

О КРИТЕРИЯХ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Дь. КРАЛЛИЧ

Институт механической технологии и металловедения Будапештского Технического Университета

Поступило: 5 января 1979 г.

Представлено: проф. И. Артингер

Введение

При процессах обработки металлов давлением (о. м. д) может возникать разрушение, которое является в большинстве случаев пластическим. Для характеристики в технических применениях важную роль играет деформируемость металлов, которая характеризуется степенью деформации, возникающей при разрушении. Чтобы использовать резервы пластичности металлов, необходимо учитывать внешние и внутренние факторы, в том числе напряженное состояние, скорость деформации, температуру, условия окружающей среды, металлургическое состояние материала и историю изменения всех этих величин.

Напряженное и деформированное состояние в отдельных точках материала зависит от технологических параметров процесса, определяемых конструкцией инструмента, геометрией заготовки и смазкой. Регулируя эти параметры, можно создать условия, задерживающие разрушение при больших деформациях.

Целенаправленное регулирование этих параметров возможно, если известны надежные критерии в процессах о. м. д.

В настоящее время из литературы известны различные теории пластического разрушения. Одна из них — теория *Макклинтока* [1], которая предполагает, что в материале находятся поры и разрушение происходит в результате роста пор. Такая модель достаточно хорошо описывает реальную ситуацию, возникающую в большинстве случаев после образования зародышей разрушения. На основе этой модели вычисленная деформация разрушения ϵ_p равна

$$\epsilon_p = \frac{(1-n)\ln f^{-\frac{1}{3}}}{sh[(1-n)(\sigma_a + \sigma_b)(2\sigma_i\sqrt{3})]} \quad (1)$$

где n — показатель деформационного упрочнения
 σ_i — интенсивность напряжений
 f — объемная доля пор

σ_a, σ_b — напряжения, возникающие на бесконечности.

Для процессов о. м. д. эта теория применяется в работе [2]. Основная трудность использования теории Макклинтока заключается в определении величины f и изучении истории деформации.

Кокрофт на основании удельной энергии деформации при растяжении разработал следующий критерий разрушения [3]

$$\int_0^{\varepsilon_p} \sigma^* d\varepsilon = C \quad (2)$$

где C — постоянная для данного материала при данной температуре и скорости деформации, найденная из испытаний на одноосное растяжение

σ^* — максимальное растягивающее напряжение

ε_p — степень деформации при разрушении.

Этот критерий подчеркивает роль растягивающих напряжений при разрушении, и как ниже будет показано, не точно характеризует возникновение разрушения.

В работах [4], [5] для прогнозирования разрушения при процессах о. м. д. используется пластическая неустойчивость, возникающая перед разрушением. Для листовой штамповки *Килером*, *Бэкофеном* и *Гудви-*

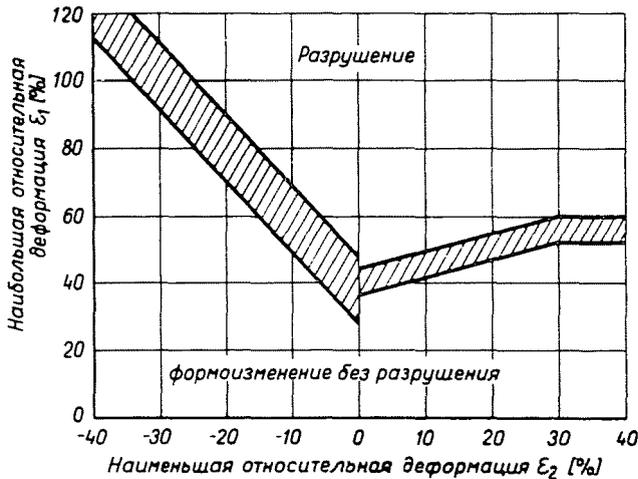


Рис. 1. Диаграмма предельного формоизменения листового металла

ном [6], [7] был предложен критерий разрушения, использующий диаграммы предельного формоизменения *рис. 1*.

