

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ХОЛОДНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ КОКРОФТ-ЛЭТЭМ И ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА *DEFORM 3D*

Боткин А.В., доцент, канд. техн. наук,
Валиев Р.З., профессор, докт. физ.- мат. наук,
Степин П.С., аспирант.
Уфимский государственный авиационный технический университет,
г. Уфа, Россия

Предложены методика расчета поврежденности металла и экспериментально расчетная методика определения предельных значений показателя Кокрофт-Лэтэм для условий холодной пластической деформации и изменяющегося напряженного состояния.

Введение

При моделировании процессов холодной обработки металлов давлением с использованием различных современных программных комплексов большое значение имеют заложенные в них условия разрушения.

Как отмечает автор работы [1], программные комплексы, за редким исключением, удовлетворительны в части расчета разрушения металлов.

Программный комплекс *DEFORM 3D* [2] для прогнозирования разрушения металла при холодной пластической деформации предусматривает выбор модели разрушения по усмотрению исследователя. Согласно модели разрушения Кокрофт-Лэтэм [3] условие не разрушения материальной точки проверяют по неравенству:

$$\int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i < c_{\text{пр}}, \quad (1)$$

где σ_1 – главное положительное нормальное напряжение, σ_i – интенсивность напряжений,

ε_i – интенсивность деформаций, $c_{\text{пр}}$ – предельное значение показателя Кокрофт-Лэтэм, соответствующее моменту разрушения металла. Левая часть неравенства (1) C – энергетический показатель Кокрофт-Лэтэм относительной удельной работы элементарных растягивающих сил. Разрушение металла в соответствии с моделью разрушения Кокрофт-Лэтэм происходит при выполнении равенства: $C = c_{\text{пр}}$. Авторы работы [4] для определения предельных значений показателя $c_{\text{пр}}$ предложили экспериментально расчетную методику включающую:

- деформирование образцов до появления признаков разрушения;
- фиксирование момента времени появления трещины в образце визуально или по диаграмме: сила деформирования – перемещение индентора;

– определение моделированием деформирования образца показателя C в месте его разрушения и в момент времени появления трещины.

Определенное таким образом значение показателя принимается предельным показателем $c_{\text{пр}}$ для данного металла.

Моделирование показало, что отношение σ_1 / σ_i в месте разрушения металлических образцов, в испытаниях предложенных авторами работы [4], не является постоянным, а предельные значения показателя $c_{\text{пр}}$, полученные для одного и того же исходного металла по результатам разных испытаний, различных по форме образцов существенно отличаются. Существенное отличие определенных по указанной методике предельных значений $c_{\text{пр}}$ для одного и того же исходного металла затрудняет применение неравенства (1) для прогнозирования разрушения металла.

Целями проведенных исследований являлись: разработка методики расчета поврежденности металла на основе показателя Кокрофт-Лэтэм с учетом изменяющегося напряженного состояния материальной точки; апробация изготовленной экспериментальной оснастки для комбинированного деформирования до разрушения стальных образцов; определение предельных значений показателей $c_{\text{пр}}$ металла при различных, постоянных во времени отношениях σ_1 / σ_i ; сравнение результатов расчета поврежденности металла с экспериментальными данными разрушения стальной заготовки, соответствующей тестовой задаче.

Материал, методики и методы исследования

В качестве объектов исследований выбрали: трубчатую заготовку в форме усеченного конуса, высотой равной 15 мм, с диаметрами оснований равными 10 мм и 6 мм и с диаметром сквозного отверстия – 2 мм; сплошные и трубчатые образцы, показанные на рис. 1 и изготовленные из Ст5, взятой в виде прутков диаметром 10 мм в состоянии поставки.

На поверхность головок каждого образца (рис. 1), предварительно механической обработкой (на фрезерном станке), наносили продольную риску.

