



Л.И. Огородов, В.А. Шапкина
 Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
 Вологодский государственный университет

МЕРА ПОВРЕЖДЕНИЙ СПЛАВА НА МОМЕНТ РАЗРУШЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ НАГРУЖЕНИЙ С МГНОВЕННОПЛАСТИЧЕСКИМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ

Выполнены расчеты меры повреждений сплава ЭИ-607А при нестационарных режимах высокотемпературного (700°C) нагружения с учетом мгновеннопластического деформирования в условиях сложного напряженного состояния. Предложены комбинированные кинетические уравнения повреждений.

Сплав, сложное нагружение, ползучесть, поврежденность, кинетические уравнения, разрушение.

Многообразие сталей и сплавов, а также режимов нагружения деталей и элементов конструкций вызвало появление работ по исследованию длительного разрушения материалов и методов суммирования повреждений в условиях сложных режимов эксплуатации оборудования [1–8]. Известны три типа феноменологических моделей длительного разрушения: силовые, деформационные и энергетические. Модели длительного разрушения предполагают одновременное протекание двух и более процессов разрушения, которые накладываются или даже взаимодействуют друг с другом [1]. В этих случаях приходится прибегать к комбинированным уравнениям повреждений. Выбор адекватных кинетических уравнений повреждений, допускающих прогнозирование долговечности и расчет меры повреждений при различных видах напряженного состояния и различных режимах длительного нагружения, проблематичен ввиду недостатка экспериментальных данных.

В настоящей работе в ходе исследования использовались результаты экспериментального исследования разрушения жаропрочного сплава ЭИ-607А (ХН80ТБЮ) в условиях нестационарного нагружения с учетом мгновеннопластических воздействий в определенные промежутки времени при температуре 700°C [2]. Экспериментальная часть работы выполнена на испытательной машине УМЭ-10ТМ с дополнительным оборудованием, позволяющим проводить опыты в условиях плоского напряженного состояния (растяжение–сжатие с реверсивным кручением). Размеры рабочей части образцов сплава ЭИ-607А обеспечивали условия плоского однородного напряженного состояния в стенке образца. Допуск на разностенность по длине и диаметру составлял 0,02 мм. Режимы нагружения задавались в истинных напряжениях. Нагрузка, действующая на образец, корректировалась в соответствии с его текущими размерами. Величина интенсивности мгновеннопластической деформации задавалась в пределах 4%.

В работе [2] показано то, что мгновеннопластическая деформация оказывает влияние на длительную прочность сплава в условиях высокотемпературной ползучести. Процесс накопления повреждений в

сплаве удовлетворительно описывается с помощью предложенных автором [2] соотношений.

Задачи работы:

1. Предложить варианты комбинированных уравнений повреждений с использованием соотношения наследственного типа и с учетом влияния мгновеннопластических деформаций.

2. Сравнить результаты расчета меры повреждений на момент фактического разрушения сплава по рассматриваемым кинетическим уравнениям.

В [2] использовалось кинетическое уравнение силового типа Бэйли:

$$\frac{d\Pi}{d\tau} = f(\sigma_3). \quad (1)$$

Функция напряжений имела вид

$$f(\sigma_3) = \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma_3}{A_0}. \quad (2)$$

Текущая поврежденность подсчитывалась по формуле

$$\Pi_1 = \int_0^{\tau} \frac{1}{C_0} \exp \frac{\sigma_3}{A_0} d\tau, \quad (3)$$

где экспериментально определены для сплава ЭИ-607А $C_0 = 2,90 \cdot 10^8 \text{ сек}$ и $A_0 = 48,34 \text{ МПа}$.

Эквивалентное напряжение определялось соотношением Писаренко–Лебедева

$$\sigma_3 = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1. \quad (4)$$

Значение $\chi = 0,65$ определено по кривым длительной прочности при двух видах сложного напряженного состояния [2]. В случае сжатия при линейном и при сложном напряженном состояниях, когда наибольшее главное напряжение оказывалось отрицательным, принималось $\sigma_3 = \chi \sigma_i$.

Поврежденность от мгновеннопластического деформирования определялась [2] уравнением повреждений

$$\Pi_2 = \frac{e_i^{\text{МП}}}{C}, \quad (5)$$

где постоянная C имеет смысл мгновеннопластической деформации, приводящей к разрушению. Эта

величина определялась из опыта на деформирование ($V=50$ мм/мин) при температуре $T=700^{\circ}\text{C}$ и составила для сплава ЭИ-607А величину $C = e_{i,p}^{МП} = 8\%$.

В результате использовалось комбинированное уравнение [1, 2] вида

$$P = P_1 + P_2 + DP_1P_2, \quad (6)$$

где D – экспериментальный параметр, который в общем случае зависит от вида напряженного состояния, при котором осуществлялась мгновеннопластическая, а также вязкопластическая деформация, и от интенсивности напряжений при ползучести.