На основе этой теории Кун, Ли, Эртурк [8] разработали критерий разрушения для других процессах о. м. д. Существо этого критерия заключается в том, что зависимость между растягивающей и сжимающей деформациями при разрушении является линейной *рис. 2*.

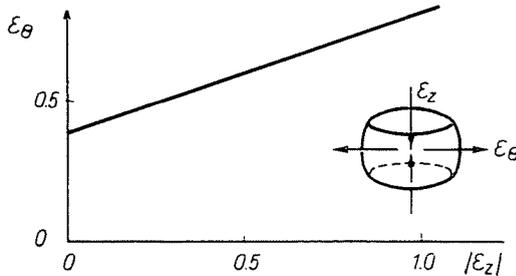


Рис. 2. Зависимость между растягивающей и сжимающей деформациями на поверхности образца до разрушения при осадке

В Советском Союзе распространена феноменологическая теория разрушения [9]. Важную роль играет в этой теории степень использования запаса пластичности

$$\psi = \int_0^{\varepsilon} B \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_p[K]} \leq 1 \tag{3}$$

где $\varepsilon_p[K]$ — предельная степень деформации, зависящая от напряженного состояния

K — показатель напряженного состояния

B — функция, учитывающая влияние немонотонности протекания деформации.

Исходный металл считается условно бездефектным $\psi = 0$, а в момент разрушения $\psi = 1$.

Целью настоящей работы является разработка методики исследования пластического разрушения при различных видах напряженного состояния и последующая оценка существующих критериев разрушения при процессах о. м. д.

Необходимые для анализа условий разрушения данные были получены из опытов по осадке алюминиевого сплава АМг5, механические характеристики которого приведены в таб. 1.

Таблица 1

R_{rL} [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	R_b [N/mm ²]	φ_s	W_s [MJ/m ³]
160	280	500	0,77	302

Методика эксперимента

При осадке цилиндра боковые свободные поверхности принимают форму бочки и разрушение начинается на ее экваторе. Бочкообразование приводит к возникновению окружного растягивающего напряжения и уменьшению осевого напряжения. Регулировать степень бочкообразности можно изменяя отношения высоты к диаметру образца и условия трения на поверхности контакта. Таким образом создаются разнообразные напряженные и деформированные состояния на экваторе свободной поверхности осажённых цилиндрических образцов, что очень удобно при изучении механизма разрушения. Местные окружные и осевые деформации рассчитывали по изменению расстояния между двумя семействами делительных линий, нанесенных на образце. Делительные линии наносили на расстояния 1 мм с помощью типографического метода. Ячейку сетки фотографировали в нескольких стадиях процесса обжатия испытываемого цилиндра, и измеряли расстояние между горизонтальными делительными линиями на проекторе, а диаметр образца измеряли микрометром. После каждого приращения деформации проводили визуальный осмотр с целью выявления трещин на свободной поверхности.

Геометрическая форма образцов и коэффициенты трения приведены в таблице 2.

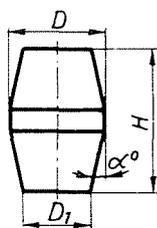


Таблица 2

№	D [mm]	D_1 [mm]	α°	H [mm]	m
1	15,00	15,00	0	30,00	0,05
2	15,00	15,00	0	25,00	0,09
3	15,00	15,00	0	22,50	0,05
4	15,00	15,00	0	30,00	0,17
5	15,00	15,00	0	22,50	0,11
6	15,00	15,00	0	22,50	0,5
7	15,00	13,00	6	24,00	0,17
8	15,00	13,00	4	24,00	0,5

На одни и те же условия нагружения проводили 5 экспериментов. Всего было реализовано 8 видов экспериментов. Скорость нагружения $v = 8$ мм/мин.

