

УДК 539.375

© 1995 г. В. П. ДЕГТЯРЕВ

## АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ

При выполнении расчетов на прочность широко используются классические формулировки критериев разрушения и их модификации, позволяющие учитывать специфические свойства различных материалов, в том числе анизотропию прочностных характеристик, разную чувствительность материалов к уровню и изменению знака среднего (объемного) напряжения и другие особенности. Выбор критерия осуществляется с учетом имеющихся в литературе результатов экспериментальной проверки их физической достоверности. Эквивалентное напряжение по выбранному критерию сравнивается с пределом прочности материала и на этой основе делается вывод о запасах прочности конструкций.

При высоком уровне допускаемых напряжений такой подход не обеспечивает необходимую точность расчетов. Во-первых, условный предел прочности пластичных металлических материалов  $\sigma_b$ , определяемый в соответствии с существующим стандартом, может значительно отличаться от истинного значения разрушающего напряжения вследствие локализации процесса пластической деформации образцов и элементов конструкции при определенных видах напряженного состояния типа неравномерного двухосного или трехосного растяжения. Во-вторых, причиной разрушения конструкций во многих практически важных случаях (разрушение в зонах концентрации напряжений, при повторных и сложных нагружениях, при деформировании элементов конструкции с большой неоднородностью характеристик сопротивления пластической деформации материала, при больших температурных градиентах) может быть исчерпание деформационной способности материала. Поэтому в расчетах прочности высоконапряженных конструкций все более широкое применение находят деформационные критерии разрушения.

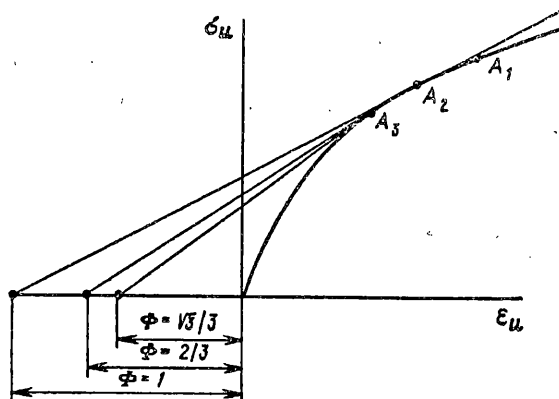
В последние годы экспериментально-теоретическое исследование деформационных критериев развернуто достаточно широко [1, 2], однако не могут претендовать на полноту охвата наиболее важных для инженерной практики направлений. Настоящая статья имеет целью привлечь внимание специалистов к решению некоторых важных для практики задач, связанных с построением и использованием деформационных критериев разрушения.

Рассмотрим вопрос о локализации процесса пластической деформации. Он достаточно полно изучен для простейших элементов конструкции типа образцов, пластин и тонкостенных оболочек при плоском напряженном состоянии и достаточно простых условиях работы, т. е. без учета эффектов сложного нагружения, ползучести, эффектов упрочнения при высокоскоростной деформации и так далее.

Имеющиеся в настоящее время результаты экспериментально-теоретических исследований показывают, что в случае локализации процесса пластической деформации критерии разрушения образцов и элементов конструкции не совпадают. Условия локализации элементов конструкций можно обобщить соотношением

$$d\sigma_u/d\varepsilon_u = \sigma_u/(\Phi + \varepsilon_u)$$

где  $\Phi$  — функция вида напряженного состояния. При растяжении образца она принимает значение  $\Phi = 1$ , при нагружении внутренним давлением цилиндрического тонкостенного сосуда  $\Phi = \frac{\sqrt{3}}{3}$ , при двухосном растяжении



Фиг. 1

сферической оболочки  $\Phi = 2/3$  [2]. Отсюда следует, что для выбора формулировки критерия прочности тонкостенных сосудов давления можно воспользоваться диаграммой простого растяжения одномерного образца (фиг. 1). Проводя касательные к кривой  $\sigma_u - \epsilon_u$  из точек на оси абсцисс, соответствующих расчетным значениям функции  $\Phi$ , можно определить величины напряжений и деформаций, превышение которых приводит к локализации процесса и лавинному разрушению в случае активного нагружения. В точке  $A_1$  заканчивается процесс равномерной деформации образца, а в точках  $A_2$  и  $A_3$  — процесс деформации тонкостенных сосудов при действии внутреннего давления.

