

## О ВЛИЯНИИ КРИВИЗНЫ ТРАЕКТОРИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ НА ЕГО ПЛАСТИЧНОСТЬ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В. А. ОГОРОДНИКОВ, И. А. ДЕРЕВЕНЬКО, Р. И. СИВАК

Винницкий национальный технический университет

При исследовании цилиндрических образцов из сталей Р9, Р12, Р18, подвергшихся одновременному кручению с растяжением, выявлено, что при сложном нагружении на пластичность металла существенно влияет скорость накопления и залечивания поврежденных в виде производных от показателей напряженного состояния. Установлено, что в этих условиях, когда первая и вторая производные от безразмерного показателя напряженного состояния растут, усиливается воздействие кривизны путей деформирования частиц материала на пластичность. По полученным результатам выбраны феноменологические критерии разрушения, которые дают достоверный результат оценки использованного ресурса пластичности в технологических процессах обработки металлов давлением.

**Ключевые слова:** деформируемость металлов, сложное нагружение, путь деформирования, траектория нагружения, траектория деформаций, история деформирования, накопление повреждений.

Оценка деформируемости металлов и сплавов без разрушения – комплексная проблема, решение которой базируется на феноменологической теории механики сплошных сред. С помощью современных представлений о механизме разрушения не удается определить степень деформаций, когда в условиях сложного нагружения металлы разрушаются.

Таким образом, следуя известной терминологии [1], одной из основных характеристик траектории такого нагружения является ее кривизна. При таком описании истории нагружения необходимо реализовать неограниченное количество траекторий, поэтому применить этот подход в феноменологических критериях разрушения становится невозможным. Кроме того, при одних и тех же условиях формоизменения траектории нагружения будут различными [2]. Тогда нагружение частиц материала нужно исследовать в шестимерном пространстве, что методически сложно. Поэтому введем новое пространство – накопленная интенсивность деформаций и безразмерные показатели напряженного состояния [2–4], что позволит смоделировать процессы обработки давлением [5].

Цель настоящей работы – выбрать феноменологические критерии разрушения и оценить предельное формоизменение с учетом влияния кривизны траекторий деформирования частиц материала на пластичность в условиях сложного нагружения при обработке металлов давлением.

**Методы исследований.** Процесс нагружения рассмотрим в пространстве безразмерных показателей напряженного состояния. Представим тензор напряжений в виде [6]

$$\sigma_{ij} = \tau S_{ij}^0 + \sigma \delta_{ij}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – гидростатическое давление;  $S_{ij}^0$  – компоненты направляющего тензора;  $S_{ij}$  – компоненты девиатора напряжений;  $\tau$  – его интенсивность;  $\tau^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$ ;  $S_1, S_2, S_3$  – главные компоненты девиатора напряжений.

Поделив левую и правую части выражения (1) на интенсивность напряжений  $\sigma_u$ , получим:

$$\frac{\sigma_{ij}}{\sigma_u} = \sqrt{\frac{2}{3}} S_{ij}^0 + \frac{\eta}{3} \delta_{ij}, \quad (2)$$

где  $\eta$  – показатель напряженного состояния, который отражает влияние относительного гидростатического давления (первый инвариант тензора напряжений) на пластичность [7].

В пространстве главных напряжений выражение (2) имеет вид

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

Таким образом, траектории нагружения можно задавать в трехмерном пространстве с координатами  $e_u, \eta, \mu_\sigma$  или  $e_u, \eta, \chi$ . Зависимости  $\eta(e_u), \mu_\sigma(e_u)$ , а также  $\chi(e_u)$  назовем “путями деформирования” [2]. Параметр  $\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1$  (Надаи–

Лоде) характеризует вид напряженного состояния. При наложении на напряженное состояние равноосного растяжения или сжатия он не изменяется. Показатель

$\chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}}$  описывает влияние третьего инварианта тензора напряжений на

пластичность в условиях объемного напряженного состояния. Накопленная деформация  $e_u = \int_0^t \dot{\epsilon}_u \cdot d\tau$  является мерой пластичности (параметр Удквиста). Из

уравнения (3) следует также, что при  $\eta = \text{const}$  и  $\mu_\sigma = \text{const}$  нагружение будет простым, а при  $\eta = \eta(e_u), \mu_\sigma = \mu_\sigma(e_u)$  – сложным [8].

