

## РАЗДЕЛ II ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.01:541

Сивак Р. И.

### ВЛИЯНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ИСПОЛЬЗОВАННЫЙ РЕСУРС ПЛАСТИЧНОСТИ

Развитая пластическая деформация всегда является неравномерной как на микро- так и на макроуровнях. Микроскопическая неоднородность естественна и определяется механизмом атомных перемещений, сама модель дислокационного механизма пластической деформации является неравномерной вследствие нарушения кристаллографической структуры. При выполнении определенных условий можно реализовать равномерную макродеформацию, хотя и в этом случае деформация на микроуровне будет неоднородной. Неравномерность пластической деформации порождает неоднородность внутренних силовых полей, которые влияют как на интенсивность накопления повреждений, так и на их залечивание. Необходимо отметить, что процессы пластической деформации и накопления повреждений взаимосвязаны, то есть повреждения влияют на поведение материала, а история нагружения на повреждения [1, 2]. Вследствие этого металлы, деформированные в условиях неравномерного распределения пластических деформаций, приобретают качественно новые свойства, многие из которых представляют практический интерес. В частности, при неоднородной деформации увеличивается пластичность [3] и имеет место измельчение зерна [4].

Для оценки пластичности металла при пластическом деформировании используют, в основном, известные критерии деформируемости В. Л. Колмогорова, Г. Д. Деся и В. А. Огородникова [5–7]. Однако в этих критериях не учитывается влияние неоднородности напряженно-деформированного состояния на пластичность. В данной работе неоднородность НДС будем характеризовать неравномерностью пластических деформаций.

Целью работы является повышение точности расчетов использованного ресурса пластичности  $\psi$  в процессах обработки металлов давлением на основе оценки совместного влияния схемы напряженного состояния и неравномерности распределения пластических деформаций на величину  $\psi$ .

В общем случае среднее значение градиента пластических деформаций макрочастицы характеризуется производными от компонент тензора деформаций  $\varepsilon_{ij}$  по координатам. Одной из инвариантных характеристик неравномерности распределения пластических деформаций является дивергенция тензорного поля. В случае прямолинейных ортогональных осей координат дивергенция тензора деформаций определяется как вектор с компонентами:

$$\begin{aligned}
 (divE)_x &= \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{xz}}{\partial z}; \\
 (divE)_y &= \frac{\partial \varepsilon_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial z}; \\
 (divE)_z &= \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial z}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Необходимо отметить, что вектор (1) определяет направление, в котором скорость изменения поля тензора деформаций имеет наибольшее значение. Так как длина вектора является инвариантом, то величину:

$$A_1 = \sqrt{(\operatorname{div} E)_x^2 + (\operatorname{div} E)_y^2 + (\operatorname{div} E)_z^2} \quad (2)$$

можно использовать для количественной оценки неравномерности деформаций.

Кроме того, неравномерность пластических деформаций будем характеризовать градиентом степени пластической деформации  $\operatorname{grad} e_u$ . В данной работе для оценки зависимости приращения предельной деформации  $\Delta e_p$  от неравномерности распределения пластических деформаций использованы экспериментальные зависимости, полученные в работах [3, 8]. Разная степень неравномерности распределения пластических деформаций достигалась за счет изменения размеров поперечного сечения образцов при чистом изгибе и путём изменения диаметров образцов при кручении.

В обоих случаях величину  $\operatorname{grad} e_u$  определяли по формуле:

$$\operatorname{grad} e_u = \frac{\partial e_u}{\partial r}. \quad (3)$$

Экспериментальные зависимости прироста предельной деформации  $\Delta e_p$  от характеристик неравномерности  $A_1$  и  $\operatorname{grad} e_u$  практически совпадают [3, 8]. Такой результат говорит о том, что в качестве количественной характеристики неравномерности можно использовать как  $A_1$ , так и  $\operatorname{grad} e_u$ . Исходя из этого в данной работе на рис. 1, 2 приведены только зависимости  $\Delta e_p(\operatorname{grad} e_u)$  для неравномерного растяжения и кручения. Необходимо отметить, что материал образца практически не влияет на характер зависимости  $\Delta e_p(\operatorname{grad} e_u)$ . Поэтому на рис. 1, 2 приведены средние значения приращения предельной деформации для четырех исследованных материалов: сталей Р6М5, Р18, стали 45 и дюралюминия Д1Т.

