

УДК 621.771

## ОЦЕНКА ГРАНИЧНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗАГОТОВОК ПРИ СЛОЖНОМ НАГРУЖЕНИИ

*Нахайчук О.В.*

*Вінницький національний аграрний університет*

*В работе приведенный подход к оцениванию предельного формообразования заготовок в условиях сложной нагрузки и немоного деформирования. Показано, что на основе развития математической теории пластичности и феноменологической теории деформируемости является возможным прогнозирование технологической наследственности заготовок без проведения трудоемких экспериментальных исследований.*

*The tendency of the evaluation of maximum forming of purveyances in the conditions of the difficult loading and unmonotonous deformation are resulted in work. It is rotined that on the basis of development of mathematical theory of plasticity and phenomenological theory is possible prognostication of technological heredity of purveyances without the leadthrough of labour intensive experimental researches.*

### **Введение**

В обработке металлов давлением широкое применение нашли феноменологические теории, в основе которых лежит гипотеза о зависимости пластичности от истории нагружения, которая задается в пространстве напряжений. Характеристиками напряжённого состояния могут быть показатели, позволяющие исследовать траектории нагружения не в пространстве тензора напряжений, а в пространстве его инвариантов. Представляет практический интерес оценивать возможности применения диаграмм пластичности, построенных в условиях плоского или линейного напряжённых состояний для оценки деформируемости металлов, деформированных в условиях объёмного напряжённого состояния. Решение такой задачи связано с трудностями, возникающими при проведении специальных экспериментов в камерах высокого давления. В наших исследованиях показано, что зависимость пластичности от схемы напряжённого состояния можно характеризовать двумя показателями напряженного состояния, а также обосновано, что при объёмном напряжённом состоянии необходимо учитывать влияние на пластичность третьего инварианта тензора напряжений [1, 2, 3].

### **Основная часть**

При традиционных решениях технологических задач процесс нагружения задаётся шестью функциями времени  $\sigma_{ij}(t)$  или функциями  $S_{ij}(t)$  и независимой функцией времени  $\sigma(t)$ . В связи с изложенным для задания траектории в пространстве напряжений возможно использование двух безразмерных показателей напряженного состояния:

$$\eta = \frac{I_1(T_\sigma)}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u}; \quad \chi = \frac{\sqrt[3]{I_3(T_\sigma)}}{\sqrt{3I_2(D_\sigma)}} = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1\sigma_2\sigma_3}}{\sigma_u} \quad (1)$$

Основное преимущество подхода, при котором траектория нагружения задаётся в пространстве безразмерных показателей  $\eta$  и  $\chi$  заключается в том, что её вид однозначно определяется условиями формоизменения, характерными для исследуемого процесса и

практически не зависит от механических свойств деформированного металла. Это даёт широкие возможности для компьютерного моделирования и выбора оптимальных материалов изделий, для чего необходимо знать параметры коэффициентов аппроксимации кривой течения и поверхности граничной пластичности. К тому же, такой подход значительно сокращает количество трудоёмких экспериментальных исследований.

На величину граничной деформации  $e_p$  существенное влияние оказывает третий инвариант тензора напряжений  $I_3(T_\sigma)$ . Пластичность материала, деформируемого в условиях гидростатического давления, можно представить граничной поверхностью, построенной в координатах  $e_p = e_p(\eta, \chi)$ . Поверхность, построенную в указанных координатах, можно определить как объёмную диаграмму пластичности. При проектировании технологических процессов формообразования заготовок в условиях объёмного напряжённого состояния и сложного нагружения необходимо учитывать влияние различных инвариантов тензора напряжений на ресурс пластичности, нелинейность накопления повреждений и немонотонность нагружения. Оценка деформируемости заготовок может быть осуществлена, если известны зависимости показателей напряжённого состояния и накопленной интенсивности деформаций в наиболее опасных (с точки зрения разрушения) областях заготовок от величины характерной деформации и других параметров процесса, оказывающих определяющее влияние на напряжённо-деформированное состояние.

В качестве примера можно рассмотреть исследованный нами процесс формирования внутреннего шлицевого профиля методом обжатия трубной заготовки на жёсткой оправке [3]. Установлено, что наиболее опасной областью контакта является область касания клина шлица оправки и пластической области, в которой показатели (1) достигают наибольшего (с учётом знака) значения, следовательно, она является наиболее жёсткой. В процессе исследований изучалось перемещение точек опасных областей в физической плоскости посредством моделирования на составных образцах и в плоскости показателей  $\bar{e}_u; \eta; \chi$ , компоненты которых рассчитывались на различных стадиях формообразования заготовок.

