

В.А.Мехеда, Х.С.Хазанов

О МЕТОДАХ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ  
ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Исследование взаимосвязи напряжений и деформаций в металлах, подвергающихся воздействию циклических нагрузок, позволяет определить многие закономерности сложных усталостных процессов, знание которых необходимо для разработки и уточнения физически обоснованных критериев усталостной прочности. Особый интерес представляет неупругость металлов в области многоциклового усталости.

Для большинства конструкционных материалов в этой области неупругая деформация обычно составляет незначительную долю полной деформации. Это обстоятельство создает определенные трудности при исследовании неупругости металлов методом динамической петли гистерезиса, так как требуется обеспечить высокую точность измерений.

На использовании двух параметров петли гистерезиса — ее ширины, характеризующей накопленную неупругую деформацию за полуцикл, а также площади, определяющей величину рассеянной за цикл энергии пластического деформирования, — базируются многие из выдвинутых деформационных и энергетических критериев усталости. Кроме того, как отмечается в работе [1], среди корреляционных зависимостей между пределом усталости и другими прочностными характеристиками материалов наиболее тесной является связь между пределом усталости и циклическим пределом пропорциональности, определяемым по динамической петле гистерезиса. В связи с этим, разработке методик измерения ди-

намических петель гистерезиса, сочетающих в себе высокую точность и надежность с простотой реализации, является делом первостепенной важности.

В настоящей работе анализируются известные методики измерения динамической петли гистерезиса, базирующиеся на применении датчиков омического сопротивления, а также предлагается усовершенствованная методика, позволяющая повысить точность и надежность подобных измерений.

Рассмотрим предложенные авторами работ [2,4,3] методики измерения динамической петли гистерезиса, функциональные схемы которых изображены на рис.1а,1б и 1в соответственно.

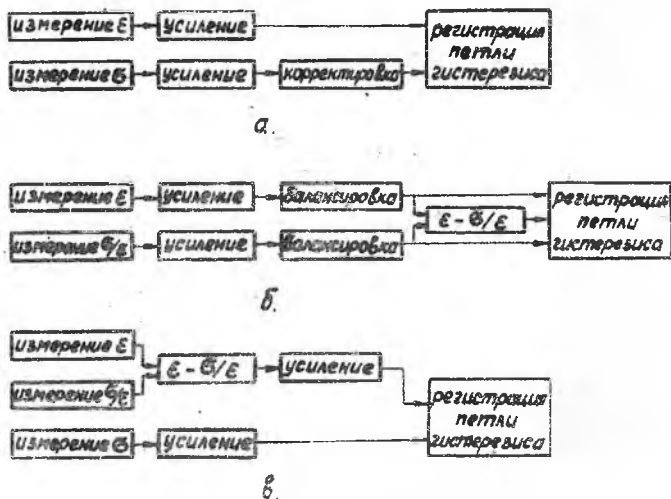


Рис. I

Согласно функциональной схеме, изображенной на рис.1а, слабые сигналы деформации  $\epsilon$  и напряжения  $\sigma$  первоначально раздельно усиливаются, возникающий при этом сдвиг фаз между ними устраняется операцией корректировки. После этого сигналы  $\epsilon$  и  $\sigma$  подаются соответственно на горизонтальные

и вертикальные отклоняющие пластины электронного осциллографа.

Основное ограничение, препятствующее увеличению чувствительности данной схемы, заключается в том, что ширина развертки петли гистерезиса лимитируется размерами экрана осциллографа. Так, например, если неупругая деформация составляет от полной всего лишь один процент, то при ширине экрана осциллографа в 100 мм она вызовет отклонение электронного луча только на 1 мм, остальные 99 мм развертки петли по горизонтали будут соответствовать упругой деформации.

Функциональная схема, изображенная на рис.1б, позволяет фиксировать петлю гистерезиса в координатах  $\sigma - \epsilon$ , а также в координатах  $\sigma - \epsilon_2$ . Сигнал нелинейной деформации  $\epsilon_2$  получается из соотношения

$$\epsilon_2 = \epsilon - \epsilon_1,$$

где  $\epsilon_1 = \sigma/E$  - линейная составляющая полной деформации. До операции вычитания сигналы полной и линейной деформаций балансируются между собой таким образом, чтобы линейная составляющая в сигнале  $\epsilon$  была равна по величине сигналу  $\epsilon_1$ .

Эта методика, ослабляя ограничения, обусловленные размером экрана осциллографа, не позволяет все же существенно повысить точность измерений. Дело в том, что в усилителях практически всегда имеют место непостоянство коэффициента усиления, фазовые и нелинейные искажения, дрейф нуля и т.д., что приводит к некоторым погрешностям в значениях  $\epsilon$  и  $\epsilon_1$ .

При напряжениях, близких к пределу выносливости, операция  $\epsilon - \epsilon_1$  представляет собой вычисление разности близких величин. Поэтому небольшие погрешности в измерении  $\epsilon$  и  $\epsilon_1$  могут привести к большим ошибкам в значениях  $\epsilon_2$ . Кроме того, вряд ли целесообразно усиливать сигнал полной деформации, в котором "полезный" сигнал нелинейной деформации составляет незначительную долю.