Главное преимущество задания траекторий нагружения в пространстве безразмерных показателей напряженного состояния  $\eta, \mu_\sigma, \chi$  в том, что здесь вид пути деформирования однозначно определяют условия формоизменения, характерные для исследуемого процесса, т.е. он практически не зависит от механических свойств материала [5, 9]. Тогда обработку давлением можно воспроизвести на модельных материалах. Но в этом случае необходимо располагать кривыми упрочнений  $\sigma_u = f(\epsilon_u)$  и диаграммами пластичности  $\epsilon_p = f(\eta), \epsilon_p = f(\mu_\sigma), \epsilon_p = f(\chi)$ .

Первая производная от показателей напряженного состояния  $\left( \frac{d\eta}{de_u}, \frac{d\chi}{de_u}, \frac{d\mu_\sigma}{de_u} \right)$  характеризует скорость накопления повреждений (или их залече-

чивания, в зависимости от знака производной), а вторая  $\left( \frac{d^2\eta}{de_u^2}, \frac{d^2\chi}{de_u^2}, \frac{d^2\mu_\sigma}{de_u^2} \right)$  –

кривизну путей деформирования. Скорость накопления повреждений или их залечивания входит в виде функций в критерий [2]

$$\Psi = \int_0^{e_u^*} \left( 1 + 0,2 \arctg \left( \frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right) \right) \frac{[e_u(\eta, \chi)]^{0,2 \arctg \left( \frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right)}}{[e_p(\eta, \chi)]^{1+0,2 \arctg \left( \frac{d\eta}{de_u} + \frac{d\chi}{de_u} \right)}} de_u \leq 1, \quad (4)$$

с помощью которого оценивают использованный ресурс пластичности либо предельную степень деформации при обработке давлением в условиях объемного напряженного состояния при сложном нагружении. Этот критерий содержит первые производные от показателей напряженного состояния, характеризующие скорость накопления повреждений. Рассмотрим их влияние на накопление повреждений и их залечивание.

Известны данные [2], полученные при испытании цилиндрических образцов из материалов, не образующих “шейку” при одноосном растяжении. Это быстрорежущие стали Р6М5, Р12 и стали 40Х, 45, которые подвергали совместному кручению и растяжению в условиях изменяющегося гидростатического давления (до 2000 МПа). При этом реализовали программы деформирования, обеспечивающие либо постоянство показателей напряженного состояния, либо их изменение по различным траекториям деформирования. Если  $\eta = \text{const}$  и  $\chi = \text{const}$  в момент разрушения,  $e_u = f(\eta)$  образует диаграмму пластичности. Если реализовать пути деформирования материала в виде прямых, наклоненных к оси деформаций (рис. 1), следуя функции

$$\eta = Be_u, \quad (5)$$

где  $B = 1, 4; 2; 2,86; 5$ , то разрушение наступит не в момент встречи с диаграммой пластичности, а позже. Иными словами, если  $\frac{d\eta}{de_u} > 0$ , то происходит залечивание

дефектов. Если  $\frac{d\eta}{de_u} < 0$  (рис. 2), то разрушение наступает до встречи прямых с диаграммой пластичности, т.е. образование дефектов более интенсивно.

