

15. Annin B. D., Kalamkarov A. L., Kolpakov A. G. Analysis of local stresses in high modulus fiber composites // Localized Damage Computer — Aided Assessment and Control.— Southampton, 1990.— V. 2.
16. Каламкарров А. Л., Колпаков А. Г., Партон В. З. К расчету высокомодульных перекрестно-армированных оболочек // Механика композит. материалов.— 1989.— № 1.
17. Аннин Б. Д., Каламкарров А. Л., Колпаков А. Г., Партон В. З. Расчет и проектирование композиционных материалов и элементов конструкций.— Новосибирск: Наука, 1993.

г. Новосибирск

Поступила 25/XI 1992 г.,
в окончательном варианте — 9/II 1993 г.

УДК 624.539.4

А. Г. Иванов, В. А. Рыжанский

ЗАПАСЫ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В современной практике эксплуатационные характеристики прочности крупногабаритного сооружения, в том числе и запасы прочности (ЗП), определяются расчетным путем на стадии проектирования [1, 2] и проверяются в опытах на моделях. Однако перенос на натуру результатов расчетов или модельных опытов без учета масштабного фактора может, как известно [3—5], привести к дефициту фактических ЗП натурального объекта по сравнению с проектными. Последствия такого просчета могут быть весьма тяжелыми. Покажем это на примерах.

В [6] предложена оригинальная конструкция шарового сосуда высокого давления (до 50 МПа) емкостью несколько тысяч кубических метров. Сосуд имеет многослойную оболочку, где каждый слой состоит из состыкованных листовых элементов. Только в наружном и внутреннем слоях стыки элементов сварены для герметизации сосуда в целом, а прочность его обеспечивается за счет трения между слоями. Известно, что использование многослойных или рулонированных труб на отдельных участках магистральных трубопроводов позволяет остановить распространяющуюся трещину и снизить тяжесть аварии. Поэтому с точки зрения предотвращения хрупкого разрушения многослойная конструкция сосуда более прогрессивна, чем однослойная, что подтверждается и результатами опытов по интенсивному импульсному нагружению сосудов [7].

Каков же исход внезапного разрушения сосуда [6], если это все-таки произойдет? Как нетрудно оценить, при емкости, например, 5000 м³ и наличии двухатомного газа под давлением 50 МПа хрупкое разрушение сосуда эквивалентно взрыву 150 т тротила (ТНТ), т. е. будет подлинной катастрофой. Тяжесть последствий такого инцидента и проблема экспериментального определения фактического ЗП полномасштабного сосуда [6] обуславливают необходимость тщательного обоснования надежности его конструкции.

Рассмотрим, как обоснована прочность сосуда в [6]. Здесь в качестве примера рассчитан вариант сосуда на рабочее давление $P = 20$ МПа, оболочка сосуда с внутренним радиусом $R_0 = 5$ м имеет $n = 40$ слоев из стали с пределом текучести $\sigma_T = 350$ МПа. Толщина внутреннего t_1 и наружного t_2 сварных слоев равна 32 мм, а каждого из промежуточных слоев $t = 5$ мм. По расчетам авторов [6], данная оболочка с общей толщиной $\delta = 254$ мм равнопрочна с монолитной при ЗП по σ_T , равном 1,5. Отметим, что хрупкое разрушение данного сосуда эквивалентно взрыву 6 т ТНТ*.

* Наиболее крупные авиабомбы времен Второй мировой войны содержали 1 т ТНТ.

Экспериментальное исследование прочности и надежности сосудов [6] было проведено на четырех полусферических моделях. Соотношения R_0 моделей и прототипа составляли 1 : 33 (модели 1, 2) и 1 : 17 (модели 3, 4), но полного геометрического подобия не было. Если за критерий подобия взять параметр δ/R_0 , то наиболее близка к прототипу модель 1 со стальной оболочкой из восьми слоев толщиной 1 мм при $\delta/R_0 = 5,3\%$ (у прототипа 5,1%). Ее расчетное и фактическое давления разрушения совпали, но оказались на 44% ниже, чем у монолитной. С учетом заложенного в конструкцию ЗП по пределу прочности, равного 2,4, результаты модельных опытов подводят читателя к выводу, что нет оснований сомневаться в надежности и натуральных сооружений подобного типа. В самом деле, если полагать, что несущая способность (прочность) конструкции однозначно определяется только ее напряженно-деформированным состоянием, то два геометрически подобных объекта (модель и прототип), нагруженные подобным же образом, должны разрушаться при одинаковых напряжениях. Однако этот постулат экспериментально не подтверждается.

