

УДК 621.7.011

Грушко А. В.

**ПАРАМЕТРЫ КАРТ НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ ПЛАСТИЧНОСТИ И ОЦЕНКИ
ДЕФОРМИРУМОСТИ**

Диаграмма пластичности является важнейшей фундаментальной характеристикой деформируемого металла, без которой невозможно применение критериев разрушения при оценке деформируемости в моделировании процессов обработки металлов давлением (ОМД). В традиционной диаграмме пластичности по оси абсцисс откладывается показатель напряженного состояния, а по оси ординат накопленная интенсивность деформаций e_i к моменту разрушения, полученная при условии, что показатель напряженного состояния при испытании остается постоянным. В большинстве работ, посвященных исследованиям деформируемости, вид напряженного состояния, характеризующий пластичность, определяется показателем жесткости напряженного состояния по В. А. Бабичкову в виде [1–3]

$$\eta = c \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где σ_i – интенсивность нормальных напряжений (напряжение Мизеса); c – нормировочный коэффициент; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные нормальные напряжения.

Удобно принять $c = 1$, тогда в условиях растяжения $\eta = 1$, сжатия $\eta = -1$, кручения $\eta = 0$, двухосного равномерного растяжения $\eta = 2$ и сжатия $\eta = -2$.

Удачно принятая аппроксимирующая функция диаграммы пластичности дает возможность строить последнюю с необходимой точностью по результатам испытаний с минимальным числом опытов и возможностью экстраполяции. Отметим широко используемую для практических расчетов аппроксимацию диаграммы пластичности [1, 4]:

$$e_p = e_{p0} \exp(-\lambda_{1,2}\eta), \quad (2)$$

где e_{p0} – пластичность металла при сдвиге; $\lambda_{1,2}$ – чувствительность пластичности металла к изменению схемы напряженного состояния (λ_1 при $0 \leq \eta \leq 2$ и λ_2 при $-2 \leq \eta \leq 0$).

Функция (2) дает высокую точность при $\eta \leq 0$. Однако при $\eta \geq 0$ часто наблюдается не монотонность зависимости e_i от η . Для различных сплавов, применяемых в ОМД характерно, что деформации при растяжении превышают деформацию сдвига; при двухосном растяжении пластичность соизмерима с деформацией одноосного растяжения, а при плоском деформированном состоянии может быть наименьшая из отмеченных [3–5].

Также известно, что пластичность в той или иной мере зависит также от других показателей напряженного состояния (например, показателя Лодэ – Надаи), и тогда диаграмма превращается в поверхность [6]. Для задач объемного напряженного состояния актуальным является поиск такого показателя, который возвращал бы поверхность пластичности в плоский график, что является весьма важной задачей [1, 4].

В работах [5, 7] предложен показатель напряженного состояния, полученный на основе феноменологического подхода, что позволило использование монотонных функций диаграммы пластичности при $\eta \geq 0$ с хорошей корреляцией с опытными данными:

$$\zeta = \frac{\sigma_1 + k_2\sigma_2 + k_3\sigma_3}{\sigma_i} = \dot{a}_1 + k_2\dot{a}_2 + k_3\dot{a}_3, \quad (3)$$

где $\dot{\alpha}_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_i}$, $\dot{\alpha}_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_i}$, $\dot{\alpha}_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_i}$ – относительные главные напряжения; k_2, k_3 – коэффициенты

влияния относительных главных напряжений на пластичность металла (являются величинами, зависящими от физико-механических свойств материала, могут быть как положительными, так и отрицательными, а также равными нулю). Принято, что при первом относительном главном напряжении, независимо от вида материала $k_1 = 1$.

В основу аппроксимирующей функции диаграммы положена экспоненциальная зависимость, подобная (3), которую запишем в виде:

$$e_p = d \cdot \exp(-q \cdot \zeta) = d \cdot \exp(-q \cdot (a_1 + k_2 a_2 + k_3 a_3)), \quad (4)$$

где d, q – константы диаграммы пластичности, определяемой показателем ζ .

Функция (4) удовлетворяет граничным условиям пластичности по отношению к виду нагружения: при трехосном растяжении пластичность стремится нулю, при трехосном сжатии – к бесконечности. Величины k_2, k_3, d, q являются составляющими карты металла для процессов холодного пластического деформирования (ХПД) [7], однако, значения этих параметров в литературе отсутствуют.

Целью работы является определение параметров k_2, k_3, d, q для ряда металлов и сплавов и анализ полученных диаграмм пластичности для их применения в критериях деформируемости.