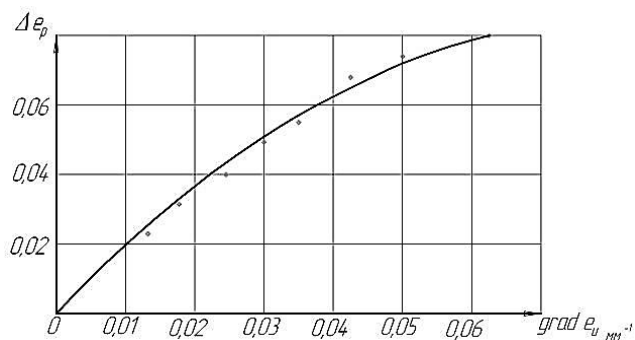


Рис. 1. Зависимость  $\Delta e_p$  от  $\operatorname{grad} e_u$ , при  $\eta = 1, \mu_\sigma = -1$

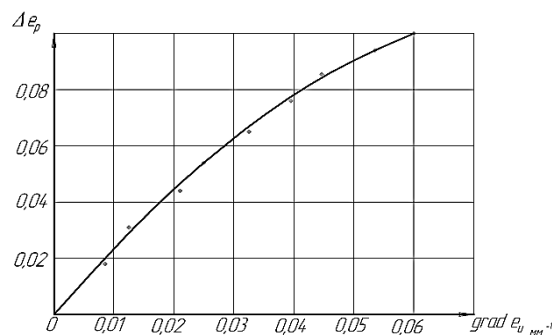


Рис. 2. Зависимость  $\Delta e_p$  от  $\operatorname{grad} e_u$ , при  $\eta = 0, \mu_\sigma = 0$

Как уже отмечалось, характер зависимости  $\Delta e_p(\operatorname{grad} e_u)$  слабо зависит от материала образца, но существенно зависит от схемы напряженного состояния. Это следует из сравнения результатов, приведенных на рис. 1 и рис. 2. При изменении  $\operatorname{grad} e_u$  от 0 до  $0,06 \text{ мм}^{-1}$  для неравномерного растяжения ( $\eta = 1, \mu_\sigma = -1$ ) прирост предельной деформации  $\Delta e_p = 0,078$ , а при изменении  $\operatorname{grad} e_u$  от 0 до  $0,06 \text{ мм}^{-1}$  для неравномерного сдвига ( $\eta = 0, \mu_\sigma = 0$ ) прирост предельной деформации составляет  $\Delta e_p = 0,1$ .

Зависимость  $\Delta e_p$  от  $\operatorname{grad} e_u$  при неравномерном растяжении (рис. 1) аппроксимировали формулой:

$$\Delta e_p(1) = 0,6(\operatorname{grad} e_u)^{0,68}, \quad (4)$$

а при неравномерном сдвиге (рис. 2) зависимость  $\Delta e_p$  от  $\operatorname{grad} e_u$  аппроксимировали кривой:

$$\Delta e_p(0) = (\operatorname{grad} e_u)^{0,8}. \quad (5)$$

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для оценки величины использованного ресурса пластичности в процессах обработки давлением, для которых характерна значительная неоднородность распределения пластических деформаций, необходимо учитывать влияние как схемы напряженного состояния, так и совместное влияние схемы напряженного состояния и  $grade_u$ .

В данной работе для оценки влияния  $grade_u$  на величину использованного ресурса пластичности  $\psi$  предлагается следующая методика. Для оценки величины  $\psi$  будем использовать критерий:

$$\psi = \int_0^{e_u} \frac{e_u^{m-1}}{(e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u))^m} d e_u, \quad (6)$$

где  $e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u)$  – поверхность предельных деформаций, в которой учтено влияние  $grade_u$ ;

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

$a, b$  – эмпирические константы, которые зависят от материала заготовки.

При этом для учета влияния неоднородности распределения пластических деформаций на величину предельной деформации  $\Delta e_p$  поверхность  $e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u)$  определяется зависимостью:

$$e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u) = e_p(\eta, \mu_\sigma) + \Delta e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u), \quad (7)$$

где  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  – поверхность предельных деформаций, построенная по известной методике [9],

$\Delta e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u)$  – приращение предельной деформации, обусловленное  $grade_u$ , при данной схеме напряжённого состояния.

Для определения  $\Delta e_p$  предлагается следующая методика. По известным значениям  $grade_u$  определяется  $\Delta e_p(1)$  при растяжении по формуле (4) и при кручении  $\Delta e_p(0)$  по формуле (5). Для получения зависимости  $\Delta e_p$  от показателя напряженного состояния при заданном  $grade_u$  используем аппроксимацию В. А. Огородникова [6]:

$$\Delta e_p(\eta) = \Delta e_p(0) \exp(-\lambda \eta), \quad (8)$$

где 
$$\lambda = \ln(\Delta e_p(0) / \Delta e_p(1)). \quad (9)$$

Чтобы определить зависимость  $\Delta e_p$  от двух показателей напряженного состояния  $\eta$  и  $\mu_\sigma$  использовали методику, приведенную в работе [9]. Для этого по формуле (8) рассчитываем прирост предельной деформации  $\Delta e_p(-1)$  при  $\eta = -1$  и определяем параметр:

$$\lambda = \ln \frac{\Delta e_p(-1)}{\Delta e_p(0)}. \quad (10)$$

По приведенным в работе [9] зависимостям  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  от  $\lambda$  находим  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  для полученного значения  $\lambda$  и аппроксимируем прирост пластической деформации  $\Delta e_p$  при заданном  $grade_u$  зависимостью:

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

Полученное по формуле (11) значение  $\Delta e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u)$  используем для определения  $e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u)$  по формуле (7).

