

УДК 539.43

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ СПЛАВОВ**Медведь И. И.****SMALL-CYCLE FATIGUE OF CONSTRUCTION ALLOYS****Medved I.**

Построение математической модели процесса исследования малоциклового усталости конструкционных сплавов.

Ключевые слова: математическая модель, математические методы планирования, малоцикловая усталость, конструкционный сплав

Введение. Малоцикловая усталость является одним из главных факторов, определяющих долговечность (ресурс) основных деталей конструкции. Согласно мировой статистике основная доля разрушений в инженерной практике происходит именно по причине усталости, поэтому проблема усталости является одной из наиболее актуальных научно-технических задач современности, решение которой требует дополнительных комплексных экспериментальных и теоретических исследований.

Постановка задачи. Задача оценки несущей способности и долговечности в условиях воздействия циклических нагрузок имеет чрезвычайно большое значение. При циклических нагружениях возникает ряд специфических явлений и трудно учитываемых аналитически факторов, которые в первую очередь связаны с развитием усталостной поврежденности, с необходимостью оценки циклической и структурной нестабильности материалов [1]. Поскольку такие исследования являются очень трудоемкими и дорогостоящими, то проблема минимизации таких экспериментов в настоящее время является актуальной. В данной работе исследуется возможность использования математических методов планирования при проведении экспериментальных исследований при криогенных температурах. Под планированием эксперимента обычно понимают процедуру выбора объема и условий проведения испытаний, необходимых и достаточных для решения поставленной задачи с требуемой точностью.

Условия проведения эксперимента задаются набором факторов, представляющих собой независимые переменные величины, изменением

которых можно управлять в процессе эксперимента. Число возможных значений фактора, которые он принимает в различных опытах, принято называть его уровнями.

При планировании эксперимента предполагается, что каждому набору уровней факторов, то есть каждому опыту, соответствует вполне определенное поведение исследуемого объекта и соответствующие ему с точностью до ошибки опыта значение зависимой переменной (отклика).

Вид аналитической зависимости функции отклика от включенных в эксперимент факторов определяется природой изучаемого явления при этом запись в определенной последовательности условий проведения эксперимента, необходимых и достаточных для получения оценок неизвестных параметров функции отклика, называется планом эксперимента

Анализ последних достижений и публикаций. Проблемами прочности конструкционных сплавов в широком диапазоне температур занимается группа ученых под руководством профессора Стрижало В.А. Сложность и трудоемкость экспериментальных исследований определяет ограниченность информации по этому вопросу.

Цель работы. Исследование возможностей определения степени и характера влияния уровня максимальных напряжений цикла, предварительной пластической деформации температуры испытания на малоцикловую усталость титанового сплава ПТ-3В

Результаты исследований. В настоящей работе предполагалось определить степень и характер влияния уровня максимальных напряжений цикла (X_1^i), предварительной пластической деформации (X_2^i) и температуры испытания (X_3^i) на малоцикловую усталость титанового сплава ПТ-3В.

В качестве функции отклика y была принята величина $\lg N_p$ ($\lg N_p$ - число циклов до

разрушения). Среднее по области значение дисперсии опыта при этом составило $s_y^2 = 0.0032$.

Прямые исследования не проводились. Поэтому целесообразно было предположить нелинейную модель.

Для обеспечения максимально возможной точности в задании уровней фактора (X_3^i) предварительное деформирование проводилось в средах жидких хладагентов: азота и гелия, а также на воздухе при температурах 77, 4,2 и 293 К [2, 4].

Величину предварительной статической остаточной деформации фиксировали по диаграмме ($P - \Delta l$) с масштабом 1:200, а уровни фактора X_1^H - по предельной кривой прочности для образцов в исходном состоянии (таблица 1).

Таблица 1
Значение факторов в эксперименте

Номер фактора, i	Наименование фактора	F_i	Натуральное значение, X_1^H
1	Максимальное относительное напряжение цикла, $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_a}$	0	0,76
		1	0,85
		2	0,94
2	Величина предварительной остаточной деформации, $\varepsilon_i, \%$	0	0
		1	1
		2	3
3	Температура предварительного деформирования, T, K	0	4
		1	77
		2	300

План полного факторного эксперимента требует проведения 3^3 опытов, а сама модель содержит большое число эффектов взаимодействий, которые не всегда оказываются статистически значимыми. Поэтому было принято решение по результатам дробного факторного эксперимента 3^{3-1} строить модель главных эффектов с генерирующим

соотношением $F_3 = F_1 \cdot F_2^2$. Условия проведения опытов для реплики 3^{3-1} представлены в таблице 2.

Таблица 2
Условия проведения эксперимента

Номер опыта	F_1	F_2	F_3	X_1^i	X_2^i	X_3^i
1	0	0	0	0,76	0	4
2	1	0	1	0,85	0	77
3	2	0	2	0,94	0	300
4	0	1	2	0,76	1	300
5	1	1	0	0,85	1	4
6	2	1	1	0,94	1	77
7	0	2	1	0,76	3	77
8	1	2	2	0,85	3	300
9	2	2	0	0,94	3	4

Чтобы получить оценки параметров модели и провести статистическую обработку и интерпретацию результатов эксперимента, удобно провести нормализацию уровней факторов. Нормализованная матрица плана дробного факторного эксперимента 3^{3-1} и результаты опытов представлены в таблице 3.