Деформации поверхностного слоя цилиндрического образца можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\Theta} &= \ln \frac{a}{a_0} = \ln \frac{d}{d_0} \\ \varepsilon_z &= \ln \frac{b}{b_0}\end{aligned}\quad (4)$$

где a_0, b_0 — исходные размеры ячейки сетки
 a, b — размеры той же ячейки сетки в рассматриваемой стадии процесса обжатия цилиндра
 d_0 — исходный диаметр образца на экваторе
 d — текущий диаметр

На основе работы Смирнова-Аляева [10] можно записывать следующим уравнением связь между деформациями:

$$-\varepsilon_z = 0,5\varepsilon_{\Theta} + 1,5g \operatorname{arc} \tan \left(\frac{\varepsilon_{\Theta}}{g} \right) \quad (5)$$

где g — константа.

На основе опытных данных можно определить константу, методом наименьших квадратов.

Степень деформации записывается в виде

$$\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_{\Theta}} \sqrt{1 + 1/3 \left(2 \frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_{\Theta}} - 1 \right)^2} d\varepsilon_{\Theta} \quad (6)$$

Используя уравнение Леви-Мисеса, можно определить напряжения. На боковой поверхности $\sigma_r = 0$, и отсюда

$$\begin{aligned}\sigma_{\Theta} &= \frac{\frac{\varepsilon_{\Theta}^2}{\varepsilon_{\Theta}^2 + g^2}}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{g^2}{\varepsilon_{\Theta}^2 + g^2} \right)^2}} \sigma_i \\ -\sigma_z &= \frac{2 \frac{g^2}{\varepsilon_{\Theta}^2 + g^2}}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{g^2}{\varepsilon_{\Theta}^2 + g^2} \right)^2}} \sigma_i\end{aligned}\quad (7)$$

Показатель напряженного состояния

$$K = \frac{1 - 3 \frac{g^2}{\varepsilon_{\Theta}^2 + g^2}}{\sqrt{1 + 3 \left(\frac{g^2}{\varepsilon_{\Theta}^2 + g^2} \right)^2}} \quad (8)$$

Зная степень деформации и показатель напряженного состояния при разрушении можно построить диаграмму пластичности. Полученные точки аппроксимируются в следующем виде:

$$\varepsilon_p = a_0 + a_1 K + a_2 K^2 + a_3 K^3 \quad (9)$$

В нашем примере $a_0 = 0,946$, $a_1 = -0,29$, $a_2 = 0,025$, $a_3 = 0,00$. Вышеописанный расчет проводили с помощью ЭВМ Одра 1204.

Дополнительные эксперименты

Коэффициенты трения для каждого варианта определили методом осадки кольца [11]. Для определения параметров уравнения сопротивления деформации были проведены эксперименты по осадке образцов с торцевыми цилиндрическими выточками, заполненными твердой смазкой [12]. Уравнение сопротивления деформации записывается в виде

$$\sigma_i = A \varepsilon^n$$

$$A = 445 \text{ N/мм}^2, \quad n = 0,188$$

Результаты

На *рис. 3—10* показаны напряжения, деформации, возникающие при осадке и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации. Диаграмма пластичности, построенная на основе данных, полученных при осадке, показана на *рис. 11*.

Критерий *Кокрофта* [2] не точно описывает возникновение разрушения, поскольку констант C сильно зависит от пути деформации (таб. 3). Также исследовали пластическую неустойчивость в качестве критерия разрушения.

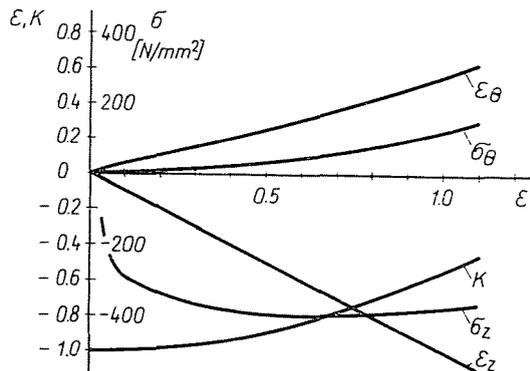


Рис. 3. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 1 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

