины с отверстием и надрессорной балки вагонной тележки по новой модели материала с деактивацией разрушенных конечных элементов получен почти в два раза заниженный прогноз числа циклов развития усталостной трещины [6]. При этом, как обычно, материал считался однородным, и аномалия свойств поверхностного слоя явно в расчете не учитывалась. Между тем экспериментально установлено, что глубина слоя  $h$  с аномальными механическими свойствами у сталей достигает 0,2 мм, а предел текучести материала поверхностных слоев на 30% ниже, чем основного металла [8]. Различные стартовые условия усталостных процессов в поверхностном слое и в глубине металла приводят к появлению трещины на поверхности, даже если эти процессы протекают подобным образом. На рис. 2 представлены варианты схемы изменения прочности основного металла  $S_B(\sigma_{\max}; n)$  и распределение прочностных и циклических свойств по глубине поверхностного слоя.

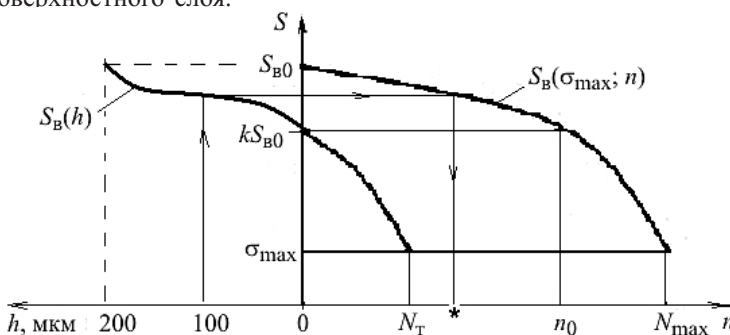


Рис. 2. Схема определения прочностных и циклических свойств по глубине поверхностного слоя.

Основной металл конструктивного элемента моделируется однородной средой с пределом прочности  $S_{B0}$  и числом циклов  $N_{\max}$  до усталостного разрушения при снижении предела прочности при циклировании до уровня максимального напряжения цикла  $\sigma_{\max} = \text{const}$ . Функция  $S_B(\sigma_{\max}; n)$  определяется в эксперименте с

периодической обточкой образцов, когда долговечность возрастает в несколько раз. Предел прочности поверхностных слоев материала  $kS_{B0}$  меньше, чем основного металла, т.е.  $k < 1$ , и зависит от способа обработки поверхности. Закон изменения предела прочности по глубине поверхностного слоя нелинейный [8] и в численном примере описывается кубическим полиномом Лагранжа. Коэффициенты полинома вычисляются из граничных условий  $S_B(h) = S_{B0}$ ,  $S_B(0) = 0,7S_{B0}$  и его симметрии. Аналогично определяется начальный модуль упругости материала каждого слоя. Число циклов  $N_T$  до появления усталостной трещины оценивается путем стандартных испытаний на усталость.

В рассматриваемой схеме на взаимосвязи между статическими и циклическими свойствами материала базируется следующее утверждение: состояние материала на поверхности эквивалентно состоянию основного металла после циклической обработки до  $n_0$  циклов (рис. 2). Тогда оставшееся до разрушения основного металла число циклов  $N_{max} - n_0$  будет таким, как и  $N_T$  для поверхностного слоя:

$$N_T = N_{max} - n_0. \quad (3)$$

Из выражения (2) при  $S_B(\sigma_{max}; n_3) = \kappa S_{B0}$  ( $n_3$  – экспериментальное число циклов) следует

$$n_3 = \left( \frac{S_{B0} - \kappa S_{B0}}{S_{B0} - \sigma_{max}} \right)^{1/m} N_{max}.$$

Согласно (3) получим зависимость

$$N_{max} = N_T \left[ 1 - \left( \frac{S_{B0} - \kappa S_{B0}}{S_{B0} - \sigma_{max}} \right)^{1/m} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Полагая, например,  $\sigma_{max} = 0,4S_{B0}$ ,  $m = 2$ ,  $\kappa = 0,7 \dots 0,9$ , в соответствии с формулой (4) получим  $N_{max} = (1,7 \dots 3,4)N_T$ . Таким образом, число циклов  $N_{max}$  до разрушения образца, принадлежащее действительной усталостной кривой, не является характеристикой ни основного металла, ни поверхностного слоя.

В модельной задаче неоднородность механических свойств по глубине поверхностного слоя учитывается путем разбиения его на десять однородных подслоев толщиной 0,02 мм, свойства которых также устанавливаются по схеме, приведенной на рис. 2. Для примера порядок определения свойств на глубине 0,5h показан на рис. 2 стрелками. По направлению вертикальной стрелки вверх на графике  $S_B(h)$  находится предел прочности  $S_B(0,5h)$  среднего слоя, а по направлению горизонтальной стрелки на графике  $S_B(\sigma_{max}; n)$  – число циклов  $n_0(0,5h)$  (отмечено звездочкой). Затем определяется число циклов до усталостного разрушения слоя  $N(0,5h)$  при максимальном напряжении цикла  $\sigma_i$  как разность  $N_{max} - n_0(0,5h)$ . Дегградация прочности среднего слоя описывается зависимостью  $S_B(\sigma_{max}; n)$  на интервале  $[n_0(0,5h); N_{max}]$ . Аналогично определяются модули упругости материала подслоев в исходном состоянии. Отметим, что в данной схеме учитывается как начальная неоднородность прочностных и упругих свойств, так и различная скорость их дегградации в поверхностном слое и в глубине материала детали.

