

УДК 539.389

© 2001 г. Р.А. АРУТЮНЯН, Д.Е. ТРОШИН

## О ВЛИЯНИИ ЭФФЕКТОВ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТАРЕНИЯ НА ПРИСПОСОБЛЯЕМОСТЬ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Исследуются условия приспособляемости упругопластических систем, учитывающих процессы старения, для оценки прочности, выносливости различных инженерных конструкций. При циклическом изменении пластической деформации нарушение прочности происходит при относительно небольшом числе циклов (малоцикловая усталость). В связи с этим возникает необходимость расчета упругопластических систем таким образом, чтобы допустить возможность появления пластической деформации только при первых циклах. При этом полагается, что с увеличением числа нагружений система должна как бы приспособиться к упругому изменению деформации. Такое поведение упругопластических систем, вообще говоря, возможно и оно связано с возникновением некоторого распределения остаточных напряжений обратного знака в результате начального пластического деформирования. Целью работы является изучение поведения приспособляемости упругопластических систем с учетом эффектов старения. В качестве примера рассматривается задача о приспособляемости трехстержневой системы, элементы которой изготовлены из стареющего металлического материала. Рассматриваются экспериментальные решения поставленной задачи в опытах над простыми стержневыми системами. Вводится относительная характеристика области приспособляемости.

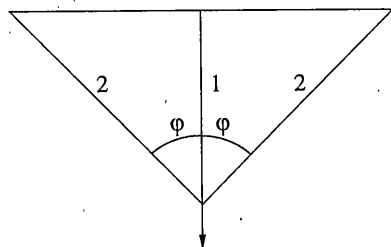
При циклическом изменении пластических деформаций разрушение упругопластических систем происходит при относительно небольшом числе нагружений (малоцикловая усталость). Механизм разрушения при этом связан с накоплением пластических деформаций с последующим вязким разрушением. Однако имеется определенный класс упругопластических систем, которые под воздействием циклических нагружений допускают возможность изменения пластических деформаций только при ограниченном числе первых циклов и с увеличением числа нагружений система приспособляется к упругому изменению деформаций. Эффект приспособляемости, по терминологии В. Прагера "shakedown" [1], связан с возникновением некоторого распределения остаточных напряжений благоприятного "обратного" знака в результате пластического деформирования на первых этапах нагружения. Этот эффект был успешно реализован для многих задач и, в частности, в задаче упругопластического циклического нагружения силой статически неопределимой трехстержневой системы.

Рассмотрим статически неопределимую систему из трех стержней, нагруженную силой  $P$  (фиг. 1). Для простоты будем считать, что стержни изготовлены из одного материала и имеют одинаковую площадь поперечного сечения  $F$ . При определенной величине силы  $P$  система будет находиться в упругом состоянии. Так как напряжение в среднем стержне больше, чем в крайних, то с увеличением нагрузки предел текучести

вначале будет достигнут в среднем стержне. Это произойдет при силе  $P_1$  [3]:

$$P_1 = \sigma_1 F (1 + 2 \cos^3 \varphi) \quad (1)$$

Если произвести полную разгрузку системы, то в ней возникнут остаточные напряжения – сжимающие в среднем и растягивающие в крайних стержнях. При повторном нагружении остаточные напряжения будут способствовать расширению области приспособляемости и упрочнению системы.



Фиг. 1

Если перевести все элементы системы в пластическое состояние, а затем разгрузить систему, то при повторном нагружении вся система будет упругой до тех пор, пока новая нагрузка не превысит той, от которой произведена разгрузка, т.е.

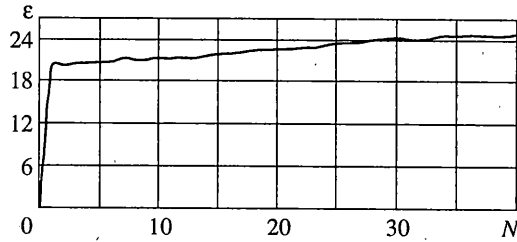
$$P_2 = \sigma_1 F (1 + 2 \cos \varphi) \quad (2)$$

В формулы (1), (2) входит предел текучести материала. Ясно, что с увеличением предела текучести можно расширить область приспособляемости и улучшить циклическую работоспособность упругопластических систем. Другой эффект, который может способствовать улучшению циклической работоспособности, заключается в охрупчивании и подавлении пластических деформаций.

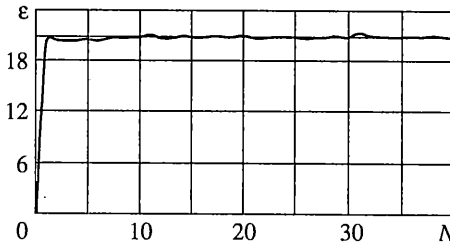
Увеличение предела текучести и охрупчивание материала и системы в целом возможно, в частности, в результате соответствующей термомеханической обработки, включающей циклическую пластическую деформацию и процессы старения – изменение фазового состава материала [4]. В процессе пластической деформации в материале вносится некоторое количество несовершенств в виде линий скольжения, дислокаций, пор и трещин, которые выступают в качестве потенциальных центров выделения новой фазы или компонента из твердого раствора. Частицы выделяющейся фазы блокируют дислокации, тем самым увеличивается предел текучести и сопротивляемость пластической деформации. Эти положения составляют теоретическую основу, обеспечивающую улучшение характеристик приспособляемости и увеличение долговечности упругопластических систем.

