

УДК 539.3

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАСТЯЖЕНИЯ-КРУЧЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 09Г2С ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ ДО РАЗРУШЕНИЯ

В.Г. Баженов¹, Е.В. Нагорных¹, Д.Л. Осетров², А.А. Рябов³

¹*Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, 603950, Россия*

²*Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева, г. Казань, 420111, Россия*

³*ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров, 607188, Россия*

Аннотация

Изучение особенностей механического поведения материалов при сложном напряженном состоянии и больших деформациях, предшествующих разрушению, является актуальной задачей. В настоящей работе проведен экспериментальный и численный анализ особенностей процессов упругопластического деформирования сплошных цилиндрических образцов при пропорциональном кинематическом нагружении кручением-растяжением до разрушения. Установлено, что при совместном действии кручения-растяжения образуется шейка, радиус поперечного сечения которой больше, а длина меньше, чем при чистом растяжении, разрушение происходит по винтовой поверхности с максимальными сдвиговыми деформациями в зависимости от соотношения растяжения и кручения.

Полная система уравнений, описывающих обобщенные осесимметричные задачи кручения, записана в цилиндрической системе координат. Кинематические соотношения сформулированы в скоростях и построены в метрике текущего состояния, что позволяет учитывать большие формоизменения. Уравнение движения сплошной среды следует из уравнения баланса виртуальных мощностей. Поскольку рассматриваются процессы активного нагружения, близкие к пропорциональным, то упругопластические свойства материалов описываются теорией течения с нелинейным изотропным упрочнением. Для решения системы уравнений, дополненной кинематическими граничными и начальными условиями, использован метод конечных элементов в сочетании с явной схемой интегрирования типа «крест».

Для изучения влияния вида напряженного состояния на деформационное упрочнение стали 09Г2С построены истинные диаграммы деформирования при растяжении и кручении до разрушения, выявлено их существенное различие при деформациях более 15%. С учетом зависимости диаграммы деформирования от вида напряженного состояния получено хорошее совпадение результатов численного моделирования процессов деформирования с экспериментальными данными. Игнорирование вида напряженного состояния приводит к существенным различиям в определении критических значений усилий и моментов образования шеек и закритического поведения стержней.

Ключевые слова: упругопластичность, большие деформации, диаграмма деформирования, комбинированное нагружение, растяжение-кручение, численное моделирование, эксперимент

Ведение

Элементы конструкций в штатных условиях эксплуатации и в аварийных ситуациях могут быть подвержены многокомпонентному силовому воздействию, что вызывает необходимость изучения особенностей механического поведения материалов при сложном напряженном состоянии и больших деформациях, предшествующих разрушению [1]. В современной теории пластичности полагается, что закон пластического упрочнения (зависимость интенсивности напряжений от интенсивности пластических деформаций, или диаграмма деформирования) при нагружениях, близких к простым, является универсальным, то есть не зависит от вида напряженного состояния [2]. Эта гипотеза «единой кривой» была выдвинута П. Людвигом [3] и в дальнейшем подвергалась многочисленным экспериментальным проверкам при простом и сложном напряженном состоянии, реализуемом при растяжении – сжатии – кручении – внутреннем или внешнем давлении металлических трубчатых образцов. Опыты Р. Шмидта [2], в которых медные и стальные трубчатые образцы нагружались пропорционально растяжением и кручением до деформаций 20%, подтвердили универсальность закона упрочнения. В опытах Е. Дэвиса [3] медные и стальные (марка не указана) трубки подвергались нагружению при различных соотношениях растягивающей силы и внутреннего давления до разрушения. Выявлено, что для меди при деформациях до 15% диаграмма деформирования не зависит от вида напряженного состояния, при деформациях от 15% до 30% наблюдается разброс экспериментальных данных, не превышающий 15%. Для стальных образцов диаграмма деформирования не зависит от вида напряженного состояния при деформациях до 110%. Результаты аналогичных опытов А.М. Жукова [3], проведенных для трубчатых образцов из сталей ЭИ415, 30ХН3А и хромоникелевой стали, свидетельствуют о независимости диаграммы деформирования от типа напряженного состояния при деформациях до 15%. В работе [4] тонкостенные трубы из стали X18H10T подвергались пропорциональному нагружению наружным, внутренним давлениями и осевой силой в различных соотношениях. Наибольшее расхождение кривых «интенсивность напряжений – интенсивность деформаций» по напряжениям составило 7%, максимальные деформации достигали 50%. В работе [5] проведено экспериментальное исследование процесса деформирования полых цилиндрических образцов из алюминиевого сплава Д16Т при различных видах комбинированного нагружения растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением. Отмечена зависимость диаграммы деформирования данного сплава от вида напряженного состояния даже при малых деформациях до 5%. В работе [6] также отмечается существенное отличие зависимостей второго инварианта тензора напряжений от второго инварианта тензора деформаций при растяжении, кручении и растяжении с кручением цилиндрических образцов из алюминиевого сплава Д16Т при деформациях до 15%.