Функция D аппроксимирована в виде

$$D = a + b \left| \arctg K \left(\frac{Mn}{\sigma} \right) \right|^n,$$

где $K = \tau/\sigma$, $a=0,45$, $b=0,08$, $n=2,5$ [2].

Режимы сложного нагружения сплава ЭИ-607А и расчетные значения меры повреждений по уравнению (6) приведены в таблицах 1 и 2. Процесс накопления повреждений при высокотемпературной ползучести с учетом влияния мгновеннопластической деформации удовлетворительно описывается с помощью соотношения (6). Однако следует отметить, что комбинированное уравнение (6) недостаточно учитывает фактор времени, то есть не фиксирует момент воздействия каждого мгновеннопластического воздействия и длительность влияния этой деформации до момента разрушения материала. В (6) используется кинетическое уравнение (3) силового типа линейного суммирования повреждений по Бейли, дающее значительный разброс значений меры повреждений.

Для описания процесса диссеминированных повреждений в сталях и сплавах (ЭИ-182, ЭИ-765, ЭИ-607А, ЭИ-893ВД, 800Н) использовалось [3–8] кинетическое уравнение наследственного типа

$$P_H = \int_0^{\tau} \sigma_{\sigma}(\theta) K(\tau - \theta) d\theta, \quad (7)$$

где $\sigma_{\sigma}(\theta)$ – режим изменения эквивалентного напряжения по критерию Писаренко–Лебедева (4), $K(\tau - \theta)$ – функция влияния (ядро), определяемая по уравнению кривой длительной прочности (при 700°C) сплава ЭИ-607А ($\sigma_{\sigma} = 942,15 - 111,34 \lg \tau$, где σ_{σ} – в МПа, τ – в секундах).

Мера повреждений сплава по уравнению (7) при нестационарных режимах нагружения без учета мгновеннопластического деформирования приведена в таблицах 1 и 2. Здесь отметим, что поврежденность материала в этом случае была меньше $P=1$ и составляла в среднем 0,914. Этот факт указывает на влияние мгновеннопластической деформации на поврежденность.

Предпринята попытка использовать комбинированное уравнение (6), где экспериментальный параметр D определялся без учета влияния вида напряженного состояния. Для определения параметра D использовались три нестационарных режима нагружения с учетом мгновеннопластического деформирования. Параметр определен равным $D=-0,92$. Результаты расчета меры повреждений по уравнению $P_K = P_1 + P_2 - 0,92 P_1 P_2$ представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Нестационарные режимы нагружения сплава ЭИ-607А с учетом мгновеннопластического деформирования и расчетные меры повреждений на момент разрушения

N режи- ма	N ступе- ни	Режимы нагружения						Расчетные меры повреждений						
		σ_{xx} , МПа	σ_y , МПа	$t \cdot 10^{-4}$, с	$\epsilon_{xx}^{МП}$, %	$\epsilon_{x\theta}^{МП}$, %	$\epsilon_i^{МП}$, %	P [2]	P_H	P_K	P_e	P'_e	P_{τ}	P''_{τ}
1	1	400	400	1,08	-	-	-	0,967	0,898	0,963	0,910	0,936	0,921	0,995
	2	400	400	0,72	-2	-	2							
	3	400	400	1,08	-1	-	1							
2	1	400	400	1,08	-	-	-	0,955	0,872	1,035	0,954	0,979	0,915	0,946
	2	400	400	0,54	-1,54	-2,02	2,8							
	3	400	400	0,54	-2,54	-2,02	3,8							
3	1	400	400	1,08	-	-	-	1,035	0,885	0,996	0,940	0,954	0,956	0,967
	2	400	400	0,54	-1	-	1							
	3	400	400	0,90	-2,54	-2,02	3,8							
4	1	400	400	1,80	-	-	-	1,120	0,944	1,002	0,960	0,976	0,978	1,087
	2	-	-	1,80	-1	-	1							
	3	420	420	1,08	-1	-	1							
	4	400	400	1,08	-1,5	-	1,5							
5	1	400	400	2,16	-	-0,87	1	0,951	0,917	0,976	0,938	0,948	0,973	1,018
	2	420	420	1,35	-0,55	-1,59	2							
6	1	-400	260	2,52	-	-	-	0,944	0,926	1,018	0,954	0,972	1,005	1,050
	2	400	400	1,08	-2	-	2							
	3	400	400	1,26	-3	-	3							
7	1	-400	260	1,80	-	-	-	0,933	0,947	1,050	0,967	0,977	1,020	1,087
	2	-400	260	1,08	0,83	1,08	1,5							
	3	400	400	1,08	0,83	1,08	1,5							
	4	400	400	1,17	3	-	3							