Практическая реализация отмеченных положений была осуществлена в опытах над статически неопределимой системой из трех стержней. Были выполнены предварительные исследования оптимального варианта шарнирных закреплений, размеров, материала и режима циклического нагружения и старения. Изготовлены несколько вариантов подобных систем и выполнены предварительные и серийные испытания. Параметры систем были следующими: угол  $\varphi$  между стержнями равен  $45^\circ$ , площадь поперечного сечения стержней –  $28 \text{ мм}^2$ , начальная длина рабочей части среднего стержня –  $40 \text{ мм}$ , начальная длина рабочей части боковых стержней –  $70 \text{ мм}$ . В качестве материала для стержней системы была выбрана сталь марки Ст. 3. Механические характеристики стали марки Ст. 3 следующие: предел текучести  $\sigma_T = 260 \text{ Н/мм}^2$ , предел прочности  $\sigma_B = 400 \text{ Н/мм}^2$ .

Ранее опыты над статически неопределимой трехстержневой системой по исследованию приспособляемости проводились без учета эффекта старения [5]. В этой работе указывается только схема системы (фиг. 1).



Фиг. 2



Фиг. 3

Экспериментальные исследования проводились над несколькими системами по двум программам циклического нагружения без учета и с учетом эффекта старения. По первой программе испытывались две системы. Для первой системы был выбран следующий режим испытания: растяжение системы таким образом, что средний стержень деформируется пластически (нагрузка  $P^* = 32000$  Н), а крайние стержни находятся в упругом состоянии. Далее система полностью разгружается и снова нагружается до  $P^*$  и т.д. Опыт на циклическое растяжение продолжается до тех пор, пока средний стержень не разрушится. Из графика зависимости между деформацией  $\epsilon$  [%] рабочей длины среднего стержня и числом циклов  $N$  (фиг. 2) видно, что с ростом числа нагружений происходит монотонное накопление остаточного (пластического) удлинения.

Вторая система испытывалась по аналогичному режиму только с промежуточным старением системы в разгруженном состоянии при температуре  $200^\circ\text{C}$  в течение двух часов. Процедура старения проводилась после каждых пяти циклов нагружения. Из графика зависимости между деформацией рабочей длины среднего стержня и числом циклов (фиг. 3) видно, что в процессе старения происходит значительное охрупчивание материала и системы в целом.

По второй программе испытывались также две системы. В этих опытах изучался эффект возможного расширения области приспособляемости в процессе старения в условиях активного упругопластического циклического нагружения. Для первой системы был выбран следующий режим испытаний: растяжение системы таким образом, чтобы деформация рабочей длины среднего стержня составляла 1%, после разгрузки и старения при температуре  $200^\circ\text{C}$  в течение двух часов система растягивалась повторно (деформация составляла 1,5%) и т.д. до тех пор, пока средний стержень не разрушится.

Для сравнения проводились аналогичные опыты, в которых система после разгрузки не подвергалась старению.

В результате в опыте со старением наблюдается большее увеличение предела текучести после каждого цикла, чем в опыте без старения.

Для оценки полученных результатов введем относительную величину  $\gamma = (P_s - P_0)/P_0$ , которую можно рассматривать как относительную характеристику об-

ласти приспособляемости ( $P_s$  – нагрузка, при которой средний стержень разрушился,  $P_0$  – нагрузка, которая соответствует первому циклу, когда деформация среднего стержня составляла 1%). Имеем в опыте со старением  $\gamma = 83.1\%$ , без старения  $\gamma = 47\%$ . По абсолютной величине область приспособляемости  $P_s - P_0$  для системы, испытанной в режиме старения, равна 1480 Н, а для системы в режиме без старения – 10000 Н.

Таким образом, расширение области приспособляемости по величине силы составило 4800 Н.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prager W. Problem types in the theory of perfectly plastic materials // J. Aer. Sci. 1948. V. 15. № 6. P. 337–341.
2. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
3. Работнов Ю.Н. Соппротивление материалов. М.: Физматгиз, 1962. 456 с.
4. Арутюнян Р.А., Каменцева З.П. Циклическое упрочнение стареющих сплавов. // Исследования для упругости и пластичности. Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. № 11. С. 121–127.
5. Ходж Ф.Г. Расчет конструкций с учетом пластических деформаций. М.: Машгиз, 1963. 380 с.

С.-Петербург

Поступила в редакцию  
10.01.2000