

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОСТУЛАТА ДРУКЕРА

*М. Я. Бровман**(Краматорск)*

Постулат Друкера можно сформулировать как условие того, что работа дополнительных напряжений при нагружении — не отрицательная величина

$$(1) \quad d\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij} \geq 0.$$

Этот постулат имеет большое значение в теории пластичности, в частности, из него следует ассоциированный закон пластического течения [1, 2], а также то, что поверхность текучести должна быть выпуклой. Экспериментальную проверку постулата проводили для ряда металлов при комнатной температуре [3, 4]. Поскольку большая часть процессов пластической деформации металлов осуществляется при высокой температуре, представляет интерес экспериментальная проверка постулата именно в этих условиях. Такая проверка проведена при одноосном напряженном состоянии (растяжение и сжатие) на специальном устройстве — пластомере [5]. Были испытаны следующие металлы и сплавы: медь техническая, латунь (Л90, Л68, Л62), никель (НПА1 и НПАН), монель-металл (НМЖ, МЦ-28-2,5), нейзильбер (МНЦ 65-15-20), мельхиор (МН19), углеродистые стали 20, 3, 45, 6, У8, легированные стали 40Х, 40ХН, 45Г2, 12ХНЗА, 35ХГС, 15ХСНД, ШХ15, 14ГН, 60С2, 1Х13, 4Х13, Х17Н2, Х18Н12М2ТО, Р18, жаропрочные никелехромистые сплавы ЭИ435, ЭИ602, ВЖ98, цинк и свинец. Образцы для испытаний на растяжение (диаметром 6, длиной 30 мм с винтовыми захватами) нагревали одновременно в четырех электропечах, контроль температуры в которых осуществлялся термопарами. Растяжение образца, расположенного в электропечи, осуществлялось кулачком, профиль которого определяет закон деформирования. Привод кулачка осуществлялся через маховик, редуктор и сцепную муфту от электродвигателя постоянного тока. Скорость электродвигателя уменьшалась в процессе деформирования не более чем на 2%. Эта скорость контролировалась тахогенератором.

Образцы на сжатие (диаметром 6 и высотой 9 мм) нагревали вместе с контейнером в печах, затем устанавливали на пластомер и осуществляли испытание. Термопарой осуществляли контроль температуры, которая за время опыта не изменялась более чем на 5°C ввиду значительной массы контейнера. Термопары вводили в печи через отверстия и плотно прижимали к середине образца с помощью пружины.

Регулирование температуры печей осуществляли электронными потенциометрами типа ЭПД-17 со шкалой 0—1600°C класса 0,5. После испытания серии в 40—60 образцов показания потенциометров проверяли контрольным переносным потенциометром класса 0,2. Такое внимание к точности определения температуры необходимо, поскольку она оказывает сильное влияние на механические свойства. В данном случае точность ее контроля была равна 3—4°C. Различия температуры в деформируемом объеме не превышали 5°C. Контейнер, пуансон и захваты изготовляли из сплава ЭИ652. Для уменьшения трения при испытании на сжатие применяли смазку трех составов для диапазонов температур 800—1000°C, 1000—1100°C и 1100—1200°C. Состав смазки, подобранный Д. Элдером и

В. Филиппом для высокотемпературной деформации, описан в [6, 7]. Месдозы на проволочных тензодатчиках с электронным усилителем ПЭТЗВ обеспечивали измерение усилий деформирования. Показания регистрировали на осциллографе Н102, применяя вибратор с частотой собственных колебаний 5000 Гц. Месдозы охлаждали циркулирующей воды во избежание их нагрева при испытании. Съемка на осциллографе включалась перед началом испытания автоматически контактным кулачком, что особенно важно при высоких скоростях деформации. Это устройство обеспечивает надежную регистрацию показаний при скорости кулачка до 900 об/мин. Месдозы тарировали непосредственно в пластомере с помощью грузов известной массы, которые подвешивали к захватам через шарниры и рычаги. Термопары также периодически тарировали. Кулачковый пластомер позволяет получить различные законы развития деформации во времени  $\varepsilon_{11}(\tau)$  за счет профиля кулачка, к которому траверса с роликком все время прижата пружинами. Функцию  $\varepsilon_{11}(\tau)$  контролировали с помощью датчика перемещений в виде консольной балки равного сопротивления с тензодатчиками. Траверса при перемещении изгибалась консольный конец балки, прогиб которой равен перемещению траверсы. Тарировку осуществляли непосредственно в приборе с помощью индикатора.