Так, из исследований взрывостойкости геометрически подобных стальных сосудов [8—12] известно, что если при импульсном нагружении меньший сосуд разрушается при пластической деформации ϵ_{p1} , то больший (при прочих равных условиях) — при $\epsilon_{p2} < \epsilon_{p1}$. Чем больше коэффициент моделирования k , тем меньше ϵ_{p2} вплоть до перехода ее в упругую область, и в этом случае разрушение приобретает катастрофический, как правило, хрупкий характер (хотя материал — все та же пластичная сталь). Кстати, именно так обычно разрушаются стальные сферические сосуды [10, 11].

Возможность существенного снижения прочности геометрически подобных сосудов давления с увеличением их размеров рассмотрена в [3—5]. Природа этого явления энергетическая, ибо разрушение (разделение целого на части) есть результат работы, совершенной за счет упругой энергии, накопленной материалом сосуда под нагрузкой*. Эта энергия пропорциональна объему материала $\sim L^3$ (L — характерный размер объекта), в то время как работа разрушения пропорциональна поверхности разрушения $\sim L^2$. Поэтому с увеличением L упругая энергия растет быстрее, чем затраты ее на работу разрушения, что приводит к сильной зависимости разрушающего напряжения $\sigma_p(L)$ вида

$$(1) \quad \sigma_p \sim L^{-1/2}.$$

Если разрушение модели в соответствии с (1) произойдет при $\sigma_p \approx \sigma_T$, то при геометрически подобном увеличении ее до натуральных размеров, т. е. в k раз, разрушение может произойти при напряжении, в \sqrt{k} раз меньшем. Такого рода результат влияния масштабного фактора на прочность объекта именуется масштабным эффектом (МЭ) энергетической природы или сильным МЭ [3]. Игнорирование возможности проявления МЭ, в особенности сильного, делает заложенный проектантом ЗП сосуда — объекта ответственного назначения — весьма сомнительным (с точки зрения вышеизложенной энергетической концепции разрушения ЗП отсутствует). Соответственно и надежность сосуда оказывается сомнительной.

Зависимость (1) — лишь необходимое условие разрушения, являющееся следствием баланса упругой энергии деформации и работы разрушения. Достаточным условием разрушения может оказаться наличие в материале объекта дефекта либо экстремально нагруженной зоны (например, зоны с концентрацией напряжения, гриффитовской трещины и т. п.). Конечно, тщательная конструкторская и технологическая обработка сосуда, применение многослойной оболочки позволяют улучшить его прочностные характеристики, поднять несущую способность и надежность. Но в принципе, как бы ни был объект совершенен, он будет менее прочен, чем его уменьшенная модель. С увеличением размеров модели до размеров натурального

* Поскольку время разрушения достаточно мало, работа внешних сил при этом несущественна.

сосуда разрушающее напряжение снизится, разрушающая деформация перейдет в упругую область и разрушение из пластического трансформируется в хрупкое.

Таким образом, если при разработке крупногабаритной конструкции не учтены МЭ, в особенности сильный, ее расчетный ЗП недостаточно надежен или, вопреки расчетам, может отсутствовать. В последнем случае объект обречен на разрушение, которое рано или поздно произойдет и, как показывает практика, произойдет внезапно, при неожиданно низких напряжениях и с катастрофическими последствиями.

Означает ли изложенное выше, что в соответствии с (1) за увеличение размеров сосуда или вообще любого объекта необходимо расплачиваться резким снижением его прочности? Отнюдь нет: есть пути преодоления этого тупика. Рассмотрим их.

Первый путь состоит в замене большого сосуда на N геометрически подобных малых сосудов с линейными размерами, в $N^{1/3}$ раз меньшими, чем у прототипа. В этом случае при тех же затратах материала и суммарном полезном объеме значение σ_p , согласно (1), возрастет в $N^{1/6}$ раз (например, при $N = 10^3$ σ_p возрастет в ~ 3 раза). Однако на практике такое решение проблемы вряд ли приемлемо, ибо сопряжено с существенным ростом затрат на сооружение и эксплуатацию сосуда, а также требует увеличения производственной площади.