В численном расчете живучести пластины с отверстием рассмотренная схема используется для определения предела прочности и модуля упругости поверхностного слоя металла, прилегающего к отверстию. По толщине пластины свойства не менялись. Были проведены испытания на усталость чугуновой пластины (50×30×1,8 мм) с центральным отверстием диаметром 3 мм при пульсирующем цикле перемещений

на границе и определены числа циклов до появления трещины  $N_{T0} = 62500$  и до полного разделения пластины на две части  $N_{p0} = 108000$ , а также построена экспериментальная зависимость длины трещины  $L$  от числа циклов. Испытания проводились на сервогидравлической установке INSTRON 8801 с заданным максимальным перемещением цикла  $0,0047$  мм, появление трещины связывалось с началом падения нагрузки.

При заданных параметрах с помощью программного пакета ANSYS решалась плоская статическая задача с размером элемента  $0,02$  мм по определению напряжений, в частности  $\sigma_{\max 0}$  в конечном элементе на краю отверстия, при максимальном перемещении цикла (на рис. 3 кривая 1). Исходное распределение пределов прочности элементов вдоль горизонтальной оси показано на рис. 3 кривой 1'. Необходимо построить кинетические кривые деградации для всех конечных элементов на интервале циклирования  $[0, N_{T0}]$ .

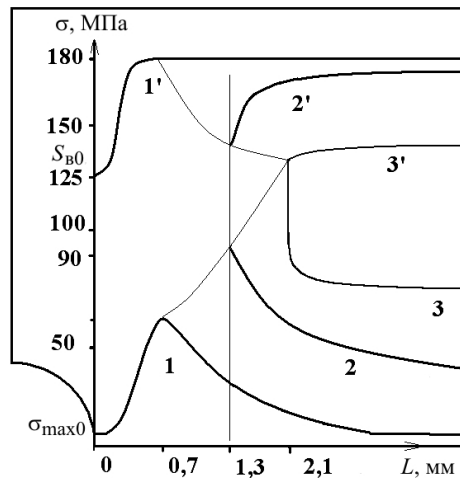


Рис. 3. Распределение напряжений (1, 2, 3) и пределов прочности (1', 2', 3') в вершине трещины.

Поскольку исходное поле напряжений неоднородное, необходимо определить значения долговечности  $N_{\max}$  по формуле (4) для каждого элемента. Зададим кривую усталости по условию появления трещины в виде  $N_T \sigma_{\max}^\alpha = N_{T0} \sigma_{\max 0}^\alpha$ . Полагая для чугуна  $\alpha = 5$ , где  $\alpha$  — параметр кривой, находим значения  $N_T$ ,  $N_{\max}$ ,  $n_0$  и кинетическую кривую

$$S_B(\sigma_{\max}; n) = kS_{B0} - k_\sigma(n_0 + n)^m,$$

где для конечных элементов основного металла пластины принимаем  $k = 1$ ,  $n_0 = 0$ .

По кинетическим кривым при стационарной внешней нагрузке определяется текущее значение предела прочности во всех элементах при  $n = n_0 + N_{T0}$ . При этом в крайнем элементе поверхностного слоя отверстия в соответствии с критерием (2) имеет место равенство

$$S(\sigma_{\max 0}; n_0 + N_{T0}) = \sigma_{\max 0}.$$

Данный элемент деактивируется, что приводит к перераспределению напряжений в пластине при двух (ввиду симметрии) элементах по краям отверстия. Циклирование условно останавливается, и решается статическая задача для новой пластины по определению напряжений в уцелевших конечных элементах. Если при новом напряженном состоянии в каком-либо элементе сопротивление будет меньше

(или равно) действующего напряжения, этот элемент также деактивируется. Снова решается статическая задача, проверяется условие прочности и т.д. Если во всех уцелевших элементах найденное ранее значение предела прочности будет больше напряжения при максимальном перемещении цикла внешней нагрузки, пластина с начальной трещиной “готова” к дальнейшему циклированию (напр., кривая 2 на рис. 3). Необходимо некоторое число циклов пока сопротивление не снизится до нового значения максимального напряжения цикла. Прием с остановкой циклирования представляется вполне оправданным ввиду несоизмеримо разных физических времен процессов накопления усталостных повреждений и перераспределения напряжений в упругом теле.

Поскольку на этапе развития трещины напряженное состояние постоянно меняется, имеет место нестационарное нагружение элементов при неизменных граничных условиях. Дальнейшее циклирование продолжается с новой интенсивностью, но без роста трещины и сопровождается падением предела прочности. Оно останавливается согласно критерию (2), если в каком-либо элементе сопротивление снижается до уровня максимального напряжения цикла. Проводится деактивация элементов, решается статическая задача и т.д. По аналогии с первым шагом после нескольких итераций определяется новое состояние равновесия и продолжается циклирование. Расхождение в итерационных процессах при длине трещины более 2 мм означает, что в пластине отсутствует равновесное напряженное состояние, т.е. она начинает неуправляемо разрушаться. Результаты расчетов приведены на рис. 4.