При испытании одновременно получали осциллограммы удлинения (или укорочения)  $\Delta l(\tau)$  и усилия  $P(\tau)$ , по которым определяли  $\varepsilon_{11}(\tau)$  и  $\sigma_{11}(\tau)$ :

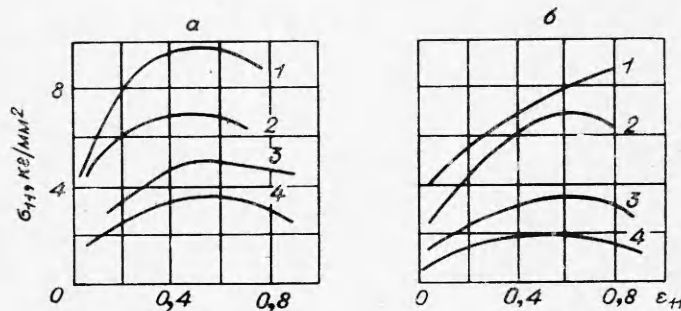
$$\varepsilon_{11}(\tau) = \ln \left[ 1 + \frac{\Delta l(\tau)}{l_0} \right], \quad \sigma_{11}(\tau) = \frac{P(\tau)}{F_0} \left[ 1 + \frac{\Delta l(\tau)}{l_0} \right]$$

( $l_0$  — начальная длина образца). Здесь использовано условие несжимаемости, которое, как показали опыты, при  $\varepsilon_{11} > 0,05$  выполняется с высокой степенью точности.

Для получения малых скоростей деформации на пластомере удобно использовать изобретение [8]. Это позволяет без перестройки привода на одном и том же устройстве получать скорости деформации от  $10^{-6}$  до  $100 \text{ с}^{-1}$ .

Степень деформации изменяли в диапазоне 0,05—0,08. Температурный интервал принят равным  $900\text{—}1200^\circ\text{C}$  для сталей,  $450\text{—}950^\circ\text{C}$  — для меди и латуней,  $800\text{—}1250^\circ\text{C}$  — для никеля,  $600\text{—}1250^\circ\text{C}$  для монель-металла,  $900\text{—}1100^\circ\text{C}$  — для нейзильбера и мельхиора,  $50\text{—}340^\circ\text{C}$  — для цинка.

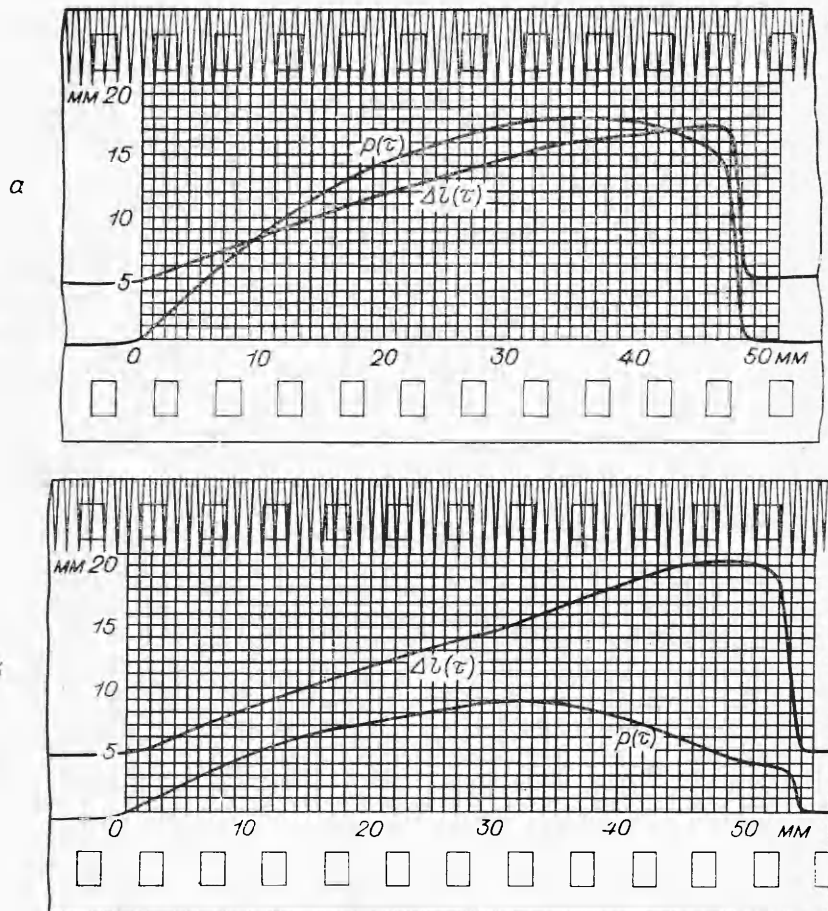
Указанные выше материалы, а также свинец и алюминий испытывали и при комнатной температуре. На фиг. 1, а показаны функции  $\sigma_{11}(\varepsilon_{11})$  для стали 60С2 при  $\dot{\varepsilon}_{11} = 0,25 \text{ с}^{-1}$ ,  $t = 1000^\circ\text{C}$  — линия 1, стали 45 при  $\dot{\varepsilon}_{11} = 0,5 \text{ с}^{-1}$ ,  $t = 1100^\circ\text{C}$  — линия 2, меди при  $950^\circ\text{C}$  и скорости деформации



