

## О ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИНАХ РАЗРУШЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ СЖАТИИ

*М. М. Муздакбаев, В. С. Никифоровский*

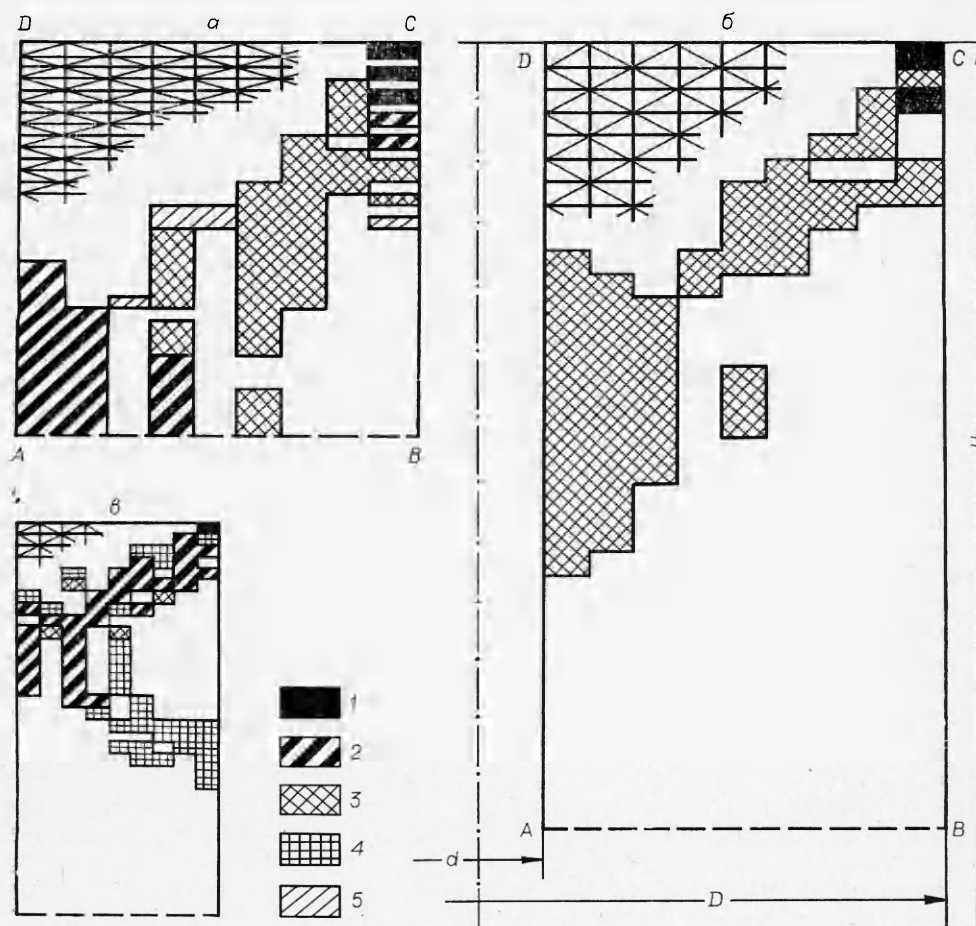
(Новосибирск)

Наиболее простым по исполнению, а поэтому и самым распространенным является испытание материалов на одноосное сжатие. Надо сказать, что во многих случаях образец, круглый, трубчатый, прямоугольный — куб, параллелепипед и т. п., повторяет или довольно близок к реальному виду той детали строения или конструкции, надежность которой необходимо оценить, и поэтому с точностью до вопросов моделирования дает достаточно правдоподобную техническую характеристику прочности. О материале, по-видимому, в этот момент говорить преждевременно, хотя некая косвенная его оценка и происходит (см., например, [1]), логичнее говорить о технической прочности образца-конструкции [2, 3].

Экспериментаторы наблюдают разный характер разрушения образца в зависимости от условий эксперимента: конусы и призмы в окрестности торцов связывают с появлением опасной концентрации максимальных касательных напряжений; трещины, соосные действующему сжатию, признаются как парадоксальные, хотя имеют место на соответствующих площадках нормальные напряжения растяжения [2, 3]. Причиной возникновения здесь нормальных напряжений растяжения может быть неоднородность напряженного состояния, обусловленная необратимыми деформациями в части образца. В данной работе обсуждается еще одна причина возникновения вертикальных (соосных действующему давлению) трещин — максимальные касательные напряжения.

Рассмотрим кинетику разрушения трубчатого образца в условиях работы [3]. Будем считать, что разрушение происходит при достижении осредненным по прямоугольному элементу, состоящему из двух треугольных, максимальным касательным напряжением предельного значения  $\tau_{\max} = \tau_0$ . «Разрушенный» материал теряет свои прежние прочностные свойства: его модуль упругости уменьшается скачком и приобретает значение  $E_1 = kE_0$ ,  $k < 1$ . Это приводит к уменьшению суммарной несущей способности всего образца, а следовательно, к релаксации напряжений в нем при неизменном заданном граничном смещении торцов  $v = \text{const}$  и к перераспределению всего поля напряжений. Соответствующая картина рассчитывается как нелинейная методом последовательных приближений. Затем производится следующее очередное смещение торцов  $v_{i+1} = v_i + \Delta v$ , осуществляются анализ поля напряжений и проверка выполнения критерия прочности, перестроение разрушенной области с изменением свойств материала и уточняющим пересчетом — численный эксперимент по деформированию и разрушению образца.

