

ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ОБРАЗЦОВ НАДРЕЗОМ, ПОДВЕРГАЕМЫХ ИСПЫТАНИЮ НА УСТАЛОСТЬ

Э. ЦОБОЛЬ—Б. И. ШАНДОР*

Кафедра механической технологии Будапештского Технического Университета

Поступило: 21 сентября 1978 г.
Представлено: доц. д-р И. Артингер

Введение

Испытание образцов с надрезом представляет собой мост, соединяющий результаты испытаний проведенных на гладких образцах и на готовых конструкциях [1]. Влияние повторной нагрузки на структуру материала, процессы, приводящие к усталостному разрушению, реакция отдельных типов материала на повторную нагрузку, а также факторы, влияющие на ход процессов в большинстве случаев исследуются на гладких образцах [2, 3]. Однако, даже со знанием всех этих данных невозможно с достаточной надежностью дать предварительный расчет о долговечности конструкции, построенной из данного материала. Это объясняется тем, что поведение образца с большей или меньшей концентрацией напряжения зависит не только от усталостных свойств материала, но и от его чувствительности к надрезам [4], что можно изучать на образцах с надрезом различной геометрической формы. Однако, для обобщения результатов испытания образцов с надрезом и тем самым для их использования при расчете конструкций на долговечность, необходимо знать распределение напряжений как в образце, так и в конструкции [5].

Для определения распределения напряжений в принципе возможны два пути: определение расчетным или измерительным путем. В нижеследующем, без стремления к полноте, хотелось бы указать на некоторые трудности, встречающиеся при обоих методах. Проблемы нередко оказываются тяжелыми и даже их решение на нынешнем уровне наших знаний не всегда возможно. Однако, пренебрегая ими, результаты могут вводить нас в заблуждение и приводить к противоречиям.

Трудности определения распределения напряжений попытаемся представить в виде примеров, взятых из результатов серии измерений. Описание всех результатов этой серии далеко выходило бы за рамки статьи, поэтому здесь приводятся только избранные примеры. При этом освещаются

* Университет Уисконсин (США)

лишь случаи, которые регулярно повторялись в серии измерений, исключая возможность заключения вывода из неизвестной ошибки измерения находится в литературе под № [6].

Описание измерения

Из материала торгового качества, катанного и свободного от напряжений, марки ШАЕ 1043 изготовились образцы с двояким видом надреза, представленные на *рис. 1*. На поверхность образцов были наклеены датчики размером $1,6 \times 1,6$ мм, распределенные по схеме *рис. 2*. На рисунке датчика № 1 и 3 обозначены пунктиром потому, что они наклеивались на симметричные

