

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Я. Б. ФРИДМАН и Т. К. ЗИЛОВА

О ПРОЦЕССЕ РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 3 VI 1950)

Как известно, в общем случае процесс деформации материалов, в частности, металлов, состоит из трех накладывающихся друг на друга стадий: упругой, затем пластической деформации и разрушения. Хотя проведение границ между этими стадиями чрезвычайно важно для техники, до сих пор такое четкое разграничение часто невозможно. Хорошо известно, что переход из упругой в упруго-пластическую область происходит весьма постепенно и потому вместо четкого разграничения



Рис. 1. Схема процесса деформации и разрушения пластичных материалов. 1 — первые пластические деформации; 2 — первые наблюдаемые пластические деформации; 3 — начало разрушения; 4 — первые наблюдаемые трещины; 5 — окончательное разрушение тела

между упругой и пластической стадиями приходится пользоваться условными «пределами», например, пределом текучести $\sigma_{0,2}$ (при 0,2% остаточного удлинения), пределом упругости и т. п.

Не меньшие трудности представляет разграничение между пластической деформацией и разрушением, т. е. обнаружение начала разрушения. Если принять, что первые трещины могут иметь величину порядка 10 Å, то очевидно, что большинство (если не все), из существующих методов, в том числе рентгеновский, металлографический и др., недостаточно чувствительны для обнаружения подобных трещин и то, что обычно называют «первыми трещинами», является уже результатом более или менее развитого процесса разрушения (см. рис. 1).

Целью настоящей работы является показать: 1) что даже с помощью макроскопических методов возможно изучить процесс пластического разрушения, от его начальных стадий до окончательного разделения тела и 2) что выводы о пластически-деформированном состоянии, сделанные на основании изучения окончательно разрушенных образцов (что нередко практикуется), могут привести к ошибочным результатам, так как в процессе дальнейшего развития уже образовавшейся трещины может происходить значительная дополнительная местная (и общая) пластическая деформация. Деформированное состояние окончательно разрушенного образца слагается из: а) деформаций, полученных образцом до образования начальных трещин, т. е. до начала разрушения; б) дополнительных деформаций как местных, так и общих, возникающих в процессе развития трещины до окончательного разрушения (разделения образца) включительно.

Для изучения деформированного состояния был применен метод накатанной сетки, описанный ранее (1). Этот метод позволяет измерять значительные пластические деформации плоских и криволинейных поверхностей на базе 2; 1; 0,5 и даже 0,15—0,2 мм. С помощью этого метода были детально изучены местные деформации цилиндрических образцов из различных сплавов при статическом кручении в пластической области.

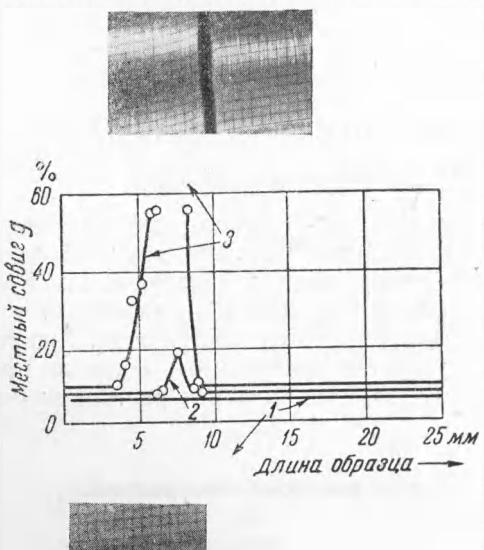


Рис. 2. Дополнительная пластическая деформация по длине образца в зоне излома при кручении образца из стали 40ХНМА, отпуск 200°. 1 — $M_{kp} = 137$ кгм, $\phi = 120^\circ$, видимые трещины отсутствуют, деформация однородна по всей длине; 2 — $M_{kp} = 141,5$ кгм, $\phi = 140^\circ$, волосная трещина на поверхности, в зоне волосной трещины резкая дополнительная деформация; 3 — $M_{kp} = 140$ кгм, $\phi = 166^\circ$, окончательное разрушение образца, в зоне излома очень резкая местная деформация

личии отчетливо видимых трещин (рис. 2) состояние неравномерность местной деформации разрушенного кручением образца (участок 1 на рис. 3) местная дополнительная деформация практически отсутствует и, постепенно увеличиваясь на участке 2, достигает наибольшей величины на участке 2, диаметрально противоположном участку 1*. Таким образом, в этом случае дополнительная деформация проходит не в начале разрушения, а в процессе распространения трещины в глубь сечения образца (2). Это показывает, что описанная в работе (3) неравномерность распределения деформации по длине образца при кручении также есть проявление дополнительной деформации, вызванной процессом разрушения.