В исследовании [7] не выявлено зависимости диаграммы деформирования стали 09Г2С от вида нагружения (растяжение, сжатие, сдвиг) при деформациях до 15%. В работе [8] истинные диаграммы деформирования стали 12Х18Н10Т, построенные на основе экспериментов на кручение и растяжение сплошных цилиндрических образцов, практически совпадают при деформациях до 80%, что свидетельствует о независимости диаграммы «интенсивность напряжений – параметр Одквиста» от вида напряженного состояния при больших деформациях для данного материала. В статье [9] построена диаграмма деформирования титанового сплава ВТ9 по данным испытаний на растяжение с одновременным кручением в условиях сверхпластичности. Интенсивность напряжений определяли двумя способами: через осевое усилие и через крутящий момент. Зависимости интенсивности напряжений от степени деформаций, полученные таким образом, практически совпали и в рамках

погрешности эксперимента соответствовали диаграмме растяжения. Таким образом, универсальность закона упрочнения при умеренных пластических деформациях (до 15%) имеет экспериментальное подтверждение не для всех материалов. При больших деформациях зависимость упрочнения материала от вида напряженного состояния экспериментально изучена недостаточно. Для описания деформирования материалов, характеристики пластичности которых чувствительны к виду напряженного состояния, наряду с параметром Надаи – Лоде по напряжениям применяются параметр трехосности напряжений и другие функции [10, 11].

Настоящая работа посвящена экспериментальному и численному анализу особенностей процессов упругопластического деформирования сплошных цилиндрических образцов при пропорциональном кинематическом нагружении кручением-растяжением до разрушения, изучению влияния вида напряженного состояния на деформационное упрочнение стали 09Г2С при растяжении и кручении при больших деформациях, а также оценке влияния комбинированного нагружения на потерю устойчивости пластического деформирования в виде шейки.

1. Методика численного решения

Полная система механических уравнений, описывающих решение обобщенных двумерных задач кручения, записывается в цилиндрической системе координат r, β, z (Oz – ось вращения). Кинематические соотношения формулируются в скоростях и строятся в метрике текущего состояния, что позволяет учитывать большие формоизменения. Компоненты тензоров скоростей деформаций и скоростей вращения с учетом равенства $\dot{u}_\beta = r\dot{\theta}$ ($\dot{\theta}$ – угол закручивания по окружной координате β) имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{e}_{rr} &= \dot{u}_{r,r}, & \dot{e}_{\beta\beta} &= \dot{u}_r r^{-1}, & \dot{e}_{zz} &= \dot{u}_{z,z}, \\ \dot{e}_{rz} &= \frac{1}{2}(\dot{u}_{r,z} + \dot{u}_{z,r}), & \dot{e}_{r\beta} &= \frac{1}{2}r\dot{\theta}_r, & \dot{e}_{\beta z} &= \frac{1}{2}r\dot{\theta}_z, \\ \dot{\omega}_{rz} &= \frac{1}{2}(\dot{u}_{z,r} - \dot{u}_{r,z}), & \dot{\omega}_{r\beta} &= -\frac{1}{2}(r\dot{\theta}_r + 2\dot{\theta}), & \dot{\omega}_{\beta z} &= \frac{1}{2}r\dot{\theta}_z. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение движения сплошной среды следует из уравнения баланса виртуальных мощностей:

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} (\sigma_{rr}\delta\dot{e}_{rr} + \sigma_{\beta\beta}\delta\dot{e}_{\beta\beta} + \sigma_{zz}\delta\dot{e}_{zz} + 2\sigma_{rz}\delta\dot{e}_{rz} + 2\sigma_{r\beta}\delta\dot{e}_{r\beta} + 2\sigma_{\beta z}\delta\dot{e}_{\beta z})r \, d\Omega + \\ & + \iint_{\Omega} (\rho w_r\delta\dot{u}_r + \rho w_\beta\delta\dot{u}_\beta + \rho w_z\delta\dot{u}_z)r \, d\Omega - \\ & - \int_{G_p} (p_r\delta\dot{u}_r + p_\beta\delta\dot{u}_\beta + p_z\delta\dot{u}_z)r \, dG - \int_{G_q} (q_r\delta\dot{u}_r + q_\beta\delta\dot{u}_\beta + q_z\delta\dot{u}_z)r \, dG = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь σ_{ij} и \dot{e}_{ij} – компоненты тензоров напряжений Коши и скоростей деформаций (симметричной части градиента скорости перемещений), \dot{u}_α и w_α – компоненты векторов скорости перемещения и ускорения перемещения; p_α и q_α – компоненты поверхностных и контактных нагрузок ($i, j, \alpha = r, \beta, z$), ρ – плотность, Ω – область, занимаемая меридиональным сечением сплошной среды, G_p – часть поверхности, на которой задается априори известная поверхностная нагрузка, G_q – часть поверхности, на которой задаются контактные давления, определяемые в процессе решения. В силу осевой симметрии все искомые функции зависят от радиальной и осевой координат и не зависят от окружной.