Для исследования влияния третьего инварианта тензора напряжений был проведён сравнительный анализ расчётов использованных ресурсов пластичности по критерию Г. Д. Деля, В. А. Огородникова, В. Г. Нахайчука, основанном на нелинейной теории накопления повреждений [4]:

$$\psi = \int_0^{e_u} n \frac{e_u^{n-1}}{e_p(\eta)^n} de_u = 1; \quad n = 1 + 0,2 \arctg \frac{d\eta}{de_u}, \quad (2)$$

а также по критерию Г. Д. Деля [5], который учитывает направленность характера повреждений и содержит тензорную модель накопления повреждений:

$$\psi_{ij} = \int_0^{e_u} \left( 1 - a + 2a \frac{e_u}{e_p(\eta)} \right) \beta_{ij} \frac{de_u}{e_p(\eta)};$$
$$\psi_{ij} \psi_{ij} = 1. \quad (3)$$

На рис. 1. представлена диаграмма пластичности стали 20Х и пути деформирования опасных областей при внедрении шлицевого штампа (подробное описание полученных результатов представлено в работе [3]). На рис. 2 – расхождения результатов

вычислений  $\psi(\chi)$ ,  $\psi(\eta)$ ,  $\psi_{ij}(\chi)$   $\psi_{ij}(\eta)$ . На рис. 3. представлены плоскости деформирования и граничные поверхности, которые показывают на достаточный запас пластичности.

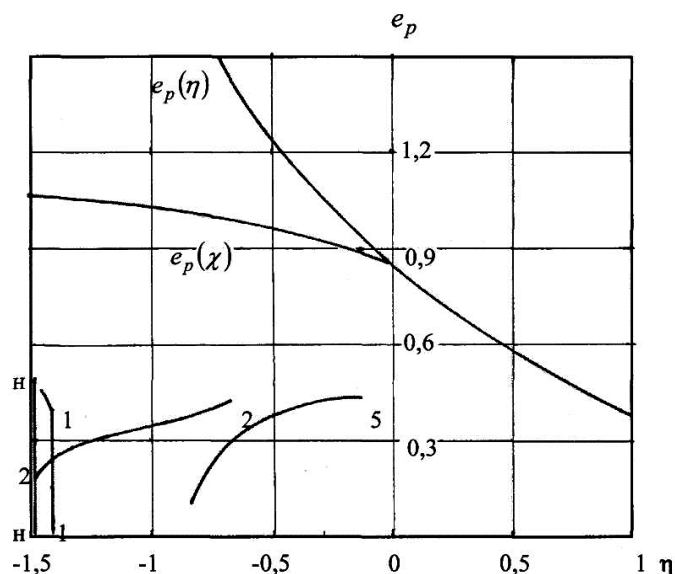


Рис. 1. Диаграмма пластичности стали 20X и пути деформирования опасных областей при внедрении шлицевого штампа