Как видно из рис. 2, после образования видимых трещин происходит не только местная, но и общая деформация образца. Дополнительная местная деформация в процессе разрушения наблюдалась нами также и при других способах нагружения. В качестве примера на рис. 4

* На участке 2 дополнительная деформация распространяется и по длине образца на расстоянии нескольких миллиметров.

Процесс нагружения периодически прерывался, и поверхность образцов (на которой при кручении однородного материала появляются первые видимые трещины) рассматривалась в микроскоп при увеличении ~ 27 раз. Таким образом было изучено деформированное состояние: а) до появления видимых трещин; б) после появления видимых трещин; в) после окончательного разрушения.

До появления видимых трещин во всех изученных случаях деформация на поверхности закрученных образцов распределялась равномерно по всей рабочей поверхности образца.

После появления видимых трещин распределение деформации на поверхности образцов менялось в зависимости от материала.

Типичные результаты опытов приведены на рис. 2 и 3, из которых видно, что неравномерность деформации по длине скручиваемого образца до начала разрушения отсутствует и наблюдается лишь при на-

2). У образцов в отожженном состоянии неравномерность местной деформации наблюдалась по окружности. В зоне начала разрушения

практически отсутствует и, постепенно увеличиваясь, достигает наибольшей величины на участке 2, диаметрально противоположном участку 1*.

Таким образом, в этом случае дополнительная деформация проходит не в начале разрушения, а в процессе распространения трещины в глубь сечения образца (2). Это показывает, что описанная в работе (3) неравномерность распределения деформации по длине образца при кручении также есть проявление дополнительной деформации, вызванной процессом разрушения.

Как видно из рис. 2, после образования видимых трещин происходит не только местная, но и общая деформация образца. Дополнительная местная деформация в процессе разрушения наблюдалась нами также и при других способах нагружения. В качестве примера на рис. 4

приведены эпюры деформации по дну надреза призматического образца на разных стадиях пластического изгиба. Эпюра деформации 3 на рис. 4 соответствует моменту образования трещины в середине надреза, т. е. началу разрушения. В процессе разрушения деформированное состояние существенно изменилось (эпюра деформации 4), окончательное разрушение произошло от среза крайних зон образца.

Повидимому, можно различать следующие случаи дополнительной деформации, приводящей к увеличению средней (общей или местной) деформации тела в процессе разрушения: а) за счет появления или увеличения неоднородности деформированного состояния (например, по длине образца при кручении); б) за счет выравнивания местных деформаций в зоне излома (например, при растяжении образцов с над-

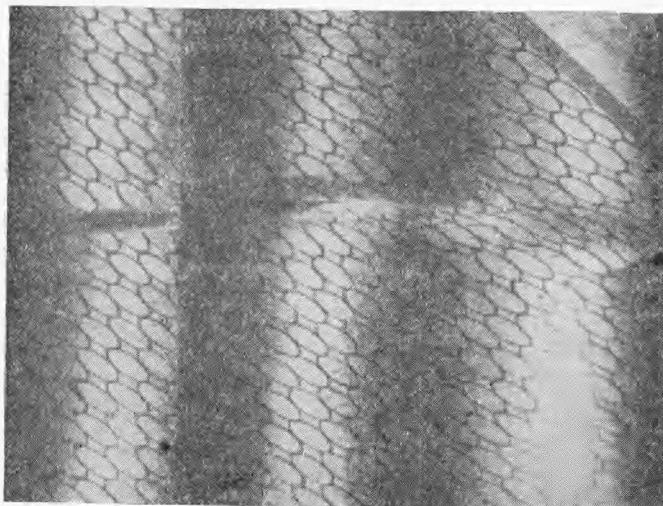


Рис. 3. Дополнительная деформация в зоне конца излома при кручении образца из стали 40ХНМА, отожженное состояние. База сетки 0,5 мм. Разворотка цилиндрического образца. Участок 1 — зона однородной деформации в начале излома, участок 2 — зона конца излома с дополнительной деформацией, полученной в процессе разрушения

резом сужение поперечного сечения в момент образования видимой трещины значительно меньше, чем сужение поперечного сечения после разрушения*); в) за счет продолжения деформации вне зон концентрации (например, увеличение угла сдвига при закручивании образцов после появления видимых трещин на поверхности и др.).

Изучение предельных пластически деформированных состояний (доводимых до разрушения) и сопоставление их с результатами расчетов следует проводить, в первую очередь, до начала разрушения (включая момент образования видимой трещины), а не после его окончания. Поэтому дополнительная деформация в процессе разрушения часто может не учитываться, что упрощает сложную для конечных деформаций проблему.