Для устранения особенности на оси вращения и повышения точности численного решения уравнений движения вводятся новые функции $\dot{v}_r = r\dot{u}_r$, $\dot{v}_z = r\dot{u}_z$, $\dot{\theta} = r^{-1}\dot{u}_\beta$. Тогда общее уравнение динамики (2) в силу соотношений (1) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} (\sigma_{rr} \frac{\partial \delta \dot{v}_r}{\partial r} + \sigma_{rz} \frac{\partial \delta \dot{v}_r}{\partial z} - \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\beta\beta}}{r} \delta \dot{v}_r + \rho w_r \delta \dot{u}_r) d\Omega - \int_G (p_r + q_r) \delta \dot{v}_r dG = 0, \\ \iint_{\Omega} (\sigma_{r\beta} \frac{\partial \delta \dot{\theta}}{\partial r} + \sigma_{\beta z} \frac{\partial \delta \dot{\theta}}{\partial z} + \rho w_\beta \delta \dot{\theta}) r^2 d\Omega - \int_G (p_\beta + q_\beta) r^2 \delta \dot{\theta} dG = 0, \\ \iint_{\Omega} (\sigma_{zz} \frac{\partial \delta \dot{v}_z}{\partial z} + \sigma_{rz} \frac{\partial \delta \dot{v}_z}{\partial r} - \frac{\sigma_{rz}}{r} \delta \dot{v}_z + \rho w_z \delta \dot{u}_z) d\Omega - \int_G (p_z + q_z) \delta \dot{v}_z dG = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

При моделировании процессов активного нагружения, близких к пропорциональным, процессы деформирования металлов при больших деформациях достаточно хорошо описываются теорией течения с нелинейным изотропным упрочнением [8, 12]. Связь между компонентами девиатора скоростей напряжений $\dot{\sigma}'_{ij} = \dot{\sigma}_{ij} + P\dot{\delta}_{ij}$ и упругими составляющими компонент девиатора скоростей деформаций $(\dot{\epsilon}'_{ij})' = \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{\epsilon}_{ij}/3 - \dot{\epsilon}^p_{ij}$ осуществляется на основе обобщенного закона Гука в метрике текущего состояния

$$\begin{aligned} D_J \sigma'_{ij} = 2G(\dot{\epsilon}'_{ij})', \quad D_J \sigma'_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} - \dot{\omega}_{ik} \sigma'_{kj} - \dot{\omega}_{jk} \sigma'_{ik}, \\ \dot{P} = -K\dot{\epsilon}^e, \quad \dot{P} = -\dot{\sigma}_{ii}/3, \quad \dot{\epsilon}^e = \dot{\epsilon}^e_{ii}, \quad \dot{\epsilon}^p_{ii} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь K , G – модули объемного сжатия и сдвига, P – давление, D_J – производная Яуманна, описывающая поворот частицы среды как жесткого целого, δ_{ij} – символ Кронекера. В силу осевой симметрии в выражениях для компонент тензоров скоростей вращения $\dot{\omega}_{ij}$ (последние три равенства в (1)) полный угол поворота относительно оси Oz не учитывается.

Скорости пластических деформаций определяются ассоциированным законом течения

$$\dot{\epsilon}^p_{ij} = \dot{\lambda} \sigma'_{ij}, \quad \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = 2/3 \sigma_i^2(\varkappa), \quad (5)$$

где $\sigma_i = \sigma_i(\varkappa)$ – зависимость интенсивности напряжений от параметра Одкависта при монотонном нагружении (истинная диаграмма деформирования материала).

Для численного моделирования процессов деформирования образцов при пропорциональном комбинированном нагружении растяжением-кручением реализована зависимость диаграммы деформирования от вида напряженного состояния. Уточненная диаграмма деформирования является линейной комбинацией диаграмм растяжения и кручения, коэффициенты которой зависят от параметра вида напряженного состояния Π , определенного по формуле [13]

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

или от параметра Надаи – Лоде по напряжениям

$$\chi_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1.$$

Параметр вида напряженного состояния изменяется в пределах $-\sqrt{3} \leq \Pi \leq \sqrt{3}$, при этом величина $\Pi = -\sqrt{3}$ соответствует всестороннему сжатию, $\Pi = -1$ –

одноосному сжатию, $\Pi = 0$ – чистому сдвигу, $\Pi = 1$ – одноосному растяжению, $\Pi = \sqrt{3}$ – всестороннему растяжению [13]. Истинная диаграмма деформирования задается соотношением

$$\sigma_i = \begin{cases} |\Pi|\sigma_i^1(\varkappa) + (1 + |\Pi|\sigma_i^2(\varkappa)), & |\Pi| \leq 1, \\ \sigma_i^1(\varkappa), & 1 \leq |\Pi| \leq \sqrt{3}. \end{cases}$$

Здесь $\sigma_i^1 = \sigma_i^1(\varkappa)$ – диаграмма деформирования при одноосном растяжении, $\sigma_i^2 = \sigma_i^2(\varkappa)$ – диаграмма деформирования при кручении.

