

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА С РОСТОМ СТЕПЕНИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Г. А. ДОЩИНСКИЙ, Н. В. СИТНИКОВА

(Представлена научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Развитие современной механики материалов характеризуется стремлением к более полному учету свойств реальных материалов, расширению и усовершенствованию их расчетных моделей. Классические феноменологические модели упругой и пластической сред, несмотря на широкое применение в инженерных приложениях, нередко не вмещают существенных явлений, наблюдаемых в процессах деформирования реальных металлических материалов. Наибольшие неувязки такого рода обнаруживаются в поведении металлов за пределами упругости. Накапливаемые экспериментальные данные по изучению поведения реальных металлов являются основой для усовершенствования как физических теорий, так и механико-математических моделей упругопластических сред.

В данной работе рассматриваются некоторые возможности сближения теоретического описания с действительным поведением металлов при учете взаимосвязанных явлений пластического упрочняющегося материала: анизотропности упрочнения, эффекта Баушингера, изменения формы поверхности текучести.

Исследованиями Баушингера еще в 90-х годах прошлого столетия на малоуглеродистых сталях было отмечено существенное снижение предела текучести при сжатии, после предварительного растяжения. Позднее это явление, получившее название эффекта Баушингера, изучалось и на других металлах и было признано характерным свойством пластической деформации упрочняющихся тел.

Весьма вероятной причиной подобного явления можно предполагать возникновение остаточных напряжений в металле после предварительного растяжения, которые, накладываясь на рабочие напряжения, приводят к снижению предела текучести в процессе последующего сжатия. Однако модель упругопластического упрочняющегося тела не предполагает при разгрузке однородной среды каких-либо остаточных напряжений. Возможности теоретического предопределения эффекта Баушингера в рамках механических моделей могут быть получены на путях учета возможной неоднородности пластически деформированного тела.

Более соответствующей физической картине деформации поликристаллического металла является не условие интегрального однородного состояния всех кристаллов, обычно принимаемое теорией, а различное

состояние отдельных зерен, часть которых может еще оставаться даже в упругом состоянии, в то время когда другие получили необратимые различные искажения. Подобный подход вносит существенные трудности в математическое представление локальных условий совместности деформаций. Однако можно полагать, что условия совместности обеспечиваются при этом групповым поведением в некоторых объемах, включающих определенное количество субэлементов, в виде упруго или пластически продеформировавшихся зерен кристаллов. Попытки к подобному подходу, во всяком случае, уже предпринимались в ряде работ [1] и др.

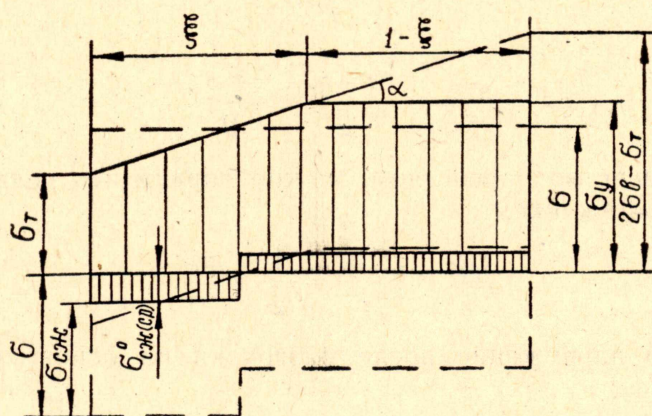


Рис. 1

Будем рассматривать металл за пределами упругости как композит, состоящий из упругих и пластических субэлементов. Примем поведение первых соответствующим модели идеально упругого тела, а вторых—идеально пластического тела с различными пределами текучести для отдельных элементов. Введем понятие концентрации ξ как отношения объема зерен, охваченных пластической деформацией, к общему объему металла. Для однородной (равномерной) смеси величина ξ будет определять и долю пластических элементов в сечении стержня. Для расчетной схемы (рис. 1) можно принять в первом приближении (что принципиально для вывода) линейное распределение пределов текучести в различных зернах от значения σ_{τ} , соответствующего пределу текучести наиболее слабого зерна, до значения $2\sigma_{\tau}$, соответствующего достижению средним напряжением в металле σ предела прочности σ_{ν} (при $\xi=1$ все зерна будут захвачены пластической деформацией $d\sigma/de=0$).

