

УДК 539.374

ПОСТРОЕНИЕ УПРУГОГО ЯДРА МАТЕРИАЛА С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ

А.Г. Щербо

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь
e-mail: a.shcherbo@psu.by

Рассматриваются эффекты упруго-пластического деформирования, в результате которых изменяются упругие свойства материала. Как следствие, изменяется и упругая составляющая полной деформации, определяющая упругое ядро. При малых допусках на пластическую деформацию неучёт этих изменений приводит к существенным погрешностям как при определении размеров упругого ядра и его формы, так и при определении других параметров образа процесса деформирования при сложном нагружении.

Ключевые слова: деформация, упругое ядро, модуль упругости.

CONSTRUCTION OF AN ELASTIC CORE OF A MATERIAL TAKEN INTO ACCOUNT CHANGES IN ELASTIC MODULES

A. Shcherbo

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus
e-mail: a.shcherbo@psu.by

The effects of elastic-plastic deformation, as a result of which the elastic properties of the material change, are considered. As a consequence, the elastic component of the total deformation, which determines the elastic core, also changes. With small tolerances for plastic deformation, failure to take these changes into account leads to significant errors both in determining the dimensions of the elastic core and its shape, and in determining other parameters of the image of the deformation process under complex loading.

Keywords: deformation, elastic core, elastic modulus.

Изменение упругих свойств отмечено в ряде работ, где констатируется уменьшение модулей упругости E и G в процессе деформирования за пределом упругости. Общей неточностью методики в указанных работах следует считать измерение модулей упругости после полной разгрузки предварительно деформированного за предел упругости образца. При этом на пути разгрузки и последующего нагружения возникают наряду с упругими и пластические деформации, что существенно влияет на величину изменённых модулей упругости. Исправить указанные ошибки позволяет методика, представленная ниже.

Эксперименты проводились на установке, выполненной по типу «мёртвой нагрузки» [1], образцы – цельнотянутые тонкостенные трубы. Модули упругости E и G до пластического деформирования определялись предварительно по общепринятой методике. Затем путем закручивания или растяжения образцам сообщалась пластическая деформация заданной величины. Далее их выдерживали под нагрузкой и вслед за этим из различных точек кривой разгрузки осуществляли замкнутые по напряжениям циклы нагружения, по результатам которых и определяли модули упругости. Для объяснения количественных расхождений результатов образцу сообщалась пластическая деформация сдвига 0,016. Потом выполнялись полная разгрузка и повторное нагружение до того же уровня напряжений. Если при этом учесть деформацию цикла, считая её упругой, окажется, что модуль G уменьшился на 40 %.

Однако здесь на замкнутом пути нагружения появляется петля гистерезиса [2], что свидетельствует, о наличии пластических деформаций в цикле разгрузка – нагрузка. Следовательно, непосредственное измерение модуля упругости по обычной методике содержит ошибку, т. к. полная деформация содержит пластическую составляющую. Следует добиться исчезновения петли гистерезиса путем циклического нагружения - разгрузки, а регистрируемые после этого деформации учитывать при определении модуля упругости. По предлагаемой методике образец был деформирован до величины 0,014 относительной деформации. Уровень напряжений составил 240 МПа. Затем нагрузка была снижена до уровня напряжений 60 МПа и в диапазоне 60-140 МПа проведено 4 цикла нагрузки-разгрузки. В каждом цикле наблюдалось сужение петли гистерезиса и, наконец, слияние на четвертом цикле кривых нагрузки и разгрузки. Изменение модуля G составило 6% по отношению к первоначальному. Указанная методика осуществлялась в диапазоне изменения напряжений 80 МПа на различных уровнях напряжений. Результаты оказались практически одинаковыми. При увеличении диапазона изменения напряжений до 160 МПа "выбрать" петлю гистерезиса полностью не удалось. Возможно, в данном случае сказываются временные эффекты пластического деформирования, проявление которых отмечено в работе [1]. После вычета ширины петли из деформации этого диапазона уменьшение модуля составило 6,6% по отношению к первоначальному, т. е. практически такое же изменение, что и в диапазоне 80 МПа.

Для определения влияния величины предварительного пластического деформирования образцу сообщалась пластическая деформация 0,014. Изменение модуля G составило при этом 6,2%. Образец дополнительно деформировался до 0,0243. Уменьшение модуля составило еще 3,2%, т. е. общее уменьшение модуля 9,4% по отношению к первоначальному. Таким образом, наблюдается очевидная корреляция между величиной первоначальной деформации и величиной изменения модуля упругости.