Параметр Надаи – Лоде χ_σ по напряжениям изменяется на отрезке $[-1, 1]$, при этом значения $\chi_\sigma \leq -1$ соответствуют одноосному растяжению, $\chi_\sigma \leq 0$ – чистому сдвигу, $\chi_\sigma \leq 1$ – одноосному сжатию. Истинная диаграмма деформирования принимается в виде $\sigma_i = |\chi_\sigma|\sigma_i^1(\varkappa) + (1 + |\chi_\sigma|\sigma_i^2(\varkappa))$.

Система уравнений (1), (3)–(5), дополненная кинематическими граничными и начальными условиями, решается методом конечных элементов в сочетании с явной схемой интегрирования типа «крест» [8].

2. Монотонное пропорциональное нагружение кручением и растяжением

Проводилось численное и экспериментальное исследование процессов деформирования осесимметричных образцов переменной толщины с цилиндрической рабочей частью при монотонном кинематическом нагружении растяжением-кручением с учетом больших деформаций и неоднородности НДС. Эксперименты выполнялись на модернизированном испытательном комплексе Z100 ZWICK-ROEL, позволяющем проводить испытания на растяжение и кручение цилиндрических образцов при одновременном синхронизированном по времени задании параметров: скорость изменения продольного перемещения – скорость изменения угла закручивания. Предельные значения параметров испытательной техники по силе ± 100 кН, по крутящему моменту ± 1000 Нм. Измерительная аппаратура комплекса включает в себя лазерный экстензометр Laser Xtens, позволяющий одновременно измерять как продольные деформации (база измерения 20–100 мм) с разрешающей способностью ≤ 1 мкм, так и деформации при кручении, класс точности 1 по ISO 9513, датчик силы 0–250 кН, класс точности 1 по ISO 7500–1. Программное обеспечение testXpert настраивается для проведения испытаний при растяжении, кручении или комбинированном нагружении и предоставляет возможность получения необходимых экспериментальных значений параметров исследуемого процесса (осевое перемещение, угол закручивания, осевая сила, крутящий момент) в параметрическом или других видах.

В расчетах темп нагружения задавали таким образом, чтобы вклад инерционных сил был пренебрежимо мал. Геометрические параметры образца (рис. 1): радиус и длина рабочей части $R_1 = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $L_1/R_1 = 10.333$, размеры переходной части $R_2/R_1 = 1$, $L_2/R_1 = 1$, радиус и длина цилиндрического захвата $R_3/R_1 = 2$, $L_3/R_1 = 12.166$, общая длина образца $L = 0.22$ м. Образец изготовлен из стали 09Г2С, упругие характеристики материала: модуль объемного сжатия $K = 1.667 \cdot 10^5$ МПа, модуль сдвига $G = 7.692 \cdot 10^4$ МПа, плотность $\rho = 7.85 \cdot 10^3$ кг/м³.

Для оценки взаимного влияния двух видов нагружения на процесс деформирования вводятся следующие параметры:

$$q = \frac{R_1\theta}{\sqrt{3}u_z}, \quad \bar{e}_i = \sqrt{\bar{e}_{zz}^2 + \frac{4}{3}\bar{e}_{\beta z}^2} = \frac{u_z}{L_0}\sqrt{1+q^2}, \quad \bar{e}_{zz} = \frac{u_z}{L_0}, \quad \bar{e}_{\beta z} = \frac{1}{2}\frac{R_1\theta}{L_0}, \quad L_0 = \frac{L_1}{2},$$

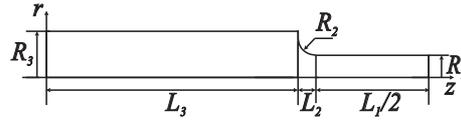


Рис. 1. Конструктивная схема образца

$$F = 2\pi \int_0^R \sigma_{zz} r dr, \quad M = 2\pi \int_0^R \sigma_{\beta z} r^2 dr, \quad A = \int_0^{u_z} F du_z + \int_0^\theta M d\theta.$$

Кинематический параметр q характеризует соотношение кручения и растяжения, \bar{e}_i , \bar{e}_{zz} и $\bar{e}_{\beta z}$ – соответственно условные интенсивность деформаций, осевая и сдвиговая деформации на поверхности рабочей части образца, отнесенные к начальной длине L_1 и радиусу R_1 рабочей части образца, u_z и θ – осевое перемещение и угол закручивания между торцами соответственно; F – осевая сила, M – крутящий момент, A – суммарная работа осевой силы и крутящего момента. При чистом кручении $q = \infty$, $\bar{e}_i = 2\bar{e}_{\beta z}/\sqrt{3}$, при одноосном растяжении $q = 0$, $\bar{e}_i = \bar{e}_{zz}$, при комбинированном нагружении $0 < q < \infty$.