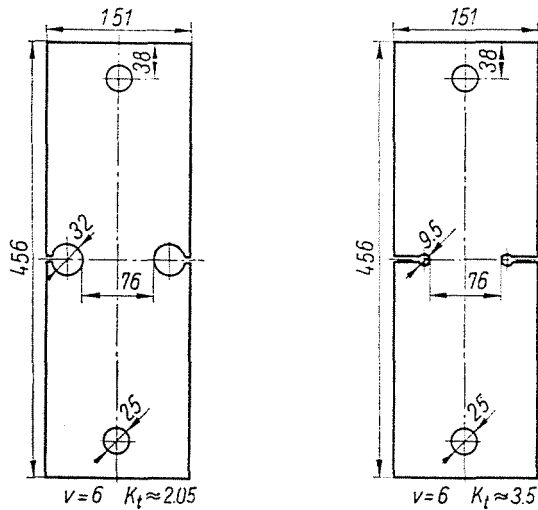


Рис. 1. Плоские образцы с надрезом, применяемые для испытаний на усталость

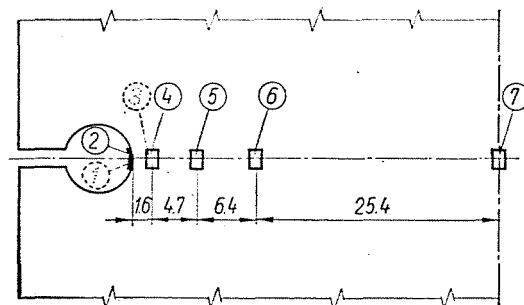


Рис. 2. Размещение датчиков на образцах, подвергаемых усталости

места, соответствующие датчикам № 2 и 4. Таким образом, датчик № 1 был наклеен в другом отверстии, на правой стороне образца, в то время как датчик № 3 был размещен на левой стороне, но на противоположной поверхности чем остальные датчики. Это позволило определить изгибающее усилие, возникающее от возможной асимметричной нагрузки образца в его плоскости и перпендикулярно к нему. Захват образцов показан на рис. 3. Растягивающая

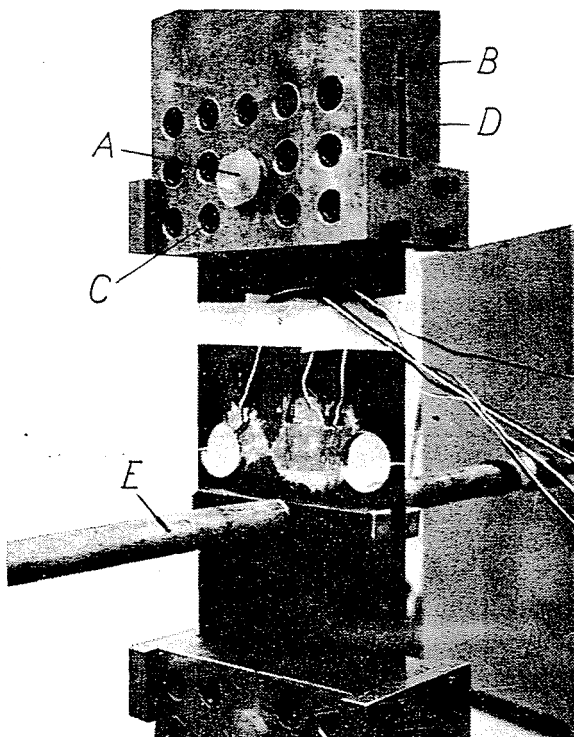


Рис. 3. Захват датчиков при испытаниях на усталость

нагрузка передается через штифт А, а сжатие — через клины, заклиненные в щель В. Болты С прижимают образец к поверхности Д, обеспечивая тем самым беззазорное прилегание в точном направлении. Боковые опоры Е предотвращают изгиб образца в период сжатия.

¹Так как в отношении описания явлений точные значения усилий и напряжений не представляют интереса, опытные данные по английским единицам измерения приведены в округленных значениях метрической системы. Так, напр., 1000 пси равно 7 MN/m^2 , $1 \text{ лс} = 5 \text{ N}$.

Образцы были одинаково нагружены средней амплитудой напряжения $\sigma_a = \pm 140 \text{ MN (м}^2 \text{ 1)}$, однако, для каждого образца было изменено среднее напряжение σ_M . Его значения, одновременно и обозначения образцов приведены в табл. I. В табл. II, составлены максимальные значения напряжения для отдельных групп образцов, с учетом как средних величин, так и величин концентрации напряжения. Имея в виду, что предел текучести использованного материала составил $R_e = 360\text{—}380 \text{ MN/м}^2$, видно, что концентрация напряжения, возникающая в нижней части надреза у некоторых образцов была ниже предела текучести, а у других превысила его.