Среднее напряжение в металле из условия равновесия определяется выражением

$$\sigma = \xi\sigma_{\text{п}} + (1-\xi)\sigma_{\text{у}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{п}}$ — среднее напряжение в пластической части сечения;

$\sigma_{\text{у}}$ — в упругой.

Так как упругие элементы достигают больших упругих деформаций, чем отключающиеся от упругого сопротивления текущие пластические зерна, то при разгрузке эта разница в упругих деформациях приведет к возникновению остаточных напряжений сжатия σ в пластических зернах и растяжения $\sigma_{\text{р}}^0$ в упругой части. Наибольшее значение сжимающего остаточного напряжения $\sigma - \sigma_{\tau}$ будет иметь место в зернах с наименьшим пределом текучести, наименьшее, очевидно, равно нулю. При равной вероятности различных значений пределов текучести в пластической зоне математическое ожидание определит среднее остаточное напряжение значением

$$\sigma_{сж}^0 = \frac{\sigma - \sigma_T}{2}. \quad (2)$$

При нагружении последующим сжимающим напряжением $\sigma_{сж}$, можно ожидать дальнейшее развитие пластической деформации после того, как сжимающие напряжения вместе с остаточными в пластической части достигнут величины напряжения, при котором прекращен процесс пластической деформации предварительным растяжением.

$$\sigma_{сж} + \sigma_{сж}^0 > \sigma,$$

откуда

$$\sigma_{сж} > \sigma - \sigma_{сж}^0 = \sigma - \frac{\sigma - \sigma_T}{2} = \frac{\sigma + \sigma_T}{2}.$$

Заменяя неравенство равенством, можно определить величину эффекта Баушингера выражением

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma} = \frac{\sigma + \sigma_T}{2\sigma} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma_T}{2\sigma}. \quad (3)$$

Повторное нагружение после разгрузки на основе рассмотренной схемы дает

$$\sigma_p > \sigma,$$

т. е. дальнейшее развитие пластической деформации идет после превышения растягивающим напряжением величины предварительного напряжения.

Наиболее известное теоретическое решение, полученное при сходных предположениях, соответствующее принципу Мазинга [3], [6], определяет эффект Баушингера выражениями

$$\sigma_{сж} = 2\sigma_T - \sigma; \quad \frac{\sigma_{сж}}{\sigma} = \frac{2\sigma_T - \sigma}{\sigma} = \frac{2\sigma_T}{\sigma} - 1. \quad (4)$$

В экспериментах по проверке формулы Мазинга [3] отмечалось близкое соответствие с действительностью лишь в области очень малых пластических деформаций.

В данной работе приводим результаты поставленных нами опытов по определению величины эффекта Баушингера для 3-х металлов: малоуглеродистая сталь, латунь, дюралюминий. Опыты проводились на прессе Гагарина. Предварительно для всех материалов были получены диаграммы растяжения. Из растянутых до различных степеней деформации образцов вырезались по 2—3 дублируемых образца для сжатия. Пределы текучести определялись по точкам пересечения линий упругой и пластической деформации, по методике, предложенной Л. М. Качановым в работе [4].

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2, где точками показаны экспериментальные значения эффекта Баушингера, характеризуемого отношением $\sigma_{сж}/\sigma$. Здесь же приведены расчетные кривые, построенные на основе диаграмм растяжения испытанных металлов по предлагаемой расчетной формуле (3) и формуле Мазинга (4). Опыты показывают удовлетворительное приближение расчетных значений на основе предложенной зависимости для теоретического предсказания величины эффекта Баушингера. В то же время формула Мазинга, приближающаяся к экспериментальным значениям на начальных ста-

дних пластической деформации, с ростом последней приводит к существенным отклонениям. А при степенях деформации в несколько процентов принцип Мазинга приводит к утверждению, что пластическая деформация начнется еще при разгрузке, и для последующего сжатия упругое сопротивление не имеет места. Это положение вступает в явное противоречие с экспериментом, как правило, показывающим упругое поведение сжимаемого образца после предварительного растяжения и разгрузки.

