

# Моделирование циклических свойств материала по изменению его статической диаграммы

Миронов В.И.

*ИМАШ УрО РАН*

Предложенные различными авторами модели накопления усталостных повреждений различаются теоретическим обоснованием выбора меры поврежденности, но все они слабо увязаны с механическими свойствами материала. Поэтому результаты расчетов на их основе часто существенно отличаются от экспериментальных [1]. В предлагаемом подходе к построению кинетических моделей, напротив, задействована полная информация о механических свойствах материала, заложенная в равновесной диаграмме деформирования с падающей ветвью, отражающей его структурную неоднородность и сопротивление разрушению.

## Экспериментальные циклические диаграммы деформирования

Известно, что падающая ветвь на диаграмме растяжения конструкционного материала строится при соблюдении ряда условий: малости испытываемого объема, достаточно большой жесткости испытательной машины, нагружения заданным перемещением и т.д. [2]. В описанных ниже опытах использовали образцы диаметром 2 мм и длиной рабочей части  $l_0 = 2$  мм, материальный объем которых приближен к эффективному объему материала [3]. Испытания на машине ИНСТРОН-1251 с управлением от датчика обратной связи позволяли получать машинную диаграмму с падающей (хотя и не до нуля) ветвью как неповрежденных образцов, так и циклически тренированных.

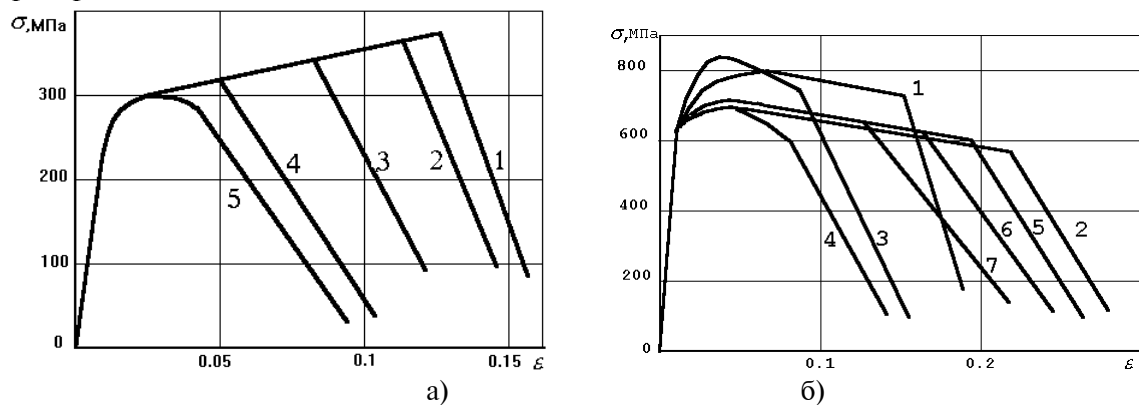


Рис.1 Циклические диаграммы деформирования латуни и стали 35.

На рис.1 (а,б) кривые под номером 1 - осредненные диаграммы связи материала без циклической тренировки. Они построены по правилу  $s = Q/F_0$ ,  $e = D/l_0$ , где  $Q$ ,  $D$  - текущие значения нагрузки и удлинения образца,  $F_0$  - начальная площадь сечения. Остальные кривые на рис.1 - осредненные статические диаграммы материалов, построенные после некоторого числа циклов  $n_1 < N$  тренировки (циклические диаграммы).

Предварительное циклирование проводилось на уровне максимального напряжения пульсирующего цикла  $S_M \leq 0.8S_T$  ( $S_T$  - предел текучести), что отвечает

области многоциклового усталости. Начала координат циклических диаграмм совмещены ввиду того, что остаточных макродеформаций после циклирования не было. Число циклов тренировки  $n_1 < N$ , где  $N = N(S_M)$  - опытное число циклов до разрушения на уровне напряжений  $S_M$  (точка диаграммы Велера).

Кривые 2, 3, 4 и 5 (рис.1б) для латуни ЛМцСК-58-28-1-1 зафиксированы после 10, 16, 20 и 27 тысяч циклов тренировки при  $S_M = 200$  МПа, ( $N = 30720$ ). Диаграмма материала деградирует с ростом числа циклов предварительной тренировки. При числе циклов, близком к предельному, латунь теряет пластические свойства и переходит в хрупкое состояние (кривая 5 на рис. 1а). Вырождение прочностных и деформационных свойств идет немонотонно.

Кривые 2, 3, 4 (рис.1б) для стали 35 получены после 2000, 18330 и 26500 циклов тренировки при  $S_{M1} = 0.8S_T$  ( $S_T = 700$  МПа,  $N_1 = 30550$ ); кривые 5, 6 и 7 после 2000, 114940 и 172400 циклов при  $S_{M2} = 0.6S_T$ , ( $N_2 = 191560$ ). Испытания на уровне  $S_{M2} = 0.7S_T$  дали промежуточный результат и здесь не приводятся.

