

УДК 539.3

## ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОТИВОРЕЧИВОСТИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛОВ

© 2011 г.

*А.Н. Супрун, Т.М. Вежелис*

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

suprun@nngasu.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

По мере обогащения экспериментальной механики новыми опытными данными о последовательной поверхности текучести (subsequent yield surface – поверхность текучести в процессе эволюции) со все возрастающей точностью измерений стали обнаруживаться необъяснимые противоречия в виде принципиальных качественных различий практических результатов, получаемых на казалось бы идентичных материалах, образцах и методиках испытаний. Образовался разрыв между теорией пластичности, опирающейся на концепцию о существовании поверхности текучести, и экспериментальной механикой, не гарантирующей получения однозначных данных для идентификации математических моделей пластичности. В результате исследований установлено, что основной причиной опытных противоречий является неучитываемое влияние на эксперимент эффекта релаксации деформационного упрочнения.

*Ключевые слова:* последовательная поверхность текучести, релаксация деформационного упрочнения, частичная разгрузка, полная разгрузка.

Анализ известных экспериментальных результатов построения последовательных поверхностей текучести ( $S$ ) на одном образце при комнатной температуре показывает, что все множество противоречий при опытном изучении  $S$  в векторном пространстве  $\Sigma$  напряжений разделяется на два основных вида. К первому – геометрическому виду – отнесем противоречия по форме  $S$ , которые наиболее контрастно проявились в исследованиях [1] и [2], в которых проводились опыты на растяжение образцов из достаточно близкой по химическому составу малоуглеродистой стали. Форма, технология подготовки образцов к испытаниям и методика построения поверхности текучести практически идентичны. Однако в [1] поверхность текучести выпуклая и гладкая, а в [2] имеет ярко выраженные заострение и вогнутость. Попытка в [3] объяснить этот феномен опирается на уязвимый для критики аргумент. Ко второму – топологическому виду – отнесем противоречия, связанные с положением  $S$  относительно точки  $O \in \Sigma$ , соответствующей ненагруженному состоянию материала. При зондировании границ текучести после полной разгрузки образца для большинства экспериментальных поверхностей  $O \in V \cup S$ , где  $V$  – ограниченная поверхностью  $S$  область пространства  $\Sigma$  (см. [1, 2, 4] и др.). Имеются многочисленные опытные результаты (см. [4, 5] и др.), полученные при больших деформациях и частичной разгрузке, где  $O \notin V \cup S$  (см.  $S_1$  на рис. 1). Очевидно, что в этом случае при

полной разгрузке должно быть  $O \in V$  (см.  $S_2$  на рис. 1). Это подтверждают эксперименты [4]. Вместе с тем в [6] дается описание экспериментов, где  $O \in V$  (см.  $S_3$  на рис. 1). Топологические противоречия в экспериментах (вида  $S_2 - S_3$ ) не получили физического объяснения [7].

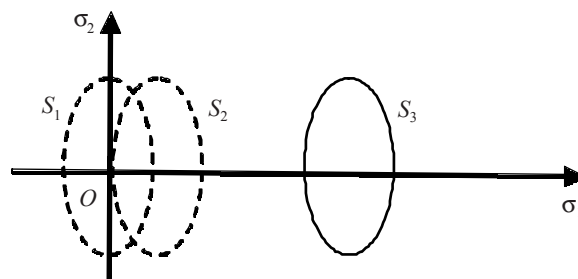


Рис. 1. Схематическое изображение положений поверхности текучести  $S$  после больших деформаций и частичной ( $S_1$ ) или полной разгрузок (вида  $S_2$  в [4] или  $S_3$  в [6])

Известно, что физические процессы, имеющие место в поликристаллических материалах после пластического деформирования и разгрузки, сопровождаются разупрочнением, обусловленным неустойчивостью дефектной структуры и стремлением системы к минимуму внутренней энергии. Процесс разупрочнения при разгрузке при феноменологическом подходе к описанию этого явления был назван [8, 9] эффектом релаксации тензора остаточных микронапряжений, который в  $\Sigma$  связывался с центром сферической по-

верхности текучести. Последующие исследования [10, 11] показали, что процесс разупрочнения сопровождается не только перемещением, но и формоизменением последующей поверхности текучести. В связи с этим такому явлению было дано более общее название [11] – эффект релаксации деформационного упрочнения. Высказывались предположения [9, 12], что эффект релаксации является причиной построения ложного заострения в точке нагружения на экспериментальной поверхности текучести, а также и вогнутости тыльной части кривой [12]. Поскольку переходные процессы в поликристаллических материалах затрудняют регистрацию опытных показателей, в получивших распространение методиках экспериментального изучения последовательных поверхностей текучести выработались традиции не включать точку конечного нагружения в состав множества опытных граничных точек и предусматривать какой-либо из вариантов выдержки образца перед началом зондирования границы текучести (при постоянной нагрузке [1], при достигнутой деформации [4], при частичной [7] или полной [2] разгрузках). Такой подход привел к некоторому сглаживанию геометрических противоречий, но, как показали исследования [10], не позволил полностью устранить экспериментальные качественные противоречия. В связи с этим есть основания полагать, что проявление эффекта релаксации деформационного упрочнения может являться главной причиной экспериментальной противоречивости последовательных поверхностей текучести. Для проверки этого были выполнены численные эксперименты.