Испытания образцов до разрушения проводили в специально изготовленной оснастке (см. рис. 1, а), позволяющей осуществлять следующие виды комбинированного деформирования:

- растяжение с кручением сплошных образцов (см. рис. 1, б);
- кручение трубчатых образцов с размещенным внутри стальным закаленным стержнем,

предотвращающим потерю устойчивости деформирования образца (см. рис. 1, в);

– сжатие с кручением трубчатых образцов с размещенным внутри стальным закаленным стержнем, предотвращающим потерю устойчивости деформирования образца (см. рис. 1, в);

– сжатие с кручением трубчатых образцов в оправке, с размещенным внутри стальным закаленным стержнем, предотвращающим потерю устойчивости деформирования образца (см. рис. 1, г).

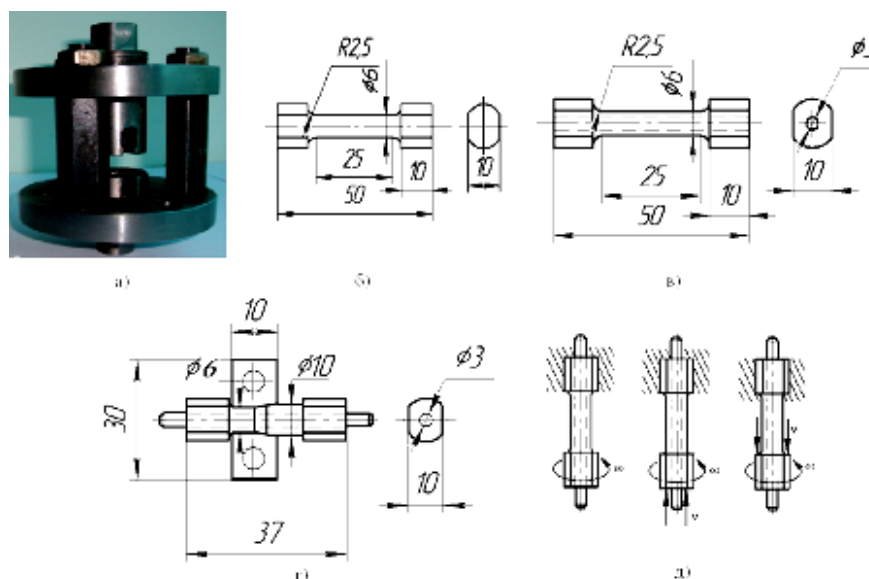


Рис. 1. Оснастка и образцы для комбинированного деформирования:

а – оснастка; б – сплошной образец; в – трубчатый образец; г – трубчатый образец, помещенный в составную оправку; д – возможные схемы деформирования образцов

Конструкция оснастки (см. рис. 1, а) позволяет заменой вкладышей и захватов с различным шагом метрической резьбы варьировать в испытаниях отношением осевой V и угловой Ω скоростей движения захватов. Возможные схемы деформирования образцов приведены на рис. 1, д.

Для измерения линейных размеров образцов применяли штангенциркуль с ценой деления 0,05 мм. Для измерения угла α по развороту риска на головках образцов с трещиной или склеенных после разрушения применяли инструментальный микроскоп БМИ – 1, с точностью поворота столика 3 мин.

Для повторяемости экспериментальных результатов в каждом испытании деформировали три образца.

Интенсивность деформаций ϵ_i рассчитывали по формулам:

для растяжения с кручением и для кручения

$$\epsilon_i = \ln(l_k / l_0) + \ln\left(1 + \lambda^2 / 2 + \lambda \cdot \sqrt{1 + \lambda^2 / 4}\right) / \sqrt{3},$$

где $\lambda = \alpha \cdot \bar{d} / (2 \cdot \bar{l})$, в соответствии с формулой Надаи;

\bar{d} , \bar{l} – средние значения наружного диаметра и длины образца;

l_0 – начальная длина образца; l_k – конечная длина образца;

α – угол закручивания образца, в радианах;

для сжатия с кручением трубчатых образцов

$$\epsilon_i = \ln(h_0 / h_k) + \ln\left(1 + \lambda^2 / 2 + \lambda \cdot \sqrt{1 + \lambda^2 / 4}\right) / \sqrt{3},$$

где $\lambda = \alpha \cdot \bar{d} / (2 \cdot \bar{h})$; \bar{h} – среднее значение высоты образца;

h_0 – начальная высота образца; h_k – конечная высота образца.