С точки зрения целесообразности последовательности операций, третья схема (рис.1в) выгодно отличается от предыдущих, однако и она не лишена недостатков. Чтобы пояснить суть вопроса, приведем схемы наклейки датчиков (рис.2а) и включения их в измерительный мост (рис.2б). Датчики  $R_1$  и  $R_2$

наклеиваются на образец I из испытываемого материала, датчики  $R_3$  и  $R_4$  - на образец 2, материал которого имеет более высокий предел пропорциональности. В пределах измерительного моста реализуется операция вычитания  $\varepsilon - \varepsilon_1$ .

Подобную схему измерений можно было бы считать идеальной, если бы модули упругости образцов строго совпадали, тензодатчики имели совершенно одинаковые измерительные характеристики, а погрешности наклейки их были полностью исключены. Практически выполнить эти условия довольно трудно. В связи с этим возникает вопрос о необходимости балансировки сигналов в пределах измерительного моста, что и осуществляется в предлагаемой ниже схеме измерений (рис.3).

Наиболее просто эта схема реализуется при поперечном изгибе консольных образцов. Схемы наклейки датчиков и включения их в измерительный мост показаны на рис.4а и 4б.

Датчик  $R_1$  наклеен на образец I из испытываемого материала и является измерителем полной деформации  $\varepsilon$ . Датчики  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и  $R_5$  наклеены на удлинитель 2 и являются измерителями линейной деформации  $\varepsilon_1 = \sigma/E$ . Удлинитель желательно изготовить из материала с более высоким пределом пропорциональности. Сопротивления  $R_0$ ,  $R_k$  и конденсаторы  $C_0$  являются элементами использованной для работы тензостанции УТС-I-ВТ-I2. Датчик  $R_6$  включается в отдельный мост и служит для измерения нагрузки.

Приведенная на рис.4б схема включения датчиков обеспечивает более высокую чувствительность измерительного моста к деформациям в сечении II - II по сравнению с сечением I - I. Это позволяет подобрать плечи  $l_1$  и  $l_2$  таким образом, чтобы в пределах моста осуществлялась балансировка по линейной составляющей деформации. Для этого достаточно перед экспериментом сместить соответствующим образом точку приложения силы  $P$ .

При появлении нелинейной составляющей деформации в сечении I - I происходит разбалансировка измерительного моста, и на вход усилителя поступает достаточно точный сигнал  $\varepsilon_2 = \varepsilon - \varepsilon_1$ .

Для оценки погрешности метода, обусловленной инерционными силами при динамическом нагружении и моментом трения в

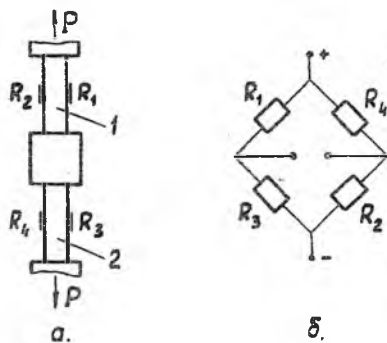


Рис.2

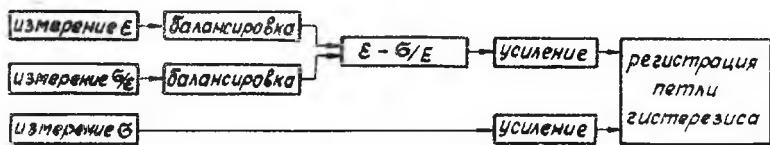


Рис.3

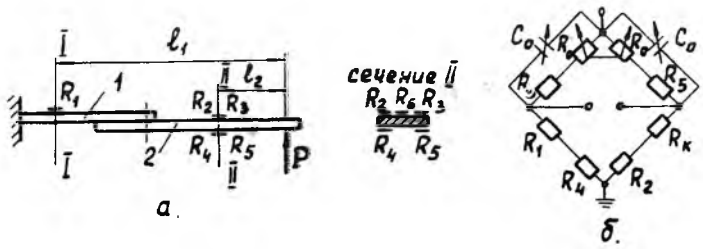


Рис.4

шарнире, передающем силу, был поставлен эксперимент на образце из материала с высоким пределом пропорциональности (закаленная сталь 30ХГСА). Погрешность оценивалась по величине нелинейного сигнала, фиксируемого регистрирующей аппаратурой. Было установлено, что при частоте 10 гц и полных деформациях сечения I - I, лежащих в пределах  $\pm 0,2\%$ , нелинейная деформация  $\epsilon_2$  определяется с точностью до  $5 \cdot 10^{-6}$ . В процессе испытаний использовались тензостанция УТС-1-ВТ-12 и шлейфовый осциллограф Н-700.

Предложенная методика может с успехом применяться при измерении статических петель гистерезиса, а также при других видах нагружения (растяжение-сжатие, кручение и др.).

#### Л и т е р а т у р а

1. В.Т.Троценко. Усталость и неупругость металлов. Киев, изд-во "Наукова думка", 1971.
2. В.Т.Троценко. Сб. "Новые машины и приборы для испытания металлов". Metallurgizdat, 1963.
3. Smith R.C. *Experimental Mechanics*, v.1, n 11, 1961.
4. Wetzel R.M. *Direct Recording of Nonlinear Reflections*, *Test Engineering*, Oct., 1968.