Образцы подвергались усталостной нагрузке в электрогидравлическом пульзаторе. Удлинения были измерены в циклах по логарифмическому ряду чисел, т. е. либо в цикле 1, 2, 5, 10, 20, 50, либо в цикле 1, 3, 10, 30, 100 и т. д. При измерении нагрузка была регулирована вручную: исходя от средней нагрузки, мы достигли максимального значения в 5 шагах, затем минимального значения в 10 шагах, и снова в 5 шагах среднего значения. В каждом шагу удлинение показанное 7 датчиками, измерилось уравнильным мостом. Максимальная погрешность отсчета составила $\pm 2\mu \text{ мм/мм}$, т. е. соответство-

Таблица 1

σ_M ИН/м ²	В состоянии прокатки		После термообработки	
	$K_t = 2,05$	$K_t = 3,5$	650°C	2 часа
			$K_t = 2,05$	$K_t = 3,5$
0	A 1	B 1	C 1	D 1
35	A 2	B 2	C 2	D 2
70	A 3	B 3	C 3	D 3
140	A 4	B 4	C 4	D 4

Таблица 2

Образец	K	Среднее значение		Макс. значение	
		σ_M MN/м ²	$\sigma_{\text{макс}}$ MN/м ²	σ_M MN/м ²	$\sigma_{\text{макс}}$ MN/м ²
A 1 и C 1	2,05	0	140	0	286
A 2 и C 2	2,05	35	175	72	360
A 3 и C 3	2,05	70	210	143	430 ^{I./}
A 4 и C 4	2,05	140	280	286	572 ^{I./}
B 1 и D 1	3,5	0	140	0	490 ^{I./}
B 2 и D 2	3,5	35	175	122	615 ^{I./}
B 3 и D 3	3,5	70	210	245	720 ^{I./}
B 4 и D 4	3,5	140	280	490 ^{I./}	980 ^{I./}

I./ Это величины только фиктивные, они рассчитаны по формуле упругости.

вала удлинению — $2 \times 10^{-4}\%$. Измерения продолжались до появления первой трещины длиной в 5—10 мм, что у слабо надрезанных образцов произошло после $2 \cdot 10^5$ нагрузок, а у резче надрезанных — после $2,5 \cdot 10^4$ нагрузок.

Результаты измерений были изображены способом, показанным на рис. 4. Была приведена сила нагрузки в зависимости от значений удлинений, измеренных на датчиках, обходя таким образом проблему, что значения напряжений неизвестны. Так как в литературе гистерезисными кривыми обычно называются кривые напряжения — удлинения, построенные нами кривые мы

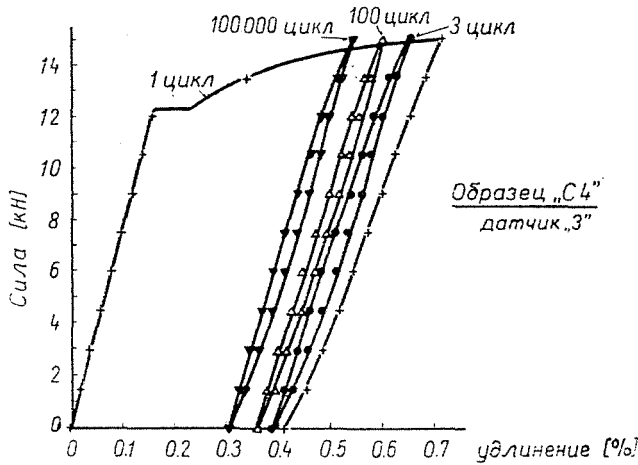


Рис. 4. Изображение значений удлинения, измеренных с помощью датчиков в зависимости от силы нагрузки

назвали — в порядке различия — псевдо-гистерезисными кривыми. В то время как в полном образце деформация носит упругий характер, измеренное удлинение изменяется пропорционально нагрузке и линия, связывающая точки измерения не совпадают на одной прямой, то это означает пластическую деформацию в одной из точек сечения. На всех причинах нелинейного поведения здесь мы не намерены остановиться — они описаны в [6].