Заготовку в форме усеченного конуса, соответствующую тестовой задаче, подвергали осадке-раздаче коническим пуансоном, с углом при вершине 37° , до разрушения со скоростью деформирования не более 0,2 мм/с на лабораторном гидравлическом прессе с номинальной силой 500 кН. Момент времени появления трещины фиксировали визуально, останавливали траверсу прессы и измеряли высоту разрушенной заготовки.

В процессе исследований использовали компьютерное моделирование пластического деформирования образцов в испытаниях и заготовки, соответствующей тестовой задаче, с использованием программного комплекса *DEFORM 3D* [2].

Для построения диаграммы деформирования Ст5 снимали диаграммы: сила-перемещение, при помощи универсальной испытательной машины У10 с цифровой записью результатов. Тарировка машины однотонным и десятилонным динамометрами показала относительную погрешность 1 – 2 %. Скорость деформирования образцов 1,3 мм/мин.

Испытания на прерывистое растяжение с промежуточными закручиваниями проводили на специально изготовленных трубчатых образцах с лысками на головках [5]. Лыски на головках образцов необходимы были для закручивания образцов вокруг продольной оси. Образцы деформировали до достижения ими при каждом растяжении относительного удлинения 2...4% и напряжения не меньшего начального напряжения течения σ_{02} металла. Между каждыми двумя, прерывистыми растяжениями осуществляли закручивание образца на угол 90 град, с предварительным размещением в отверстии образца, для исключения искажения его формы, стального закаленного стержня. Для измерения угла закручивания использовали инструментальный микроскоп – БМИ-1. Общее равномерное относительное удлинение образца после всех прерывистых растяжений не превышало 22 %, а общая средняя по перечному сечению интенсивность деформации, за счет удлинения и закручивания образца между каждыми двумя прерывистыми растяжениями, достигала значения 1,9.

При проведении компьютерного моделирования были приняты следующие условия и допущения:

- инструмент – абсолютно жесткое тело (3D модели инструмента были предварительно созданы в «КОМПАС 3D 8V»);
- температура – постоянная, равная 20 °С;
- тепловым эффектом деформации из-за малой скорости деформации пренебрегали;
- стальная заготовка и образцы – пластичные тела; диаграмму деформирования

$$\sigma_1 = 623 - 280e^{-\varepsilon_1} - 73e^{-15\varepsilon_1}$$

Ст5 – линию тренда, построенную по результатам механических испытаний прерывистым растяжением с промежуточными закручиваниями образца, в соответствие с методикой [5], вводили при подготовке базы данных в виде табличной функции;

- коэффициент трения (shear) – равный 0,08;
- количество конечных элементов – 80000;
- угловая скорость подвижного захвата 6,28 рад/с, осевая скорость деформирования – 0...5 мм/с;
- шаг по времени 0,005...0,1 с;

– количество шагов моделирования – 100...400.

Допущения, принятые при выводе зависимости для расчета поврежденности:

– приращение пластического разрыхления (уменьшение плотности металла) материальной точки ΔE пропорционально приращению показателя Кокрофт-Лэтэм ΔC ;

– приращение поврежденности $\Delta \psi$ материальной точки на этапе деформирования не зависит от истории изменения напряженного и деформированного состояния точки на предшествующих этапах деформирования – гипотеза линейного суммирования приращений поврежденности, предложенная авторами работы [6]. Под поврежденностью здесь и далее, в соответствие с работой [1], понимаются микроскопические нарушения сплошности (субмикро- и микропоры, микротрещины) металла. К моменту исчерпания металлом способности деформироваться без разрушения, т. е. к моменту накопления предельной поврежденности, лавинообразно возникает макротрещина – этот момент называют разрушением.

Вывод зависимости для расчета поврежденности

В соответствие с работой [6] приращение поврежденности материальной точки определяют по формуле:

$$\Delta \psi = \Delta E / E_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{пр}}$ – значение предельного пластического разрыхления материальной точки при деформировании.