Описанные результаты показывают, что распространенный способ изучения законов пластического разрушения, в особенности величин деформаций соответствующих полному разрушению образца, ошибочен,

* Однако в этом случае судить о величине местной деформации (по дну надреза) по величине среднего сужения поперечного сечения нельзя, так как, в силу значительной неоднородности деформированного состояния в надрезе, сужение поперечного сечения является сильно заниженной осредненной характеристикой.

так как процесс разрушения начинается значительно раньше, чем образец полностью разрушается, и за этот период деформированное состояние может весьма существенно измениться*.

Работы П. А. Ребиндера (⁵, ⁶) и его школы показали, что как для пластичных, так и для хрупких тел следует считаться с ранним появлением в процессе деформации субмикроскопических щелей (микрощелей), развивающихся на основе слабых мест (дефектов) кристаллической решетки.

Данная работа показывает, что и при более грубом, макроскопическом, подходе надо четко различать ранние стадии разрушения (видимые трещины) и его последующее развитие вплоть до полного разрушения (или разделения образца на части). Иначе говоря, пластическое разрушение есть процесс, достаточно медленно развивающийся во времени. Как для решения теоретических задач (построение

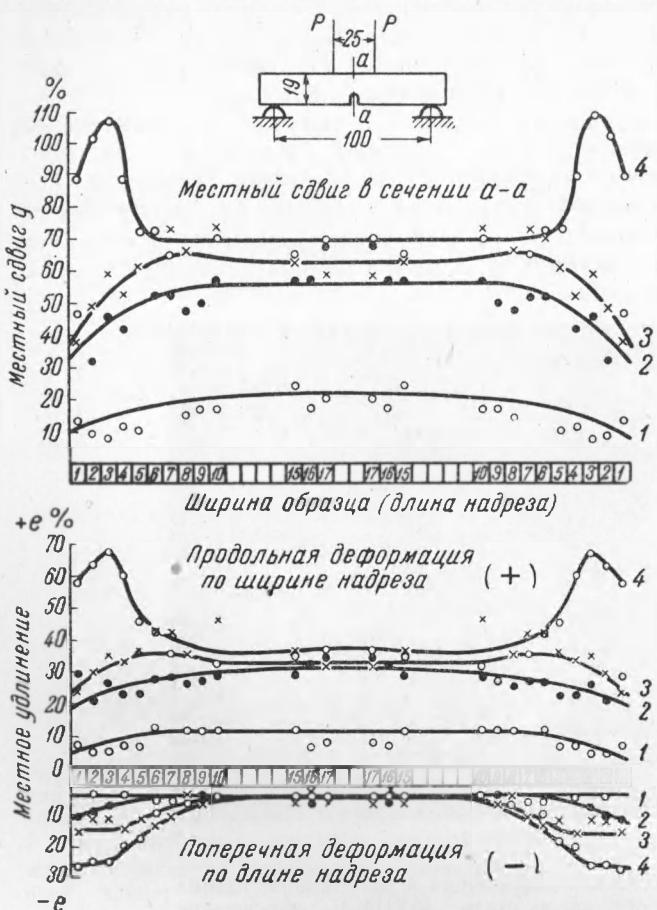


Рис. 4. Распределение пластической деформации по дну надреза прямоугольного образца на разных стадиях пластического изгиба. Сталь 40ХНМА, отожженное состояние. 1 — $M_{u32} = 56$ кгм, 2 — 75 кгм, 3 — 83,5 кгм (начало разрушения), 4 — 94 кгм (окончательное разрушение)

ние теории конечных пластических деформаций), так и для ряда чисто практических вопросов обычно важнее изучать механическое состояние в начале разрушения, чем при его дальнейшем развитии.

Всесоюзный научно-исследовательский
институт авиационных материалов

Поступило
2 VI 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Т. К. Зилова и Я. Б. Фридман, ЖТФ, 19, вып. 3 (1949). ² Я. Б. Фридман и Т. К. Зилова, Заводская лаборатория, № 1 (1950). ³ М. В. Якутович и Ф. П. Рыбалько, ДАН, 60, № 2 (1948). ⁴ С. В. Серенсен, Усталость металлов, 1949. ⁵ П. А. Ребиндер, Тр. Июльск. сессии АН СССР, М.—Л., Юбилейн. сборн. АН СССР к 30-летию Великой Октябрьской революции. ⁶ П. А. Ребиндер и В. П. Лихтман, ДАН, 69, № 2 (1949).

* Распространенный при изучении усталости металлов переход от кривых Велера к линиям повреждаемости по существу также является переходом от изучения полного усталостного разрушения образца к изучению выносливости до образования ранних трещин (4).