Ф и г. 1

ции  $6 \text{ с}^{-1}$  — линия 3,  $0,4 \text{ с}^{-1}$  — линия 4. На фиг. 1, б приведены аналогичные диаграммы для монель-металла при  $1100^\circ\text{C}$  и  $\dot{\epsilon}_{11} = 1,8 \text{ с}^{-1}$  — линия 1, мельхиора при  $t = 1030^\circ\text{C}$  и  $\dot{\epsilon}_{11} = 6 \text{ с}^{-1}$  — линия 2, никеля при  $1250^\circ\text{C}$  и  $\dot{\epsilon}_{11} = 1,8 \text{ с}^{-1}$  — линия 3 и латуни Л62 при  $850^\circ\text{C}$  и  $\dot{\epsilon}_{11} = 0,4 \text{ с}^{-1}$  — линия 4.

Экспериментальные кривые усилия  $P(\tau)$  и удлинения  $\Delta l(\tau)$ , по которым определяли  $\sigma_{11}(\tau)$  и  $\epsilon_{11}(\tau)$ , приведены на фиг. 2, а, б для стали 45 при



Ф и г. 2

$1000^\circ\text{C}$  и для меди при  $950^\circ\text{C}$  соответственно. Осциллограмму печатали на фотобумаге с увеличением в 4 раза, на фотобумагу наклеивали кальку с размеченной сеткой, что упрощало обработку экспериментальных данных [6]. Одновременно с процессом растяжения или сжатия на осциллограмме записывали колебания, полученные от генератора звуковой частоты ЗГ-10. Эти колебания, расположенные в верхней части фиг. 2, повышали точность построения  $\sigma_{11}(\tau)$  и  $\epsilon_{11}(\tau)$  как функций времени. Частоту генератора настраивали так, чтобы 1 мм осциллограммы соответствовал частоте 1 Гц, например при скорости движения пленки 2000 мм/с частота 200 Гц.

Процесс деформации, происходивший в течение 0,024 с, занимал на осциллограмме 48 мм и здесь же имелось 48 периодических колебаний от генератора. Для графиков фиг. 2, а условие (1) выполняется, а для фиг. 2, б оно нарушается при  $\epsilon_{11} > 0,6$ .

Поскольку абсолютно жестких испытательных машин нет, для учета упругой деформации самой конструкции пластомера периодически вместо образцов деформировали пружины, работавшие в области упругих деформаций с известной зависимостью удлинения от усилия. При этом измеряли упругую деформацию пластомера, влияние которой менее 3%, и тарировали измерительные устройства.

Погрешность в определении величины  $\epsilon_{11}$  не превышала 6%, а  $\sigma_{11}$  при комнатной температуре 8% и высоких температурах 15%, что определяли анализом разброса данных и определением среднеквадратичного отклонения. Для цинка отклонения были более значительными и достигали 20—25%. При малых скоростях деформации ( $\dot{\epsilon}_{11} < 0,5 \text{ с}^{-1}$ ) и комнатной температуре для цинка наблюдались «скачки деформации» с остановками; описание и анализ такой деформации в данной работе не приводятся, укажем только, что при этом разброс данных значительно возрастает (до 50%).

