

УДК 519.6

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ 09Г2С ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И ВНУТРЕННЕМ ДАВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ "ЛОГОС ПРОЧНОСТЬ"

А. А. Рябов, В. Н. Речкин, В. А. Барышев, Р. А. Барабанов
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской области)

Приводятся результаты расчетно-экспериментальных исследований особенностей квазистатического деформирования и разрушения трубчатых образцов стали 09Г2С при осевом растяжении и действии внутреннего давления. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния образцов при больших деформациях вплоть до разрушения выполняется с использованием программного модуля "Логос Прочность" на основе полученных в экспериментах истинных диаграмм деформирования материала. Исследуются предельные уровни интенсивности пластических деформаций материала образцов в условиях изменяющегося вида напряженного состояния, описываемого различными параметрами.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, упругопластическое деформирование, разрушение, критерии прочности, метод конечных элементов, пакет программ "Логос", программный модуль "Логос Прочность".

Введение

В последние десятилетия наблюдаются значительный рост производительности вычислительной техники и успешное развитие численных методов и программных средств для решения проблем прочности. Современные комплексы программ, разработанные на основе методов конечных объемов и конечных элементов (КЭ), позволяют эффективно описывать состояние подвижных (газовых и жидких) сред и деформируемых тел, детально учитывая свойства материалов и конструктивные особенности реальных изделий. Однако при этом по-прежнему весьма актуальной остается проблема разработки и применения достоверных расчетно-экспериментальных критериев прочности материалов в задачах обоснования надежности и безопасности разрабатываемых изделий.

Разработка современных летательных аппаратов, энергетического оборудования, сложных машиностроительных конструкций и научно-исследовательских установок проходит в условиях возрастающих требований к надежности и безопасности их функционирования. В авиастроении, атомной энергетике и ряде других областей науки и техники разрабатываемые изделия могут испытывать повышенные нагрузки в возможных экстремальных ситуациях. Гражданские самолеты должны обеспечивать безопасность пассажиров как при нормальной эксплуатации, так и в возможных аварийных условиях [1, 2]. Газотурбинные двигатели пассажирских самолетов должны удовлетворять требованиям безопасности при столкновении с птицами и при обрыве лопатки [2, 3]. Требования надежности и безопасности необходимо строго соблюдать при проведении сложных физических экспериментов [4, 5]. Защитные контейнеры для наземной транспортировки и хранения отработанного ядерного топлива АЭС должны выдерживать интенсивные нагрузки при падении с высоты 9 м на недеформируемую поверхность [6, 7].

Об актуальности разработки надежных критериев прочности свидетельствует множество численных и экспериментальных исследований проблем деформирования и разрушения материалов [8–15], в которых используются силовые, деформационные, энергетические и другие критерии прочности, учитывающие вид напряженного состояния в наиболее напряженных зонах.

При формулировании критериев прочности в [8, 10] вид трехосного напряженного состояния характеризуется коэффициентом Лоде–Надаи

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1,$$

где $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ — главные напряжения. Одноосному растяжению соответствует $\mu_\sigma = -1$, сжатие — $\mu_\sigma = 1$, чистому сдвигу — $\mu_\sigma = 0$.

Для описания трехосности нагружения в работах [13, 16, 17] используется параметр жесткости напряженного состояния — отношение первого инварианта тензора напряжений к интенсивности напряжений:

$$\xi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}}. \quad (1)$$

Параметр ξ может меняться в диапазоне $-\infty < \xi < +\infty$, при этом $\xi = 1$ соответствует одноосному растяжению, $\xi = -1$ — одноосному сжатию, $\xi = 0$ — сдвигу.

В качестве параметра вида напряженного состояния, влияющего на критическую энергию пластической деформации, в работе [15] рассматривается отношение первого инварианта тензора напряжений к длине вектора главных напряжений:

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}}.$$

Параметр Π может меняться от трехосного сжатия до трехосного растяжения в диапазоне $-\sqrt{3} \leq \Pi \leq \sqrt{3}$. При одноосном растяжении $\Pi = 1$, сжатии — $\Pi = -1$, при чистом сдвиге $\Pi = 0$.

Использование деформационного критерия прочности в виде критической интенсивности пластических деформаций [18] в условиях сложного напряженного состояния предполагает применение параметра трехосности TF (Triaxiality Factor), который так же, как ξ (1), задается отношением первого инварианта тензора напряжений к интенсивности напряжений [19]. Отметим, что приведенные параметры вида напряженного состояния не однозначны. Так, например, параметрам вида $\xi = TF = 2$ и $\Pi = 1,4$ может соответствовать как двухосное растяжение: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$; $\sigma_3 = 0$, так и трехосное растяжение с одной доминирующей компонентой: $\sigma_1 = \sigma$; $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma/2$.

Известно, что вязкому разрушению пластичных конструкционных материалов предшествует локализация больших деформаций [20], которая начинает развиваться после потери устойчивости процесса деформирования, условием которой по критерию Консидера является равенство [9]

$$\frac{1}{\sigma} \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i} = M,$$

где $M = 1$ при одноосном растяжении и $M = \sqrt{3}$ при внутреннем давлении; σ_i , ε_i — интенсивности истинных напряжений и деформаций соответственно; σ — максимальное истинное нормальное напряжение в образце.

Для исследования зависимости критериев прочности от вида напряженного состояния при вязком разрушении материалов широко используются эксперименты по растяжению, кручению и нагружению внутренним давлением трубчатых образцов [8, 9, 11, 21–23]. В работе [9] рассматривается идеально пластичная трубка под действием растяжения и внутреннего давления. Проводится анализ напряженного состояния с учетом и без учета сжимаемости материала на основе соотношений теории течения и теории малых упругопластических деформаций. В работе [11] определены условия потери устойчивости процесса пластического деформирования, подтвержденные экспериментальными данными при комбинированном нагружении трубчатых образцов давлением и растяжением. В статье [23] предлагается метод исследования уравнений состояния и критериев разрушения пластичных

материалов при сложном нагружении на основе испытаний трубчатых образцов при растяжении, кручении и внутреннем давлении.