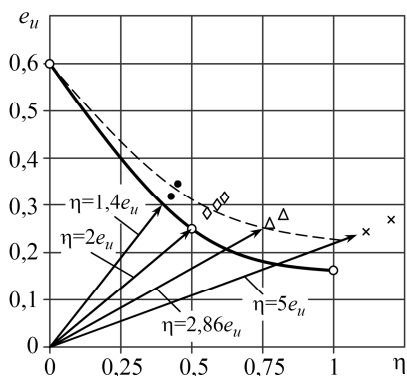


Рис. 1. Fig. 1.

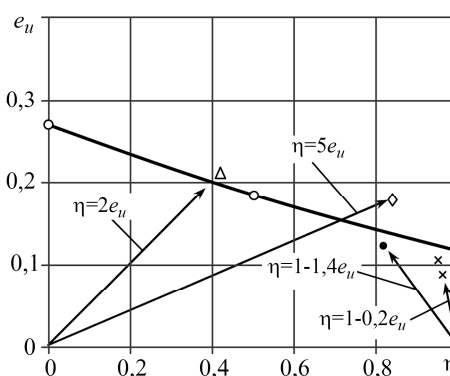


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 1. Влияние вида путей деформирования на скорости накопления повреждений и пластичность стали Р12 [2]: пунктирная линия – расчет по критерию (4);  
 —○— — диаграмма пластичности ( $\eta = \text{const}$ );  
 ●, ◇, ×, △ – разрушение при сложном деформировании.

Fig. 1. Influence of the shape of strain paths on damage accumulation rate and plasticity of P12 steel [2]: dashed line – calculation by criterion (4);  
 —○— — plasticity diagram ( $\eta = \text{const}$ ); ●, ◇, ×, △ – fracture under complex deformation.

Рис. 2. Влияние вида путей деформирования на пластичность стали Р9 [2] (обозначения см. на рис. 1).

Fig. 2. Influence of the shape of strain paths on the P9 steel plasticity [2] (designations as in Fig. 1).

В работе [2] введен коэффициент влияния истории деформирования (первой и второй производных от показателей напряженного состояния по интенсивности деформаций) на предельную степень деформации:

$$w = \frac{e_p(\eta)}{e_p(\eta = \text{const})}, \quad (6)$$

где  $e_p(\eta)$  – предельная степень деформации с учетом истории деформирования;  $e_p$  – предельная степень деформации при  $\eta = \text{const}$ . С возрастанием первой производной от показателя напряженного состояния влияние коэффициента  $w$  усиливается. При  $\frac{d\eta}{de_u} > 5$  для стали Р18 он достигает 1,8.

Установили также, что производные путей деформирования существенно влияют на накопление повреждений и их залечивание, а следовательно, на меру пластичности. Что касается путей деформирования, близких к  $\eta = \text{const}$  (траектории малой кривизны), то предельные деформации можно оценить по критерию Г. А. Смирнова–Аляева [10]

$$\psi = \frac{e_u}{e_p(\eta)} \leq 1, \quad (7)$$

который не учитывает влияния истории деформирования на пластичность.

При изменении первой производной в пределах  $0,5 \leq \frac{d\eta}{de_u} \leq 1,75$ , а кривизны

пути деформирования – в пределах  $0,25 \leq \frac{d^2\eta}{de_u^2} \leq 2$  удовлетворительную точность дает критерий В. Л. Колмогорова [11]:

$$\psi = \int_0^{e_p^*} \frac{d\bar{e}_u}{[e_p(\bar{e}_u)]} \leq 1. \quad (8)$$

Если  $\frac{d\eta}{de_u} \geq 2$ , а кривизна пути деформирования  $\frac{d^2\eta}{de_u^2} \geq 3$ , наибольшую

точность дает критерий (4).

**Результаты и их обсуждение.** Приведем пример технологического процесса, в котором частицы металла при деформации образуют траектории средней кривизны, а пути деформирования описывают кривые в виде квадратичных парабол, при этом показатель напряженного состояния  $\eta$  изменяется от  $-2$  (двухосное сжатие) до  $-5$  (всестороннее сжатие). Таким процессом является ротационное обжатие, когда заготовку деформируют коническими сходящимися штампами, обеспечивающими всестороннее пульсирующее давление (рис. 3).