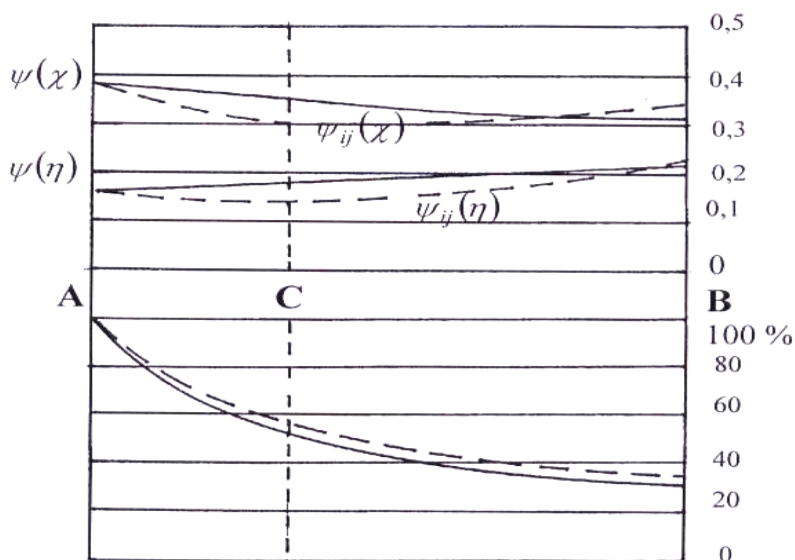
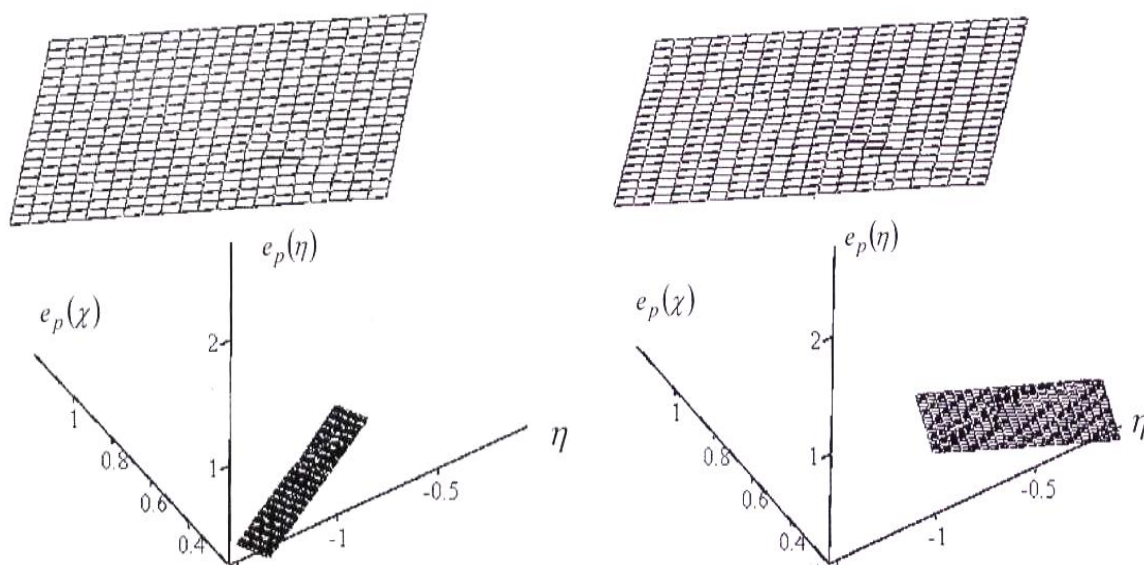


Рис. 2. Расхождение результатов расчётов  $\psi(\chi)$ ,  $\psi(\eta)$ ,  $\psi_{ij}(\chi)$ ,  $\psi_{ij}(\eta)$



**Рис. 3. Плоскости деформирования областей, близких к разрушению  $\bar{e}_u = f(\eta, \chi)$  и граничные поверхности  $e_p = f(\eta, \chi)$**

### Выводы

1. Из полученных данных следует, что использованный ресурс пластичности, рассчитанный с учетом влияния  $I_3(T_\sigma)$ , оказался при разных значениях  $\eta$  выше значений  $\psi$ , рассчитанных без учета влияния  $I_3(T_\sigma)$ . При этом, величина расхождения зависит от показателей  $\eta$  и  $\chi$ . С уменьшением  $\eta$  (ростом гидростатического давления) увеличивается влияние  $I_3(T_\sigma)$  на величину граничных деформаций.

2. При определенных уровнях гидростатического давления, когда его значение по модулю приближается к пределу текучести материала на сдвиг, влияние  $I_3(T_\sigma)$  уменьшается. Дальнейшее увеличение давления, вероятно, приведёт к возрастанию его влияния.

### Литература

1. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. – К.: Вища школа, 1983. – 175 с.
2. Сивак И. О., Огородников В. А., Сивак Р. И., Мысловский А. Я. Ресурс пластичности заготовок при последовательных операциях пластического формоизменения // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії. – Краматорськ: ДГМА. – 2000. – С. 29-33.
3. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: Монографія. / О.В. Нахайчук, О.О. Розенберг, В.А. Огородніков, А.Д. Крицький, В.В. Мельниченко, С.Ф. Студенець. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 158 с.
4. Дель Г. Д., Огородников В. А., Нахайчук В. Г. Критерий деформируемости металлов при обработке давлением // Изв. вузов. Машиностроение. – 1975. - № 4. С 135–140.
5. Дель Г. Д. Пластичность деформированного металла // Физика и техника высоких давлений. – 1983. - № 11. – С. 28-32.