Определение распределения напряжений расчетным путем

Спервая рассмотрим простейший случай, т. е. распределение напряжений, возникающее при первой нагрузке, когда деформация везде остается упругой. Анализ напряжений в таких случаях может быть проведено по теории упругости, а концентрация напряжения может быть вычислена с помощью формфактора K_t [7]. Однако, надо обратить особое внимание на влияние захвата, так как при испытании на усталость понадобится весьма жесткий

захват, что в свою очередь делает задачу статически неопределенной. У приведенного примера измерения действующая в направлении продольной оси образца растягивающая нагрузка привела к таким большим растягивающим поперечным напряжениям, в сечении надреза, которые вызвали положительное растяжение и в поперечном направлении датчиками и испытаниями по оптике напряжений (*рис. 5*). Из рисунка видно, что при наших измерениях наблюдались весьма значительные поперечные напряжения. Из значениями нельзя пренебрегать даже в средней линии образца, далеко от надреза. Под влиянием одноосного усилия возникло двуосное напряженное состояние в критическом сечении образца. Оказывается справедливым предложение, что подобные явления могут встречаться и при образцах другой геометрии, механизмах захвата другого решения и это следует учесть в расчетах.

Задача оказывается более сложной, если пластическая деформация в окружности надреза начинается уже при первой нагрузке. Такое обстоятельство в очаге деформации снижает напряжения по сравнению с напряжениями, которые возникли бы при нагрузке такой же величины в случае упругой деформации. В случае материала с определенными верхним и нижним пределами текучести значение напряжения может и фактически снизиться. Это непосредственно и наблюдалось при наших измерениях. В расчетах это уже не учитывается, так как в теории пластичности поведение материала — диаграммы его сопротивления деформации — описывается в более-менее упрощенном виде [8, 9]. Можно предполагать, что метод конечных элементов, широко распространившийся в последние годы, может быть пригодным и для описания поведения материалов, имеющих определенные верхний и нижний пределы текучести, но авторы не имеют сведения о проведенных до сих пор попытках в этой области.

По сравнению с случаем однократной нагрузки, расчет напряжений осложняется при повторных нагрузках. При это новую трудность представляет то, что свойства материала — точки диаграммы сопротивления деформации смещаются под влиянием циклической нагрузки. Смещение может происходить в двух направлениях, что называется циклическим уточнением и циклическим смятением [10]. Смещение точек в зависимости от числа циклов сначала происходит в бурных темпах, а затем, примерно около 50% срока службы изменение уже небольшое. Совокупность точек, относящихся к 50% срока службы, называется циклическим течением. На *рис. 6* показывается диаграммы сопротивления деформации для стали при однократной нагрузке и циклическом течении. Следует подчеркнуть, что каждая по точек диаграммы относится к различным числам нагрузки, так как образцы, подвергаемые усталости различными амплитудами направления и удлинения имеют различную долговечность. Далее видно, что на выбранном примере — как это бывает и в случае других материалов — смещения отдельных точек диаграммы отклоняются не только по величине, но и по знаку. Все эти изменения следует учи-

тывать при расчетах местного напряжения в зависимости от места и числа циклов, в случае, если такие свойства материала достаточно известны. Методы расчета на ЭВМ с учетом циклических свойств предлагают Моубре [12] и другие [13, 14]. Несмотря на указанные работы, проблема еще далеко не считается решенной, так как циклические свойства материала недостаточно известны. Например, при упомянутых в предыдущем пункте испытаниях было выяснено, что циклическое смягчение в большей мере зависит от геометрии образца [6, 15], так, принятие на гладких образцах диаграммы со-

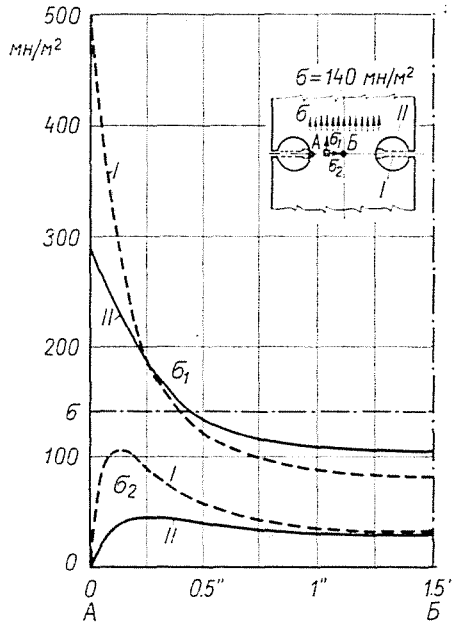


Рис. 5. Распределение продольных и поперечных напряжений в минимальном сечении образцов, определенных испытаниями по оптике напряжений