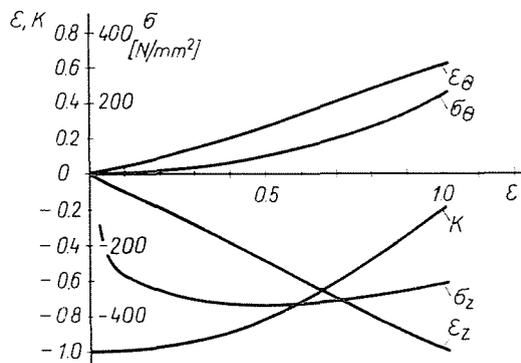


Рис. 4. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 2 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

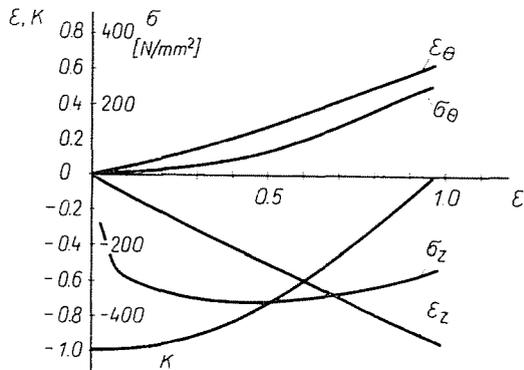


Рис. 5. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 3 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

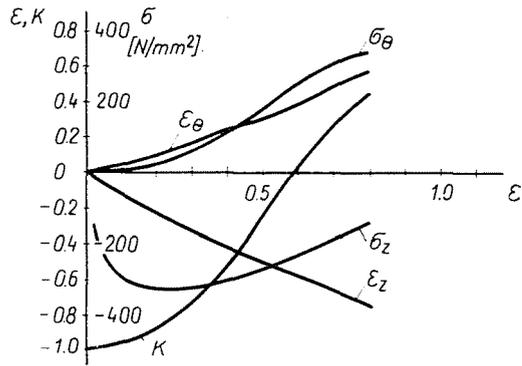


Рис. 6. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 4 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

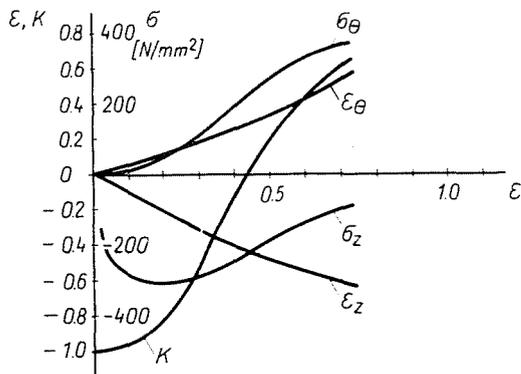


Рис. 7. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 5 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

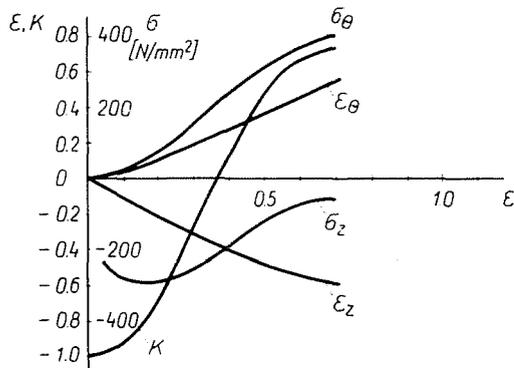


Рис. 8. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 6 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

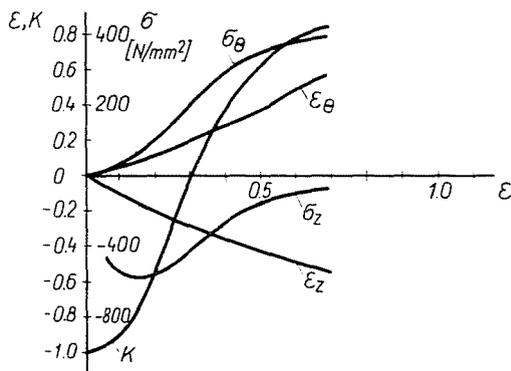


Рис. 9. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 7 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