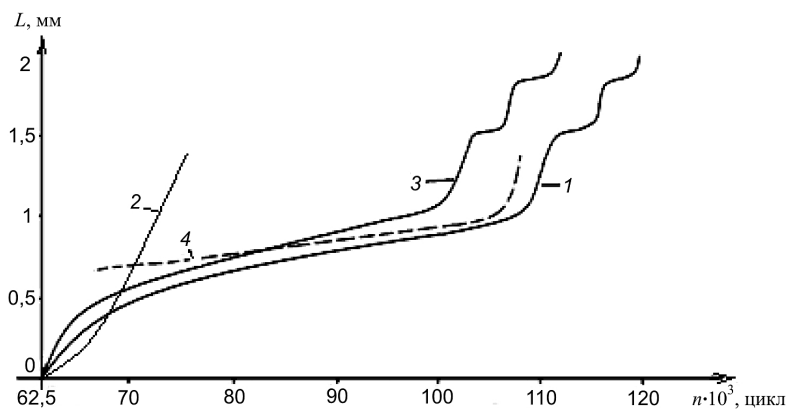


Рис. 4. Рост трещины в чугунной пластине: 1 – эксперимент; 2, 3 – соответственно расчет без учета и с учетом аномалии свойств поверхностного слоя; 4 – расчет по уравнению Париса.

Как отмечалось выше, расчет без учета аномалии механических свойств поверхностного слоя дает заниженный прогноз живучести пластины (на рис. 4 кривая 2) по сравнению с экспериментом (кривая 1). Кривая 4 (рис. 4), полученная интегрированием уравнения Париса, хорошо описывает стадию подрастания усталостной трещины. Расчетная кривая роста трещины, полученная с учетом аномалии свойств поверхностного слоя (на рис. 4 кривая 3), качественно соответствует эксперименту. Для улучшения количественного прогноза необходимо учитывать реологически неустойчивые состояния материала, что приведет к 5%-ному увеличению числа циклов роста усталостной трещины [9]. Тем не менее полученные результаты дают основание для дальнейшей разработки метода полных диаграмм и его применения в расчетах усталостного ресурса элементов конструкций. В частности, для разработки объединительной методики численного расчета долговечности и живучести элементов конструкций исходя из единых модельных представлений о циклической деградации материала.

**Резюме**

Модельюється процес циклічної деградації матеріалу в елементі конструкції на основі представлень щодо аномалії механічних властивостей поверхневого шару. Кінетика процесу встановлюється в нестандартному експерименті з побудовою повних рівноважних діаграм попередньо циклічно навантажених зразків. Приводяться результати числового розв'язання задачі щодо розвитку тріщини від утомленості в пластині з отвором, які узгоджуються з експериментальними.

1. Пат. РФ № 2251676. Устройство и способ для испытания образцов материалов на растяжение / В. И. Миронов, В. А. Андронов, А. В. Якушев, В. Б. Бамбулевич. – Оpubл. 10.05.2005, Бюл. № 13.
2. Лебедев А. А., Чаусов Н. Г. Новые методы оценки деградации механических свойств металла конструкций в процессе наработки. – Киев: Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2004. – 133 с.
3. Миронов В. И., Емельянов И. Г., Якушев А. В., Лукашук О. А. Разработка экспресс-метода для контроля свойств вагонных сталей // Транспорт Урала. – 2012. – № 2 (33). – С. 13 – 18.
4. Емельянов И. Г., Миронов В. И., Кузнецов А. В. Оценка долговечности оболочечной конструкции, лежащей на опорах // Пробл. машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 1. – С. 101 – 107.
5. Mironov V. I., Lukashuk O. A., Yakushev A. V., Kozhushko G. G. Cyclic degradation of material in vehicle components // Russian Eng. Res. – 2012. – 32, No. 5-6. – P. 417 – 422.
6. Емельянов И. Г., Миронов В. И. Долговечность оболочечных конструкций. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. – 218 с.
7. Гриненко Н. И. Вопросы усталостной прочности машиностроительных конструкций // Тр. школы-семинара “Усталостная прочность машиностроительных конструкций”. – Челябинск: Челяб. рабочий, 1975. – 92 с.
8. Прокопенко А. В., Торгов В. Н. Поверхностные свойства и предел выносливости металла. Сообщ. 1. Зависимость предела текучести от глубины слоя // Пробл. прочности. – 1986. – № 4. – С. 28 – 34.
9. Миронов В. И., Якушев А. В. Прогноз усталостного ресурса пластины с отверстием с учетом реологически неустойчивых состояний материала: Тр. VI Науч.-техн. конф. “Механика микронеоднородных материалов и разрушение”. – Екатеринбург, 2010. – С. 321 – 325.

Поступила 14. 11. 2013