Значительно проще, если прототип имеет цилиндрическую форму. У такого сосуда с радиусом R и высотой H окружные напряжения вдвое превышают осевые независимо от отношения H/R , поэтому не нужно изменять H при замене исходного сосуда на N малых сосудов-труб. Значит, при тех же затратах материала и общем полезном объеме сосудов-труб σ_p возрастет в $N^{1/4}$ раз, а объем-брутто при плотной упаковке труб увеличится всего на 10 %. Так, при $N = 200$ радиус сосуда-трубы r составит 1/14 радиуса прототипа (например, при $R = 5$ м $r = 0,36$ м), а σ_p , согласно (1), возрастет в 4 раза. Таким образом, замена цилиндрического сосуда высокого давления пакетом труб при прочих равных условиях существенно повысит несущую способность и надежность конструкции, а также экологическую безопасность (сосуд-труба в пакете работает и разрушается автономно). Идентичность составных частей такого сосуда позволяет размещать их в оптимальном для эксплуатации виде и экспериментально определять фактический ЗП. Наконец, как и сосуд [6], данный сосуд может быть смонтирован на месте эксплуатации.

Второй путь — использование ориентированных волокнистых композитов. Такие материалы, в частности стеклопластики, как показано в [13, 14], обладают фундаментальным свойством: при их разрушении отсутствует МЭ энергетической природы. Дело в том, что основным несущим элементом стеклопластика является волокно, диаметр которого $d = \text{const}$ независимо от размера объекта. Поэтому, согласно (1) (где $L \equiv d$), $\sigma_p = \text{const}$, что и обуславливает отсутствие МЭ энергетической природы. Если для металлических конструкционных материалов наиболее опасным событием является хрупкое разрушение в упругой области деформаций, где мала вязкость разрушения K_{Ic} , то для отдельного стекловолокна упругая деформация и хрупкое разрушение — естественное поведение. При этом даже массовое разрушение волокон некатастрофично для объектов из волокнистых композитов [14]. В частности, у стекловолокон, согласно (1), несмотря на пренебрежимо малое значение K_{Ic} стекла по сравнению со сталью, меньшая d , можно существенно повысить σ_p [3, с. 75]. Например, у стекловолокон ВМ-1 при $d = 10$ мкм $\sigma_p = 4,2$ ГПа [15], т. е. существенно больше, чем у сталей, причем плотность стекла в 3 раза меньше плотности стали.

Несколько слов о конструкциях из многослойных и рулонированных материалов. Их основным несущим элементом является слой, толщина которого $t = \text{const}$ независимо от размера объекта. По реакции на нагружение эти материалы подобны композитам, в частности стеклопластику, у волокон

которого $d = \text{const}$. Их существенное отличие от композитов имеет два аспекта.

1. Для обеспечения работоспособности растягивающие напряжения в конструкции не должны превышать σ_T , которое невелико по сравнению, например, с σ_p стекловолокна и в отличие от последнего ограничено сверху. У стекловолокна же, уменьшая d , значение σ_p можно существенно поднять.

2. Из-за отсутствия матрицы слои материала акустически связаны, в то время как у стеклопластика волокна и матрица практически развязаны (их акустические сопротивления различаются примерно на порядок). Поэтому многослойный и рулонированный материалы, как и монолит, не свободны от проявления МЭ энергетической природы, который, однако, выражен у них существенно слабее, чем у монолита [16].

По данным многочисленных исследований [3, 8, 12, 16, 17], при интенсивных импульсных нагрузках выполняются оба условия разрушения — необходимое и достаточное. Согласно [17], увеличение диаметра геометрически подобных стальных однослойных труб в 4 раза приводит при их взрывном нагружении к снижению ϵ_p в 2—2,5 раза. Аналогично в [16]: увеличение диаметра рулонированной трубы в 10 раз снижает ϵ_p в 1,5 раза. А поскольку падение относительного удлинения материала с ростом размера образцов отмечается и при их статических испытаниях [3, с. 74], не исключено, что подобные факты могут иметь место и при действии статических нагрузок. Поэтому, возвращаясь к [6], следует иметь в виду, что перенос результатов опытов с моделью 1 на полномасштабный сосуд даже при сохранении толщины слоев модели с одновременным увеличением их количества в 33×8 раз может под влиянием масштабного фактора привести к падению ϵ_p в область упругих деформаций, т. е. к возможности хрупкого разрушения.

Итак, оценка прочности крупногабаритного объекта на основе результатов модельных испытаний без учета масштабного фактора некорректна: даже при использовании многослойной конструкции и большом ЗП модели возможно проявление МЭ энергетической природы способно существенно снизить или свести на нет фактический ЗП объекта.

Современные методы обеспечения необходимых ЗП крупногабаритных конструкций основаны на выборе материала несущих элементов. Охрупчивание материала при увеличении размеров объекта учитывается по результатам испытаний на трещиностойкость образцов натурной толщины или по смещению критической температуры хрупкости с изменением размеров образца. Но, как показано в [18], и такие испытания не гарантируют ухода от хрупкого разрушения. Использование многослойной несущей конструкции тоже не решает проблему: с одной стороны, такие материалы не везде могут быть использованы, а с другой — как показано выше, и они не свободны от МЭ. В такой ситуации можно рекомендовать применение ориентированных волокнистых композитов, а при невозможности этого или при необходимости использовать традиционные металлы представляет интерес еще один путь решения проблемы.

