

УДК 621.73.011.001.5

Р. И. Сивак¹, к.т.н., И.О.Сивак², д.т.н.

1 – Винницкий национальный аграрный университет

2 – Винницкий национальный технический университет

ПЛАСТИЧНОСТЬ МЕТАЛЛОВ ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

Розроблено методику побудови поверхні граничних деформацій та метод оцінки пластичності металів при формозмінненні в умовах об'ємного напруженого стану.

The method of construction of surface of maximum deformations and method of estimati of plasticity of metals is developed at formed in the conditions of the by volume tense state.

При значительных пластических деформациях большим изменениям деформаций отвечают малые изменения напряжений. Поэтому использование для оценки предельного формоизменения критериев разрушения, в которых накладываются ограничения на напряжения приводит к большим погрешностям. Более достоверные результаты при оценке вероятности разрушения дают деформационные критерии. Такие критерии, основанные на скалярном описании процесса накопления повреждений, получили развитие в работах [1 - 5] и широко применяются для оценки деформируемости материалов при обработке давлением.

При холодной пластической деформации пластичность зависит, в основном, от вида напряженного состояния и закона его изменения. Процесс нагружения в микрообъеме сплошной среды можно задать траекторией в пространстве главных напряжений. Однако, такое описание истории нагружения не всегда оправдано, так как необходимо проводить исследования для неограниченного количества траекторий. В работах Г. Д. Деля и В. А. Огородникова [1, 2] показано, что траектория нагружения зависит от условий формоизменения и не зависит от механических характеристик материала, если в качестве координат выбраны безразмерные инвариантные характеристики напряжённо-деформированного состояния. Поэтому для задания траектории нагружения в общем случае сложного деформирования нами предлагается ввести в качестве координат два безразмерных показателя напряженного состояния и степень деформации. Для обоснования выбора таких координат представим тензор напряжений σ_{ij} в виде [6, 7].

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma \delta_{ij}, \quad (1)$$

где $\sigma = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ - среднее напряжение,

S_{ij} - компоненты девиатора напряжений,

σ_u - интенсивность напряжений.

Кроме того используем известные соотношения

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{2S_2 - S_1 - S_3}{S_1 - S_3} = \frac{3S_2}{S_1 - S_3}, \quad (2)$$

$$S_1 + S_2 + S_3 = 0, \quad 2\sigma_u^2 = (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2, \quad (3)$$

где μ_σ - параметр Надаи-Лоде.

После решения системы уравнений (2) и (3) в главных компонентах S_i , находим

$$S_1 = -\frac{\sigma_u}{3} \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad S_2 = \frac{\sigma_u}{3} \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}, \quad S_3 = -\frac{\sigma_u}{3} \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \quad (4)$$

Поделим левую и правую части уравнения (1) на σ_u

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_u} = \frac{S_{ij}}{\sigma_u} + \frac{\sigma}{\sigma_u} \delta_{ij}. \quad (5)$$

В пространстве главных напряжений (5) с учётом (4) принимает вид

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_u} = \frac{1}{3} \left(\eta - \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right), \quad \frac{\sigma_2}{\sigma_u} = \frac{1}{3} \left(\eta + \frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right), \quad \frac{\sigma_3}{\sigma_u} = \frac{1}{3} \left(\eta - \frac{3 + \mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}} \right), \quad (6)$$

где $\eta=3\sigma/\sigma_u$ - показатель жесткости напряженного состояния.

Из анализа (6) следует, что траекторию нагружения можно задавать в трёхмерном пространстве с координатами e_u, η, μ_σ с помощью кривой заданной в параметрической форме $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$. Зависимости $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$ называют путями деформирования. Если пути деформирования $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$ известны и задана кривая течения $\sigma_u(e_u)$, то используя (6) легко получить траекторию нагружения в пространстве главных напряжений.

