

**ТРЫВАЛАСЦЬ, ПЛАСТЫЧНАСЦЬ, АПРАЦОУКА ЦІСКАМ  
МЕТАЛАУ І ІНШЫХ МАТЭРЫЯЛАУ**

УДК 539.431

*Н. Н. КУРИЛОВИЧ, В. Х. БРОНЗ, А. П. НОВИҚОВ*

**НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ  
В УСЛОВИЯХ МАЛОЦИКЛОВОГО  
И СТАТИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

Вопросам накопления повреждений в условиях циклического нагружения и высоких температур посвящен ряд работ [1—7], в которых рассматриваются закономерности накопления повреждений при длительном циклическом нагружении. Для описания процесса накопления повреждений в этих условиях могут быть использованы кинетические уравнения повреждений деформационного, энергетического и силового типов. Предложенные критерии для оценки меры повреждений должны подвергаться экспериментальной проверке.

В данной работе для описания процесса накопления повреждений в условиях малоциклового нагружения и длительного статического нагружения используется кинетическое уравнение повреждений силового типа, которое распространяется на различные формы циклов нагружения. Для проверки предложенного соотношения исследовали закономерности разрушения жаропрочного конструкционного сплава на никелевой основе ЭИ607А. Экспериментальная часть работы выполнена на установке УМЭ-10ТМ с дополнительным устройством, позволяющим испытывать тонкостенные трубчатые образцы в условиях одновременного растяжения и кручения. Все испытания проводили при температуре 700 °С.

При описании процесса накопления повреждений для случая циклической смены напряжений исходили из допущения, что поврежденность  $\Pi$  в момент разрушения соответствует принципу линейного суммирования повреждений и должна быть равной единице:

$$\Pi = \Pi_1 + \Pi_3, \quad (1)$$

где  $\Pi_1$  — поврежденность, определяемая по выражению

$$d\Pi_1/dt = f(\sigma), \quad (2)$$

предложенному в работе [8]. Функция напряжений выражалась в виде

$$f(\sigma) = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma}{A_0}, \quad (3)$$

где  $C_0$  и  $A_0$  — экспериментальные параметры. Для данного материала величина  $C_0 = 2,90 \cdot 10^8$  с, а  $A_0 = 48,34$  МПа.

Экспериментальные данные показывают, что в условиях циклического режима нагружения для некоторых материалов разрушение наступает раньше, чем это прогнозируется по выражению (2), и поэтому для расчета меры повреждений в этих условиях необходимо вводить поправку  $\Pi_3$ . Слагаемое  $\Pi_3$  определяет циклическую поврежденность, обуслов-

ленную периодическим характером действия напряжений. Она зависит от уровня напряжений и характеристики цикла нагружения

$$\Pi_3 = f_1(\sigma_i^{\max}) f_2(R) f_3(\omega) N. \quad (4)$$

Выражения (2) и (4) строятся на основе феноменологической модели разрушения и в дальнейшем подвергаются экспериментальной проверке.

В выражении (4)

$$f_1(\sigma_i^{\max}) = B(\sigma_i^{\max})^m \quad (5)$$

представляет зависимость интенсивности максимальных за цикл напря-

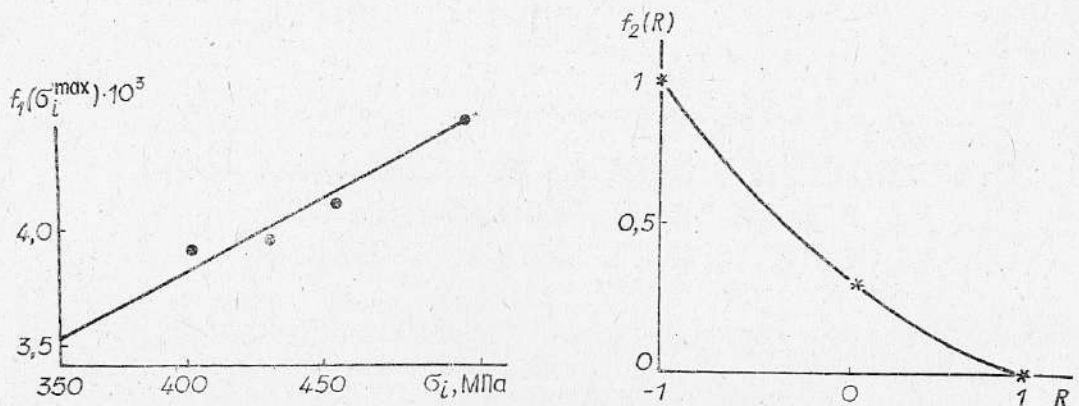


Рис. 1. График зависимости  $f_1(\sigma_i^{\max}) = B(\sigma_i^{\max})^m$

Рис. 2. Зависимость  $f_2(R)$  от коэффициента асимметрии цикла при линейном напряженном состоянии

жений  $\sigma_i^{\max}$  от уровня напряжений при постоянных коэффициенте асимметрии цикла  $R$  и частоте смены напряжений  $\omega$ . Экспериментальная зависимость (5) представлена на рис. 1, где  $B = 9 \cdot 10^{-5}$ ,  $m = 0,63$  — экспериментальные постоянные.

Функция  $f_2(R)$  учитывает влияние асимметрии цикла на процесс накопления повреждений и представлена на рис. 2. Эксперименты проводились при трех значениях коэффициента асимметрии  $R = -1$ ,  $R = 1$ ,  $R = 0$ . Очевидно, что при  $R = 1$ , т. е. при статическом нагружении  $f_2(R) = 0$ , и, следовательно,  $\Pi_3 = 0$ , при наиболее жестком симметричном режиме, когда  $R = -1$ , принимаем  $f_2(R) = 1$ .