Целями настоящей работы являются численный анализ с использованием программного модуля "Логос Прочность" [24], входящего в состав многофункционального пакета программ "Логос" [25], напряженно-деформированного состояния испытанных трубчатых образцов из стали 09Г2С при больших деформациях при растяжении и внутреннем давлении вплоть до разрушения, сравнение расчетных данных с результатами испытаний образцов и выявление особенностей процессов деформирования для определения деформационных критериев прочности.

Определяющие соотношения

Фундаментальное уравнение механики деформируемого твердого тела, выражающее закон сохранения энергии, записывается в форме вариационного принципа Даламбера—Лагранжа [26]

$$\iiint_V (\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij}) dV = \iiint_V \mathbf{F} \cdot \delta \mathbf{u} dV + \iint_S \mathbf{p} \cdot \delta \mathbf{u} dS, \quad i, j = \overline{1, 3}, \quad (2)$$

где σ_{ij} — тензор напряжений; $\delta \varepsilon_{ij}$ — тензор бесконечно малых приращений деформаций; $\delta \mathbf{u}$ — вектор бесконечно малых приращений перемещений; $\mathbf{F} = (F_1, F_2, F_3)$, $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)$ — векторы объемных сил и поверхностной нагрузки; V , S — соответственно объем и поверхность деформируемого тела. Кинематические соотношения, связывающие бесконечно малые приращения деформаций и перемещений, строятся на основе модифицированного тензора приращений деформаций Грина [26]. Система определяющих соотношений замыкается уравнениями состояния, которые можно представить в приращениях компонент тензоров напряжений и деформаций [27, 28]. Уравнения состояния при необходимости дополняются условием текучести, которое в пространстве девiatorов напряжений принимается в форме поверхности Мизеса. Приращения пластических составляющих деформаций определяются ассоциированным законом течения [27, 29]:

$$\begin{aligned} d\varepsilon_{ij}^p &= \lambda S_{ij}; & S_{ij} S_{ij} &= \frac{2}{3} C_p^2(\chi); & S_{ij} &= \sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0, & \sigma_0 &= \frac{1}{3} \sigma_{ii}; \\ d\rho_{ij} &= 2G d\varepsilon_{ij}^p, & G &= G(J), & J &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{\rho_{ij} \rho_{ij}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь λ — параметр, вычисляемый по методике, подробно изложенной в [29], из условия прохождения текущей поверхности текучести через конец вектора, определяемого компонентами девiatorа напряжений S_{ij} ; $C_p(\chi)$ — радиус поверхности текучести; χ — параметр Одквиста; δ_{ij} — символ Кронекера; ρ_{ij} — тензор микронапряжений, определяющий координаты центра поверхности текучести; G — модуль анизотропного упрочнения.

Система соотношений (2), (3) полностью определяет деформационное поведение материалов конструкции на шаге нагружения. Для ее решения можно использовать различные численные методы. В данной работе используется наиболее распространенный в прочностном анализе метод КЭ, реализованный в программном модуле "Логос Прочность".

Постановка задачи и метод решения

Рассматривается статическое деформирование трубчатых образцов из стали 09Г2С в условиях одноосного растяжения и действия внутреннего давления. Форма и основные размеры одного из образцов показаны на рис. 1.

На рис. 2 показаны условные, построенные без учета изменения площади поперечного сечения образца, и истинные диаграммы деформирования, рассчитанные по методикам Давиденкова—Спирidonовой [21] и Баженова [22] на основе результатов испытаний серии образцов на растяжение.

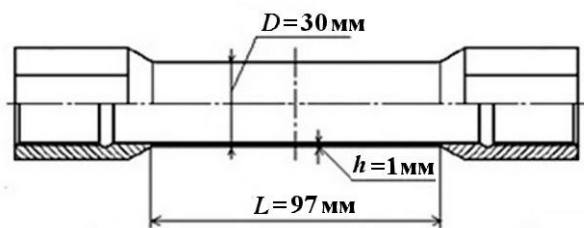


Рис. 1. Форма и основные размеры образца из стали 09Г2С

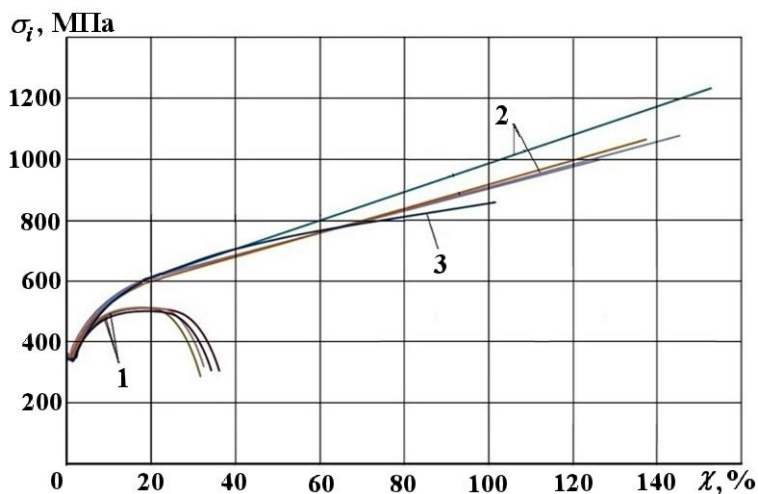


Рис. 2. Диаграммы деформирования образцов из стали 09Г2С при растяжении: 1 — условные диаграммы; 2 — расчет по методике Давиденкова—Спиридоновой; 3 — расчет по методике Баженова

Видно, что истинные диаграммы, рассчитанные по двум методикам, близки и значительно отличаются от условных диаграмм деформирования. Приведенные диаграммы деформирования используются для численного моделирования в программном модуле "Логос Прочность" нелинейного квазистатического деформирования указанного образца, размеры которого приведены на рис. 1, при растяжении и действии внутреннего давления.