Из (6) также следует, что в общем случае сложного напряжённого состояния зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния необходимо задавать поверхностью предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$. При построении этой поверхности для несжимаемых материалов, в качестве меры пластичности используют накопленную к моменту разрушения пластическую деформацию

$$e_p = \int_0^{t_p} \dot{\epsilon}_u d\tau, \quad (7)$$

где $\dot{\epsilon}_u$ - интенсивность скоростей деформаций,

t_p - время деформирования до разрушения.

Основное преимущество подхода, при котором траектория нагружения задаётся не в шестимерном пространстве напряжений, а в пространстве безразмерных показателей η и μ_σ состоит в том, что в последнем случае вид траектории нагружения однозначно определяется условиями формоизменения, характерными для исследуемого процесса и практически не зависит от механических свойств деформируемого металла.

Таким образом, наличие результатов исследований деформируемости металла в каком-нибудь процессе, позволят оценить пригодность любого другого металла для реализации аналогичного процесса, если только в банке данных есть кривая течения и поверхность предельных деформаций исследуемого материала.

Из анализа соотношений (6) следует, что при плоском напряженном состоянии показатели η и μ_σ зависимые [7]. В особенности важным является случай, когда равняется нулю среднее напряжение ($\sigma_2=0$), тогда из (6) находим

$$\eta = -\frac{2\mu_\sigma}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \quad (8)$$

В этом случае зависимость пластичности от схемы напряженного состояния описывается предельной кривой $e_p(\eta)$, которая известна как диаграмма пластичности. Кривая $e_p(\eta)$ получается от пересечения поверхности предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ с поверхностью (8). Необходимо отметить, что поверхность (8) очень близкая к плоскости $\eta=-\mu_\sigma$. В данном случае показатель η изменяется в интервале $-1 \leq \eta \leq 1$, а параметр Надаи-Лоде от 1 до -1.

Второму случаю отвечает $\sigma_1=0$, то есть имеет место плоское сжатие и

$$\eta = \frac{\mu_\sigma - 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \quad (9)$$

Зависимость пластичности от схемы напряженного состояния описывается предельной кривой $e_{p1}(\eta)$, которая есть результатом пересечения поверхностей $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ и (9). Показатель η меняется при этом в интервале $-2 \leq \eta \leq -1$.

Третий случай плоского напряженного состояния отвечает плоскому растяжению ($\sigma_3=0$), тогда

$$\eta = \frac{\mu_\sigma + 3}{\sqrt{\mu_\sigma^2 + 3}}. \quad (10)$$

В данном случае зависимость пластичности от схемы напряженного состояния можно описать предельной кривой $e_{p3}(\eta)$, которая получается при пересечении поверхности $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ с поверхностью (10). Показатель η в этом случае изменяется в интервале $1 \leq \eta \leq 2$. Таким образом, зависимость пластичности от схемы напряженного состояния при плоском напряженном состоянии можно описать тремя предельными кривыми, методика построений которых приведена в работе [6].

Если $2 < \eta < -2$ или не выполняются условия (8), (9), (10), то имеет место объемное напряженное состояние и расчет использованного ресурса пластичности необходимо вести по критериям, в которых зависимость пластичности от схемы напряженного состояния задается поверхностью предельных деформаций [6, 7].

Для построения поверхности предельных деформаций, которая описывает зависимость предельной деформации e_p от показателей напряженного состояния η и μ_σ необходимо реализовать условия, при которых $\eta = \text{const}$ и $\mu_\sigma = \text{const}$ в течение всего процесса нагружения вплоть до разрушения при разных комбинациях η и μ_σ .

Наиболее достоверными являются опыты в камере высокого давления [8, 9]. Однако испытания в условиях всестороннего сжатия, проводимые в камере высокого давления, не всегда возможны и требует применения нестандартного оборудования.