Учитывая, что при интенсивном импульсном нагружении реализуются необходимые и достаточные условия разрушения, можно, доведя до разрушения 2—3 модели разного масштаба, оценить условия разрушения натурального объекта. Поясним это на примере взрывного разрушения геометрически подобных сферических сосудов из стали. Уравнение ее деформирования примем для простоты в идеализированной билинейной форме

$$\begin{aligned} \sigma &= E\epsilon \quad \text{при} \quad \sigma \leq \sigma_0, \\ \sigma &= \sigma_0 + K(\epsilon - \sigma_0/E) \quad \text{при} \quad \sigma > \sigma_0, \end{aligned}$$

где σ_0 — идеализированный предел текучести; E и K — модули упругости и упрочнения. Если радиус сосуда R достаточно мал, так что перед разрушением часть кинетической энергии сосуда тратится на пластическое течение материала, нетрудно найти связь между R и ϵ_p :

$$(2) \quad R_T/R = [(1 - K/E) + K\epsilon_p/(E\epsilon_T)]^2.$$

Здесь ϵ_T и R_T — деформация на пределе текучести и радиус сосуда, разрушающегося на пределе текучести. При разрушении в упругой области ($K = E$) уравнение (2) принимает вид

$$(3) \quad R_T/R = (\epsilon_p/\epsilon_T)^2.$$

Уравнения (2) и (3) позволяют в опытах на модели радиуса $R = R_1$ найти ее разрушающую деформацию ϵ_{p1} и при известных E , K и ϵ_T оценить предельный радиус R_T : при $R > R_T$ разрушение сосуда будет носить хрупкий характер. При этом в первом приближении влиянием на σ скорости деформации и температуры материала, по-видимому, можно пренебречь, учитывая, что эти факторы дают малые поправки разного знака. Например, как показано в [19], для сосудов из сталей 25 и 22к при $\delta/R \approx 0,2$ оцененное таким способом значение $R_T \approx 0,2$ м, что не противоречит результатам эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Браун У., Сроули Дж. Испытания высокопрочных металлических материалов на вязкость разрушения при плоской деформации. — М.: Мир, 1972.
2. Махутов Н. А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. — М.: Машиностроение, 1973.
3. Иванов А. Г., Минеев В. Н. О масштабных эффектах при разрушении // ФГВ.— 1979.— № 5.— С. 70—95.
4. Иванов А. Г. Хрупкая прочность тонкостенных сосудов // Пробл. прочности.— 1988.— № 6.— С. 49—53.
5. Иванов А. Г. О возможности построения единой теории разрушения // ПМТФ.— 1990.— № 1.— С. 109—116.
6. Пимштейн П. Г., Тупицын А. А., Мурашев Б. Г., Борсук Е. Г. Исследование шаровых сосудов высокого давления новой конструкции // Пробл. прочности.— 1990.— № 12.— С. 44—48.
7. Тюняев Ю. Н., Попов Н. Н., Минеев В. Н. Прочность сплошных и рулонированных оболочек при внутреннем импульсном нагружении // Пробл. прочности.— 1978.— № 1.— С. 23—26.
8. Иванов А. Г., Сеницын В. А., Новиқов С. А. Масштабные эффекты при динамическом разрушении конструкций // ДАН СССР.— 1970.— Т. 194, № 2.— С. 316—317.
9. Цыпкин В. И., Клещевников О. А., Шитов А. Т. и др. Масштабный эффект при взрывном разрушении сосудов, заполненных водой // Атомная энергия.— 1975.— Т. 38, вып. 4.— С. 251—252.
10. Иванов А. Г., Учаев А. А., Рыжанский В. А. Импульсное разрушение геометрически подобных объектов // ДАН СССР.— 1981.— Т. 261, № 4.— С. 868—873.
11. Цыпкин В. И., Иванов А. Г., Минеев В. Н., Шитов А. Т. Влияние масштаба, геометрии и заполняющей среды на прочность стальных сосудов при внутреннем импульсном нагружении // Атомная энергия.— 1976.— Т. 41, вып. 5.— С. 303—308.
12. Иванов А. Г., Тюнькин Е. С., Минеев В. Н. Импульсное схлопывание стальных цилиндрических оболочек // Изв. АН СССР. МТТ.— 1982.— № 2.
13. Рыжанский В. А., Минеев В. Н., Иванов А. Г. и др. Разрушение цилиндрических стеклоэпоксидных оболочек, заполненных водой, при внутреннем импульсном нагружении // Механика полимеров.— 1978.— № 2.— С. 283—289.
14. Федоренко А. Г., Сырунин М. А., Иванов А. Г. Динамическая прочность оболочек из ориентированных волокнистых композитов при взрывном нагружении (обзор) // ПМТФ.— 1993.— № 1.— С. 126—133.
15. Композиционные материалы: Справочник/Под ред. В. В. Васильева и Ю. М. Тарнопольского.— М.: Машиностроение, 1990.
16. Цыпкин В. И., Иванов А. Г. Масштабный эффект при взрывном разрушении рулонированных оболочек // Пробл. прочности.— 1981.— № 6.— С. 110—112.
17. Иванов А. Г., Минеев В. Н., Цыпкин В. И. и др. Пластичность, разрушение и масштабный эффект при взрывном нагружении стальных труб // ФГВ.— 1974.— № 4.— С. 603—607.