В лаборатории ВНТУ проведены исследования пластичности некоторых металлических материалов, сведенных в табл. 1. При определении пластичности материалов использовали стандартные образцы на растяжение, кручение, сжатие. Также использовались нестандартные плоские образцы для испытаний в условиях сдвига, на одноосное и двухосное растяжение по пробе Эриксона (рис. 1, б). Для образцов с боковыми круговыми вырезами варьировали соотношением толщины стенки к диаметру выреза и ширины перемычки, что дает возможность получить достаточно широкий интервал экспериментальных точек в области от одноосного до двухосного растяжения при практически неизменных на протяжении всего испытания параметрах вида напряженного состояния вплоть до разрушения. Стандартные образцы ограничены в таких свойствах. Также использовались уникальные образцы для определения пластичности в условиях сдвига и сдвига с растяжением (рис. 1, б).

Таблица 1

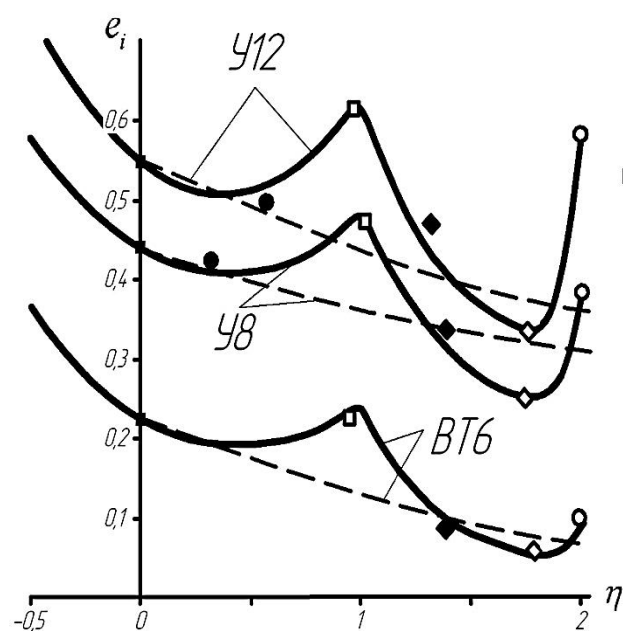
Параметры карт исследованных сплавов для построения диаграмм пластичности

Материал	Параметры диаграммы пластичности по (4)				Твердость HB, МПа	Примечание
	d	q	k_2	k_3		
Сплав Д16	58130	-11,81	-0,108	-0,789	1020	
Сплав АД33Т1	2578	8,12	-0,063	-0,761	820	
Сталь У12	23,33	3,63	0,02	-0,79	2290	рис. 1 (а)
Сталь У8	11,24	3,153	0,08	-0,78	2810	рис. 1 (а)
Сталь 08кп	37	3,8	0,01	-0,77	1180	лист 2,5 мм
Сталь ШХ15	115	5,48	0,06	-0,76	2050	
Сталь 20	202	-0,134	0,028	-0,822	1310	отжиг
Сталь 20Х	64	4,6	0,08	-0,805	1570	отжиг
Титан ВТ6	38,4	5,09	0,2	-0,75	3050	отжиг
Титан ВТ22	58	6,7	0,15	-0,83	4300	отжиг

Показатели напряженного состояния и величины предельных деформаций рассчитывались по методу сеток, предварительно нанесенных на испытуемые образцы.

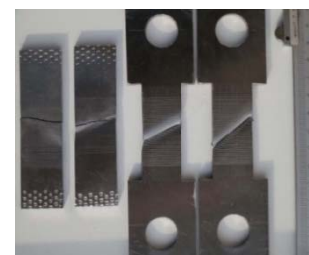
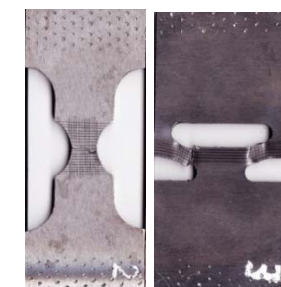
Некоторое неудобство использования показателя напряженного состояния ζ состоит в его уникальности для каждого материала, что обуславливает невозможность визуального сравнения различных диаграмм пластичности на одной плоскости $\zeta - e_i$. При необходимости

такого рода сравнений следует воспользоваться формулами перерасчета [5]. Так, на рис. 2, для примера, показаны расчетные точки характеристик пластичности алюминиевого сплава АД33Т1, а также диаграммы пластичности, построенные по аппроксимациям (2) и (4).