Обстоятельство, что опыты проводились при трех значениях коэффициента асимметрии, не дает основания для точной аппроксимации экспериментальной кривой, представленной на рис. 3. Можно лишь точно указать, что

если  $R = -1$ ,  $f_2(-1) = 1$ ,  $R = 1$ ,  $f_2(1) = 0$ , а при  $R = 0$   $f_2(0) = 0,3$ .

Для определения вида функции  $f_3(\omega)$  эксперименты проводили на четырех частотах. За базу принимался циклический режим нагружения с периодом  $T = 1800$  с и коэффициентом асимметрии  $R = -1$ , откуда  $\omega_* = 1/T = 1/1800 = 0,00056$  при  $\omega = \omega_*$ ,  $f_3(\omega) = 1$ . Функция  $f_3(\omega)$  зависела от отношения  $\omega/\omega_*$ , где  $\omega$  — любая частота при

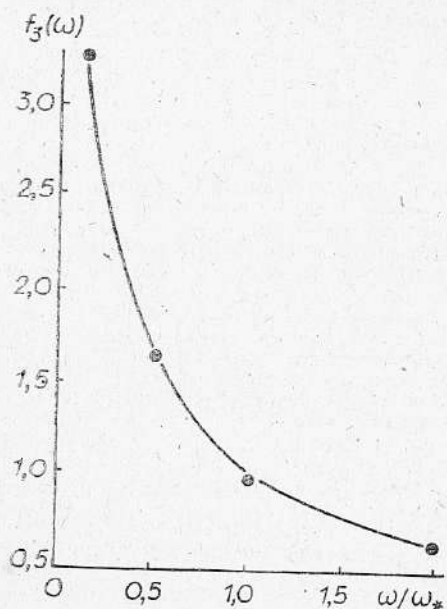


Рис. 3. Экспериментальная зависимость  $f_3(\omega)$  от  $\omega/\omega_*$

Режимы нагружения и расчетные значения меры повреждений при циклическом нагружении (сплав ЭИ607А,  $t = 700^{\circ}\text{C}$ )

Режимы нагружения $\sigma$ , МПа*	$N_p$	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$\Pi$
	38	0,93	0,04	0,97
	82	0,90	0,05	0,95
	33	0,85	0,13	0,98
	32	0,84	0,13	0,97
	38	0,87	0,09	0,96



испытании. Экспериментальная зависимость  $f_3(\omega)$  представлена на рис. 3 и аппроксимирована выражением

$$f_3(\omega) = (\omega/\omega_*)^n, \quad (6)$$

где  $n = -0,9$ ,  $N$  — число циклов нагружения. В таблице приведены режимы нагружения и значения меры повреждений,  $\Pi_1$ ,  $\Pi_3$  и  $\Pi = \Pi_1 + \Pi_3$ , подсчитанных по формуле (1). Результаты расчета подтверждают эффективность указанного соотношения, величина меры повреждений в них близка к единице.

Приведенные расчеты в таблице показывают, что кинетическое уравнение повреждений силового типа в форме (2) достаточно эффективно описывает процесс повреждений для нестационарных режимов нагружения, в которых преобладают напряжения одного знака. В случае знакопеременных циклических режимов нагружения необходимо вводить поправку в виде выражения (4), так как в этих условиях, помимо статического накопления повреждений при заданном времени выдержки под нагрузкой, наблюдается накопление еще и некоторой поврежденности, обусловленной циклической сменой напряжений. Циклический режим нагружения со сменой знака напряжений приводит к более быстрому разрушению, чем нестационарный, в котором преобладают растягивающие напряжения.

### Summary

A criterion to evaluate the damage extent under cyclic loading conditions is reported. The mutual influence of malcyclic fatigue and long term static loading has been taken into consideration.

### Литература

1. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С., Антипов Е. А. Сопротивление жаропрочных материалов нестационарным силовым и температурным воздействиям. Киев, 1974.
2. Шнейдерович Р. М., Гусенков А. П., Зацаринный В. В. // Проблемы прочности. 1983. № 2. С. 19—27.
3. Гецов Л. Б. // Проблемы прочности. 1974. № 2. С. 32—37.
4. Биргер И. А. // Проблемы прочности. 1978. № 11. С. 3—11.
5. Стрижало В. А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. Киев, 1978.
6. Осасюк В. В., Олисов А. Н. // Проблемы прочности. 1984. № 3. С. 12—17.
7. Добровольский В. И. // Проблемы прочности. 1984. № 9. С. 24—28.
8. Павлов П. А., Курилович Н. Н. // Проблемы прочности. 1982. № 2. С. 44—47.

Могилевский технологический институт

Поступила в редакцию  
17.11.87

УДК 539.3.01+539.612

В. С. ПОРОШИН, Е. Н. СОКОЛОВ

### К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ПЛОСКУЮ ТРЕЩИНУ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА,

### С УЧЕТОМ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФАЗ

С точки зрения механики разрушения можно говорить об истинной или внутренней прочности адгезионного соединения, определяемой исключительно свойствами контактируемых материалов в непосредственной близости к поверхности раздела, и технической прочности, зависящей помимо указанных свойств от геометрии соединяемых тел. В любых конкретных испытаниях определяется только техническая прочность.