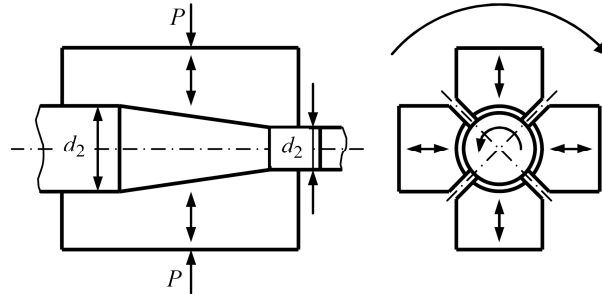
Благоприятная схема напряженного состояния при таком нагружении позволяет обрабатывать заготовки из малопластичных труднодеформируемых металлов и сплавов. Тем не менее, при определенных условиях деформирования в центре заготовок из малопластичных материалов часто образуются трещины. Поэтому необходимо предотвратить брак от разрушения с помощью расчетного аппарата феноменологической теории деформируемости, в основу которой положены критерии деформируемости.

В критериях (4), (7), (8) учтена информация о путях деформирования частиц материала в опасной области деформируемой заготовки, а также диаграмма плас-

тичности  $e_p = f(\eta)$ . В работе [12] получены пути деформирования  $\eta = f(e_u)$  частиц материала заготовок в опасной области для различных обжатий:  $\delta = 0,135; 0,24; 0,305; 0,37$ .

Рис. 3. Схема деформирования заготовки при ротационном обжатии.

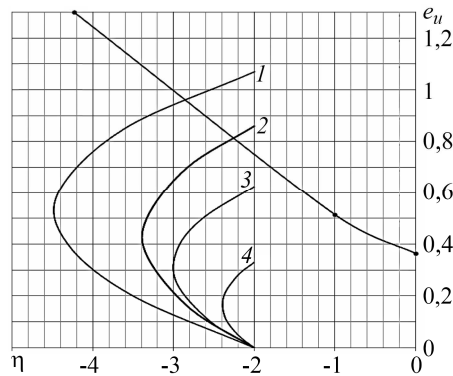
Fig. 3. Strain pattern of the billet during rotary reduction process.



На рис. 4 диаграмму пластичности дюралюминия Д1-Т сопоставили с путями деформирования  $\eta = f(e_u)$  частиц материала заготовок, подвергнутых различным обжатиям (кривые 1–4).

Рис. 4. Пути деформирования частиц дюралюминия Д1-Т вдоль оси симметрии заготовок при ротационном обжатии [2]: 1–4 – пути деформирования при обжатиях  $\delta = 0,37; 0,305; 0,240; 0,135$ .

Fig. 4. Strain paths of the particle, made of duralumin Д1-Т, along the symmetry axis of billets during rotary forging process [2]: 1–4 – strain paths for different reduction types  $\delta = 0.37; 0.305; 0.240; 0.135$ .



Использованный ресурс пластичности  $\psi$  по критерию (4) составлял 1,05, по критерию (7) – 1,621, по критерию (8) – 0,981. При максимальном обжатии  $\delta = 0,37$  в центре заготовки обнаружили трещину, что подтверждает расчет по критерию (4).

Таким образом, для процессов, сопровождающихся формоизменением, когда производные от пути деформирования частиц материала лежат в пределах  $-5 \leq \frac{d\eta}{de_u} \leq 5$ , наибольшую сходимость с экспериментом дает критерий (4).