В примерах, приведенных на фиг. 1, за исключением монель-металла, имеют место участки, где неравенство (1) не выполняется. Следует указать, что для титана неравенство (1) также нарушается при  $t > 300^\circ\text{C}$  и  $\epsilon_{11} = 0,6-0,8$  [7]. В диапазоне 20—300°C постулат Друкера для титана согласуется с опытными данными.

Был проведен анализ возможности разупрочнения за счет нагрева металла, т. е. отклонений от изотермического процесса. При этом работу деформации определяли по площади диаграммы  $\sigma_{11}(\epsilon_{11})$  и принимали, что вся она переходит в тепло, что на самом деле неточно — в тепло переходит 0,85—0,90 работы деформации. Кроме того, процесс считали адиабатическим, так что были определены завышенные величины возможных изменений температур, но и они незначительны (за исключением цинка, который, видимо, следует рассмотреть отдельно). Замеры с помощью термометра показывают, что даже при скоростях деформации 80—100  $\text{с}^{-1}$  повышение температуры не более 15—25°C, а при  $\dot{\epsilon}_{11} < 40 \text{ с}^{-1}$  — 5°C, следовательно, нагрев металла при деформации не может являться причиной нарушения условия (1). Термические деформации для испытанных материалов малы. Они определяются коэффициентом линейного расширения. Эта величина (зависящая от температуры) равна для меди (1,6—1,9)  $10^{-5}$  1/град, для латуней (1,7—2,2)  $10^{-5}$  1/град, для углеродистых сталей (1,0—1,5)  $10^{-5}$ , для легированных сталей (1,0—1,3)  $10^{-5}$  1/град, для никеля (1,3—1,6)  $10^{-5}$  1/град, свинца (2,8—3,2)  $10^{-5}$  1/град, монель-металла  $1,5 \cdot 10^{-5}$  1/град, цинка (3,9—4,1)  $10^{-5}$  1/град.

При нагреве на 25°C термическая деформация для меди, сталей, никеля, мельхиора, монель-металла не превышает  $25 \cdot 2,2 \cdot 10^{-5} = 5,5 \cdot 10^{-4}$ . Для свинца она достигает  $8 \cdot 10^{-4}$ , а для цинка  $4,1 \cdot 25 \cdot 10^{-4} = 10^{-2}$ .

Что касается термической деформации до начала деформации в течение времени нагрева от комнатной температуры до рабочей, то перед началом испытания специальным маховиком выбирали все зазоры (что контролируется мессдозами) и измерение деформации начинали при испытании образца с нуля.

Таким образом, на процесс оказывает влияние только термическая деформация за счет изменения температуры в процессе испытания. Эта величина, как показано выше, при колебаниях температуры до 25°C не превышает  $10^{-3}$ , что в 300—600 раз ниже измеренных величин  $\epsilon_{11}$ .

Термические деформации могут изменить диаграмму  $\sigma_{11}(\varepsilon_{11})$  при малых степенях деформации  $\varepsilon_{11} < 10^{-3}$ , если при этом процесс деформирования отклоняется от изотермического.

Деформацию ползучести определяли по результатам экспериментов, в которых напряжение оставалось постоянным. В этом частном случае упрощается расчет деформации ползучести и ее отделение от полной деформации [9].

При этом принималось, что скорость деформации ползучести — функция только напряжения  $v(\sigma)$ , а деформация ползучести  $\varepsilon_p = \int v(\sigma) d\sigma$ . В случае, когда время испытания образца менее 2 с для меди, латуней, цинка, никеля, углеродистых сталей, менее 3—4 с для сталей 1X13, 4X13, X18H9T, X18H12M2TO, P18 и менее 5—6 с для сплавов ЭИ435, ЭИ602, ВЖ98, деформация ползучести незначительна (менее 2%). Для сплавов ЭИ435, ЭИ602, ВЖ98 и монель-металла участок установившейся ползучести ( $\dot{\varepsilon}_{11} = \text{const}$ ,  $\sigma_{11} = \text{const}$ ) мал, поэтому деформацию ползучести здесь определяли по теории упрочнения (см. [9]). Деформацию ползучести можно не учитывать, когда время деформации менее 2—4 с и  $\dot{\varepsilon}_{11} > 0,5 \text{ с}^{-1}$ . При меньших скоростях деформации, когда процесс нагружения продолжается более 2—3 с, следует при высоких температурах учитывать деформацию ползучести.

При малых степенях деформации (менее  $10^{-2}$ ) необходимо учитывать также и упругие деформации. Упругие деформации и деформации ползучести вычитают из величин полной деформации при построении функций  $\sigma_{11}(\varepsilon_{11})$ .