Результаты экспериментов позволяют однозначно заключить: циклическая тренировка немонотонно и неоднозначно меняет параметры диаграммы деформирования испытанных конструкционных материалов, но в конечном счете приводит к ее вырождению. При циклировании существенно меняется располагаемая пластичность, оцениваемая здесь длиной диаграммы деформирования материала и модуль спада.

## Эффект увеличения запаса пластичности

Отвлекаясь от построения модели усталостного разрушения материала остановимся на эффекте увеличения деформируемости (длины циклической диаграммы) стали 35 в начальный период циклирования. Данный эффект наблюдается при сотне циклов тренировки, что важно для практического использования. Сохраняется до числа циклов  $n_1 = (0.3 \dots 0.5)N$ , а затем уже происходит вырождение диаграммы с исчерпанием пластичности и прочности.

Увеличение деформируемости металла в холодную исключительно важно для многих технологических операций: гибки, штамповки, протяжки и т.д. Известны промышленные способы предварительной обработки циклическим деформированием (правка в вальцах) и защищенные патентами методы повышения долговечности конструкций на основе циклической перегрузки. Эксперимент с малыми образцами позволяет без больших затрат определить целесообразность циклической тренировки изделия: если нет увеличения запаса пластичности (как у стали 35), то циклическая тренировка повышенными нагрузками бесполезна или даже вредна.

Доказательством того, что именно запасом пластичности определяются циклические свойства материала служат результаты испытаний стали 35 при ступенчатом циклическом нагружении. Сравнивая долговечности на двух уровнях стационарного нагружения  $N_1 = 30550$  и  $N_2 = 191560$  циклов, можно заключить, что повреждающее действие напряжений высокого уровня сильнее, чем низкого. Известные модели накопления усталостных повреждений, построенные на такой логике, предсказывают снижение долговечности на низком уровне напряжений после тренировки на более высоком. Экспериментальная проверка часто дает обратный результат [1].

Так, и у стали 35, после тренировки на уровне  $S_{M1} = 0.8S_T$  до числа циклов  $n_1 = 15275$  и последующем переходе на уровень  $S_{M2} = 0.6S_T$  число циклов до разрушения возрастает до 321800. Подобный переход при  $n_1 = 2000$  дает долговечность 446000 циклов, что значительно больше долговечности  $N_2$  нетренированного образца. Такой результат можно объяснить лишь возрастанием пластичности стали 35 на начальном этапе циклирования. По всей вероятности, одна из причин неудовлетво-

рительного прогноза ресурса изделий при нестационарном нагружении связана с ошибочным представлением об однозначно повреждающем действии циклирования.

С другой стороны, при ступенчатом нагружении в обратном порядке хороший прогноз долговечности той же стали 35 дает линейная гипотеза суммирования. На уровне напряжений  $S_{M2}$  партия образцов нагружалась до  $n_1 = 0.5 N_2 = 95780$  циклов, а затем на уровне  $S_{M1}$  доводилась до разрушения. Средняя по шести образцам долговечность составила 111700 циклов, при прогнозе по линейной гипотезе 110000 циклов.

Можно сказать, что диаграмма Велера отражает конечный результат стационарного циклирования: разрушение после некоторого числа  $N$  циклов нагружения. Эксперименты с построением циклических диаграмм дают дополнительную информацию о кинетике данного процесса: изменении свойств материала по мере роста числа циклов тренировки  $n_1 \leq N$ . А тот факт, что усталость проявляется в изменении параметров именно падающей ветви диаграммы растяжения, позволяет по новому оценить связь статических и циклических свойств материала и на этой основе расширить возможности феноменологического описания явления усталости.

### Кинетические кривые вырождения статических свойств

Выбор подходящих кинетических параметров одномерной модели определяется характером вырождения конкретного материала. В частном случае, для материала типа латуни, удобно использовать силовой подход и в качестве контролирующего параметра взять предел прочности  $S_B(S_B; n_1)$ , как функцию максимального напряжения цикла  $S_M$  и числа циклов тренировки ( $0 \leq n_1 \leq N$ ). Условие усталостного разрушения определим, предварительно, равенством

$$S_B(S_M; N_S) = S_M \cdot \quad (1)$$

Функция  $S_B(S_M; n)$ , вообще говоря, является подходящей аппроксимацией экспериментальных данных. Если не идентифицировать расчетную модель с конкретным материалом, то можно записать, для примера [4]

$$S_B(S_M; n) = S_B^0 - k_S n^m \quad (2)$$

где  $S_B^0$  - начальный предел прочности (при  $n_1 = 0$ );  $m = m(S_N)$  или, в частном случае,  $m = \text{const}$ ; коэффициент  $k_S$  определяется условием

$$k_S = \frac{S_B^0 - S_M}{N_S^m}.$$

В последнем выражении  $N_S$  долговечность при стационарном циклировании с заданным значением  $S_M$ .