При $q = \text{const}$ выражение для работы A можно преобразовать к виду (W – обобщенная сила)

$$A = \int_0^{\bar{e}_i} \frac{L_0}{\sqrt{1+q^2}} \left(F + \frac{\sqrt{3}q}{R_1} M \right) d\bar{e}_i = \int_0^{\bar{e}_i} W d\bar{e}_i.$$

В качестве критерия потери устойчивости пластического деформирования с образованием шейки принимается условие $dW/d\bar{e}_i = 0$, характеризующее момент достижения обобщенной силой W максимальных значений. Данное условие является обобщением известного условия А. Консидера, полученного при растяжении стержней [14]. В эксперименте реализованы следующие программы нагружения: одноосное растяжение ($q = 0$), чистое кручение ($q = \infty$), пропорциональное нагружение растяжением-кручением при $q \approx 2.84, 5.69, 11.4$. На рис. 2 линиями с маркерами отмечены экспериментальные зависимости осевой силы от условной осевой деформации $F = F(\bar{e}_{zz})$ и крутящего момента от условной сдвиговой деформации $M = M(\bar{e}_{\beta z})$. Соответствующие значения параметра q приведены рядом с кривыми. Точками на кривых отмечены моменты потери устойчивости пластического деформирования с образованием шейки.

На основе проведенных экспериментов строились истинные диаграммы деформирования для стали 09Г2С. На рис. 3 сплошной линией отмечена истинная диаграмма деформирования, построенная по экспериментальным данным по монотонному кручению ($q = \infty$) до разрушения образца по методике [8], пунктирной – по одноосному растяжению ($q = 0$) с учетом образования шейки по методике [15]. На экспериментальной диаграмме растяжения стали 09Г2С имеется площадка текучести, предел текучести при растяжении $\sigma_T = 340$ МПа. Материальные кривые, построенные для этих двух видов нагружения, при значениях параметра Одквиста $0.02 < \varkappa < 0.1$ практически совпадают, что согласуется с известными данными [3]. При величине параметра Одквиста $\varkappa = 0.2$ (момент начала образования шейки при одноосном растяжении) расхождение между кривыми составляет 4.5%, при $\varkappa = 1 - 17\%$.

Проведено численное моделирование процессов деформирования образцов с учетом зависимости диаграммы деформирования от вида напряженного состояния. На рис. 2 сплошными линиями отмечены результаты расчетов, в которых

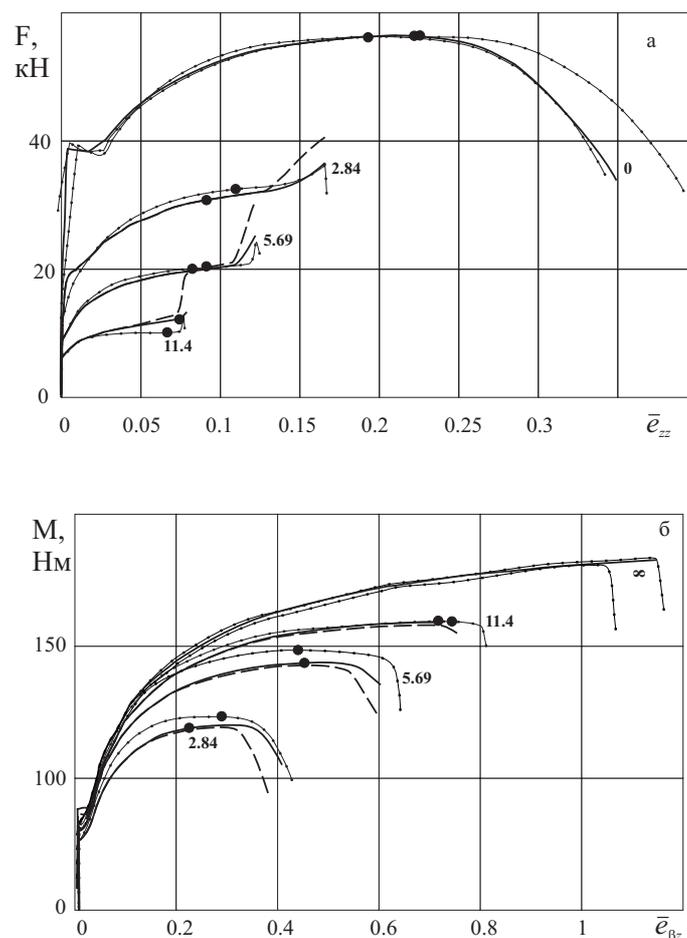


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные зависимости осевой силы от условной осевой деформации (а) и крутящего момента от условной сдвиговой деформации на поверхности рабочей части образца (б)

вид напряженного состояния описывается параметром напряженного состояния Π , пунктирными – параметром Надаи – Лоде по напряжениям. При комбинированном пропорциональном нагружении расчетные кривые, учитывающие вид НДС, располагаются между кривыми, полученными с диаграммами деформирования растяжения или кручения. Закритическое поведение образцов после локализации деформаций с образованием шейки лучше описывается моделью, учитывающей вид напряженного состояния с помощью параметра Π .