Для решения задачи разработан ряд конечно-элементных моделей 1/8 части образца, состоящих из разного количества 8-узловых КЭ сплошной среды, с краевыми условиями симметрии. Используется модель упругопластического материала с изотропным упрочнением. На основе серии численных расчетов с использованием подготовленных конечно-элементных моделей с различным количеством КЭ проведены исследования сходимости результатов решений задачи для случая одноосного растяжения образца, которые показали, что приемлемой по точности получаемых решений является конечно-элементная сетка с размером КЭ $\sim 0,15$ мм (рис. 3).

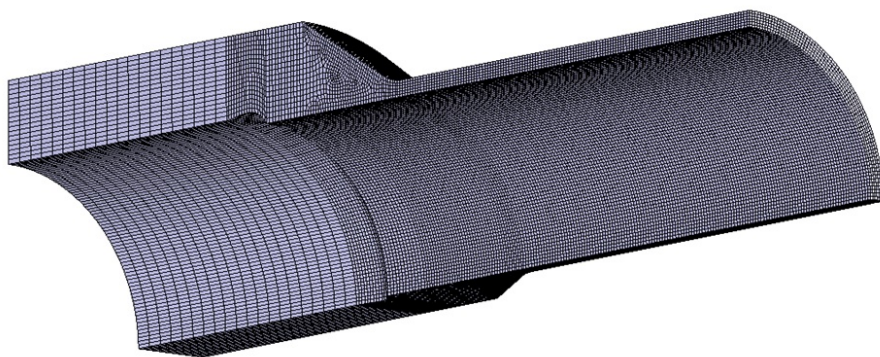


Рис. 3. Конечно-элементная модель 1/8 части образца с размером КЭ $\sim 0,15$ мм

Результаты исследований и их анализ

Результаты численных и экспериментальных исследований больших деформаций образца вплоть до разрушения при растяжении и внутреннем давлении приведены на рис. 4—9. Анализ результатов численных расчетов показывает, что траектории деформации в пространстве Ильюшина [27] имеют малую кривизну, подтверждая применимость соотношений теории течения.

На рис. 4, а показаны кривые расчетного и экспериментального удлинения образца, размеры которого приведены на рис. 1, и расчетного изменения его диаметра в зоне локализации деформаций — образования шейки при растяжении. Видно, что расчетные и экспериментальные значения осевых перемещений качественно и количественно близки, что подтверждает достоверность численного моделирования больших деформаций образца вплоть до разрушения. На рис. 4, б показаны характер разрушения образца и длина зоны сужения $L_{ш}$, превышающая половину длины рабочей части. Минимальный диаметр образца, замеренный после разрушения в шейке, отмечен крестиком на рис. 4, а. Пластические деформации появляются в образце при осевой силе $N \sim 43$ кН и приводят к заметному росту осевых перемещений. Радиальные перемещения начинают ощутимо возрастать только после потери устойчивости процесса деформирования и локализации деформаций при достижении максимальной осевой силы $N_{max} \sim 67$ кН.

На рис. 5 показано распределение интенсивности пластических деформаций в образце к моменту разрушения, полученное по программному модулю "Логос Прочность". Видно, что разрушению образца предшествует значительное уменьшение диаметра и толщины стенки в зоне разрыва, а также интенсивная локализация деформаций в этой зоне.

Кривые изменений параметров Π , ξ и μ_σ приведены на рис. 6 (кривые 1–3). Кружками отмечены значения параметров, соответствующие началу образования пластических деформаций в образце.

Видно, что при растяжении образца одноосное напряженное состояние сохраняется не только в области упругих деформаций, но и при упругопластическом деформировании до момента потери устойчивости процесса деформирования и начала образования шейки при $N_{max} \sim 67$ кН. С локализацией деформаций и значительным ростом интенсивности пластических деформаций в зоне шейки в условиях снижения нагрузки изменение значений параметров Π и ξ свидетельствует о раз-

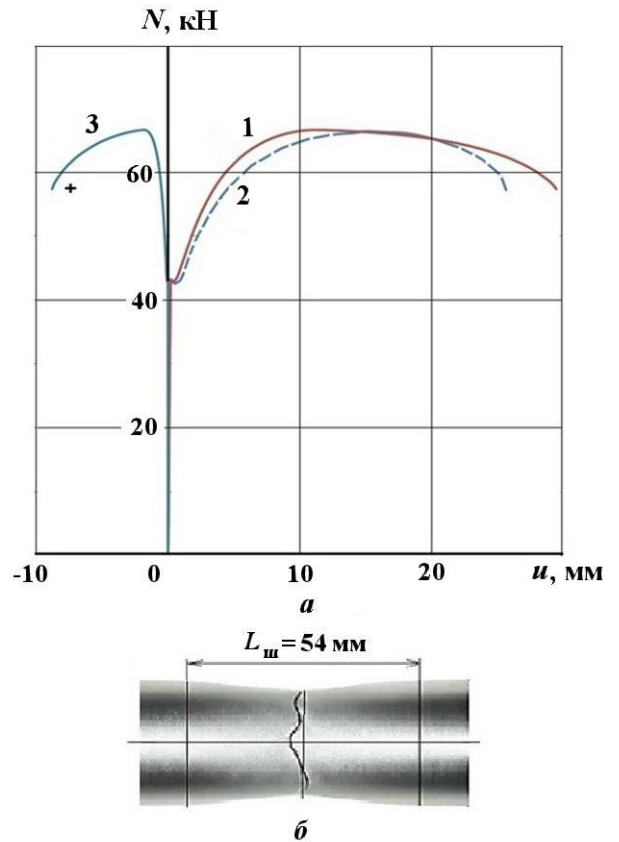


Рис. 4. Осевые (1, 2) и радиальные (3) перемещения (а) и характер разрушения (б) в образце при растяжении: —, — — расчет; - - - — эксперимент