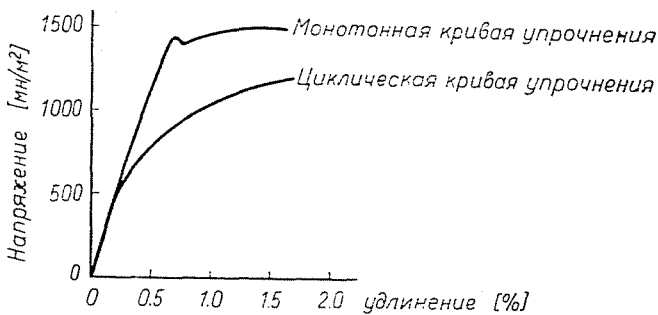


Рис. 6. Диаграмма сопротивления моно- и циклической деформации стали марки СAE 4142, термически улучшенной до твердости 380 НВ

противления деформации не могут быть непосредственно использованы для характеристики образцов с надрезом.

Расчет местных напряжений в большей мере осложняется и тем, что местная пластическая деформация — после изменения направления нагрузки — вызывает остаточные направления, что сильно влияет как на распределение напряжений, так и на амплитуду местных напряжений. Все эти неопределенности оказываются наибольшими как раз в критических местах, у основы надрезов, отсюда ожидается начало усталостных трещин.

Определение распределения напряжений путем измерения

Экспериментальное определение распределения напряжений является таким же неопределенным и обуславливает ряд предположений, которые в действительности удовлетворяются лишь очень приблизительно.

При измерении напряжений надо считаться с двумя основными трудностями. Одна из них — конечный размер измерительных средств, вследствие которого измеряется лишь среднее напряжение данного места и, таким образом, именно концентрация напряжения получается меньшей при измерении. Однако, при правильном выборе размеров образца и измерительного средства отклонение небольшое. Другой вопрос, доступны ли данные места измерительным средствам. При наших испытаниях датчики № 1 и 2 были размещены внутри отверстий, а датчики № 3 и 4 на поверхности образца, по возможности в максимальной близости отверстий. По сравнению со средними значениями удлиненный на датчиках № 3—4 измеряли удлинения только на 60—80% больше, в то время как на датчиках № 1—2 уже на 100—250% больше. С заострением надреза это отклонение еще повысилось бы. Но наклеивание датчиков даже на внутреннюю поверхность этих относительно больших отверстий было довольно сложно, и совершенно непредставимо для более острых надрезов, в особенности для кромки трещин.

Другая основная трудность измерения напряжений происходит из факта, что непосредственно измерять напряжения невозможно, а только смещения или удлинения. Удлинения пересчитаются на напряжения с помощью предполагаемой теории деформаций. О недостатках в знании «теории деформации» — при циклической нагрузке — уже упоминалось в предыдущем. Однако, можно было бы предполагать, что диаграмма сопротивления деформации дает по крайней мере хорошую информацию о значении местного напряжения. Но результаты измерения местных напряжений призывают к осторожности. Оказывается, что пластическое удлинение одинаково нагруженных частиц может иметь большие отклонения, предположительно, за счет случайного расположения, направленности и т. д. зерен частиц. Для наглядного представления этого показываются результаты измерения, полученные с

помощью датчиков № 1 и 2 при первой нагрузке образца Д 4 (D 4) *Рис. 7*. Видно, что пока деформация остается упругой, на датчиках изменяются приблизительно одинаковые значения удлинения. Пластическая деформация началась примерно одновременно на обоих надрезах, но их относимое друг к другу значение составляет около 2,5 : 1 на пользу датчика № 2. У других образцов также наблюдалось аналогичное рассеяние значений удлинения. Кроме того, из 16 экспериментов два раза случилось и то, что большее пластическое