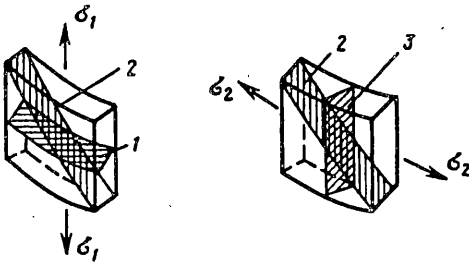
Такое построение наглядно демонстрирует разницу наибольших напряжений для образцов и элементов конструкций и позволяет выбрать ту формулировку критерия разрушения, которая дает наименьшее расхождение с опытом. Приведенный пример показывает также актуальность решения многих других задач о локализации процесса деформации элементов конструкций, требующих учета эффектов сложного нагружения, ползучести, высокоскоростного деформирования и т. п.

Неустойчивость процесса деформации при растяжении осложняет задачу экспериментального построения деформационных критериев разрушения.

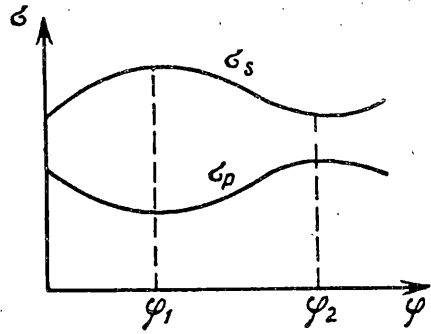
Для плоского напряженного состояния деформационные критерии могут быть найдены путем измерения деформаций на поверхности массивных тел, не теряющих устойчивость процесса деформации вплоть до разрушения. При этом могут быть широко использованы результаты испытаний сплошных круглых образцов на совместное действие осевой силы и крутящего момента и испытания балок прямоугольного сечения на изгиб.

При объемном напряженном состоянии типа неравномерного всестороннего растяжения, которое характерно для элементов конструкции сложной формы, деформационные и силовые критерии можно установить экспериментально-теоретическим методом по результатам расчета напряженно-деформированного состояния и испытаний образцов на растяжение с глубокими выточками [2]. Получаемые по результатам расчета и испытаний предельные деформации и напряжения позволяют использовать резервы прочности конструкций в локальных зонах неравномерного всестороннего растяжения, связанные с тем, что напряжение отрыва может превышать условный предел прочности в 1,5—1,7 раза.

Следует заметить, что предельное состояние конструкции при объемном неравномерном растяжении можно оценить не проводя сложных испытаний, поскольку основной эффект повышенного сопротивления конструкции разрушению можно установить приближенно по результатам определения характеристик  $\sigma_u$  и  $\Psi$  при испытании гладких образцов. В этом случае граница разрушения



Фиг. 2



Фиг. 3

определяется соотношением  $\sigma_{\max} = \sigma_y / (1 - \Psi)$ , а деформационная граница определяется на основе гипотезы простого нагружения о совпадении кривых  $\sigma_u - \epsilon_u$  с диаграммой простого растяжения образца. Анализ справочной информации с таким подходом показывает, что предельная деформация  $\epsilon_u^*$  существенно уменьшается с ростом среднего (объемного) растягивающего напряжения.

Получение систематических экспериментальных данных при разных уровнях среднего напряжения представляет большой практический интерес для решения задач о прочности элементов конструкций сложной пространственной формы и прочности сварных швов, обладающих неоднородностью упругопластических свойств.

Другое важное направление исследований деформационных критериев разрушения сопряжено с учетом эффектов сложного нагружения, которые становятся существенными при воздействии на конструкцию при эксплуатации сложной системы сил, изменяющихся по-разному во времени, при учете влияния на прочность операций деформирования в технологическом процессе изготовления конструкций и при решении задач генезиса свойств и состояний, связанных с анализом аварийных разрушений.