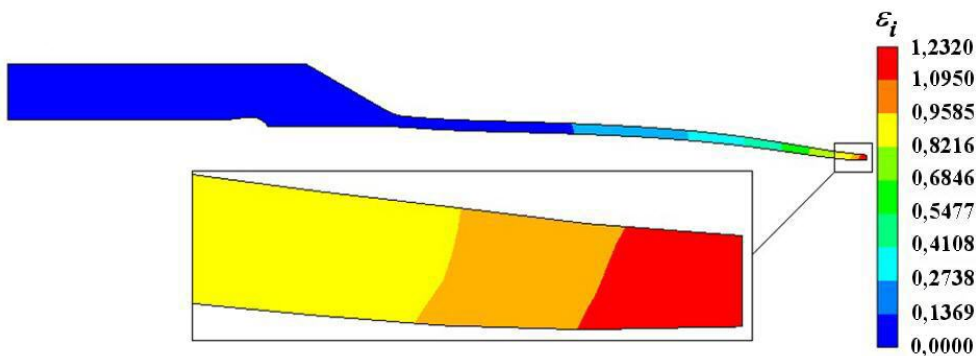


Рис. 5. Распределение интенсивности пластических деформаций (в отн. ед.) в образце к моменту разрушения при растяжении

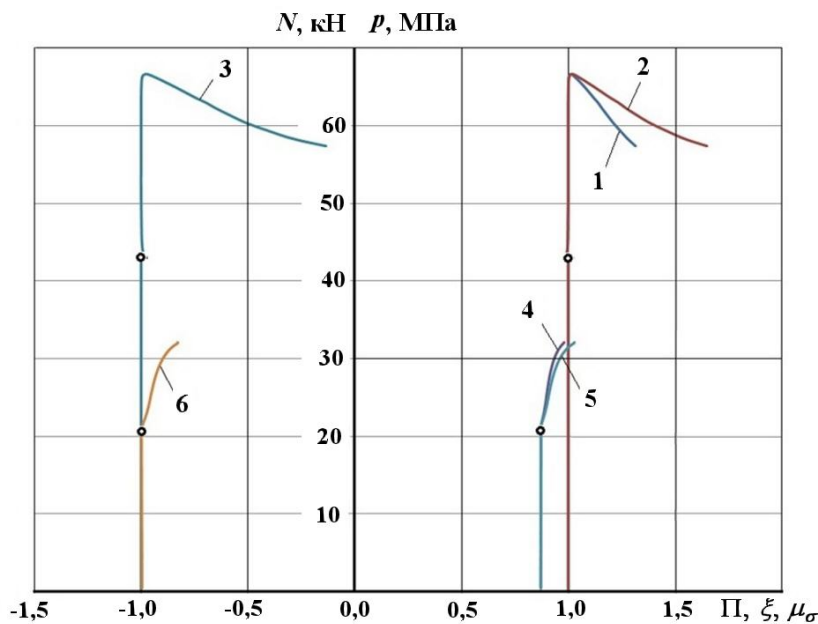


Рис. 6. Изменения параметров вида напряженного состояния в рабочей части образца: 1 — $\Pi(N)$; 2 — $\xi(N)$; 3 — $\mu_\sigma(N)$; 4 — $\Pi(p)$; 5 — $\xi(p)$; 6 — $\mu_\sigma(p)$

витии двухосного напряженного состояния, а параметр Лоде—Надаи стремится к $\mu_\sigma \sim 0,1$, указывая на приближение к условиям чистого сдвига. Разрыв образца происходит при уровне интенсивности пластических деформаций $\varepsilon_{i \max} \sim 120\%$, что превышает значение относительного остаточного удлинения материала почти в четыре раза ($\varepsilon_{i \max} \sim 4\delta$). Безразмерные главные напряжения в наиболее напряженной зоне образца, отнесенные к пределу текучести материала, перед разрушением образца составляют: $\sigma_1 = 3,7$; $\sigma_2 = 1,6$; $\sigma_3 = 0$.

На рис. 7, а приведены расчетная и экспериментальные кривые изменения диаметра другого аналогичного образца в зоне локализации деформаций при действии внутреннего давления.

В расчетной модели образца давление задается только на внутренней цилиндрической поверхности. При испытаниях внутренняя полость образца герметизируется торцевыми доньшками. При этом растягивающая сила, возникающая от действия давления на доньшки, компенсируется сжимающей нагрузкой испытательной установки таким образом, чтобы продольные перемещения свободного конца были близки к нулю. Из рис. 7, а видно, что, несмотря на некоторые отличия перемещений в начальной стадии нагружения, обусловленные некоторой разностью постановок опыта и расчета, при увеличении давления расчетные и экспериментальные значения перемещений сближаются, что подтверждает достоверность моделирования деформирования образца при больших деформациях. В испытаниях при действии внутреннего давления разрушению образца также предшествует заметная локализация деформаций, которая видна из рис. 7, б по изгибу теней в зоне трещины. Длина трещины L_T составляет почти четверть рабочей части образца.