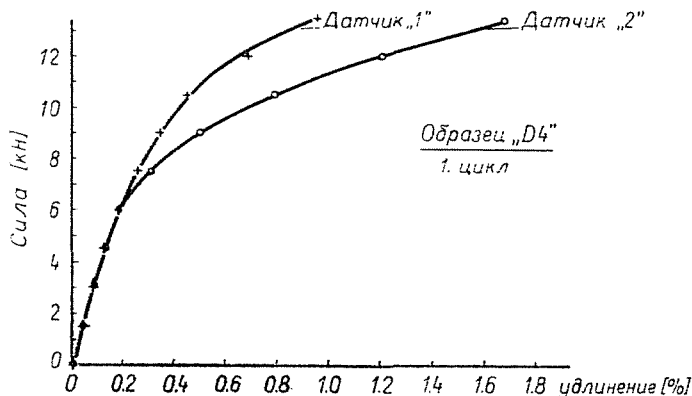


Рис. 7. Сравнение значений удлинения, измеренных в двух отверстиях образца

тическое удлинение появилось именно на той стороне, на которой, по свидетельству упругого удлинения, местное напряжение за счет асимметрии нагрузки было примерно на 5—10% меньше.

Значение вычисленных из измерения удлинения напряжений изменения вследствие циклических нагрузок сделает еще более неопределенным. По данным наших измерений в той или иной точке образца может одновременно происходить даже три вида явлений, либо одновременно (перекидывая друг друга), либо последовательно. Эти явления следующие:

а) Упрочнение под деформированием. Это наблюдалось в первый период в точках, имеющих большую исходную деформацию. Упрочнение обозначается уточнением псевдо-гистерезисной кривой.

б) Циклическое смягчение, наблюдаемое после большого количества циклов, вследствие чего псевдо-гистерезисные кривые расширяются.

в) Циклическая ползучесть. Область удлинения т. е. положение псевдогистерезисных кривых смещается. Это явление наблюдалось даже в случае симметричной колеблющейся нагрузки.

С точки зрения настоящих исследований самое большое значение имеет циклическая ползучесть. Деформации переменного направления не всегда

уравновешают друг друга точно и накопленное во времени различие может отодвинуть конечные точки удлинений. Но это в сущности не изменяет значения местных напряжений. Можно, однако, представить и такой механизм действия, что возникающие в микросреде остаточные деформации приводят к таким местным напряжениям, которые складываются с напряжениями от нагрузки. Путем датчиков последнее явление можно наблюдать так же как циклическую ползучесть — т. е. область удлинений смещается. Если имелось бы в нашем распоряжении такое средство, которым можно было бы отделить упругие деформации от остаточных, то можно было бы решить и эту проблему. Дело в том, что напряжения всегда пропорциональны упругим удлинениям. Однако, в наших измерениях упругая и остаточная деформация появляется совместно и, на уровне нынешних знаний, мы не в состоянии разделить их друг от друга.

Так как разделение упругого и пластического удлинений представляет собой основную проблему измерения напряжений, рассмотрим этот вопрос подробнее на примере средней псевдогистерезисной кривой (рис. 8). Средняя нагрузка образца составила нуль, т. е. колебания напряжения были симметричны. Исходим из точки А и повышаем нагрузку в одинаковых шагах. Если бы удлинение было только упругим, то и его повышение произошло бы в одинаковых шагах.

В этом случае была бы действительна пропорциональная зависимость

$$\Delta F = C \cdot \Delta \varepsilon$$

где

$$C = \frac{A_0 \cdot E}{K_t} = \text{const для данного образца} \quad (1)$$

- ΔF = повышение силы в одном шагу
 $\Delta \varepsilon$ = повышение удлинения у одного шага
 A_0 = сечение образца
 E = модуль упругости
 K_t = формфактор, выражающий концентрацию напряжения.

В результате измерений получились значения $\Delta F = 1,5 \text{ KN}$ и $C = 294 \text{ KN} \cdot \text{C}$ рисунка можно отсчитывать, что удлинение даже при первом шаге нагрузки больше чем значение, вычисленное вышеуказанной зависимостью, что и обозначается на рисунке пунктиром. Таким образом, часть удлинения даже сначала носит пластический характер и последняя доля все более повышается по мере повышения нагрузки.