Приращение ΔC показателя Кокрофт-Лэтэм в соответствие с левой частью неравенства (1) равно:

$$\Delta C = \int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i,$$

а приращение пластического разрыхления металла в материальной точке, в соответствие с первым принятым допущением:

$$\Delta E = b \int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i, \quad (3)$$

где $\varepsilon_{i,k}$ – интенсивность деформации, накопленной материальной точкой к началу k-го этапа деформирования, $\varepsilon_{i,k+1}$ – интенсивность деформации, накопленной материальной точкой к окончанию k-го этапа деформирования, b – коэффициент, значение которого зависит от физико-

химической природы металла, термомеханических параметров и характера деформации.

К моменту разрушения материальной точки пластическое разрыхление достигает предельного значения:

$$E_{\text{пр}} = b \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{\text{ср}} \varepsilon_{i,p}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{i,p}$ – интенсивность деформации, накопленной материальной точкой к моменту разрушения при постоянном отношении σ_1 / σ_i , равном среднему значению отношения $(\sigma_1 / \sigma_i)_{\text{ср}}$ на k -ом этапе деформирования.

После подстановки выражений (3) и (4) в (2) получим:

$$\Delta \Psi = \int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1 d\varepsilon_i}{\sigma_i} \left/ \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{\text{ср}} \varepsilon_{i,p} \right]_k \right. \quad (5)$$

Применяя к формуле (5) второе допущение, получим формулу для поврежденности:

$$\Psi = \sum_{k=1}^n \left[\int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1 d\varepsilon_i}{\sigma_i} \left/ \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{\text{ср}} \varepsilon_{i,p} \right]_k \right. \right], \quad (6)$$

где n – количество этапов деформирования частицы.

Следуя работе [6] условие не разрушения металла выразим неравенством:

$$\sum_{k=1}^n \left[\int_{\varepsilon_{i,k}}^{\varepsilon_{i,k+1}} \frac{\sigma_1 d\varepsilon_i}{\sigma_i} \left/ \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{\text{ср}} \varepsilon_{i,p} \right]_k \right. \right] < 1 \quad (7)$$

Результаты моделирования

На рис. 2 и рис. 3 представлены результаты моделирования механических условий деформации образцов и заготовки, полученные с использованием возможностей постпроцессора программного комплекса *DEFORM 3D* [2].

На рис. 2 представлена графическая зависимость отношения σ_1 / σ_i материальной точки поверхности образца от интенсивности деформации, а в табл. 1 приведены сводные данные об условиях деформирования образцов.

Из рис. 2 и табл. 1 видно, что отношение

σ_1 / σ_i для материальной точки поверхности образца в каждом испытании является практически постоянным во времени. Скачок вверх на рис. 2, обусловлен отсутствием контакта образца с оправкой в начале деформирования сжатием с кручением. В дальнейшем рабочая часть образца осаживается, величина зазора между образцом и оправкой уменьшается до 0 и отношение σ_1 / σ_i не изменяется.