Непропорциональные режимы нагружения сплава ЭИ-607А с учетом мгновеннопластического деформирования и расчетные меры повреждений на момент разрушения

Режимы нагружения									Расчетные меры повреждений						
N режи-ма	N ступе-ни	σ_{xx} , МПа	$\tau_{x\theta}$, МПа	σ_z , МПа	$t \cdot 10^{-4}$, с	$\epsilon_{xx}^{МП}$, %	$\epsilon_{x\theta}^{МП}$, %	$\epsilon_i^{МП}$, %	П [1,2]	П _н	П _к	П _с	П _с '	П _τ	П _τ '
1	1	230	203	394,9	1,08	-	-	-	0,957	0,895	1,005	0,934	0,961	0,957	1,002
	2	230	203	394,9	1,08	-1,10	-0,55	2							
	3	230	203	394,9	0,99	-1,14	-0,72	3							
2	1	230	203	394,9	1,44	-	-	-	0,946	0,938	0,972	0,934	0,954	1,058	1,098
	2	230	203	394,9	1,44	-	-1,74	2							
	3	400	-	400	1,44	-	-1,74	2							
3	1	154	244	332,9	0,72	-	-0,87	1	1,112	0,885	1,082	0,942	0,993	0,915	0,988
	2	400	-	400	0,72	-	-0,87	1							
	3	400	-	400	0,72	-0,51	-2,01	2,5							
	4	400	-	400	0,36	-2,01	-2,09	4							
4	1	-230	-203	314,4	1,80	-	-	-	0,926	0,942	1,025	0,964	0,971	1,021	1,065
	2	-230	-203	314,4	1,08	1,00	-	1							
	3	400	-	400	1,08	1,00	-	1							
	4	400	-	400	1,26	-0,1	-1,44	3							

Предложено использовать комбинированное кинетическое уравнение повреждений в виде

$$P_e = \int_0^{\tau} \sigma_{\Sigma}(\theta) K(\tau - \theta) d\theta + (1 - P_n) \frac{e_i^{МП}}{e_{i,p}^{МП}}, \quad (8)$$

где $e_{i,p}^{МП}$ – интенсивность мгновеннопластической деформации, в первом варианте, на последнем участке нагружения (считаем то, что последний участок нагружения является определяющим). В другом варианте величину $e_i^{МП}$ представили суммой деформаций мгновеннопластических воздействий $e_i^{МП} = \Sigma e_i^{МП}$. Расчетные значения меры повреждений по уравнению (8), так же как и по соотношениям (6) и (8), не учитывают влияние момента и времени мгновеннопластического воздействия.

Другой вариант комбинированного уравнения повреждений представлен как

$$P_{\tau} = \int_0^{\tau} \sigma_{\Sigma}(\theta) K(\tau - \theta) d\theta + m \Sigma \frac{e_{i,j}^{МП} \tau_j}{e_{i,p}^{МП} \tau_p}, \quad (9)$$

где $e_{i,j}^{МП}$ – мгновеннопластическая деформация на соответствующей ступени нагружения, τ_j – время влияния деформации с момента воздействия до разрушения материала, $e_{i,p}^{МП} = 8\%$ – предельная мгновеннопластическая деформация, используемая в (5), τ_p – время опыта на деформирование сплава ($V=50$ мм/мин) до разрушения ($\tau_p = 60$ сек) при температуре $700^{\circ}C$, m – безразмерный коэффициент ($m=0,001$).

Расчетные значения меры повреждений сплава в двух вариантах P_{τ}' и P_{τ}'' представлены в таблицах 1 и 2. В первом варианте принято учитывать время воздействия мгновеннопластической деформации на последней ступени нагружения. Во втором варианте учитывается воздействие всех прило-

женных $e_i^{МП}$ деформаций. Мгновеннопластическая деформация не только вносит вклад в общую поврежденность, но и влияет на процесс накопления повреждений.

Эффективность применяемых уравнений повреждений оценивается путем сравнения расчетного значения меры повреждений P на момент фактического разрушения материала с тем теоретическим значением $P=1$, которое должно было бы наблюдаться при идеальном описании процесса разрушения. Так как в качестве функционального параметра уравнений повреждений силового типа используется кривая статической усталости (длительной прочности), а в уравнениях деформационного типа – зависимость предельных деформаций, отвечающие 50% вероятности разрушения, то можно предположить, что при нестационарном нагружении теоретическое условие $P=1$ отвечает той же вероятности. Эффективность анализируемых уравнений оценивается также величинами отклонений меры ΔP индивидуальных опытов от среднего значения меры повреждений (P_{CP}) для сопоставимых режимов нагружения.

В таблицах 1 и 2 представлены режимы нестационарного нагружения образцов сплава ЭИ-607А и расчетные меры повреждений материала на момент разрушения, а в таблице 3 приведены средние значения меры повреждений (P_{CP}) и величины отклонений ΔP .