Предложенная методика использована для расчета величины использованного ресурса пластичности в поверхностном пластически деформированном слое металла при поверхностном пластическом деформировании [10]. При ППД пластическая деформация происходит

только в малом объеме металла, очаге деформации, форма и размеры которого зависят от соотношения размеров и геометрии поверхности детали и инструмента. Кроме того, в очаге деформации имеют место большие градиенты пластических деформаций, которые оказывают влияние на неоднородность упрочнения и на процесс накопления повреждений.

При использовании разработанной методики для оценки зависимости величины прироста пластической деформации  $\Delta e_p$  от  $grade_u$  необходимо учитывать, что при поверхностном пластическом деформировании  $grade_u$  постоянно изменяется. Для учета влияния этого изменения на  $\Delta e_p$  необходимо использовать формулы (4) и (5) для расчета соответствующих значений  $\Delta e_p(0)$  и  $\Delta e_p(1)$  и формулу (11) для расчёта  $\Delta e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u)$ .

При расчёте использованного ресурса пластичности  $\psi$  считали, что  $\psi=1$  при появлении шелушения поверхности. Это условие использовали для оценки точности расчётов  $\psi$  по критерию (6). При этом расхождение рассчитанных значений  $\psi$  с экспериментальными результатами не превышало 15 %. Однако при изменении направления движения инструмента относительно поверхности детали сказывается немонотонность нагружения и погрешность превышает 50%, поэтому применять критерий (6) нежелательно.

### ВЫВОДЫ

Предложена методика оценки влияния неоднородности распределения пластических деформаций на пластичность металла с учётом комплексного влияния схемы напряжённого состояния и градиента степени пластической деформации  $grade_u$ . Так как приращение степени пластической деформации  $\Delta e_p$  зависит как от  $grade_u$ , так и от схемы напряженного состояния, то для количественной оценки влияния  $grade_u$  на величину использованного ресурса пластичности  $\psi$ , поверхность предельных деформаций  $e_p(\eta, \mu_\sigma)$  в критерии деформируемости (6) заменена поверхностью предельных деформаций  $e_p(\eta, \mu_\sigma, grade_u)$ , что позволило более точно оценить влияние неоднородности распределения пластических деформаций на пластичность металла.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивак Р. И. Пластичность металлов при сложном нагружении / Р. И. Сивак, И. О. Сивак // Вісник НТУУ «КПІ». – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – № 60. – С. 129–132. – (Серія «Машинобудування»).
2. Сивак Р. И. Оценка предельных деформаций при немонотонном нагружении / Р. И. Сивак, И. Г. Савчинский, И. О. Сивак // Вісник НТУУ «КПІ». – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – № 62. – С. 247–250. – (Серія «Машинобудування»).
3. Огородников В. А. Зависимость пластичности металлов от градиента пластических деформаций / В. А. Огородников, И. О. Сивак // Изв. АН СССР. Металлы. – 1978. – № 6. – С. 169–174.
4. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов, Д. А. Павлик, В. Ф. Малышев. – Минск : Наука и техника, 1994. – 232 с.
5. Колмогоров В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 229 с.
6. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. – Киев : Вища школа, 1983. – 175 с.
7. Дель Г. Д. Технологическая механика / Г. Д. Дель. – М. : Машиностроение, 1978. – 174 с.
8. Сивак И. О. Влияние неравномерности напряжённого состояния на пластичность / И. О. Сивак, С. И. Сухоруков, Е. И. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'нськ : ДДМА, 2003. – С. 221–225.
9. Сивак И. О. Поверхность предельной пластичности / И. О. Сивак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : тем. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 272–274.
10. Сивак І. О. Зміцнення поверхневого шару металу у разі вдавлювання кульки / І. О. Сивак, Т. В. Ярошенко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 4 (91). – С. 54–58.

Сивак Р. И. – канд. техн. наук, доц. ВНАУ.

ВНАУ – Винницкий национальный аграрный университет, г. Винница.

E-mail: sivak\_r\_i@mail.ru

Статья поступила в редакцию 18.05.2012 г.