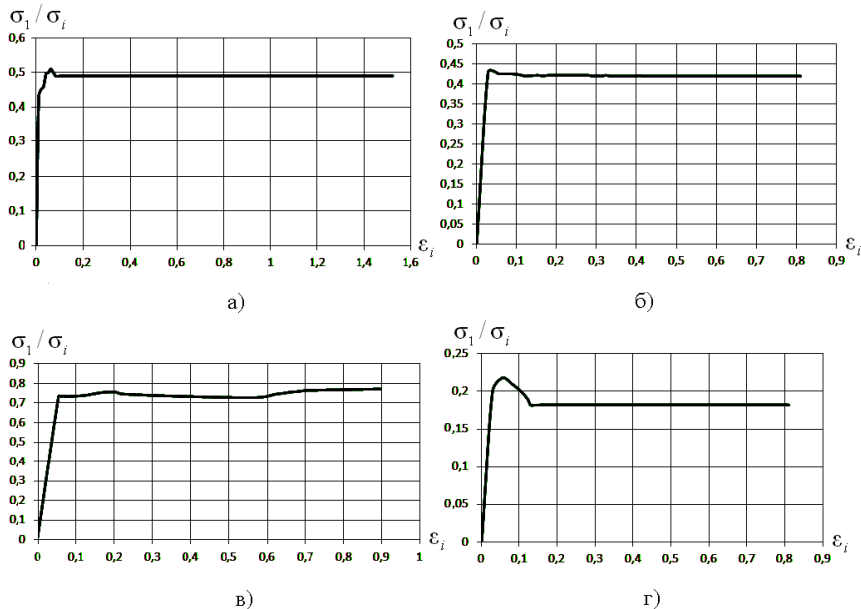


Рис. 2. Графическая зависимость отношения σ_1 / σ_i от интенсивности деформации для материальной точки поверхности образца при деформировании:

- a – сжатием с кручением трубчатых образцов, со скоростями: $V = 1$ мм/с; $\Omega = 6,28$ рад/с; b – сжатием с кручением трубчатых образцов, со скоростями: $V = 2$ мм/с; $\Omega = 6,28$ рад/с; v – растяжением с кручением сплошных образцов, со скоростями: $V = 4,5$ мм/с; $\Omega = 6,28$ рад/с; g – сжатием с кручением трубчатых образцов в оправке, со скоростями: $V = 0,5$ мм/с; $\Omega = 6,28$ рад/с

Условия деформирования образцов

V / Ω , мм/рад	σ_1 / σ_i
4,5/6,28	0,74727
0/6,28	0,58
-0,25/6,28	0,5479
-0,5/6,28	0,5247
-0,75/6,28	0,5156
-1/6,28	0,49032
-2/6,28	0,41917
-0,5/6,28*	0,18

- деформирование образца сжатием с кручением, * – образец в оправке

На рис. 3, б представлена графическая зависимость отношения σ_1 / σ_i от времени для

материальной точки P заготовки, соответствующей тестовой задаче (см. рис. 3, а).

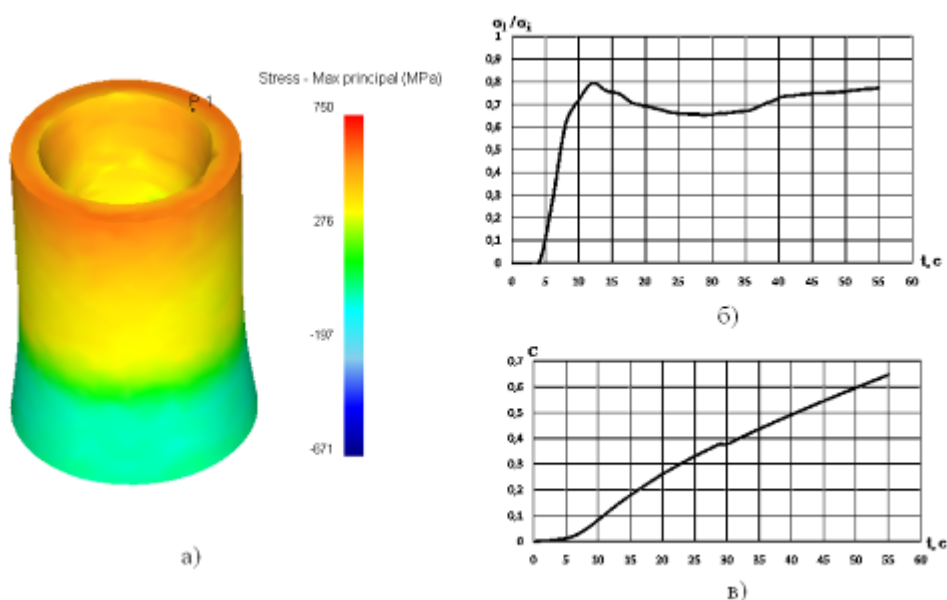


Рис. 3. Результаты моделирования осадки-раздачи заготовки:

а – распределение максимального, главного нормального напряжения σ_1 и положение материальной точки P , взятой для расчета поврежденности;

б – графическая зависимость отношения σ_1 / σ_i в материальной точке P от времени; в – графическая зависимость показателя C в материальной точке P от времени