После максимальной силы (точка В) следует отрицательные шаги ΔF . Деформация при снижении нагрузки сначала упругая, что обозначается

совпадением точек измерений в одной прямой. Но значения $\Delta \varepsilon$ все же больше чем значения, которые соответствовали бы вышеуказанной формуле. (Точки C' , C'' , ...). Это объясняется тем, что среда не претерпевшая пластическую деформацию при снижении нагрузки старается сжимать очаг деформации. Вследствие этого снижение местного напряжения резче, чем следовало бы из снижения внешней нагрузки и изменяет свой знак раньше, прежде чем нагрузка достигает нуля. Однако, точный момент последнего из измерения невозможно определить, а обнаруживается всего только то, что соединяющая

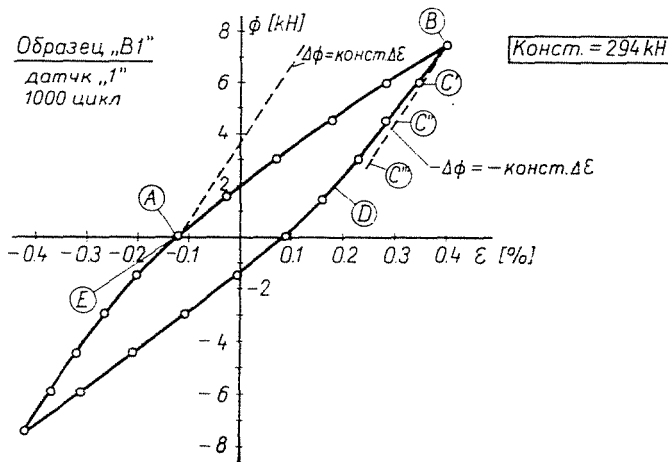


Рис. 8. Расчетные, упругие и измеренные общие удлинения при произвольно выбранной псевдогистерезисной кривой

точки измерения линия снова начинает изгибаться (точка Д), в знак пластической деформации — но в данном случае уже сжатия. Можно предполагать, что местное напряжение меняет свой знак в точке Д, т. е. напряжение сжатия сразу же вызывает и пластическую деформацию. Но справедливость этого предположения весьма спорна.

Динамика кривой указывает на симметричность сжимающих и растягивающих напряжений. Таким образом все, что было определено для растягивающих нагрузок, можно было бы повторить и для участка сжимающих нагрузок. Из этого следует, что в конечной точке кривой следующего цикла — местное напряжение неизвестно, но по-видимому не имеет нулевого значения.

Среди трудностей измерений напряжений следует упоминать и неопределенность, которая получается из самого датчика. Помимо образца переменной нагрузке подвергаются и датчик и клей. Некоторыми вопросами датчиков занимается [6]. Более подробные испытания описаны в [16].

Выводы

Испытание образцов с надрезом будет необходимо и в дальнейшем, в целях получения цифровых данных и чувствительности отдельных материалов к надрезу. Однако поднимается вопрос, оказывается ли всесторонне целесообразным путем охарактеризовать результаты испытаний с использованием понятия «напряжений», тогда, как определение местных напряжений, возникающих на критических точках образцов неопределенно как путем расчета, так и путем измерения. А ведь процесс усталости в целом — местное явление. Образование деформаций, щелей и микротрещин ограничивается весьма незначительным объемом или только несколькими зернами полного образца. В таких случаях информационное содержание измерений, основанных на средние значения только весьма ограниченное.

Пока еще было бы трудно назначить самый целесообразный путь, но предполагается, что направления, основанные при характеристике явлений усталости вместо напряжения на других величинах, будут более эффективными.

В настоящее время часть специалистов считает пластическую деформацию [17], а другая их часть — энергию (18 - 20) таким показателем, который в этом настолько важном для инженерной практики вопросе может вести поближе к окончательному решению.