Ряд экспериментов был посвящен влиянию деформации обратного знака на изменение модуля. Выяснилось, что после сообщения пластической деформации обратного знака модуль упругости G частично восстанавливался. Исследования по изменению модуля Юнга качественно подтвердили описанную выше картину, хотя его снижение было несколько меньшим. Так, после сообщения деформации растяжения 0,016 модуль E уменьшился на 5,7%. Представляет интерес и «скрестное» изменение модулей. При первоначальном сдвиге изменялись оба модуля упругости, аналогичная картина наблюдается и при первоначальном растяжении.

Приведенные выше результаты исследования использованы далее при построении поверхности текучести (границы упругого ядра материала).

Понятие поверхности текучести широко используется при построении моделей упруго-пластического деформирования в механике сплошных сред. При этом существенную роль играет как форма поверхности текучести, так и её смещение в зависимости от направления и величины сообщённой первоначальной упруго-пластической деформации. Так, в ряде работ поверхность текучести представлена в виде эллипса с центром, смещённым в направлении первоначального нагружения, в некоторых видах моделей упруго-пластического деформирования в виде окружности. Между тем, положение и форма поверхности текучести имеют решающее значение при определении упругой и пластической составляющих деформации на путях нагружения, различным образом ориентированных в пространстве напряжений. Экспериментальному построению поверхности текучести посвящено значительное число работ, в которых приводится подробная методика получения точек поверхности [3]. Сравнивая результаты описанных экспериментов, можно сделать вывод о подтверждении тенденции смещения поверхности в сторону точки нагружения, однако, теоретическая форма поверхности, особенно на тыльной границе,

экспериментального подтверждения, как правило, не получает. Причинами этого авторы указанных работ считают, например, недостаточно полный учёт временных эффектов при определении точек поверхности текучести и ряд других [4]. Однако в результате упруго-пластического деформирования претерпевают существенные изменения механические характеристики материала, что приводит к изменению соотношения упругой и пластической составляющих полной деформации и порождает ошибки. С учётом этого выполнено построение упругого ядра по уточнённой методике.

Допуск при построении границы упругого ядра $2,5 \cdot 10^{-4}$. Эта поверхность оказалась вогнутой на тыльной части и вектор приращения пластической деформации в точке, противоположной точке нагружения и ближайших к ней точках, будучи перпендикулярным к поверхности, должен иметь отрицательную составляющую вдоль оси растяжения, что не наблюдается. Указанное противоречие может быть объяснено ошибочным уменьшением упругой составляющей, если считать эту величину по первоначальному модулю упругости, не учитывая его изменение в процессе предварительного упруго-пластического деформирования. Изменение модуля G при первоначальном закручивании составляет 12–15%, а изменение модуля E до 10%. Если учесть эти изменения при определении соответствующих составляющих, указанный выше допуск на пластическую деформацию достигается на более длинных лучах повторного нагружения. Тыльная часть поверхности текучести хоть и остаётся поджатой к точке нагружения, уже не является вогнутой и располагается в отрицательной части оси сдвига. Так, точка, противоположная точке нагружения перемещается в отрицательную часть оси сдвига на такую же величину, что и расстояние до тыльной точки, полученной по первоначальной методике, располагающейся в положительной части оси сдвига. Построенные при этом векторы приращения пластической деформации оказываются градиентальными к поверхности текучести с отклонениями порядка отклонений в других точках.

Таким образом, с учётом изменения модулей упругости построенная упругая поверхность оказывается более точной, на что указывает градиентальность векторов пластической деформации в её точках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов В.К., Шишмарев О.А., Щербо А.Г. Экспериментальное исследование некоторых закономерностей пластического деформирования стали // Прикл. пробл. прочности и пластичности. – 1983. – Вып. 23. – С. 149-156.
2. Шевченко Ю.Н., Терехов Р. Г. Физические уравнения термовязкопластичности. – Киев: Наук, думка, 1982. – С. 215-226.
3. Шишмарев О.А. Экспериментальная проверка законов изотропии и запаздывания и граница текучести при сложном нагружении // II Всесоюз. съезд по теорет. и прикл. механике, 1964: Аннот. докл. – М.: Наука, 1964. – С. 159-164.
4. Шишмарев О.А., Щербо А. Г. Образ процесса нагружения для двухзвенных ломаных траекторий деформации с углом излома более 90° // Изв. АН СССР. Сер. Механика твердого тела. – 1982. – № 5. – С. 185-189.