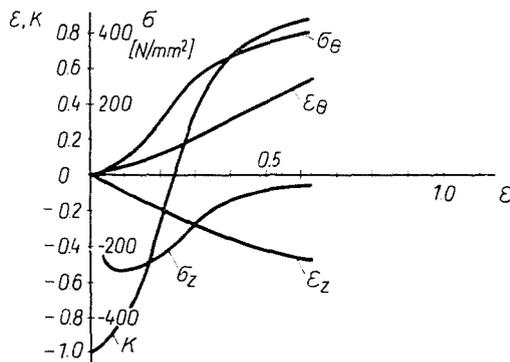


Рис. 10. Напряжения, деформации, возникающие на поверхности образца № 8 и показатель напряженного состояния в зависимости от степени деформации при осадке

При сжатии цилиндра на боковой поверхности экватора окружное напряжение является растягивающим. Его неустойчивость можно определить по следующему уравнению [4]

$$\frac{\partial \sigma_{\theta}}{\partial \varepsilon_{\theta}} = \sigma_{\theta} \left(2 + \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial \varepsilon_{\theta}} \right) \quad (10)$$

С помощью этого уравнения определили те деформации, где возникает неустойчивость. Результаты приведены на рисунке 12. В нескольких случаях неустойчивость проявляется перед разрушением, а в других случаях разрушение происходит перед возникновением неустойчивости. Таким образом, по нашему мнению, неустойчивость не характеризует однозначно условия разрушения.

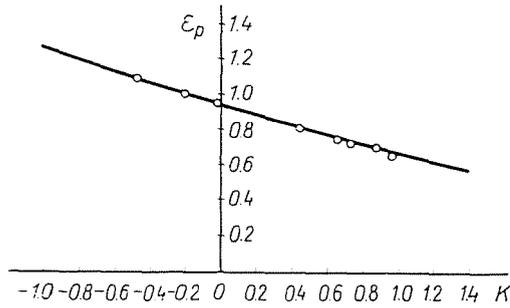


Рис. 11. Диаграмма пластичности алюминиевого сплава АМг5

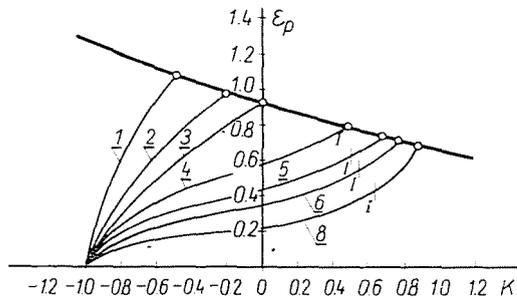


Рис. 12. Возникновение пластической неустойчивости при разных условиях осадки

Таблица 3

№	C [МД/см ²]
1.	52,6
2.	71,1
3.	91,9
4.	103,8
5.	123
6.	135,6
7.	139,6
8.	146,1

Изучали пластические процессы в диаграмме предельного формоизменения. На рис. 13 представлен график, на котором нанесены конечные точки различных путей деформации.

Предельная кривая характеризуется уравнением

$$\varepsilon_{\Theta p} = 0.175|\varepsilon_{z p}| + 0.445 \quad (11)$$

Зная функцию $\varepsilon_{\theta} = f(\varepsilon_z)$, одновременно можно определить диаграмму пластичности и предельную кривую по теории Ли, Эртурка, Куна. Это значит, что феноменологическая теория разрушения и теория предельной формоустойчивости тесно связаны друг с другом.

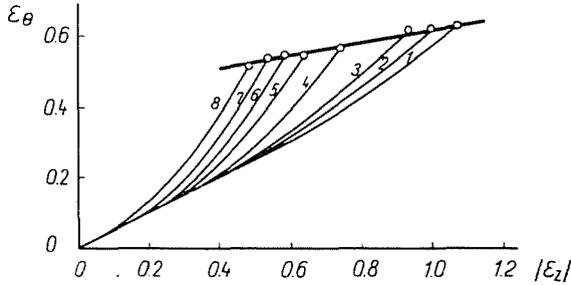


Рис. 13. Пути деформации в местах разрушения образцов

Более детально оценивалась феноменологическая теория разрушения, как имеющая широкое применение для технологических задач [9], [13].