В этой материальной точке предположительно произойдет разрушение, т. к. согласно модели разрушения Кокрофт-Лэтэм [3] разрушение происходит в материальных точках от действия только растягивающих напряжений. В указанной материальной точке P (см. рис. 3, а) в течение всего времени деформирования действуют растягивающие, максимальные, в сравнение с другими материальными точками заготовки, напряжения. Отношение σ_1 / σ_i для выбранной материальной точки изменяется за время деформирования от 0 до 0,8 (см. рис. 3, б). Изменение во времени показателя

C для материальной точки P (см. рис. 3, в) показано на рис. 3, в.

Результаты физического эксперимента и решения тестовой задачи

В результате экспериментального комбинированного деформирования образцов до разрушения, последующих измерений линейных, угловых размеров и расчета интенсивности деформации $\epsilon_{i,p}$, соответствующей моменту времени появле-

ния трещины на поверхности образца, получили данные представленные в табл. 2.

Большинство образцов за исключением

образцов в оправке разрушалось с зарождением трещины на поверхности в центральной части (см. рис. 4, а).

Таблица 2

Результаты испытаний образцов

V / Ω , мм/рад	Наименование испытания	l_0 , мм	l_K , мм	h_0 , мм	h_K , мм	d_0 , мм	d_K , мм	α , рад	$\varepsilon_{i,p}$
1/0	Растяжение	20	24,5			6	5,4	0	0,2
4,5/6,28	Растяжение с кручением	20	23,8			6	5,45	5,83	0,302
0/6,28	Кручение			10	10	6	6	9,424	1,437
-1/6,28	Сжатие с кручением			10	8,5	6	6,4	9,424	1,599
-0,5/6,28	Сжатие с кручением образца в оправке			5	5	6	6	11,06	2,211

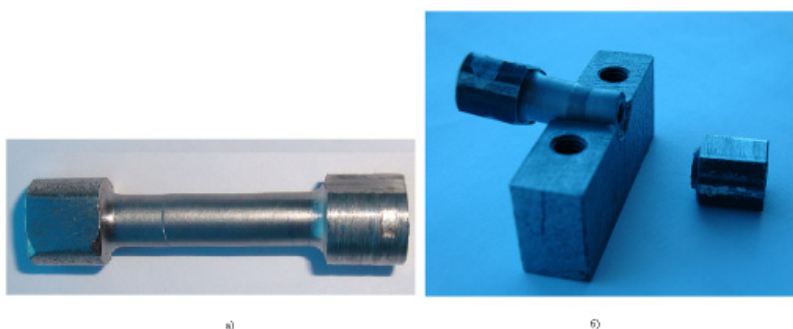


Рис. 4. Образцы, деформированные до разрушения:
а – сжатием с кручением трубчатого образца;
б – сжатием с кручением трубчатого образца в оправке

Образцы в оправке разрушались с зарождением трещины на поверхности в месте локализации деформации, находящемся в цилиндрическом участке оправки (см. рис. 4, б). Длина визуально фиксированной трещины составляла 3...4 мм, ориентировка трещины – 84...90 град. к продольной оси закрученного образца.

На рис. 5 приведена графическая зависимость интенсивности деформации $\varepsilon_{i,p}$, накопленной материальной точкой к моменту разрушения от отношения σ_1 / σ_i – логарифмическая линия тренда, построенная с использованием данных таблиц 1 и 2.