Распределение интенсивности пластических деформаций в сечении образца к моменту начала разрушения показано на рис. 8. Виден характерный изгиб стенки вдоль всей длины рабочей части образца, наблюдаемый и на рис. 7, б, и на рис. 8. Максимальные расчетные значения интенсивности пластических деформаций в среднем сечении рабочей части образца перед разрушением достигают $\varepsilon_{i \max} \sim 12\%$. Этот уровень интенсивности пластических деформаций на порядок ниже, чем при растяжении, и более чем в два раза меньше значения остаточного относительного удлинения материала ($\varepsilon_{i \max} \sim 0,4\delta$).

Изменение расчетных значений параметров вида напряженного состояния в наиболее нагруженной точке с ростом давления внутри образца показано на рис. 6 (кривые 4–6). До момента появления пластических деформаций, обозначенного кружком, судя по параметру Лоде—Надаи $\mu_\sigma = -1,0$, напряженное состояние в рабочей части образца — одноосное растяжение, значения параметров $\Pi =$

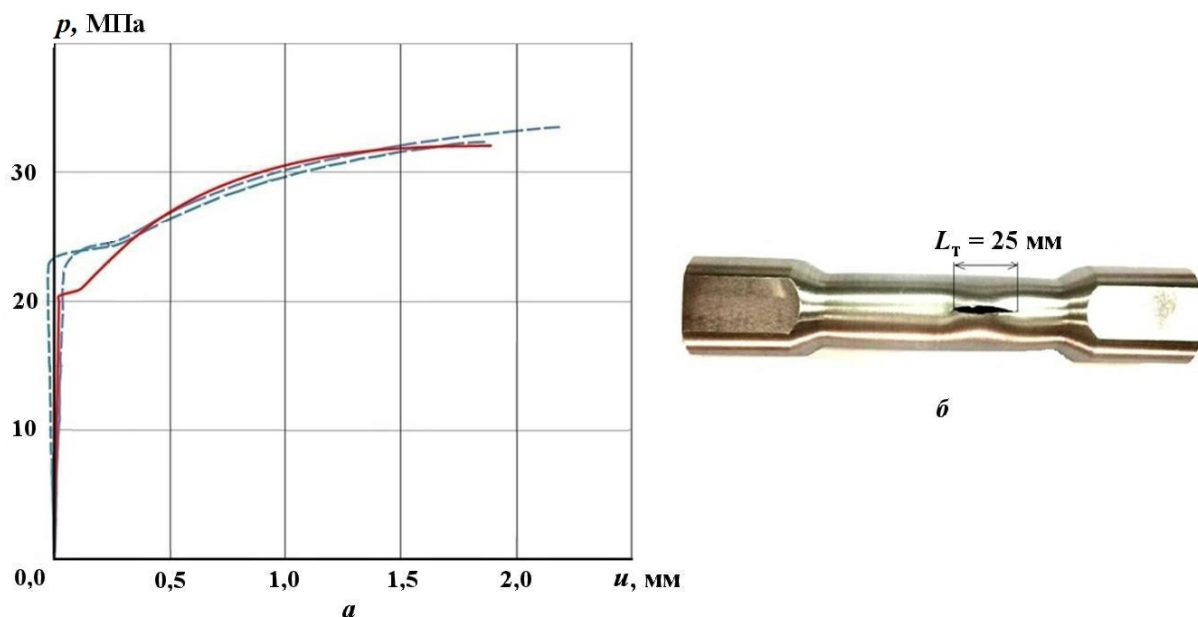


Рис. 7. Радиальные перемещения (а) и характер разрушения (б) в рабочей части образца при действии внутреннего давления: — — расчет для одного образца; - - - эксперименты для двух образцов

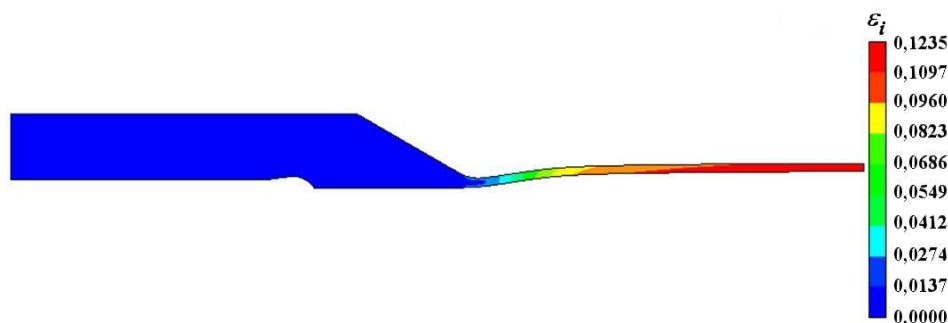


Рис. 8. Распределение интенсивности пластических деформаций (в отн. ед.) в образце к моменту начала разрушения от внутреннего давления

$= 0,87$ и $\xi = 0,87$ также указывают на близость к одноосному растяжению. С появлением в образце пластических деформаций значения параметров начинают плавно меняться и к моменту начала разрушения составляют: $\mu_\sigma = -0,83$; $\Pi = 0,98$; $\xi = 1,03$. Безразмерные главные напряжения перед разрывом имеют значения: $\sigma_1 = 1,75$; $\sigma_2 = 0,06$; $\sigma_3 = -0,09$. Разрушение материала происходит в условиях, весьма близких к одноосному растяжению материала трубчатого образца кольцевыми напряжениями σ_1 .