По мнению Колмогорова в большинстве случаев о. м. д. функция В, учитывающая влияние немонотонности пластической деформации, равна единице. В этом случае степень использования запаса пластичности ψ запишется в виде

$$\psi = \int_0^{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_p [K]} \tag{12}$$

и при разрушении $\psi = 1$.

Проверили этот критерий. Полученные результаты показаны на рисунке 14. Видно, что ψ только при монотонной деформации равна единице, а в других случаях она меньше единицы.

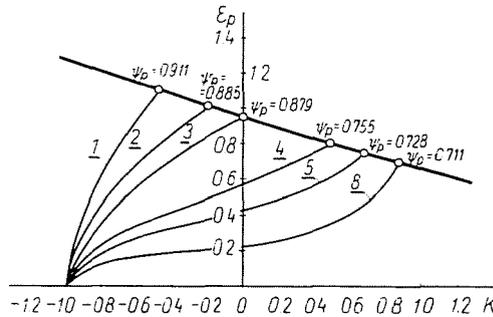


Рис. 14. Степени использования запаса пластичности осаженных цилиндрических образцов при разрушении по уравнению (12)

Также проверили критерий *Огородникова* [14], который записывается в виде

$$\psi_p = \int_0^{\varepsilon_p} \left(1 + a \frac{\partial K}{\partial \varepsilon}\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}\right)^a \frac{\partial K}{\partial \varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_p} = 1 \quad (13)$$

где a — постоянная величина, слабо зависящая от материала. Результаты расчетов по данным экспериментов показаны на *рис. 15*, они не удовлетворительно согласуются с представлением *Огородникова*.

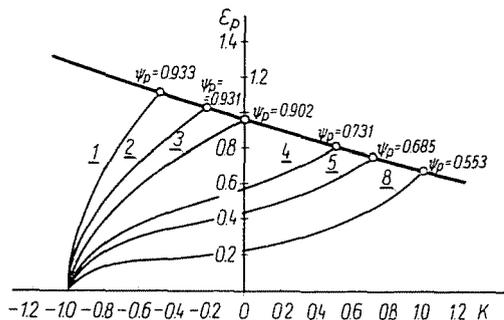


Рис. 15. Степени использования запаса пластичности осажённых цилиндрических образцов при разрушении по уравнению (13)

На основе наших испытаний условие разрушения металла может быть определено уравнением

$$\psi_p = \int_0^{\varepsilon_p} \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_p [K^*]} = 1 \quad (14)$$

Значение $\varepsilon_p [K^*]$ объясним позже. Исследуем процесс пластического формоизменения в диаграмме $\varepsilon_p - K$ (*рис. 16*). Траектория нагружения

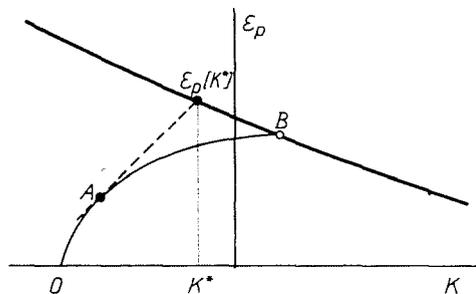


Рис. 16. Траектория нагружения в диаграмме степени деформации и показателя напряженного состояния

представлена линией ОВ. В определенный момент времени напряжение и деформированное состояние некоторой зоны деформированного тела характеризуется точкой А. Если бы протекание деформационного процесса не изменилось, дальнейшая траектория нагружения должна описываться на наш взгляд, штриховой линией (касательная).