В результате реализации опытов были получены оценки параметров модели:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11} Z_1 + \beta_{22} Z_2 + \beta_{33} Z_3,$$

где: X_1, X_2, X_3 - нормализованные значения линейных членов модели;

Z_1, Z_2, Z_3 - нормализованные значения квадратичных членов модели.

Для параметров β_i оценкой являются величины b_i . Таким образом, коэффициенты модели получились равные: $b_0 = 3.4639$, $b_1 = -1.1017$, $b_2 = -0.0341$, $b_3 = -0.0034$, $b_{11} = -0.1534$, $b_{22} = 0.0290$, $b_{33} = 0.0056$.

Таблица 3
Нормализованная матрица плана

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	Z_1	Z_2	Z_3	$\lg N_p$
1	1	-1	-4	-2.5	1	2	3	4.5750
2	1	0	-4	-1.0	-2	2	-4	3.9500
3	1	1	-4	3.5	1	2	1	2.4500
4	1	-1	-1	3.5	1	-3	1	4.3876
5	1	0	-1	-2.5	-2	-3	3	3.7552
6	1	1	-1	-1.0	1	-3	-4	2.0899
7	1	-1	5	-1.0	1	1	-4	4.2739
8	1	0	5	3.5	-2	1	1	3.6068
9	1	1	5	-2.5	1	1	3	2.0864

Проверка их статистической значимости показала, что оценки b_3 и b_{33} являются статистически незначимыми. Так как матрица плана ортогональна, то соответствующие им факторы можно исключить из модели без пересчета оставшихся. Тогда уточненная модель будет иметь вид:

$$y = 3.4639 - 1.1017X_1 - 0.0341X_2 - 0.1534Z_1 + 0.0290Z_2.$$

Гипотезу об адекватности полученной модели проверяли по F- критерию Фишера. При уровне значимости $\alpha = 0.05$ уточненная модель достаточно точно описывает малоцикловую усталость сплава ПТ-3В.

Для интерпретации полученных результатов следует перейти к натуральным значениям исследуемых факторов. В этом случае модель будет иметь вид:

$$\lg N_p = -26.6783 + 84.3436X_1^i - 0.3130X_2^i - 56.8147(X_1^i)^2 + 0.0677(X_2^i)^2.$$

Выводы. Получена математическая модель, определяющая степень и характер влияния уровня максимальных напряжений цикла, предварительной пластической деформации температуры испытания на малоцикловую усталость титанового сплава ПТ-3В. Анализ полученной математической модели показывает, что предположение о нелинейном влиянии максимального напряжения цикла и предварительной деформации подтвердилось. Статистическую незначимость оценок b_3 и b_{33} можно интерпретировать как отсутствие влияния температуры предварительного деформирования на долговечность титанового сплава ПТ-3В. К тому же для решения поставленной задачи объем испытаний сократился примерно в 15 раз.

Л и т е р а т у р а

1. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур / Стрижало В.А. – К.: Наук. думка, 1978. – 238 с.
2. Медведь И.И. Малоцикловая усталость хромомарганцевой стали 03Х13АГ19 при низких температурах (293-4,2К)/И.И. Медведь // Проблемы прочности. - 1986. - № 4. – С. 38–41.
3. Клявин О.В. Физика пластичности кристаллов при гелиевых температурах /Клявин О.В. – М.: Наука, 1987. – 256 с.
4. Медведь И.И.Циклическая ползучесть конструкционных сплавов при глубоком охлаждении/ И.И.Медведь, Н.Л.Белевцова//Сборник научных трудов ДонДТУ.-2011.-Вып.35.-С.252-257.

R e f e r e n c e s

1. Strizhalo VA Cyclic strength and creep of metals under low-cycle loading under low and high temperatures / Strizhalo VA - K.: Science. dumka, 1978. - 238 p.
2. Medved I Low-cycle fatigue of chromium-manganese steel 03H13AG19 at low temperatures (293-4.2K) / I. Medved // Problems of Strength. - 1986. - No. 4. - P. 38-41.
3. Klyavin O.V. Physics of plasticity of crystals at helium temperatures / Klyavin OV - Moscow: Nauka, 1987. - 256 p.
4. Medved I Cyclic creep of structural alloys at deep cooling / I Medved, N L Belevtsova // Collected scientific works of DonNTU.-2011.-Вып.35.-С. 252-257

Медвідь І.І. Малоциклова втома конструкційних сплавів

Побудова математичної моделі процесу дослідження малоциклової сталості конструкційних сплавів.

Ключові слова: математична модель, математичні методи планування, малоциклова сталість, конструкційний сплав.

Medved I. Small-cycle fatigue of construction alloys

The construction of a mathematical model of the research process cycle fatigue of structural alloys.

Keywords: mathematical model, mathematical methods of planning, low cycle fatigue of structural alloys.

Медвідь І.І. – к.т.н., доцент, доцент кафедри «будівництво, урбаністики та просторового планування» Східноукраїнського національного університету, e-mail: iw.medwed@yandex.ua.

Рецензент: д.т.н., проф. **Смолій В.М.**

Стаття подана 12.11.2018