Таким образом, при нагружении трубчатых образцов осевой силой и внутренним давлением вид напряженного состояния и максимальные уровни интенсивности пластических деформаций в наиболее нагруженной зоне к моменту начала разрушения существенно различаются. Заметим, однако, что значительный рост пластических деформаций при растяжении трубчатого образца начинается только с момента потери устойчивости процесса деформирования и проходит при заметном снижении силы. Потеря устойчивости процесса деформирования происходит в условиях одноосного напряженного состояния при уровне пластических деформаций $\epsilon_{i \max} \sim 13\%$, что весьма близко к уровню пластических деформаций материала образца к моменту начала разрушения от внутреннего давления. После потери устойчивости процесса деформирования образец уже не оказывает сопротивления приложенной нагрузке.

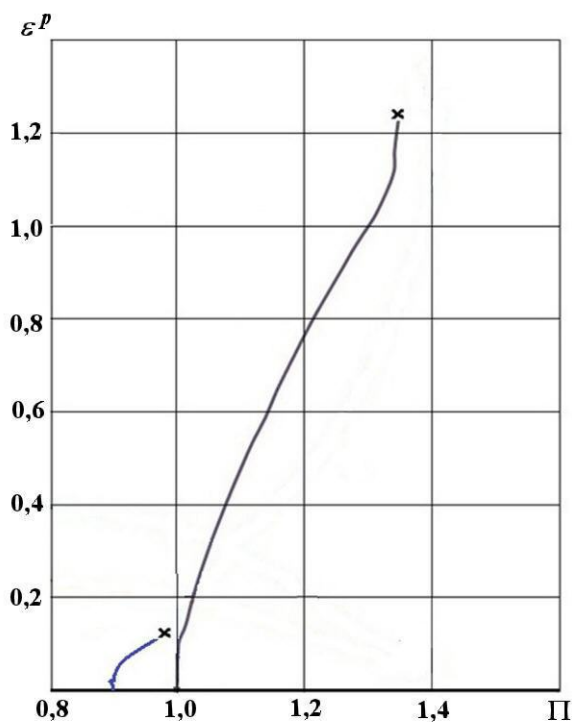


Рис. 9. Зависимость интенсивности истинной пластической деформации в наиболее напряженных зонах образцов от параметра вида напряженного состояния: — — растяжение образца; — — нагружение образца внутренним давлением

В заключение на рис. 9 приводятся расчетные зависимости изменения максимального уровня интенсивности истинной пластической деформации от значений параметра вида напряженного состояния Π для рассмотренных вариантов нагружения трубчатых образцов. Крестиками отмечены уровни истинных деформаций, при которых произошло разрушение образцов.

Анализ расчетных и экспериментальных данных показывает, что при рассмотренных вариантах нагружения образцов до потери устойчивости процесса деформирования параметр Π сохраняет постоянное значение, а затем по причине потери устойчивости процесса начинает плавно меняться, что свидетельствует об изменении вида напряженного состояния в наиболее напряженной зоне. Истинные пластические деформации наиболее напряженной зоны трубчатого образца в случае действия внутреннего давления возрастают в условиях, близких к одноосному растяжению до и после потери устойчивости процесса деформирования, при незначительном изменении параметра Π в закритической области (после потери устойчивости процесса).

Выводы

На основе анализа полученных результатов расчетно-экспериментальных исследований особенностей квазистатического деформирования и разрушения трубчатых образцов из стали 09Г2С при осевом растяжении и действии внутреннего давления сделаны следующие выводы:

1. При одноосном растяжении трубчатого образца до потери устойчивости процесса пластического деформирования параметры вида напряженного состояния в его рабочей части остаются постоянными. Потеря устойчивости процесса (несущей способности материала) происходит при интенсивности истинной пластической деформации $\varepsilon_{i \max} \sim 13\%$, при этом значения параметров вида напряженного состояния составляют $\Pi = 1$; $\xi = 1$; $\mu_{\sigma} = -1$ и указывают на одноосное напряженное состояние. В закритической области при постепенном исчерпании несущей способности материала значения параметров Π , ξ , μ_{σ} существенно изменяются. Максимальная интенсивность истинной пластической деформации в локальной наиболее напряженной зоне образца перед разрушением возрастает до $\varepsilon_{i \max} \sim 120\%$, параметры Π , ξ принимают значения 1,32 и 1,65 соответственно, что свидетельствует о переходе к двухосному напряженному состоянию, а параметр $\mu_{\sigma} = -0,1$ указывает на близость к чистому сдвигу. Главные безразмерные напряжения в наиболее напряженной зоне образца перед разрушением составляют: $\sigma_1 = 3,7$; $\sigma_2 = 1,6$; $\sigma_3 = 0$.
2. При действии внутреннего давления потеря устойчивости процесса деформирования образца происходит при $\varepsilon_{i \max} \sim 10\%$ в условиях одноосного напряженного состояния ($\Pi = 1$; $\xi = 1$; $\mu_{\sigma} = -1$). Далее при незначительном увеличении интенсивности истинных пластических деформаций до $\varepsilon_{i \max} \sim 12\%$ происходит разрыв образца по образующей. Значения параметров вида напряженного состояния для наиболее напряженной зоны образца перед разрушением

изменяются незначительно и составляют $\mu_\sigma = -0,83$; $\Pi = 0,98$; $\xi = 1,03$, что свидетельствует о сохранении напряженного состояния, близкого к одноосному. Главные безразмерные напряжения в наиболее напряженной зоне образца перед разрушением составляют: $\sigma_1 = 1,75$; $\sigma_2 = 0,06$; $\sigma_3 = -0,09$.