18. Иванов А. Г. Две возможные причины хрупких разрушений // ДАН СССР.— 1988.— Т. 350, № 2.— С. 354—357.
19. Иванов А. Г., Новиков С. А., Синицын В. А. Масштабный эффект при взрывном разрушении замкнутых стальных сосудов // ФГВ.— 1972.— № 1.— С. 124—129.

г. Арзамас-16

Поступила 18/XI 1992 г.

УДК 539.3

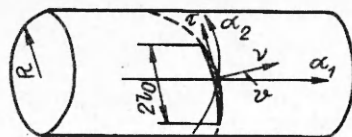
А. В. Абраменко, В. Н. Максименко

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ПРОЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДЕФЕКТАМИ ТИПА СКВОЗНЫХ РАЗРЕЗОВ

Композитные элементы конструкций оболочечного типа находят все более широкое применение в различных областях современной техники (криволинейные панели обшивки летательных аппаратов, сосуды давления и т. д.). Анализ опыта экспериментальных исследований и эксплуатации конструкций из полимерных композитных материалов (стеклопластики, углепластики, боропластики) показывает, что повреждения в таких конструкциях обусловлены не рабочими нагрузками, а случайными механическими воздействиями (удары при сборке и проведении регламентных работ, соударения с камнями и градинами и т. д.), а рост повреждений при спектре рабочих нагрузок чрезвычайно медленный [1, 2]. Таким образом, в отличие от металлических эксплуатационная живучесть полимерных композитных конструкций в первую очередь определяется их остаточной прочностью. Аналитические и экспериментальные исследования проблемы разрушения оболочек с дефектами типа трещин носят достаточно широкий и полный характер (см., например, обзор в [3]). Изучение этой проблемы для композитных материалов движется сравнительно медленно, что обусловлено недостатком сведений о влиянии на трещиностойкость таких характеристик, как относительные размеры оболочки и трещины, порядок укладки и вид анизотропии монослоев.

В настоящей работе на базе метода граничных интегральных уравнений и деформационного критерия прочности слоистых полимерных композитов предложен замкнутый алгоритм расчета напряженного состояния вблизи дефекта и оценки остаточной прочности для оболочки с системой сквозных разрезов. Приведены численные результаты, иллюстрирующие влияние различных геометрических и физических параметров задачи на величины относительных коэффициентов интенсивности напряжений и критической нагрузки.

1. Рассмотрим бесконечную цилиндрическую оболочку радиуса R , постоянной толщины $2h$, составленную из однородных анизотропных слоев, симметрично расположенных относительно срединной поверхности. Оболочка имеет систему сквозных разрезов длины $2l_0$ ($l_0 \gg h$), направленных под углом ϑ к координатной линии α_2 локальных ортогональных безразмерных координат α_1, α_2 , отнесенных к радиусу оболочки R и связанных с ее срединной поверхностью (рис. 1). Параметрические уравнения разрезов имеют вид



Р и с. 1

$\alpha_1 = \xi_1(\lambda) = -n_2\lambda, \quad \alpha_2 = \xi_2(\lambda) = n_1\lambda, \quad |\lambda| \leq \leq \lambda_0 = R^{-1}l_0 + mT \quad (m = 0, 1, \dots, \mu - 1)$, где $v = (n_1, n_2) = (\cos \vartheta, \sin \vartheta)$ — вектор единичной нормали к левому берегу разреза; $T = 2\pi/\mu$ — период; μ — количество разрезов.

Исходя из соотношений теории пологих анизотропных оболочек с собственными на-