Была проведена также проверка образцов, вырезанных из деформированного металла, на анизотропию. Испытывали образцы, ориентированные вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений. В отличие от испытаний при низких температурах при высоких температурах деформация не привела к развитию анизотропии, различие в пределах текучести и других механических свойствах не превышает — 10—15%, что близко к точности эксперимента. Единственным исключением из исследуемых материалов явился цинк, для которого различие достигает 50—100%, а круглое сечение образцов в процессе деформации становится эллиптическим. Остальные материалы в пределах точности эксперимента можно считать изотропными. Анализ экспериментальных данных показывает, что для меди и латуней случаи, когда величина  $d\sigma_{11}/d\varepsilon_{11} < 0$ , имеют место при  $t > 750^\circ\text{C}$  и  $\varepsilon_{11} > \varepsilon_{11}^0$ , где  $\varepsilon_{11}^0 = 0,50—0,65$ . Величина  $\varepsilon_{11}^0$  возрастает с увеличением скорости деформации. Для мельхиора при  $t > 900^\circ\text{C}$   $\varepsilon_{11}^0 = 0,60—0,70$ , для никеля при  $t > 1100^\circ\text{C}$   $\varepsilon_{11}^0 = 0,65—0,75$ . Для углеродистых сталей  $\varepsilon_{11}^0 = 0,40—0,50$  при  $t > 1000^\circ\text{C}$ , а при скорости деформации свыше  $50 \text{ с}^{-1}$  увеличивается до  $0,60—0,70$ . Для легированных сталей 40X, 40XH, 15XCHD и т. д. при  $t \geq 1100^\circ\text{C}$   $\varepsilon_{11}^0 = 0,40—0,50$ , а для высоколегированных сталей 1X13, 4X13, X17H2, X18H9T, X18H12M2TO при  $t = 1100—1200^\circ\text{C}$  и  $\dot{\varepsilon}_{11} < 5 \text{ с}^{-1}$   $\varepsilon_{11}^0 = 0,35—0,55$ . Для быстрорежущей стали P18 в диапазоне  $900—1200^\circ\text{C}$   $\varepsilon_{11}^0 = 0,25—0,40$ . Для жаропрочных сплавов ЭИ435, ЭИ602, ВЖ98 и монель-металла величина  $d\sigma_{11}/d\varepsilon_{11}$  положительна во всем диапазоне изменения степени, скорости деформации и температуры.

При комнатной температуре нарушения условия (1) имели место для цинка и свинца при  $\varepsilon_{11}^0 = 0,45—0,55$ , а для остальных материалов, указанных выше, в изученном диапазоне степени и скорости деформации условие (1) выполнялось.

Материал	Диапазон температур, °С	$\sigma_0, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$n$	$m$	$p, \frac{1}{\text{град}}$
Медь техническая	450—950	73	0,40	0,11	0,0023
Латунь Л90	450—950	105	0,40	0,11	0,0030
Л70	450—900	190	0,57	0,11	0,0035
Л68	$t < 600$	99	0,57	0,11	0,0028
Л68	$t > 600$	97	0,38	0,11	0,0028
Л62	$t < 750$	127	0,50	0,11	0,0040
Л62	$750 \geq t \geq 600$	105	0,50	0,11	0,0070
Л62	$t < 600$	150	0,50	0,11	0,0040
Никель	800—1250	270	0,50	0,11	0,0028
Мельхиор	600—900	174	0,40	0,15	0,0025
»	900—1100	390	0,40	0,15	0,0035
Нейзильбер	600—950	485	0,50	0,15	0,0040
Монель-металл	600—1000	200	0,45	0,11	0,0022
»	1000—1250	200	0,45	0,11	0,0024
Алюминий	300—500	18	0,37	0,14	0,0017
Сталь 45	900—1200	166	0,25	0,14	0,0025
Ст. 12ХНЗА	900—1200	290	0,25	0,14	0,0029
4Х13	900—1200	550	0,28	0,09	0,0037
Х17Н2	900—1200	900	0,28	0,09	0,0037
Х18Н9Т	900—1200	415	0,28	0,09	0,0028
Сплав ЭИ435	900—1200	1200	0,35	0,10	0,0032
ЭИ602	900—1200	1490	0,35	0,10	0,0032
ВЖ98	900—1200	1040	0,35	0,10	0,0028

Деформационное разупрочнение [10] играет значительную роль при высоких температурах. При  $\epsilon_{11} \leq 0,30-0,40$  результаты испытаний позволяют описать функцию  $\sigma_{11}(\epsilon_{11}, \epsilon_{11}, t)$  формулой (при  $\epsilon_{11} = \text{const}$ )

$$\sigma_{11} = \sigma_0 \epsilon_{11}^n \epsilon_{11}^m \exp(-pt),$$

где  $\sigma_0, m, n, p$  — постоянные для данного материала величины, приведенные в таблице. Изложенное показывает, что постулат Друкера даже при сравнительно больших деформациях не противоречит опытным данным.