3. Исчерпание несущей способности трубчатого образца при осевом растяжении и внутреннем давлении реализуется при близких уровнях интенсивности истинных пластических деформаций $\varepsilon_{i \max} \sim 10 \div 13\%$ в условиях одноосного напряженного состояния наиболее напряженной зоны рабочей части. В закритической области деформация образца значительно различается. Под действием внутреннего давления разрушение происходит вскоре после потери устойчивости процесса деформирования, при $\varepsilon_{i \max} \sim 12\%$, а при растяжении образец разрывается при $\varepsilon_{i \max} \sim 120\%$; при этом в закритической области с ростом силы параметры вида напряженного состояния в наиболее напряженной зоне заметно меняются.
4. Результаты проведенных расчетных исследований указывают на необходимость учета истории деформирования наиболее напряженных зон материала при выборе и определении критерия разрушения. В практической работе при обосновании прочности сложных изделий в экстремальных условиях нагружения необходимо на основе численного моделирования выявлять траектории деформирования в наиболее нагруженных точках, затем проводить испытания на образцах в условиях их нагружения по этим траекториям вплоть до разрушения и на основе анализа полученных результатов определять критерий разрушения.
5. Программный модуль "Логос Прочность" версии 2022 года позволяет с хорошей точностью моделировать процессы нелинейного квазистатического деформирования материалов вплоть до разрушения.

Список литературы

1. *Погосян М. А., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Маслов Е. Е., Стрелец Д. Ю., Литвинов М. С., Корнев А. В.* Компьютерный анализ безопасности пассажирского самолета Superjet-100 при аварийной посадке // *Авиационная промышленность*. 2017. № 2. С. 4–10.
Pogosyan M. A., Ryabov A. A., Romanov V. I., Kukanov S. S., Maslov E. E., Strelets D. Yu., Litvinov M. S., Kornev A. V. Kompyuternyy analiz bezopasnosti passazhirskogo samolyeta Superjet-100 pri aviarynoy posadke // *Aviatsionnaya promyshlennost*. 2017. № 2. S. 4–10.
2. *El-Sayed.* Bird strike in aviation: statistics, analysis and management. Wiley, UK, 2019.
3. *Ryabov A. A., Kukanov S. S., Rechkin V. N., Shmotin Y. N., Gabov D. V.* Numerical analysis of aircraft engine fan blade out // 42nd Joint Propulsion Conference. AIAA. Paper 2066-4620. Sacramento CA, USA. July 9–12, 2006.
4. Разрушение разномасштабных объектов при взрыве: Монография / Под ред. А. Г. Иванова. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2001.
Razrushenie raznomasshtabnykh obyektoy pri vzryve: Monografiya / Pod red. A. G. Ivanova. Sarov: RFYaTs-VNIIEF. 2001.
5. *Bazhenov V. G., Ryabov A. A., Romanov V. I., Maslov E. E.* Dynamic deformation and failure criterion of cylindrical shells subjected to explosive loading // *Multiscale Solid Mechanics. Advanced Structured Materials*. 2021. Vol. 141. P. 47–55. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54928-2_5.
6. *Il'kaev R. I., Soloviyov V. P., Ryabov A. A., Romanov V. I., Kukanov S. S., Maslov E. E., Tsiberev K. V., Kozhaev L. N.* Numerical stress analysis of spent nuclear fuel transport package in normal and accident conditions // PATRAM-2016. 18th Int. Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive Materials. Kobe, Japan. September 18–23, 2016.
7. *Соловьёв В. П., Рябов А. А., Романов В. И., Куканов С. С., Маслов Е. Е.* Обоснование безопасности крупногабаритного контейнера 109Т для перевозки ОЯТ // *Атомная энергия*. 2019. Т. 127. Вып. 3. С. 163–166.

- Solovyev V. P., Ryabov A. A., Romanov V. I., Kukanov S. S., Maslov E. E.* Obosnovanie bezopasnosti krupnogabaritnogo konteynera 109T dlya perevozki OYaT // *Atomnaya energiya*. 2019. T. 127. Вып 3. S. 163–166.
8. *Качанов Л. М.* Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974.
Kachanov L. M. Osnovy mekhaniki razrusheniya. M.: Nauka, 1974.
 9. *Малинин Н. Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
Malinin N. N. Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti. M.: Mashinostroenie, 1975.
 10. *Писаренко Г. С., Лебедев А. А.* Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка, 1976.
Pisarenko G. S., Lebedev A. A. Deformirovanie i prochnost materialov pri slozhnom napryazhyennom sostoyanii. Kiev: Naukova dumka, 1976.
 11. *Дегтярëв В. П.* Деформации и разрушение в высоконапряженных конструкциях. М.: Машиностроение, 1987.
Degtyaryev V. P. Deformatsii i razrushenie v vysokonapryazhyennykh konstruktsiyakh. M.: Mashinostroenie, 1987.
 12. *Глушак Б. Л., Новиков С. А., Рузанов А. И., Садьрин А. И.* Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках. Н. Новгород: ННГУ, 1992.
Glushak B. L., Novikov S. A., Ruzanov A. I., Sadyrin A. I. Razrushenie deformiruemykh sred pri impulsnykh nagruzkakh. N. Novgorod: NNGU, 1992.
 13. *Волков И. А., Коротких Ю. Г.* Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008.
Volkov I. A., Korotkikh Yu. G. Uravneniya sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami. M.: Fizmatlit, 2008.
 14. *Бондарь В. С., Даншин В. В.* Пластичность. Непропорциональные нагружения. М.: МГТУ "МАМИ", 2008.
Bondar V. S., Danshin V. V. Plastichnost. Neproportsionalnye nagruzheniya. M.: MGTU "MAMI", 2008.
 15. *Капустин С. А., Чурилов Ю. А., Горохов В. А.* Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ. Н. Новгород: ННГУ, 2015.
Kapustin S. A., Churilov Yu. A., Gorokhov V. A. Modelirovanie nelineynogo deformirovaniya i razrusheniya konstruktsiy v usloviyakh mnogofaktornykh vozdeystviy na osnove MKE. N. Novgorod: NNGU, 2015.
 16. *Ломакин Е. В., Мельников А. М.* Пластическое плоское напряженное состояние тел, свойства которых зависят от вида напряженного состояния // Вычислительная механика сплошных сред. 2009. Т. 2, № 2. С. 48–64.
Lomakin E. V., Melnikov A. M. Plasticheskoe ploskoe napryazhyennoe sostoyanie tel, svoystva kotorykh zavisyat ot napryazhyennogo sostoyaniya // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. 2009. T. 2, № 2. S. 48–64.
 17. *Herzig N., Abdel-Malek S., Meyara L. W., Cimpoeu S. J.* Modeling of ductile failure in high strength steel // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 197. P. 285–293.
DOI: 10.1016/j.proeng.2017.08.106.
 18. *Bjorkman G. S., Ammerman D., Snow S., Morton D. K.* Strain-based acceptance criteria for spent fuel storage and transportation containers // *Proc. Joint Conf. PATRAM-2010*. London, 2010. P. 83–86.
 19. *Davis E. S., Connelly F. M.* Stress distribution and plastic deformation in rotating cylinders of hardening material // *ASME. J. Applied Mechanics*. March 1959.
 20. *Hancock J. W., Brown D. K.* On the role of strain and stress in ductile failure // *J. Mech. Phys. Solids*. 1983. Vol. 31, No 1. P. 1–24.