При комбинированном нагружении растяжением-кручением ($0 < q < \infty$) в экспериментах и расчетах после момента потери устойчивости в процессе образования шейки наблюдается более интенсивный рост осевой силы \hat{F} вплоть до разрушения, при этом величина крутящего момента \hat{M} уменьшается из-за уменьшения радиуса поперечного сечения шейки, что согласуется с результатами исследований для стали 12X18H10T [8, 12]. Процессы деформирования до момента потери устойчивости близки к лучевым, а закритическое поведение характеризуется траекториями малой кривизны. При комбинированном нагружении ($0 < q < \infty$) до момента потери устойчивости во всем объеме образца вид напряженного состояния медленно изменяется в сторону растяжения, так как образец утончается.

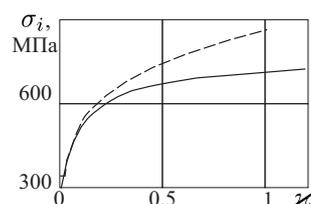


Рис. 3. Истинные диаграммы деформирования стали 09Г2С при растяжении (пунктирная линия) и кручении (сплошная линия)



Рис. 4. Сплошные цилиндрические образцы после испытаний растяжением (1), кручением (2) и растяжением-кручением (3)

Изменение вида напряженного состояния в шейке в сторону деформации чистого сдвига после момента потери устойчивости происходит наиболее интенсивно при чистом растяжении ($q = 0$). До момента падения осевой силы во всем объеме образца происходит процесс активного нагружения. В месте образования шейки активный процесс продолжается до разрушения. В экспериментах шейка образуется в средней части образца, ее положение зависит от многих случайных факторов. При расчетах образование шейки происходит на плоскости симметрии. На рис. 4 приведена фотография образцов из стали 09Г2С после разрушения при растяжении (цифра 1), кручении (2) и комбинированном нагружении с $q \approx 5.69$ (3). Видно, что при больших деформациях кручения не происходит образования шейки, как при растяжении, а разрушение происходит в плоскости, перпендикулярной оси стержня, от сдвиговых деформаций. При совместном действии кручения-растяжения образуется шейка, радиус поперечного сечения которой больше, а длина меньше, чем при чистом растяжении. При комбинированном нагружении разрушение происходит по винтовой поверхности с максимальными сдвиговыми деформациями в зависимости от соотношения деформаций растяжения и кручения.

В аналогичных экспериментах для стали 12Х18Н10Т [8, 12] при чистом растяжении в шейке в месте разрушения образца образуется симметричная чашка, так как сначала происходит хрупкое разрушение отрывом поперек оси вращения, а затем сдвиговое с выходом на поверхность образца под углом 45° . В случае стали 09Г2С происходит только сдвиговое разрушение в плоскости, под углом 45° к оси стержня. При этом поверхность разрушения не гладкая, как в случае стали 12Х18Н10Т, а шероховатая, как при хрупком отрыве. Причиной различий в характере разрушения является крупнозернистая структура стали 09Г2С.

При комбинированном нагружении (3) разрушение происходит по винтовой поверхности, но менее выраженной (с меньшим шагом), чем в случае аналогичного нагружения стали 12Х18Н10Т. При чистом кручении вид поверхности разрушения (2) аналогичен для обеих сталей.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-308-50006).