Математическая модель эволюции поверхности текучести в пространстве Ильюшина [13] при эксперименте на растяжение образца была принята в виде гиперэллипсоида  $G$  вращения вокруг оси  $\sigma_1$ :

$$\frac{(\sigma_1 - a_3)^2}{a_1^2} + \frac{(\sigma_2 - a_3)^2}{a_2^2} - 1 = 0, \quad (1)$$

где  $a_1$  – полуось  $G$  в направлении растяжения,  $a_2$  – поперечная полуось,  $a_3$  – расстояние до центра  $G$ .

Для параметров  $a_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) был принят наследственный характер зависимости от неупругой деформации растяжения  $\epsilon$ :

$$a_i = a_i^0 + f_{i1}(\epsilon) + \int_0^t L(t - \tau) df_{i2}[\epsilon(\tau)], \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где  $f_{i1}, f_{i2}, L(t)$  – материальные функции, принятые в виде  $f_{ij}(\epsilon) = c_{ij1}\epsilon + c_{ij2}\epsilon^3$  при  $i = 1, 2, 3$  и  $j = 1, 2$ , кроме  $f_{31}(\epsilon) = c_{311}\epsilon^{c_{312}}$ ,  $L(t) = \exp(-\gamma t)$ ;  $c_{ijk}$  ( $k = 1, 2$ ),  $a_i^0, \gamma$  – материальные константы, при-

чем  $a_1^0 = a_2^0, a_3^0 = 0$  – константы начальной сферической поверхности текучести.

Заметим, что при построении поверхности текучести после одноступенчатого деформирования образца достаточно применить линейный вариант (2) ( $c_{ij2} = 0$  для  $i = 1, 2, 3$  и  $j = 1, 2$ , кроме  $c_{312} = 1$ ).

Разработана компьютерная программа, моделирующая эволюцию поверхности текучести (1), (2) по данным экспериментов с недостаточностью информации по временным факторам. Программа определяет параметры модели на допустимом множестве недостающих временных показателей экспериментов, минимизируя сумму квадратичных отклонений между экспериментальными точками границ текучести и теоретическими точками, полученными по (1), (2), руководствуясь известными данными по методике их зондирования в опытах. Численные эксперименты [11], выполненные по результатам опытов [2, 4, 6], показали, что существуют такие временные показатели реализованных авторами экспериментов, которые при использовании принятой модели эффекта релаксации деформационного упрочнения дали пренебрежимо малое отклонение между опытными и теоретическими точками границы. Примечательно, что для поверхностей текучести, указанных в [6] для трех ступеней деформирования ( $\epsilon = 2\%, 6\%, 12\%$ ) как при полной, так и при частичной разгрузках, была построена модель (1), (2) при едином комплекте параметров.

*Исследование выполнено по Аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы» Министерства образования и науки РФ.*

#### Список литературы

1. Michno M.J., Findley W.M. // J. Eng. Mater. Technol. Trans. ASME. Ser. H. 1975. Vol. 97. P. 25–32.
2. Gupta N.K., Laurent H.A. // ZAMM. 1983. Bd. 63. H. 10. S. 497–504.
3. Findley W.M., Michno M.J. // ZAMM. 1987. Bd. 67. H. 7. S. 309–312.
4. Khan A.S., Kazmi R., Pandey A., Stoughton T. // Int. J. Plasticity. 2009. Vol. 25. P. 1611–1625.
5. Phillips A. // Proc. Int. Symp. Foundational of Plasticity, 2. Noordhoff Int. Pub., 1974. P. 193–233.
6. Shiratori E., Ikegami K., Kaneko K., Sugibayashi T. // Preprint of Japan Soc. Mech. Engrs. 1975. P. 41–44.
7. Ishikawa H. // Int. J. Plasticity. 1997. Vol. 13, No. 6–7. P. 533–549.
8. Кадашевич Ю.И., Новожилов В.В. // Мех. деформ. сред. Межвуз. сб. / Куйбышев. 1977. Вып. 2. С. 3–32.
9. Бережной И.А., Ивлев Д.Д. // ДАН СССР. 1965. Т. 163, №3. С. 595–598.

10. Супрун А.Н. // Изв. АН СССР. МТТ. 1991. №4. С. 180–185.

11. Супрун А.Н., Вежелис Т.М. // XIV Междунар. науч.-техн. конф. Иваново, 2007. С. 559–564.

12. Супрун А.Н. // X семинар. Таргуск. ун-т, 1985. С. 117–118.

13. Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей мат. теории. М.: АН СССР, 1963. 272 с.

#### **PROBLEMS OF EXPERIMENTAL INCONSISTENCIES IN THE SUBSEQUENT YIELD SURFACES OF METALS**

*A.N. Suprun, T.M. Vezhelis*

With the new experimental data relating to subsequent yield surface obtained through increasing accuracy of measurements in Mechanics there appeared unexplained inconsistencies in the form of principal qualitative differences in practical results for seemingly identical materials, samples and test methods. Hence, there appeared a gap between the theory of plasticity based on the concept of the yield surface and experimental mechanics, which cannot ensure unambiguous data for the identification of mathematical models of plasticity. The study has shown that the main cause of experimental inconsistencies is the effect of work hardening relaxation not taken into account in the experiments.

*Keywords:* subsequent yield surface, work hardening relaxation, partial unloading, complete unloading.