Резюме

Знание распределения напряжений в образцах является важной задачей. Без него применять результаты экспериментов в конструкциях, деталях невозможно. Статья занимается проблемами определения напряжений образцов с надрезами, подвергаемых испытанию на усталость. Учитываются трудности, связанные с расчетом и экспериментальном определением напряжений. В статье пишется о неопределенности, которую надо исследовать при решении таких задач.

Литература

1. Morrow J., Wetzel R. M., Topper R. H. Laboratory simulation of structural fatigue behaviour. In ASTM STP 462, 1970, 74—91.
2. Yokobory T., Nambu M., Takeuchi N. On the initiation and propagation of fatigue crack. Proc. 3rd Conf. on Dimensioning and Strength Calculations, Budapest 1968 Akadémiai Kiadó.
3. Crosskeutz I. C. Fatigue mechanisms in the sub-creep range. In ASTM STP 495, 1971, 5—60.
4. Lehr E., Mailander R. Einfluss der Hohlkehlen an abgesetzten Wellen und von Querbohrungen auf die Biege-wechselfestigkeit. Arch. Eisenhüttenwesen 11 (1937/38) 563—566.
5. Serensen S. V. Méretezés kifáradásra statisztikai módszerrel. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1971.
6. Czoboly E., Sándor B. I. Fatigue behavior of notched steel specimens. Eng. Experiment Station Rep. No. 39. University of Wisconsin, Madison, Wisc. USA.
7. Neuber H. Kerbspannungslehre. Springer Verlag, Berlin 1958.

8. Prager W., Hodge Ph. G. Theory of perfectly plastic solids. John Wiley and Sons, New York 1951.
9. Соколовский В. В. Теория пластичности. Гостехиздат. Москва—Ленинград, 1952.
10. Morrow J., Halford G. R., Millan J. F. Optimum hardness for maximum fatigue strength of steels. Proc. First Int. Conf. on Fracture vol. 3, Smdai, Japan 1965.
11. Landgraf R. W., Morrow J., Endo T. Determination of the cyclic stress-strain curve. Journal of materials vol. 4. (1969) No. 1. 176—188.
12. Mowbray D. F., McConnelee J. E. Application of finite element stress analysis and stress-strain properties in determining notch fatigue specimen deformation and life. In ASTM STP 519, 1973.
13. Martin J. F., Topper T. H., Sinclair G. M. Computer based simulation of cyclic stress-strain behavior. Theoretical and Appl. Mech. Report No. 326. Univ. of Illinois, Urbana, Illinois USA 1969.
14. Jhansale H. R. Description of cyclic deformation phenomena for fatigue analysis. Proc. 5th Conf. on Dimensioning and Strength Calculations vol. II. Akadémiai Kiadó, Budapest 1974.
15. Czoboly E., Sándor B. I. Cycle-dependent softening in notched steel specimens. Journal of Testing and Evaluation vol. 3. (1975) No. 5. 343—347.
16. Gowda C. V. B., Topper T. H. Performance of miniature resistance strain gages in low-cycle fatigue. SESA Fall Meeting, San Francisco, California, USA 1968.
17. Грошченко В. Г., Гетман А. Ф. Исследование влияния малых упругопластических деформаций на несущую способность образцов с концентраторами напряжений в условиях повторно-переменного нагружения. Проблемы прочности 1972. № 2 пр. 13—17.
18. Morrow, J. D. Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. In ASTM STP 378, 1965 45—87.
19. Gillemot L. Low-cycle fatigue by constant amplitude true mean stress. Periodica Polytechnica Vol. 10 (1966) No. 2. 77—94.
20. Gurevits S. E., Edidovits L. D., Gaevoj A. P. General features of damaging energy accumulation and of the subsequent process of crack propagation in fatigue. Proc. 5th Conf. on Dimensioning and Strength Calculations vol. II. Akadémiai Kiadó, Budapest 1974.

др. Э. Цоболь } Будапешт, Н-1521
Б. И. Шандор } Уисконсин, США