пунктир – аппроксимация (2); сплошные линии – аппроксимация (4), пересчитанная на аргумент η

а



б

Рис. 1. Диаграммы пластичности сталей У12, У8 и титанового сплава ВТ6 (а) и испытанные образцы (б)

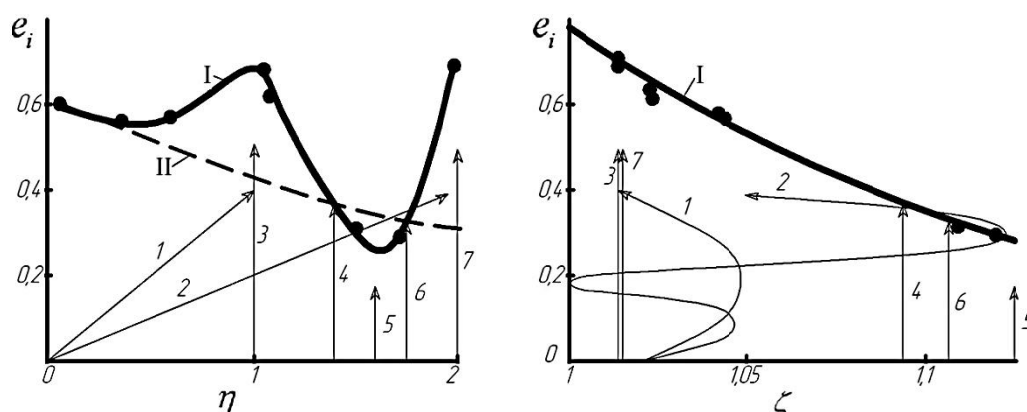


Рис. 2. Диаграммы пластичности алюминиевого сплава АД33Т1 и пути деформирования в координатах аргумента η и ζ ($k_2 = -0,063$, $k_3 = -0,761$):

I, II – диаграммы пластичности (аппроксимации (4) и (2) соответственно); 1–7 – пути деформирования

Можно отметить высокую степень корреляции рассчитанных диаграмм с экспериментом (0,95–0,98), а также слабую зависимость коэффициента k_3 от вида металла (сплава), исследованных в работе ($k_3 = -0,75...-0,85$). Гипотетически, это позволяет сократить количество необходимых экспериментов для построения диаграммы пластичности в области положительного гидростатического давления до 3-х. На наш взгляд, наилучшими испытаниями являются опыты на сдвиг (кручение), на растяжение плоских образцов с выкружками или гладких цилиндрических, на плоский изгиб и двухосное растяжение по пробе Эриксона.

Использование предложенного показателя напряженного состояния ζ и соответствующей аппроксимации (4) в моделях вязкого разрушения состоит в том, что вместо традиционной функции диаграммы пластичности $e_p(\eta)$ следует применять функцию диаграммы $e_p(\zeta)$. Например, для простых путей деформирования следует использовать критерий Г. А. Смирнова-Аляева, который преобразуется к виду:

$$\Psi_{\eta} = \frac{e_i^*}{e_p(\eta)} < 1 \quad \Rightarrow \quad \Psi_{\zeta} = \frac{e_i^*}{e_p(\zeta)} < 1. \quad (5)$$

При сложных путях деформирования имеем зависимость на основе критерия В. Л. Колмогорова:

$$\Psi_{\zeta} = \int_0^{e_i^*} \frac{de_i}{e_p(\zeta)} < 1. \quad (6)$$

При сложных путях деформирования, в которых наблюдается смена знака производной в пространстве показатель напряженного состояния – накопленные деформации, может быть использована модифицированная зависимость Деля – Огородникова – Нахайчука:

$$\Psi_{\zeta} = \int_0^{e_i^*} (1 + 0.2 \cdot f) \cdot \frac{e_i^{0.2 \cdot f}}{[e_p(\zeta)]^{1 + 0.2 \cdot f}} de_i < 1. \quad (7)$$

Для сравнения результатов, полученных с применением диаграмм пластичности (3) и (4), выполним расчет СИЗП для ряда путей деформирования (рис. 2) для алюминиевого сплава АД33Т1. Таким образом, получим значения СИЗП по критериям (5)–(7), которые обозначим Ψ_{η} и Ψ_{ζ} (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение расчета СИЗП

Путь деформирования по рис. 2	Расчеты СИЗП и погрешностей								
	Ψ_{η}	Ψ_{ζ}	$\Delta, \%$	Ψ_{η}	Ψ_{ζ}	$\Delta, \%$	Ψ_{η}	Ψ_{ζ}	$\Delta, \%$
1	0,92	0,57	-61	0,85	0,64	-33	0,96	0,68	-41
2	1,26	0,56	-125	0,92	0,87	-5,7	1,1	0,85	-29
3	1,19	0,73	-63	1,19	0,73	-63	1,19	0,73	-63
4	1	1	0	1	1	0	1	1	0
5	0,5	0,68	26	0,5	0,68	26	0,5	0,68	26
6	1	1	0	1	1	0	1	1	0
7	1,69	0,73	-131	1,69	0,73	-131	1,69	0,73	-131

При простых путях деформирования использование моделей, построенных на основе показателей η и ζ , дает расчет одинаковых значений степени использования запаса пластичности (СИЗП) в точках пересечения диаграмм пластичности и соответствующих путей деформирования (рис. 2, графики 4, 6). Расчет СИЗП при простых путях деформирования с использованием аргумента η для сплава АД33Т1 может, как существенно занижать действительные значения Ψ_{η} (рис. 2, графики 3, 7), так и завышать их (рис. 2, график 5).