Литература

1. *Дегтярев В.П.* Деформации и разрушение в высоконапряженных конструкциях. – М.: Машиностроение, 1987. – 105 с.
2. *Зубчанинов В.Г.* Механика сплошных деформируемых сред. – Тверь: ТГТУ, ЧуДо, 2000. – 703 с.
3. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
4. *Кузькин А.Ю., Латышев Д.В., Петров М.Ю., Попов В.А.* Механические свойства материалов при статическом нагружении трубчатых образцов в условиях плоского и объемного напряженных состояний // Науч.-техн. Ведомости С.-Петерб. гос. политехн. ун-та. – 2014. – № 2. – С. 162–173.
5. *Шлянников В.Н., Иштыряков И.С., Яруллин Р.Р.* Характеристики деформирования сплава Д16Т при совместном нагружении растяжением, сжатием, кручением и внутренним давлением // Труды Академэнерго. – 2014. – № 3. – С. 78–90.
6. *Ипатов А.В., Вильдеман В.Э.* Построение материальных функций неупругого деформирования алюминиевого сплава Д16Т по результатам испытаний на растяжение и кручение // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2012. – № 4. – С. 106–114. – doi: 10.14498/vsgtu1106.
7. *Баландин Вл.Вас., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Изумнов Л.А., Константинов А.Ю., Ломунов А.К.* Высокоскоростное деформирование и разрушение стали 09Г2С // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2014. – № 6. – С. 78–85.
8. *Баженов В.Г., Зефирова С.В., Крамарев Л.Н., Павленкова Е.В.* Моделирование процессов деформирования и локализации пластических деформаций при кручении-растяжении тел вращения // Прикл. матем. и механика. – 2008. – Т. 72. Вып. 2. – С. 342–350.
9. *Бердин В.К., Кашаев Р.М.* Об определении напряженного состояния при растяжении с кручением сплошного цилиндра // Проблемы прочности. – 2001. – № 1. – С. 28–37.
10. *Ломакин Е.В., Мельников А.М.* Задачи плоского напряженного состояния тел с вырезами, пластические свойства которых зависят от вида напряженного состояния // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 1. – С. 77–89.
11. *Шлянников В.Н., Иштыряков И.С.* Параметры функций вида напряженного состояния для алюминиевого сплава Д16Т // Труды Академэнерго. – 2014. – № 4. – С. 51–63.
12. *Баженов В.Г., Жегалов Д.В., Павленкова Е.В.* Численное и экспериментальное исследование упругопластических процессов растяжения-кручения осесимметричных тел при больших деформациях // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 2011. – № 2. – С. 57–66.
13. *Капустин С.А., Горохов В.А., Виленский О.Ю., Кайдалов В.Б., Руин А.А.* Соотношения модели поврежденной среды для материалов, подвергающихся терморационным воздействиям // Проблемы прочности и пластичности. – 2012. – № 74. – С. 5–15.

14. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
15. Баженов В.Г., Кибец А.И., Лаптев П.В., Осетров С.Л. Экспериментально-теоретическое исследование предельных состояний упругопластических стержней различного поперечного сечения при растяжении // Проблемы механики. Сб. статей к 90-летию со дня рожд. А.И. Ишлинского / Под ред. Д.М. Климова и др. – М.: Физматлит, 2003. – С. 116–123.

Поступила в редакцию
22.02.18

Баженов Валентин Георгиевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
пр-т Гагарина, д. 23, корп. 6, г. Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: bazhenov@mech.unn.ru

Нагорных Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского
пр-т Гагарина, д. 23, корп. 6, г. Нижний Новгород, 603950, Россия
E-mail: pavlyonkova@mech.unn.ru

Осетров Дмитрий Львович, инженер

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ
ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: osetrovdmity@mail.ru

Рябов Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, начальник отделения

ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2018, vol. 160, no. 3, pp. 495–507

**Numerical and Experimental Analysis
of Tension-Torsion Processes in Cylindrical Samples Made
of 09G2S Steel under Large Deformations before Destruction**

V.G. Bazhenov^{a}, E.V. Nagornyykh^{a**}, D.L. Osetrov^{b***}, A.A. Ryabov^c*

*^aResearch Institute of Mechanics, National Research Lobachevsky State University
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

^bTupolev Kazan National Research Technical University, Kazan, 420111 Russia

^cFGUP RFYAC-VNIIEF, Sarov, 607188 Russia

E-mail: **bazhenov@mech.unn.ru, **pavlyonkova@mech.unn.ru, ***osetrovdmity@mail.ru*

Received February 22, 2018

Abstract

The features of the mechanical behavior of materials under complex stress and large deformations preceding the failure is an urgent research problem. An experimental and numerical analysis of the features of the processes of elastoplastic deformation of solid cylindrical samples under proportional kinematic loading by torsion and tension up to failure has been carried out. With the joint torsion and tension action, a neck is formed. The radius of its cross section is greater and the length is smaller than in the case of pure tension. Destruction occurs along the helical surface with maximum shear deformations depending on the ratio of tension and torsion.

A complete system of equations describing generalized axisymmetric torsion problems has been written in a cylindrical coordinate system. The kinematic relations have been formulated in velocities and constructed in the metric of the current state, which allows one to take into account the large deformations. The equation of continuous medium motion follows from the equation of the balance of virtual capacities. Since active loading processes close to proportional have been considered, the elastoplastic properties of materials have been described by the theory of flow with nonlinear isotropic hardening. The system of equations supplemented by the kinematic boundary and initial conditions has been solved by the finite element method in combination with an explicit integration scheme of the “cross” type. To study the effect of the stress state on the strain hardening of 09G2C steel, true deformation diagrams for tension and torsion before fracture have been constructed. Their essential difference has been revealed for deformations greater than 15%. Taking into account the dependence of the deformation diagram on the form of the stress state, a good coincidence of the results of the numerical simulation of deformation processes with the experimental data has been obtained. Neglecting the form of the stressed state leads to significant differences in the determination of the critical values of the forces and moments of the formation of the necks and the supercritical behavior of the rods.

Keywords: elastoplasticity, large deformations, deformation diagram, combined loading, tension-torsion, numerical simulation, experiment

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 17-308-50006).

Figure Captions

Fig. 1. The structural layout of the sample.