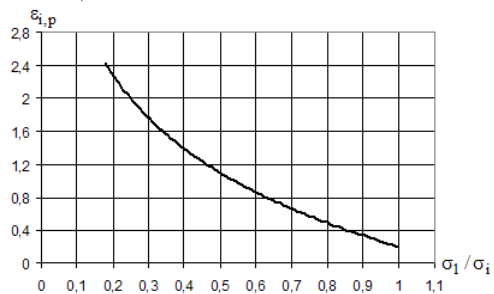


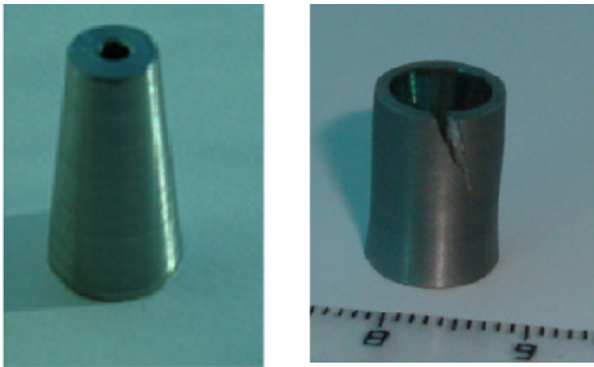
Рис. 5. Графическая зависимость интенсивности деформации $\varepsilon_{i,p}$ накопленной материальной точкой к моменту разрушения от отношения σ_1 / σ_i

График, представленный на рис. 5 хорошо описывается аппроксимирующей зависимостью:

$$\varepsilon_{i,p} = -1,3 \ln\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i}\right) + 0,2 \quad (8)$$

Зависимость (8) или график (см. рис. 5) позволяют при известном значении отношения σ_1 / σ_i рассчитывать значение предельного показателя $c_{пр} = (\sigma_1 / \sigma_i)_{ср} \varepsilon_{i,p}$ для Ст5, взятой в состоянии поставки.

На рис. 6 показана заготовка, соответствующая тестовой задаче, после разрушения. Эксперимент показал, что первоначальная трещина длиной равной 1,5...2 мм, ориентированная под углом 40...45 град. к продольной оси заготовки появляется, при осадке-раздаче заготовки, в месте соединения ее торцевой свободной и конической контактной поверхностей, при высоте заготовки равной 13,1 мм.



а)

б)

Рис. 6. Заготовка: *а* – исходная трубчатая в форме усеченного конуса; *б* – деформированная до разрушения

Это место заготовки (точка *P*) отличается максимальными значениями растягивающих напряжений в конечный момент осадки-раздачи (см. рис. 3, *а*).

Расчетное значение поврежденности для точки *P* заготовки, по формуле (6), удовлетворяло неравенству $0,97 \leq \psi \leq 1$, если при расчетах выполнялись условия:

$$0,99 \leq \sum_{k=1}^n \left[\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right)_{\text{ср}} t_{\text{э}} \right]_k / S \leq 1 \quad \text{и}$$

$$n \geq 27,$$

где S – площадь плоской фигуры, ограниченной графиком (см. рис. 3, *б*), осями абсцисс, ординат и линией параллельной оси ординат, проходящей через точку $(t_{\text{д}}; 0)$, $n = t_{\text{д}} / t_{\text{э}}$ – количество принятых в расчете этапов n деформирования материальной точки, $t_{\text{д}}$ – время деформирования материальной точки, $t_{\text{э}}$ – длительность одного этапа деформирования, принятая в расчете исследователем.

ВЫВОД

Проведено физическое деформирование заготовки осадкой-раздачей с фиксацией появления трещины в месте соединения торцевой свободной и конической контактной поверхностей и показано, что расчетная, по полученной формуле, поврежденность с приемлемой для практического использования точностью позволяет прогнозировать разрушение металла при холодной пластической деформации и изменяющемся напряженном состоянии материальной точки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Колмогоров В.Л.** Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов // Кузнечно-штамповочное производство. 2003. № 2. С. 4 – 16.
2. *Лицензия.* Р.С. SFTS. Key #9190/Ufa, Russia.
3. **Cockcroft M. G., Latham, D.J.** Ductility and Workability of metals // J. Inst. Metals. 1968. V. 96. P. 33 – 39.
4. **Kim H., Yamanaka M., Altan T.** Prediction and Elimination of Ductile Fracture in Cold Forging Using FEM Simulations: Proceedings of NAMRC (Houghton, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, May 1995). P. 63 – 77.
5. **Боткин А.В., Бикбулатова В.З., Степин П.С.** Изучение влияния вида испытания на характер кривой упрочнения металла при больших степенях деформации // Кузнечно-штамповочное производство. 2008. № 11. С. 24 – 27.
6. **Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В.** Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.