Использование критериев деформируемости, учитывающих историю нагружения, также приводит к расхождению результатов. При этом разница может достигать до 2-х раз, как в большую сторону, так и в меньшую, что зависит от вида пути деформирования и особенностей диаграмм конкретного материала.

ВЫВОДЫ

Использование показателя напряженного состояния (2) позволяет аппроксимировать диаграммы пластичности монотонными функциями с существенно меньшим отклонением от опытных данных, чем при аргументе в виде показателя η . Установлено, что $\bar{k}_1 > |\bar{k}_3| > |\bar{k}_2|$, при этом коэффициент \bar{k}_3 для исследованных сплавов равен -0,76...-0,85. Для получения диаграммы пластичности в положительной области гидростатических давлений рекомендуется провести 4 испытания для разных схем напряженного состояния: на чистый сдвиг (или кручение), на растяжение плоских образцов с выкружками (или гладких цилиндрических образцов), на изгиб (при плоском деформированном состоянии) и на двухосное равномерное растяжение. Использование диаграммы пластичности $e_p(\zeta)$ в деформационных критериях для процессов, протекающих в области положительных гидростатических давлений, может существенно уточнить значение СИЗП – до 2-х раз, что в свою очередь позволяет снизить прогнозируемую вероятность разрушения (до 50 %) в процессах ХПД, параметры которых рассчитаны с минимальными запасами по деформациям разрушения, и расширить технологические возможности процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В. А. Огородников. – К. : УМК ВО, 1989. – 152 с.
2. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.
3. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
4. Параметры модели, формирующей карту материала в процессах обработки давлением / В. А. Огородников [и др.] // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА. – 2011. – № 1 (26). – С. 91–98.
5. Грушко А. В. Параметр напряженного состояния, учитывающий свойства материала, и его влияние на пластичность / А. В. Грушко // Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія «Машинобудування». – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – № 64. – С. 220–226.
6. Огородников В. А. Энергия. Деформации. Разрушение : (задачи автотехнической экспертизы) / В. А. Огородников, В. Б. Киселев, И. О. Сивак. – Винница : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
7. Грушко О. В. Феноменологічні аспекти створення карт матеріалів для процесів холодного пластичного деформування / О. В. Грушко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 85–95.

REFERENCES

1. Ogorodnikov V. A. Deformiruemost' i razrushenie metallov pri plasticheskom formoizmenenii / V. A. Ogorodnikov. – K. : UMK VO, 1989. – 152 s.
2. Kolmogorov V. L. Naprjazhenija, deformacii, razrushenie / V. L. Kolmogorov. – M. : Metallurgija, 1970. – 229 s.
3. Del' G. D. Tehnologičeskaja mehanika / G. D. Del'. – M. : Mashinostroenie, 1978. – 174 s.
4. Parametry modeli, formirujushhej kartu materiala v processah obrabotki davleniem / V. A. Ogorodnikov [i dr.] // Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Kramatorsk : DGMA. – 2011. – № 1 (26). – S. 91–98.
5. Grushko A. V. Parametr naprjazhennogo sostojanija, uchityvajushhij svojstva materiala, i ego vlijanie na plastichnost' / A. V. Grushko // Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu Ukraini «KPI». Serija «Mashinobuduvannja». – K. : NTUU «KPI», 2012. – № 64. – S. 220–226.
6. Ogorodnikov V. A. Jenergija. Deformacii. Razrushenie : (zadachi avtotehničeskoj jekspertizy) / V. A. Ogorodnikov, V. B. Kiselev, I. O. Sivak. – Vinnica : UNIVERSUM-Vinnicja, 2005. – 204 s.
7. Grushko O. V. Fenomenologični aspekti stvorennja kart materialiv dlja procesiv holodnogo plastičnogo deformuvannja / O. V. Grushko // Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2013. – № 1 (34). – S. 85–95.

Грушко А. В. – д-р техн. наук., проф. ВНТУ

ВНТУ – Винницкий национальный технический университет, г. Винница.

E-mail: grushko@svitonline.com