Повреждаемость металла в этот момент времени записывается в виде

$$d\psi = \frac{d\varepsilon}{\varepsilon_p [K^*]} \quad (15)$$

В общем случае траектория нагружения является сложной кривой. Определяя в каждый момент времени $\varepsilon_p [K^*]$ и проинтегрируя уравнение (15) по траектории нагружения от исходного состояния до разрушения, получим уравнение (14). Определим при разных условиях осадки степень использования запаса пластичности при разрушении. Результаты приведены в таб. 4.

Таблица 4

№	ψ_p
1.	0,990
2.	0,989
3.	0,981
4.	0,956
5.	0,939
6.	0,971
7.	0,980
8.	1,001

Полученные данные удовлетворительно согласуются с концепцией феноменологической теории разрушения. Таким образом, зная диаграмму пластичности и траекторию нагружения, при разных операциях о. м. д. можно успешно использовать уравнение (14), для анализа разрушения и определения накопления повреждаемости металла.

Выводы

1. Испытания на осадку дают хорошую возможность для исследования пластического разрушения, так как позволяют создавать различные виды напряженного состояния на поверхности, изменяя условия трения по торцам и геометрические размеры образцов.
2. По нашим данным теория Кокрофта, и пластической неустойчивости не удовлетворительно прогнозируют возникновение разрушения. Диаграмма пластичности и диаграмма предельной формируемости связаны друг с другом.
3. Уравнение (14) удовлетворительно характеризует условия разрушения. Его проверка при различных видах напряженного состояния, создаваемых осадкой, позволяет рекомендовать это уравнение для других процессов о. м. д.

Резюме

С целью получения пластического разрушения при различных видах напряженного состояния были проведены испытания по осадке алюминиевого сплава.

Распространенные критерии разрушения при процессах о. м. д. были оценены на основе испытаний.

Исходя из наших результатов предлагается уравнение для описания условий разрушения при немонотонной деформации, создаваемой осадкой, которое удовлетворительно согласуется с концепцией феноменологической теории разрушения.

Список литературы

1. Макклinton Ф.—Аргон А.: «Деформация и разрушение материалов» Мир 1970.
2. Бэкофен В.: «Процессы деформации». Металлургия 1977.
3. СОСКРОФТ, М. G. and ЛАТНАМ, D. J.: «A simple criterion of Fracture for Ductile Metals» Journal of the Institute of Metals, vol. 96, 1968, 33—39.
4. ТНОМАСОН, P. F.: «Tensile Plastic Instability and Ductile Fracture Criteria in Uniaxial Compression Tests» Intern. Journal of mech. Sci. 1969 vol. 11. 187—198.
5. САМАНТА, S. K. «Effect of Friction and Specimen Geometry on the Ductile Fracture in Upset Forging» Trans. ASME 1975. vol. 97. 14—20.
6. КЕЕЛЕР, S. P. and ВАСКОФЕН, W. A.: «Plastic Instability and Fracture in Sheets Stretched over Rigid Punches» Trans. ASME vol. 56. 1963. 25—48.
7. ГООДВИН, G. M.: «Application of strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press shop» SAE Paper № 680093
8. КУНН, H. A.—ЛЕЕ, P. W. and ЕРТУРК Т.: «A Fracture Criterion for Cold Forming» Trans. ASME 1973. vol. 95. 213—218.
9. Колмогоров, В. Л.: «Напряжения, деформация, разрушение». Металлургия 1970.
10. Смирнов-Аляев, Г. А.: «Сопrotивление материалов пластическому деформированию». Машгиз 1961.
11. МАЛЕ, A. T. and СОСКРОФТ, M. G.: «A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals Under Conditions of Bulk Plastic Deformation» Journal of the Institute of Metals. vol. 93. 1964—1965. 38—46.
12. Кроха, В. А.: «К методике определения напряжения при сжатии до больших пластических деформаций». Заводская Лаборатория 1973. № 6. 598—601.
13. Колмогоров, В. Л.—Боготов, А. А. и другие: «Пластичность и разрушение». Металлургия 1977.
14. Огородников, В. А.: «Оценка деформируемости металлов при обработке давлением». Кузнечно-штамповочное производство 1977. № 3. 15—18.

Др. Дьердь Краллич, H-1521 Budapest