## ВЫВОДЫ

Предложено рассматривать процессы пластического деформирования в пространстве накопленная интенсивность деформаций–безразмерные показатели напряженного состояния. В этих координатах накопление повреждений или их залечивание зависят от скорости накопления повреждений. В условиях сложного нагружения, когда скорость накопления повреждений в виде первой производной

от показателя напряженного состояния  $\frac{d\eta}{de_u} \geq 5$ , а вторая производная  $\frac{d^2\eta}{de_u^2} > 1$ ,

наиболее близкие к эксперименту результаты дает критерий (4), учитывающий влияние истории деформирования на пластичность.

**РЕЗЮМЕ.** Під час досліджень циліндричних зразків зі сталей P9, P12, P18, підданих одночасному закруту з розтягом, виявлено, що за складного навантаження на їх пластичність суттєво впливає швидкість накопичення пошкоджень і їх заліковування у вигляді похідних від показників напруженого стану. Встановлено, що за складного навантаження,

коли перша і друга похідні від безрозмірного показника напруженого стану зростають, посилюється вплив кривизни шляхів деформування часток матеріалу на пластичність. За отриманими результатами вибрано феноменологічні критерії руйнування, що дають достовірніший результат під час оцінки величини використаного ресурсу пластичності в технологічних процесах обробки металів тиском.

*SUMMARY.* Experimental studies of the plasticity of cylindrical samples from P9, P12, and P18 steels, which were exposed to joint torsion with tensile, showed that under conditions of complex loading the rate of accumulation of damages and their healing in the form of derivatives from the indicators of the stress state significantly influences the plasticity. It is shown that in the conditions of complex loading, when the first and the second derivatives from the dimensionless index of tension state grow, the influence of the curvature of the deformation paths of the material particles on plasticity increases. The obtained results allowed the selection of the phenomenological criteria of fracture, which give more reliable evaluation results of the used plasticity resource in the technological processes of metal processing by pressure.

1. *Ильюшин А. А.* Об одной теории длительной прочности // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1967. – № 3. – С. 21–35.
2. *Огородников В. А.* Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Виш. шк., 1983. – 176 с.
3. *Continuous Failure Prediction Model for Nonlinear Load Paths in Successive Stamping and Crash Processes* / H. Dell, H. Gese, L. Kessler, H. Werner, and H. Hooputra // SAE-paper 2001-01-1131, New Sheet Steel Products and Sheet Metal Stamping (SP-1614). SAE 2001 World Congress, Michigan, March 5–8, 2001. – P. 113–122.
4. *A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminium extrusions* / H. Hooputra, H. Gese, H. Dell, and H. Werner // Int. J. of Crashworthiness. – 2004. – 9, № 5. – P. 449–463.
5. *Огородников В. А., Грушко А. В., Деревенько И. А.* Моделирование процессов обработки давлением на основе гипотезы о силовом и кинематическом подобии параметров деформирования // Обработка металлов давлением. – 2012. – № 4(34). – С. 46–52.
6. *Сивак И. О., Коцюбивская Е. И.* Пластичность металлов при объемном напряженном состоянии // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ–Хмельницький, 2007. – С. 73–76.
7. *Огородников В. А., Деревенько И. А., Алиева Л. И.* Ресурс пластичности металлов при холодном объемном формоизменении. – Винница: ВНТУ, 2016. – 176 с.
8. *Ogorodnikov V., Del G., and Spiridonov L.* Plasticity of Metal Subjected to Complex Loading // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Mashinostr. – 1974. – № 12. – P. 22–26.
9. *Ogorodnikov V. A., Perlov V. Ye., and Voytkiv S. V.* Control of technological heredity in the process of sheet-metal stamping in order to increase the constructions safety // Вісник нац. техн. ун-ту “Київський політехнічний інститут”. Сер. “Машинобудування”. – 2010. – № 60. – P. 133–137.
10. *Смирнов-Аляев Г. А.* Механические основы пластической обработки металлов. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
11. *Колмогоров В. Л.* Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
12. *Огородников В. А., Шестаков Н. А.* Деформируемость металла при ротационном обжатии // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. – № 9. – С. 147–152.

Получено 10.10.2017