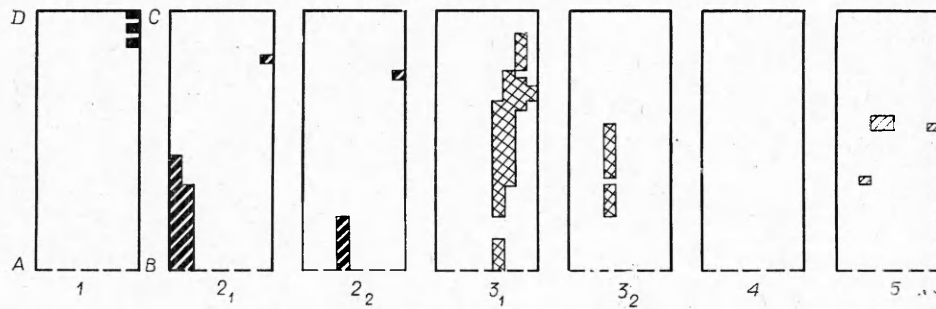
На фиг. 1 показана суммарная картина разрушенной области для следующих соотношений ( $H$  — высота,  $D$  — внешний диаметр) образца:  $a$  —  $H/D = 1$ —5 этапов разрушения;  $b$  —  $H/D = 2$ ,  $D = \text{const}$  по сравнению с фиг. 1,  $a$  — 3 этапа разрушения;  $c$  —  $H/D = 2$ ,  $H = \text{const}$  — 4 этапа разрушения. В верхнем левом углу показана структура конечных элементов; принята одинаковая во всех случаях сетка узлов  $10 \times 35$ , что в условиях различных по размеру областей могло дать разную точность и, возможно, даже некоторую корректировку обсуждаемых далее результатов. Расчет проводился во всех экспериментах до момента выхода разрушенной области на обе боковые поверхности с образованием «тре-



Ф и г. 1

щины» разрушения, пронизывающей весь образец. Следует отдавать себе отчет в том, что принятая модель поведения материала (скачкообразный переход модуля упругости из состояния  $E_0$  в состояние  $E_1$  — своеобразная потеря прочности) дает возможность в образце-конструкции зафиксировать следующие участки диаграммы  $\sigma - \epsilon$  (среднее осевое усилие — средняя осевая деформация): участок упругого деформирования с модулем  $E_0$  до предела упругости, когда в первом элементе выполняется условие разрушения  $\tau_{\max} = \tau_0$ ; скачкообразный участок течения со сбросом осевого усилия в моменты разрушения очередных единичных или групп элементов с последующим его нарастанием с новым приведенным модулем  $E_*$  ( $E_1 < E_* < E_0$ ) и т. д., причем глубина сброса зависит от количества разрушенных элементов и величины  $k$ ; участок упрочнения с модулем разрушенного материала  $E_0$ , когда все элементы области перейдут в такое состояние. Из сказанного следует, что, во-первых, разрушение в данной работе отождествлено с началом пластического течения и речь идет о построении области течения, во-вторых, уже здесь можно ощутить различие свойств материала и образца-конструкции, в-третьих, для получения интегральных характеристик диаграммы (предела прочности, участка разупрочнения) необходимо принять дальнейшие гипотезы о локальном поведении среды.

Изменение соотношения свойств первоначального и разрушенного материала (коэффициент  $k$ ) и геометрических размеров, а также харак-



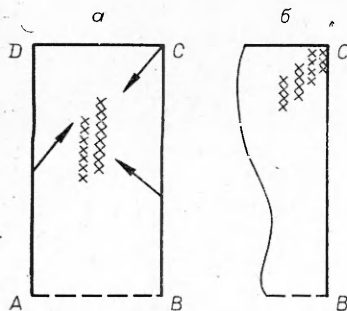
Фиг. 2

тера граничного воздействия ( $u$ ,  $v$ ) позволяет увидеть целую гамму разнообразного течения процесса разрушения. Часто разрушенная область пронизывает весь образец из верхней (рассматривается симметричная половина картины) внешней угловой области вниз к внутреннему радиусу в окрестности плоскости симметрии  $AB$  в срединной части, напоминая экспериментально наблюдаемые конусы разрушения. Возможно встречное зарождение и движение разрушенной области с внутреннего радиуса и внутренних локализованных каверн. Весьма интересно появление вертикальных областей внутри образца, а также разрушений с внешнего радиуса из плоскости симметрии в срединной части. Иногда наклонная плоскость скольжения имеет «чешуйчатое» строение — состоит из ряда последовательных вертикально ориентированных трещин.