Аналогично строится модель вырождения статических свойств материала и при деформационном подходе. Пусть многоцикловое пульсирующее нагружение проводится с контролем максимальной в цикле деформации  $e_M$ , а кинетическая кривая, по аналогии с (2), имеет вид

$$e_p(e_M, n) = e_p^0 - k_e n^m, \quad (3)$$

где  $e_p$  - деформация равновесного разрушения тренированного образца;  $e_p^0$  - то же, при  $n = 0$ ,  $m = \text{const}$  или  $m = m(e_M)$  определяются экспериментально, коэффициент  $k_e$

находится из условия  $e_p(e_M, N) = e_{pM}$ , согласованного с равенством (1), но не означающим разрушения образца. При неизменном в ходе циклирования модуле упругости материала  $E = \text{const}$  можно положить  $N_S \cong N_e$  и определить точку диаграммы Велера равенством (1). Формула (3) может быть применена и для стали 35, если величину  $e_p^0$  установить при  $n = 1000$  циклов.

По результатам проведенных экспериментов нетрудно заметить, что деформационный подход годится для всех испытанных материалов, то есть является более универсальным.

Как известно, наибольшей общностью обладает энергетический подход. Выберем в качестве кинетического параметра модели удельную работоспособность  $A(S_M, n)$  материала, определяемую площадью под циклической диаграммой деформирования. Величина  $A$  при любом фиксированном  $n$ , определяется совокупностью простых характеристик прочности, пластичности и разрушения  $S_B, S_T, e_p$  и др. Удельная работоспособность материала чувствительна к структурному состоянию материала, а значит, и к легированию, фазовым переходам, температуре и другим внутренним параметрам. Модель на основе такой комплексной характеристики материала пригодна для оценки различных деградиационных процессов - релаксации, ползучести, длительной прочности. При соответствующем экспериментальном обосновании она позволит с единых позиций оценить поврежденность материала в случае различного сочетания усталостного нагружения, выдержки под нагрузкой, температуры, пиковых перегрузок и других внешних факторов, что характерно для реальных условий работы конструкций.

### Стадия циклического предразрушения материала

Независимо от выбранного подхода (типа кинетической кривой) вырождение статической диаграммы при циклировании заканчивается усталостным разрушением испытуемого объекта материала. И тут необходимо различать два способа циклического нагружения с заданным максимальным напряжением цикла  $S_M$  и максимальной деформацией  $e_M$ . В случае неизменных модулей упругости  $E$  и разупрочнения  $E_p$ , при  $n = N$ , диаграмма деформирования становится билинейной (ломаная  $OAB$  на рис.2).

Как показывает анализ однократного нагружения системы машина-образец [2], в следующем за  $N$  полуцикле нагружения с контролем по напряжениям произойдет динамическое разрушение при  $S = S_M$ . Такой вид усталостного разрушения называют разрушением со статическим доломом, а критерием усталостной прочности является равенство (1). При нагружении малого образца с контролем по деформациям в достаточно жесткой машине возможно дальнейшее ( $n > N$ ) циклирование без разрушения.

Положим, для определенности, что вырождение диаграммы при  $n > N$  до положения  $OA_1B_1$  (рис.2) идет согласно (3). Деформирование по пути  $OA_1C$  при

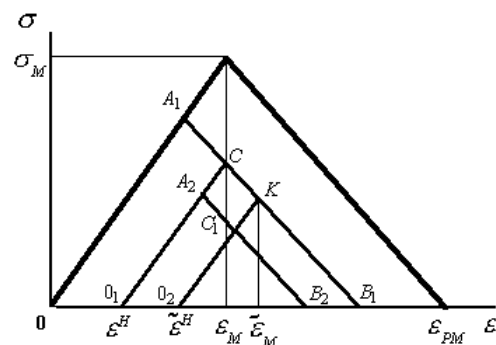


Рис.2. Схема вырождения диаграммы связи при  $n \geq N$ .

достаточно большой жесткости машины, устойчиво [2,3]. В полцикле разрузки появится остаточная деформация  $e^H$ . Для малого изменения числа циклов  $dn$  имеем

$$de^H = -\frac{E_p}{E} de_p \quad (4)$$

Материал с накопленными циклическими деформациями остается упругим, но связь напряжений и деформаций принимает вид

$$s = E(e - e^H),$$

а максимальное напряжение цикла снижается по мере накопления остаточных деформаций по закону

$$s_M = E(e_M - e^H). \quad (5)$$

Вырождение диаграммы до  $O_1A_2B_1$  и нагружение по пути  $O_1A_2C_1$  приведут к новым остаточным деформациям и т.д. Равновесное циклирование закончится разделением образца на две части при условии

$$e^H = e_M, \quad (6)$$

имеющем смысл критерия усталостного разрушения при нагружении с контролем по деформациям. Соответствующее число циклов до разрушения  $N_p > N$ .