Таблица 3

Средние значения и отклонения от среднего меры повреждений сплава

Обозначение	П[2] (6),(7)	П _н (7)	П _к (6)	П _с (8)	П _с ' (8)	П _τ (9)	П _τ ' (9)
П _{ср}	0,986	0,914	1,011	0,945	0,965	0,974	1,028
+ΔП	0,134	0,033	0,071	0,022	0,028	0,084	0,070
-ΔП	0,060	0,042	0,048	0,035	0,029	0,059	0,082

Комбинированное уравнение (6) удовлетворительно описывает процесс накопления повреждений. Однако определение параметра D связано с трудностями и дополнительными экспериментами. Отмечается значительный разброс значений меры повреждений по Бейли (3).

Расчеты меры повреждений по кинетическому уравнению наследственного типа (7) подтверждают вывод о влиянии мгновеннопластических деформаций на сопротивление длительному разрушению сплава (среднее значение меры повреждений на момент разрушения $P_H = 0,914$, то есть меньше теоретической величины $P=1$).

Возможен способ определения параметра D в зависимости (6) с использованием определенного количества опытов на нестационарное нагружение материала с мгновеннопластическими воздействиями различного вида напряженного состояния. Определена величина параметра $D = -0,92$.

Сопоставление значений меры повреждений по уравнениям (8) и (9) P_e' и P_e'' , а также P_τ' и P_τ'' не подтверждает определяющего влияния мгновеннопластического воздействия на последнем перед разрушением участке нагружения.

В комбинированном уравнении повреждений (9) имеется возможность учета момента и длительности мгновеннопластического воздействия на величину меры повреждений.

В данной статье предложены комбинированные уравнения повреждений P_e (8), P_τ (9) и P_k (аналог (6) при $D = -0,92$) для расчета меры повреждений при нестационарных режимах нагружения сплава с учетом мгновеннопластических воздействий.

Расчетные значения меры повреждений по предложенным комбинированным уравнениям близки к теоретическому значению, равному единице, причем отклонения значений меры от средней величины меры и повреждений сравнительно невелики.

Литература

1. Павлов, П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность / П.А. Павлов. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 252 с.
2. Новиков, А. П. Высокотемпературная ползучесть и длительное разрушение жаропрочного сплава с учетом мгновеннопластического деформирования при сложных нестационарных режимах нагружения : специальность 01.02.04 : автореферат диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. П. Новиков – Ленинград, 1983. – 18 с.
3. Огородов, Л. И. Экспериментальная проверка эффективности кинетических уравнений силового типа при описании длительного разрушения жаропрочного сплава в агрессивной среде в условиях нестационарного нагружения / Л. И. Огородов, А. С. Белов // Проблемы прочности. – 1995. – №3. – С. 19-27.
4. Огородов, Л. И. Экспериментальная проверка применимости кинетического уравнения повреждений наследственного типа для расчета момента разрушения жаропрочного сплава в условиях ползучести / Л. И. Огородов, С. Я. Куранаков // Вестник машиностроения. – 1995. – №10. – С. 26-28.
5. Огородов, Л. Н. Экспериментальная проверка применимости уравнений повреждений наследственного типа для оценки момента разрушения сталей и сплавов в условиях высокотемпературной ползучести при нестационарных режимах нагружения / Л. Н. Огородов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1996. – №4. – С. 98-107.
6. Куранаков, С. Я. Описание процесса разрушения жаропрочного сплава при малоцикловом нагружении и ползучести / С. Я. Куранаков, Л. И. Огородов // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, №3. – С. 129-131.
7. Куранаков, С. Я. Расчетно-экспериментальная оценка долговечности жаропрочного сплава в условиях малоцикловой усталости и ползучести / С. Я. Куранаков, Л. И. Огородов // Ползуновский вестник. – 2006. – №4. – С. 269-274.
8. Курилович, Н. Н. Поврежденность сплава 800Н при нестационарном длительном нагружении / Н. Н. Курилович, Л. И. Огородов, Ю. В. Сараев // Весті Нацыянальнай Акадэміі навук Беларусі. – 2001. – №2. – С. 5-9.

L.I. Ogorodov, V.A. Shapkina

MEASURE OF DAMAGE TO THE ALLOY AT THE TIME OF FRACTURE UNDER CONDITIONS OF NONSTATIONARY HIGH-TEMPERATURE LOADING WITH INSTANT PLASTIC INFLUENCE

The calculations of the measures of damage of the alloy EI-607A for unsteady modes high (700°C) loading given instant plastic deformation in complex stress state. The combined kinetic equations of damage are proposed.

Alloy, complex loading, creep, damage, kinetic equations, fracture.