21. *Давиденков Н. Н., Спиридонова Н. И.* Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца // Заводская лаборатория. 1945. Т. XI, № 6. С. 583–593.
Davidenkov N. N., Spiridonova N. I. Analiz napryazhyennogo sostoyaniya v sheyke rastyanutogo obraztsa // Zavodskaya laboratoriya. 1945. T. XI, № 6. S. 583–593.
22. *Баженов В. Г.* Математическое моделирование и методы идентификации деформационных и прочностных характеристик материалов // Физическая мезомеханика. 2007. Т. 10, № 5. С. 91–105.
Vazhenov V. G. Matematicheskoe modelirovanie i metody identifikatsii deformatsionnykh i prochnostnykh charakteristik materialov // Fizicheskaya mezomekhanika. 2007. T. 10, № 5. S. 91–105.
23. *Васин Р. А., Ильюшин А. А., Моссаковский П. А.* Исследование определяющих соотношений и критериев разрушения на сплошных и толстостенных трубчатых цилиндрических образцах // Известия АН. Механика твердого тела. 1994. № 2. С. 177–184.
Vasin R. A., Ilyushin A. A., Mossakovskiy P. A. Issledovanie opredelyayushchikh sootnosheniy i kriteriev razrusheniya na sploshnykh i tolstostennykh trubchatykh tsilindricheskikh obraztsakh // Izvestiya AN. Mekhanika tvyerdogo tela. 1994. № 2. S. 177–184.
24. *Александрова О. Л., Барабанов Р. А., Дьянов Д. Ю., Косарим С. С., Наумов А. О., Спиридонов В. Ф., Филимонкин Е. А., Циберева К. В.* Пакет программ ЛОГОС. Конечно-элементная методика расчета задач статической прочности конструкций с учетом эффектов физической и геометрической нелинейности // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 3. С. 3–17.
Aleksandrova O.L., Barabanov R. A., Dyanov D. Yu., Kosarim S. S., Naumov A. O., Spiridonov V. F., Filimonkin E. A., Tsibereva K. V. Paket program LOGOS. Konecho-elementnaya metodika raschyeta zadach staticheskoy prochnosti konstruktsiy s uchetom effektov fizicheskoy i geometricheskoy nelineynosti // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov. 2014. Vyp. 3. S. 3–17.
25. *Дерюгин Ю. Н., Козелков А. С., Спиридонов В. Ф., Циберева К. В., Шагалиев Р. М.* Многофункциональный высокопараллельный пакет программ ЛОГОС для решения задач теплопереноса и прочности // Сб. тез. докл. Санкт-Петербургского научного форума "Наука и общество". Санкт-Петербург, 2012.
Deryugin Yu. N., Kozelkov A. S., Spiridonov V. F., Tsibereva K. V., Shagaliev R. M. Mnogofunktsionalnuu vysokoparallelnuyu paket program LOGOS dlya resheniya zadach teplomassoperenosa i prochnosti // Sb. tez. dokl. Sankt-Peterburgskogo nauchnogo foruma "Nauka i obshchestvo". Sankt-Peterburg, 2012.
26. *Васидзу К.* Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987.
Vasidzu K. Variatsionnye metody v teorii uprugosti i plastichnosti. M.: Mir, 1987.
27. *Ильюшин А. А.* Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
Ilyushin A. A. Plastichnost. Osnovy obshchey matematicheskoy teorii. M.: Izd-vo AN SSSR, 1963.
28. *Столяров Н. Н., Рябов А. А.* Уругопластическое выпучивание прямоугольных пластин // Прикладная теория упругости. Саратов: СПИ, 1983. С. 27–36.
Stolyarov N. N., Ryabov A. A. Urugoplasticheskoe vypuchivanie pryamougolnykh plastin // Prikladnaya teoriya uprugosti. Saratov: SPI, 1983. S. 27–36.
29. *Казаков Д. А., Капустин С. А., Коротких Ю. Г.* Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций: Монография. Н. Новгород: ННГУ, 1999.
Kazakov D. A., Kapustin S. A., Korotkikh Yu. G. Modelirovanie protsessov deformirovaniya i razrusheniya materialov i konstruktsiy: Monografiya N. Novgorod: NNGU, 1999.