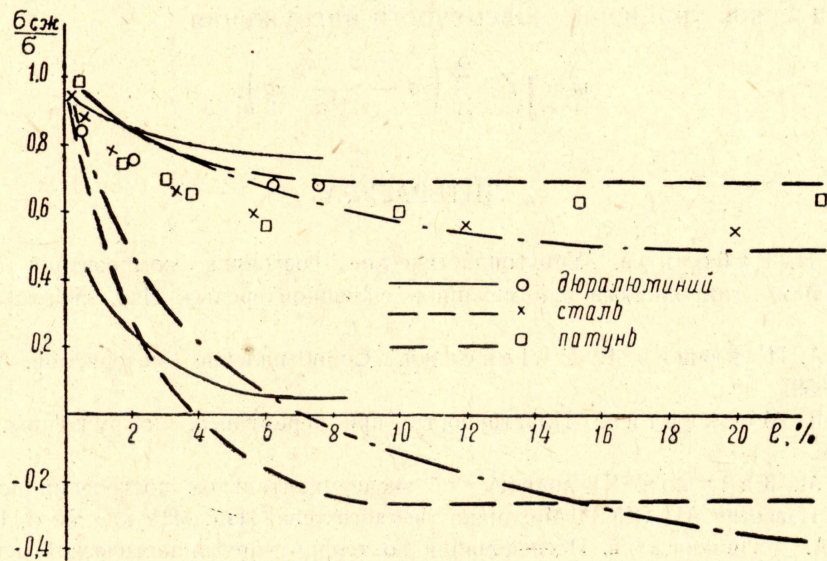


Рис. 2

Если аппроксимировать диаграмму растяжения степенной функцией вида

$$\sigma = Ae^m,$$

то зависимость эффекта Баушингера от степени деформации определится выражением

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma_T}{2Ae^m}, \quad (5)$$

показывающим асимптотическое приближение к величине $\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\sigma_T}{\sigma_B} \right)$

Тенденция к стабилизации эффекта Баушингера отмечалась в экспериментах многих исследователей.

Эффект Баушингера часто рассматривается в теории пластической деформации как наиболее яркое выражение анизотропии процесса упрочнения. Это явление было отправным для гипотезы о трансляционном упрочнении — смещении поверхности текучести без вращений в направлении нагружения. Поэтому полученный результат может найти применение в теориях пластичности с трансляционным упрочнением.

В наших исследованиях [5] на основе изучения закономерностей пластической деформации при сложных нагружениях, обусловленных изменением вида напряженного состояния, было получено уравнение поверхности текучести после простого нагружения (хорошо согласую-

щееся с опытом), которое в полярных координатах векторного пространства А. А. Ильюшина [2] принимает вид

$$\rho = S - \frac{\Delta S_B}{\pi} \varphi, \quad (6)$$

где $\Delta S_B = \sqrt{\frac{2}{3}} (\sigma - \sigma_{сж})$ предполагалось как экспериментальное значение эффекта Баушингера. Полученное в настоящей работе расчетное значение величины эффекта Баушингера позволяет дать на этой основе и теоретическое уравнение поверхности нагружения

$$\rho = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\sigma - \frac{\sigma - \sigma_T}{2\pi} \varphi \right). \quad (7)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Работнов. Уругопластическое состояние композитной структуры. Сб. «Проблемы гидродинамики и механики сплошной среды». Изд. «Наука», Москва, 1969.
2. А. А. Ильюшин, В. С. Ленский. Сопротивление материалов. Физматгиз, Москва, 1959.
3. В. В. Москвитин. Пластичность при переменных нагружениях. Издание МГУ, 1965.
4. Л. М. Качанов. К вопросу об экспериментальном построении поверхности текучести. Известия АН СССР. Механика твердого тела. Изд. «Наука», № 4, 1971.
5. Г. А. Дощинский. Исследования по теории уругопластической деформации. Автореферат докторской диссертации. Новосибирск, 1972.
6. Masing. „Wissenschaftliche Veroffentlichungen aus dem Siemens-Konzern“, № 3, 1924, № 5, 1926.