Обобщая имеющиеся результаты исследования деформационных границ разрушения металлических материалов при сложных нагружениях, необходимо отметить, что длина дуги траектории сложной деформации до разрушения превышает длину прямого луча, соответствующего простому (пропорциональному) нагружению.

Рассмотрим процесс сложного нагружения по ломаной траектории с промежуточной разгрузкой в точке излома (фиг. 2). На первом этапе, когда действует напряжение  $\sigma_1$ , наибольшие сдвиги происходят по площадкам 1 и 2, а на втором этапе изменяется знак сдвига на площадке 2 и включается в работу новая площадка 3. Отсюда следует, что расширение деформационных границ работы металла при сложном нагружении, по-видимому, объясняется расширением спектра площадок наибольших сдвигов. При этом оказывает дополнительное влияние разнообразие циклических свойств сталей и сплавов при изменении знака наибольших сдвигов.

Рассмотрим один из этапов решения задач генезиса для тонкостенного элемента конструкции типа пластины или оболочки, разрушенных в результате реализации неизвестного простого нагружения. Эта задача легко решается на основе обобщения результатов исследования связи напряжений с деформациями и деформационных критериев разрушения при сложных нагружениях по траекториям ломаной линии с промежуточной разгрузкой в точке излома, разными углами поворота траектории и разными начальными деформациями в точках излома.

Дополнительная информация, необходимая для решения этой задачи может быть получена по результатам испытаний на растяжение и сжатие образцов, вырезанных из деформированного элемента так, что ориентация продольных

осей образцов изменяется с малым шагом (10—15 градусов). Характерный вид графика изменения условных характеристик типа предела текучести при растяжении  $\sigma_t$  и сжатии  $\sigma_p$  показан на фиг. 3.

Экстремальные значения этих характеристик позволяют найти углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2 = \varphi_1 + \pi/2$ , соответствующие направлению главных напряжений в неизвестном процессе. Результаты дополнительных испытаний образцов, ориентированных в новых (главных) направлениях и общая закономерность изменения скалярных свойств металлов при сложном нагружении позволяют установить соотношение между главными напряжениями, т. е. ориентацию вектора напряжений, и участок диаграммы  $\sigma_u - \varepsilon_u$ , соответствующий продолжению неизвестного процесса. Для этого результаты исследований сложных процессов нагружения по ломаным линиям с промежуточной разгрузкой достаточно представить в виде  $\Phi(\alpha, \varepsilon_u^\circ) = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_0}$ , где  $\sigma_\alpha$  — условное напряжение при вторичном нагружении с поворотом вектора на угол  $\alpha$ ,  $\sigma_0$  — условное напряжение без изменения направления вектора напряжения.

Интенсивность начальной деформации  $\varepsilon_u^\circ$  при решении таких задач можно иногда найти по результатам измерений толщины деформированного элемента конструкции. Однако в общем случае для ее определения необходимо иметь деформационный критерий разрушения.

В заключение отметим важность еще одного направления в исследовании деформационных критериев прочности. Оно связано с прогнозированием запасов прочности и оптимизацией массовых характеристик конструкций на основе единичных статических испытаний до разрушения. Объем информации о запасах прочности, получаемый при этих испытаниях может быть значительно расширен, если произвести систематизацию сведений о предельных деформациях, которые получаются при испытании характерных узлов, фрагментов и моделей, отражающих разнообразие конструктивных решений и условий нагружения.

В качестве первого этапа в этом исследовании на основе уже имеющейся информации могут быть установлены деформационные критерии потери устойчивости элементов конструкций при действии сжимающих нагрузок. Обобщение имеющихся данных и построение деформационных критериев разрушения конструкций создаст основу для дальнейшего совершенствования методов натурных испытаний и широкого прогнозирования запасов прочности по всему объему конструкции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. М.: Машиностроение, 1974. 270 с.
2. Дегтярев В. П. Деформации и разрушение в высоконапряженных конструкциях. М.: Машиностроение, 1987. 103 с.

Москва

Поступила в редакцию  
15.VI.1993