Модель следует дополнить условием эквивалентности двух состояний материала при разной истории стационарного циклирования

$$e_p(e_{M1}, n_1) = e_p(e_{M2}, n_2), \quad (7)$$

необходимом для расчета при нестационарном нагружении.

Из равенства (7), с учетом (3) и  $m = \text{const}$  получим, что материал после циклирования на уровне максимальных деформаций  $e_{M1}$  в течение  $n_1$  циклов будет в том же состоянии, что и при циклировании на уровне  $e_{M2}$  до некоторого эквивалентного  $n_3 = n_2$  числа циклов

$$n_3 = n_1 \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{e_p^0 - e_{pM1}}{e_p^0 - e_{pM2}} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (8)$$

При иной, отличной от (3), аппроксимации кинетической кривой, условие (8) даст, естественно, другое выражение для определения  $n$ .

В интервале циклирования  $[0, N]$  переход с одного уровня деформаций  $e_M$  на другой не меняет вида статической диаграммы и приводит только к изменению интенсивности ее вырождения. В интервале  $[N, N_p]$  ступенчатое увеличение деформации цикла  $e_M$  меняет как величину остаточной деформации так и вид самой диаграммы (рис.2)

Пусть при некотором значении  $n > N$  диаграмма имеет вид  $OCB_1$  с остаточной деформацией  $e^H$ . Приращение деформации  $de = \tilde{e}_M - e_M$  вызовет приращения остаточной деформации  $de^g = \tilde{e}^H - e^H$ , причем

$$de^g = \left( 1 - \frac{E_p}{E} \right) de \quad (9)$$

а диаграмма принимает вид  $O_2KB_1$ .

## Одномерная модель деформационного типа

Объединим полученные выражения в модель деградации статических свойств материала с позиций деформационного подхода

$$\frac{de_p}{dn} = mk_e n^{m-1}, \quad m = m(e_M), \quad k_e = (e_p^0 - e_{pM}) [N(e_M)]^{-m}$$

$$s_M = E e_M, \quad n = n_1 \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{e_p^0 - e_{pM1}}{e_p^0 - e_{pM2}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad 0 < n \leq N$$

$$de^H = -E_p E^{-1} de_p, \quad de^g = \left( 1 - \frac{E_p}{E} \right) de$$

$$s_M = E (e_M - e^H - e^g), \quad N < n \leq N_p$$

Дальнейшее улучшение модели связано с учетом дефекта модулей упругости  $E$  разупрочнения  $E_p$ , роли сжимающих напряжений и изменения коэффициента асимметрии цикла при появлении остаточных деформаций и т.д.

В эксперименте стадия циклического предразрушения элемента материала ( $N < n \leq N_p$ ) возможна на машинах большой жесткости и при нагружении заданным перемещением. Подобное нагружение реализуется в статически неопределимых конструкциях даже при заданных на границе силах. В этом случае возможность появления зоны предразрушения в элементе конструкции будет определяться решением краевой задачи, включающей модель деградации статических свойств. Разумеется, для того, чтобы построенная модель могла быть введена в краевую задачу теории усталости, необходимо, как минимум, провести ее обобщение на случай неодносного напряженного состояния.

Рассмотренная концепция циклических диаграмм по-новому представляет связь статических и циклических свойств материала. Предложены варианты построения однопараметрической модели, включающей стадию циклического предразрушения. Адаптация модели к расчету конкретного элемента конструкции потребует ее доработки. Тем не менее, приведенный пример иллюстрирует предлагаемый способ построения кинетических моделей материала. Он показывает прежде всего, что возможности феноменологического описания процесса усталостного разрушения материала еще не исчерпаны. Вырождение статической диаграммы, выявленное ранее на простой структурно-неоднородной модели [2], наблюдается и у конструкционных материалов, но имеет более сложный характер.

## Литература

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращения: Пер. с англ. - М.: Мир, 1984 - 624 с.
2. Стружанов В.В., Миронов В.И. Деформационное разупрочнение материала в элементах конструкций. Екатеринбург: УрО РАН, 1995.- 190с.
3. Функция сопротивления материалов и постановка краевых задач механики разрушения/ С.Д.Волков: Препринт.- Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986.- 65с.
4. Влияние циклической тренировки на параметры функции сопротивления / В.И.Миронов, В.В.Стружанов, Т.В.Филиппова // Наб.Челны: Камский политехн. ин-т, 1990 - 10с.- Рус.Деп. в ВИНТИ № 4800 - В 90.