Поэтому после анализа зависимостей $e_p(\eta, \mu_\sigma)$, полученных экспериментально в камере высокого давления для сталей 40X, Р6М5, Р18 и дюралюминия Д1Т в работах [8, 9], нами предложено аппроксимировать экспериментальные поверхности предельных деформаций зависимостью [6]

$$e_p(\eta, \mu_\sigma) = e_p(0,0) \exp(\lambda_2 \mu_\sigma - \lambda_1 \eta), \quad (11)$$

где $\lambda_1 = \ln \frac{e_p(-1,0)}{e_p(0,0)}, \lambda_2 = \ln \frac{e_p(0,1)}{e_p(0,0)}$

$e_p(0,0), e_p(-1,0), e_p(0,1)$ – предельные деформации при $\eta=0, \mu_\sigma=0; \eta=-1, \mu_\sigma=0; \eta=0, \mu_\sigma=1$, соответственно.

В результате обработки экспериментальных зависимостей $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ для исследованных материалов получены следующие значения коэффициентов аппроксимации: для стали 40X $e_p(0,0)=0,82, \lambda_1=0,4, \lambda_2=0,36$; для стали Р6М5 $e_p(0,0)=0,3, \lambda_1=0,75, \lambda_2=0,65$; для стали Р18 $e_p(0,0)=0,33, \lambda_1=0,8, \lambda_2=0,6$; для дюралюминия Д1Т $e_p(0,0)=0,22, \lambda_1=0,68, \lambda_2=0,6$.

Из анализа аппроксимации (11) и известной аппроксимации диаграммы пластичности В.А. Огородникова [1]

$$e_p(\eta) = e_p(0,0) \exp(-\lambda \eta), \quad (12)$$

где $\lambda = \ln \frac{e_p(1,1)}{e_p(0,0)}$,

$e_p(1,1)$ – предельная деформация при $\eta=1, \mu_\sigma=1$

следует, что параметры λ и λ_1, λ_2 зависимы. На рис. 1 приведены зависимости λ_1 и λ_2 от λ , полученные на основе обработки результатов исследований влияния схемы напряженного состояния при объемном напряженном состоянии на пластичность для сталей 40X, Р6М5, Р18 и дюралюминия Д1Т. Для исследованных интервалов значений $-1 \leq \eta \leq 1, -1 \leq \mu_\sigma \leq 1$ эти зависимости оказались линейными.

Поэтому, если нет возможности получить поверхность предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$ на основе специальных экспериментальных исследований, для построения такой поверхности можно использовать диаграмму пластичности $e_p(\eta)$. При этом значения параметров аппроксимации в уравнении (11) определяются по графическим зависимостям $\lambda_1(\lambda)$ и $\lambda_2(\lambda)$ (рис. 1). Полученные таким способом значения λ_1 и λ_2 подставляем в уравнение (11) и получаем поверхность $e_p(\eta, \mu_\sigma)$, которая описывает зависимость пластичности от схемы напряженного состояния при объемном напряженном состоянии. Если имеет место объемное напряженное состояние, то в критериях деформируемости зависимость пластичности от схемы напряженного состояния задается поверхностью предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$, а для оценки влияния напряженного состояния и закона его изменения на пластичность частицы материала процесс деформации задается траекторией нагружения $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$.