Поступила 9 II 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М., «Наука», 1969.
2. Ильюшин А. А. Об основах общей математической теории пластичности. — В кн.: Вопросы теории пластичности. М., Изд-во АН СССР, 1961.
3. Ленский В. С. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упругопластических деформаций. — В кн.: Вопросы теории пластичности. М., Изд-во АН СССР, 1961.
4. Жуков А. М. Некоторые особенности поведения металлов при упругопластическом деформировании. — В кн.: Вопросы теории пластичности. М., Изд-во АН СССР, 1961.

5. Мельников А. Ф., Бровман М. Я. Метод определения сопротивления деформации и устройство для его осуществления. Авторское свидетельство № 133038. «Бюллетень изобретений», 1960, № 21.
6. Зюзин В. И., Бровман М. Я., Мельников А. Ф. Сопротивление деформации сталей при горячей прокатке. М., «Металлургия», 1964.
7. Тарновский И. Я., Бровман М. Я., Серебренников В. Н., Додин Ю. С., Римен В. Х., Волкогон Г. М. Энергосиловые параметры прокатки цветных металлов. М., «Металлургия», 1975.
8. Бровман М. Я. Нагружающее устройство к испытательным машинам. Авторское свидетельство № 207451. «Бюллетень изобретений», 1968, № 2.
9. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций. М., «Наука», 1966.
10. Шварцбарт Я. С. Состояние и перспективы развития теории расчета высокотемпературных напряжений течения металла. — В кн.: Теория прокатки. М., «Металлургия», 1975.

УДК 539.385

## УСТАЛОСТНАЯ ПРОЧНОСТЬ ВАЛОВ

В. Д. Кулиев, Г. П. Черепанов

(Москва)

В настоящее время при расчете на усталостную прочность изделий машиностроения обычно применяют правило Майнера суммирования повреждаемости и эмпирические кривые типа кривой Велера. При этом не учитывается постепенное развитие усталостных трещин в течение эксплуатации, приводящее к полному разрушению конструкции. Поэтому физически более обоснованы методы расчета усталостной прочности, учитывающие рост трещин усталости. Ниже предлагается метод расчета усталостной прочности, основанный на теории роста усталостных трещин, развитый одним из авторов [1]. Рассмотрена конкретная проблема разрушения круглого вала, подвергнутого чистому изгибу при вращении. Эта проблема представляет большой практический интерес. Вначале формулируются основные допущения, затем определяется коэффициент интенсивности напряжений на кромке усталостной трещины; из простого дифференциального уравнения определяется число циклов до разрушения (долговечность вала). Указываются способы оценок длины начальной трещины и констант материала, фигурирующих в теории усталостных трещин; приводится численный пример расчета усталостной долговечности вала.

**1. Основные допущения и постановка задачи.** Пусть сплошной цилиндрический вал кругового поперечного сечения подвергается чистому изгибу под действием изгибающего момента  $M$ , вращающегося с постоянной угловой скоростью  $\omega_0$ . Разрушение такого вала происходит вследствие постепенного развития поперечной усталостной трещины. Наблюдаемые формы этих трещин, как правило, асимметричны вследствие асимметрии начальных трещин, а также вследствие неустойчивости осесимметричного фронта трещины к малым случайным изменениям круговой линии фронта [1]. (Классификацию строения усталостных трещин см., например, в [2].) Тем не менее в данном исследовании будем предполагать, что усталостная трещина в любой момент времени имеет форму кругового концентрического кольца, растущего от границы вала. Другое допущение состоит в том, что ширина кольца в начальный момент времени считается равной  $l_0$ , гораздо меньшей радиуса вала.

При нагружении вращающимся моментом в любой фиксированный момент времени часть кольца является зоной  $D$  мгновенного контакта (на-