Fig. 2. The experimental and calculated dependencies of the axial force on the nominal axial deformation (a) and that one of the torque on the nominal shear deformation on the surface of the working part of the sample (b).

Fig. 3. True diagrams showing the formation of 09G2S steel upon tension (dashed line) and torsion (solid line).

Fig. 4. Solid cylindrical samples after the tests by tension (1), torsion (2), and tension-torsion (3).

References

1. Degtyarev V.P. *Deformatsii i razrushenie v vysokonapryazhennykh konstruktivnykh* [Deformations and Fractures in Highly Stressed Structures]. Moscow, Mashinostroenie, 1987. 105 p. (In Russian)
2. Zubchaninov V.G. *Mekhanika sploshnykh deformiruemyykh sred* [Mechanics of Continuous Deformable Media]. Tver, TGTU, ChuDo, 2000. 703 p. (In Russian)
3. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied Theory of Plasticity and Creep]. Moscow, Mashinostroenie, 1975. 400 p. (In Russian)
4. Kuz'kin A.Yu., Latyshev D.V., Petrov M.Yu., Popov V.A. The mechanical properties of materials with the static load of tubular models under the conditions of flat and volumetric stressed states. *Nauchno-Tekh. Vedomosti S.-Peterb. Gos. Politekh. Univ.*, 2014, no. 2, pp. 162–173. (In Russian)
5. Shlyannikov V.N., Ishtyryakov I.S., Yarullin R.R. Deformation characteristics for D16T alloy under combined loading by tension, compression, torsion, and internal pressure. *Tr. Akademenergo*, 2014, no. 3, pp. 78–90. (In Russian)
6. Ipatova A.V., Vil'deman V.E. Construction of material functions of aluminum alloy D16T inelastic deformation based on the results of tests of tension and torsion. *Vestn. Samar. Gos. Tekh. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki*, 2012, no. 4, pp. 106–114. doi: 10.14498/vs-gtu1106. (In Russian)
7. Balandin V.I., Balandin V.I., Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K. High-rate deformation and fracture of steel 09G2S. *Mech. Solids*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 666–672. doi: 10.3103/S0025654414060089.
8. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kramarev L.N., Pavlyonkova E.V. Modelling of the deformation processes and the localization of plastic deformations in the torsion-tension of solids of revolution. *J. Appl. Math. Mech.*, 2008, vol. 72, no. 2, pp. 226–232. doi: 10.1016/j.jappmathmech.2008.04.001.
9. Berdin V.K., Kashaev R.M. On the determination of the stress state of a solid cylinder in tension with torsion. *Strength Mater.*, 2001, vol. 33, no. 1, pp. 15–21. doi: 10.1023/A:1010407109070.
10. Lomakin E.V., Mel'nikov A.M. Plane stress state problems for notched bodies whose plastic properties depend on the form of the stress state. *Mech. Solids*, 2011, vol. 46, no. 1, pp. 62–69. doi: 10.3103/S0025654411010092.
11. Shlyannikov V.N., Ishtyriakov I.S. Parameters of stress-strain state functions for D16T alloy. *Tr. Akademenergo*, 2014, no. 4, pp. 51–63. (In Russian)
12. Bazhenov V.G., Zhegalov D.V., Pavlyonkova E.V. Numerical and experimental study of elastoplastic tension-torsion processes in axisymmetric bodies under large deformations. *Mech. Solids*, 2011, vol. 46, no. 2, pp. 204–212. doi: 10.3103/S0025654411020087.

13. Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Vilenskii O.Yu., Kaidalov V.B., Ruin A.A. Relations of the damaged medium model for materials subjected to thermal-radiation loading. *Probl. Prochn. Plast.*, 2012, no. 74, pp. 5–15. (In Russian)
14. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastichnosti* [Fundamentals of the Theory of Plasticity]. Moscow, Nauka, 1969. 420 p. (In Russian)
15. Bazhenov V.G., Kibets A.I., Laptev P.V., Osetrov S.L. Experimental–theoretical investigation of the limiting states of elastoplastic rods of different cross section at tension. In: *Problemy mekhaniki. Sb. statei k 90-letiyu so dnya rozhdeniya A.I. Ishlinskogo* [Problems of Mechanics. Collection of Papers Dedicated to A.I. Ishlinskii's Birth Anniversary]. Klimov D.M. et al. (Eds.). Moscow, Fizmatlit, 2003, pp. 116–123. (In Russian)

Для цитирования: Баженов В.Г., Нагорных Е.В., Осетров Д.Л., Рябов А.А. Численно-экспериментальный анализ процессов растяжения-кручения цилиндрических образцов из стали 09Г2С при больших деформациях до разрушения // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 3. – С. 495–507.

For citation: Bazhenov V.G., Nagornykh E.V., Osetrov D.L., Ryabov A.A. Numerical and experimental analysis of tension-torsion processes in cylindrical samples made of 09G2S steel under large deformations before destruction. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 3, pp. 495–507. (In Russian)