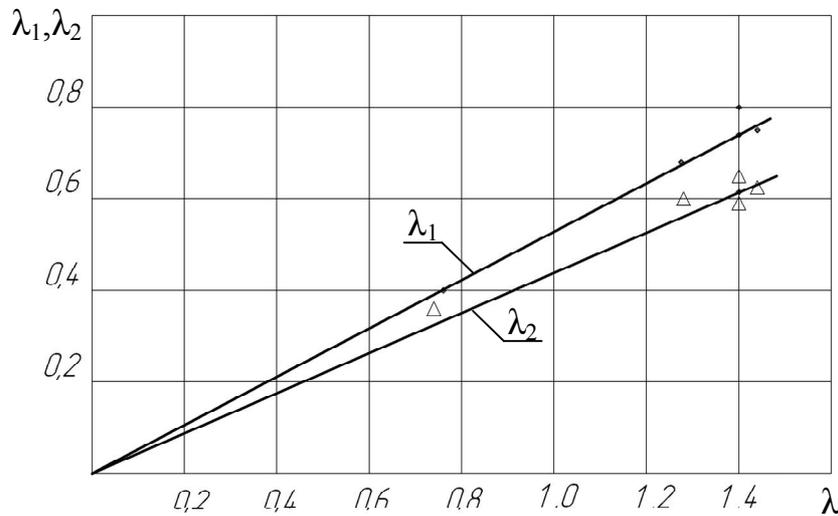


Рис. 1. Зависимости λ_1 и λ_2 от λ при объемном напряженном состоянии

Тогда для траекторий малой кривизны, без изломов, использованный ресурс пластичности можно рассчитать по формуле [6]

$$\psi = \int_0^{e_u^*} \frac{de_u(\eta, \mu_\sigma)}{e_p(\eta, \mu_\sigma)} \quad (13)$$

где $\psi=0$ в начальном состоянии частицы материала и $\psi=1$ при появлении макротрещины.

Формула (13) получена на основе гипотезы о линейном законе накопления повреждений [3, 4] и удовлетворительно описывает экспериментальные результаты, если $d\eta$ и $d\mu_\sigma$ не меняют знак.

Для траекторий нагружения средней кривизны, без изломов, а также при изменении знаков $d\eta$ и $d\mu_\sigma$ в процессе нагружения оценку использованного ресурса пластичности необходимо вести по критерию, который позволяет учитывать нелинейность закона накопления повреждений [6, 7]

$$\Psi = \int_0^{e_u^*} m \frac{e_u(\eta, \mu_\sigma)^{m-1}}{e_p(\eta, \mu_\sigma)^m} de_u \quad (14)$$

где
$$m = 1 + a \frac{d\eta}{de_u} - b \frac{d\mu_\sigma}{de_u},$$

а и b – экспериментальные коэффициенты, которые зависят от материала.

Критерии разрушения металлов (13), (14) при больших пластических деформациях в условиях объемного напряженного состояния прошли апробацию при решении ряда технологических задач [6, 7]. Их точность оказалась на уровне точности расчетов других параметров процессов обработки металлов давлением.

Выводы

В работе получили дальнейшее развитие методы оценки деформируемости металлов при сложном нагружении. Обоснован выбор безразмерных инвариантных характеристик напряженно-деформированного состояния e_u , η , μ_σ . Предложена упрощенная методика построения поверхности предельных деформаций $e_p(\eta, \mu_\sigma)$.

Список литературы

1. Огородников В.А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении / В.А.Огородников. – К.: УМК ВО, 1989. – 152 с.
2. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д.Дель. - М.: Машиностроение, 1978. - 174 с.
3. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов / Г.А.Смирнов-Аляев. - Л.: Машиностроение, 1968. - 272 с.
4. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение / В.Л.Колмогоров. - М: Металлургия, 1970. – 229 с.
5. Калпин Ю.Г. Оценка деформационной способности металлов в процессах холодной объемной штамповки / Ю.Г.Калпин, Ю.К.Филиппов, Н.Н.Безубов // Технология, организация и экономика машиностроительного производства.- М.: 1988.- вып. 10. - С.1-16.
6. Сивак И.О. Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии / И.О.Сивак, Е.И.Коцюбивская // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні: тематичн. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА. – 2007. – С. 73 - 76.
7. Огородников В.А. Энергия. Деформации. Разрушение (задачи автотехнических экспертизы): Монография / В.А.Огородников, В.Б.Киселёв, И.О.Сивак; Винницкий национальный технический университет. – Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 204 с.
8. Огородников В.А. Влияние гидростатического давления на пластичность при сложном нагружении / В.А.Огородников, И.О.Сивак // Физика и техника высоких давлений. - 1983. - №11. - С. 33 - 37.
9. Костава А.А. Условие разрушения материалов, деформируемых при высоких гидростатических давлениях / А.А.Костава, И.О.Сивак // Физика и техника высоких давлений. - 1983. - №13. - С. 3 - 6.