В этом смысле интересно поэтапно проанализировать процесс разрушения, соответствующий, например, случаю фиг. 1, а ( $H/D = 1$ ). На фиг. 2 показаны этапы разрушения, обозначенные цифрами 1—5, индексы около которых дают дополнительное уточнение на очередных последовательных приближениях расчета, последние также представляют собой подэтапы процесса. Возможна еще большая поэлементная детализация по относительному уровню осредненных напряжений, позволяющая указать направление развития процесса.

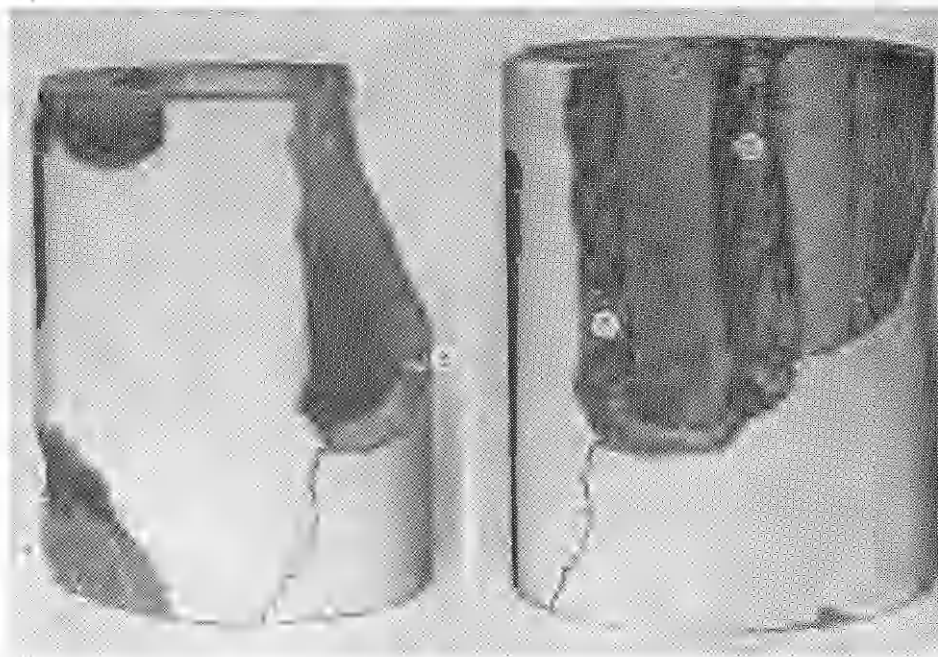
Сначала разрушаются три прямоугольных элемента на внешнем радиусе у нагружаемого торца (этап 1, фиг. 2), сразу же после них опасной оказывается протяженная зона на внутреннем радиусе около плоскости симметрии ( $2_1$ ), затем — элементы вдоль вертикальных линий ( $2_2$ ,  $3_1$ ,  $3_2$ ) и обширная зона в угловой области ( $3_1$ ). На этапе 4 происходит задержка разрушения; на этапе 5 разрушаются дополнительные отдельные элементы и группы элементов и происходит смыкание областей разрушения на внутреннем и внешнем радиусах в одну сквозную трещину, пронизывающую весь образец с возможным отделением внешней области и конуса.

При увеличении высоты образца или уменьшении его диаметра, приводящих к росту отношения  $H/D$ , можно отметить дополнительно области



Фиг. 3

разрушения с внешнего радиуса из срединной части (см. фиг. 1, в). На фиг. 3, а, б соответственно показана кинетика распространения зон разрушения и полученная на ряде расчетов «чешуйчатая» структура наклонных поверхностей скольжения. Особое внимание следует обратить на возможность образования таких вертикальных трещин (фиг. 3, а, б), соосных действующему сжатию, которые в срединной части образца также имеют место и в зависимости от степени стеснения границ и геометрических размеров порой оказываются опасными [2,



Ф и г. 4

3]. Эти трещины обусловлены не растягивающими нормальными, а предельными значениями максимальных касательных напряжений.

Сопоставим результаты численных и натурных экспериментов. На фиг. 4 представлен один из таких примеров, полученных в лаборатории Ю. А. Векслера (Караганда). Бетонный трубчатый образец разрушен действием осевого сжатия. Видны сколы углов 1 (скорее всего, это разрушение первого этапа), скол возможен по вертикальной трещине с выходом на внешнюю боковую поверхность — отделение чешуйки; разрушение 2 в окрестности внутреннего радиуса вблизи плоскости симметрии, а также 3 на внешнем радиусе в срединной части образца с переходом на внутреннюю сторону и общим выколом.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Е. И. Шемякина за внимание к работе и обсуждение результатов.

*Поступила 12 VIII 1980*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Г. Н. Механические свойства горных пород. М., Углетехиздат, 1947.
2. Бейсетаев Р. Б., Никифоровский В. С. К вопросу о прочности твердых тел на одноосное сжатие. — ФТПРПИ, 1976, № 3.
3. Муздакбаев М. М., Никифоровский В. С. О прочности материалов на сжатие. — ПМТФ, 1978, № 2.