

УДК: 669.245.018.4: 539.376

М.Р. ОРЛОВ¹, Е.М. ОРЛОВ²¹ *Открытое акционерное общество «Мотор Сич», Украина*² *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КИНЕТИКИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В НИКЕЛЕВОМ ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ ЖС6У-ВИ

Проблема определения кинетики развития высокотемпературных релаксационных процессов в литых турбинных лопатках из никелевого жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ решена в рамках линейного закона термофлуктуационного механизма ползучести с использованием аналитических и численных методов анализа. Полученные аналитические зависимости могут применяться для расчета процессов релаксации в деталях газотурбинного тракта авиационных двигателей, с учетом данных о высокотемпературной ползучести жаропрочных никелевых сплавов.

никелевый жаропрочный сплав ЖС6У-ВИ, линейный закон термофлуктуационного механизма ползучести, метод наименьших квадратов, численные методы анализа, релаксация, литые турбинные лопатки.

Введение

Увеличение ресурса рабочих и сопловых лопаток охлаждаемой конструкции из литейных жаропрочных никелевых сплавов ставит ряд вопросов перед разработчиками авиационных двигателей как по оптимизации профиля проточной поверхности лопаток, так и по оптимизации тепловых полей и полей напряжений в пере лопаток.

Наличие температурных градиентов в лопатках охлаждаемой конструкции создает дополнительные поля напряжений, которые в сочетании с силовым нагружением лопаток от воздействия газового потока и центробежных сил могут достигать величины предела пропорциональности жаропрочного никелевого сплава. Эксплуатация жаропрочных никелевых сплавов в температурном интервале 800 – 1000 °С сопровождается развитием процессов ползучести при нагрузках ниже предела пропорциональности. Циклическое упругопластическое нагружение сплава приводит к развитию термоусталостных трещин в зонах, не относящихся к «опасным» сечениям пера лопаток, а накопление необратимых микродеформаций сопровождается перераспределением макронапряжений в лопатках и искажению геометрии проточных поверхностей.

Высокотемпературная ползучесть жаропрочных никелевых сплавов достаточно подробно изучена как с позиций физики самого процесса – генерирования и взаимодействия дислокаций, неконсервативного движения дислокаций, самодиффузии легирующих компонентов сплава и диффузии вакансий, так и в направлении набора базы данных фактических свойств литейных жаропрочных сплавов – характеристик длительной прочности и скорости ползучести под постоянной нагрузкой.

Однако в условиях реальной работы охлаждаемых лопаток происходит перераспределение полей напряжений, ограничивающее развитие процессов ползучести сплава. Эффект перераспределения упругих напряжений называется релаксацией. Релаксация находит широкое применение в технологии двигателестроения в виде операций отжига или отпуска заготовок для снятия объемных остаточных напряжений после литья, деформации, закалки, сварки и механической обработки.

1. Формулирование проблемы

Кинетика развития релаксационных процессов вызывает бесспорный интерес, однако ее исследование имеет определенные трудности. В связи с тем,

что процесс релаксации эквивалентен абсолютно «жесткой» схеме испытаний образца с контролем фиксированной деформации в малом диапазоне ее значений (соответствующем упругому поведению сплава при кратковременном нагружении) при значительном времени выдержки для регистрации реальных изменений нагрузки, проведение таких испытаний становится практически нереальным. Малая скорость релаксационных процессов

$$(\dot{\varepsilon}_{\text{рел}} < 10^{-8}, \text{с}^{-1})$$

позволяет отнести их к линейным законам термофлуктуационных механизмов ползучести [1]:

- вакансионной ползучести Набарро-Херинга;
- зернограничной ползучести Кобла;
- дислокационной ползучести Харпера-Дорна

$$\dot{\varepsilon}_{\text{рел}}(t) = \sigma^n(t) \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (1)$$

для которых показатель $n = 1$; $\sigma(t)$ – изменяющаяся во времени величина напряжения; Q – энергия активации процесса ползучести; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Для работающей лопатки в момент времени t напряжение в исследуемой зоне определяется согласно закону Гука

$$\sigma(t) = E \varepsilon(t), \quad (2)$$

где $\varepsilon(t)$ – величина упругой деформации; E – модуль упругости Юнга при температуре T .

Если в начальный момент времени ($t = 0$) напряжение максимально, то с течением времени в результате протекания релаксационных процессов оно будет уменьшаться в соответствии с увеличением деформации релаксации и уменьшением упругой деформации:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon(0) - \varepsilon_{\text{рел}}(t). \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в (2), а затем в (1) и выполнив замену $A = e^{-\frac{Q}{RT}}$, получим:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{рел}}(t) = AE(\varepsilon(0) - \varepsilon_{\text{рел}}(t)). \quad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (4) дает временную зависимость деформации релаксации

$$\varepsilon_{\text{рел}}(t) = \varepsilon(0)(1 - e^{-AEt}) \quad (5)$$

и скорости релаксации

$$\dot{\varepsilon}_{\text{рел}}(t) = A\sigma(0) \cdot e^{-AEt}. \quad (6)$$

Если учесть, что величина A включает энергию активации по крайней мере трех термофлуктуационных механизмов ползучести, в свою очередь, зависящую от величины приложенного напряжения $\sigma(t)$, то решение дифференциального уравнения (6) весьма усложняется. А если учесть и тот факт, что задача о нахождении $A(t)$ для сплавов до настоящего времени не решена, то дифференциальное уравнение (6) в данном случае не имеет аналитического решения.

Переход от «жесткой» схемы испытаний жаропрочного сплава на релаксацию в условиях фиксированной деформации к «мягкой», с контролем постоянной величины напряжения при испытаниях на длительную прочность, позволяет определить «мгновенную» скорость релаксации в уравнении (6). Набор результатов испытаний жаропрочного сплава на ползучесть при различных фиксированных значениях температуры и приложенного напряжения позволяет воссоздать диаграмму релаксации с применением численных методов анализа.

2. Решение проблемы

Одним из наиболее распространенных жаропрочных сплавов, используемых для литых лопаток охлаждаемой конструкции, является сплав ЖС6У-ВИ, для которого имеется достаточно большой объем экспериментальных данных. Результаты испытаний сплава ЖС6У-ВИ на длительную прочность с определением времени достижения образцом деформации $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-3}$, полученные в работе [2], представлены в виде логарифма скорости ползучести для

различных температурно-силовых условий нагружения в табл. 1.

Таблица 1
Скорость ползучести жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ

№ п/п	Скорость ползучести, $\ln \dot{\epsilon}$	Температура T , °C	Нагрузка σ , МПа
1	-15,796	800	660
2	-18,099	800	550
3	-19,708	800	470
4	-20,401	800	440
5	-15,796	900	400
6	-18,099	900	295
7	-19,708	900	235
8	-20,401	900	210
9	-15,796	1000	210
10	-18,099	1000	135
11	-19,708	1000	94
12	-20,401	1000	80

Обработка данных, приведенных в табл. 1, методом наименьших квадратов позволяет получить аппроксимирующую функцию в виде полинома второго порядка:

$$\ln \dot{\epsilon} = a_1 + a_2 \cdot \sigma + a_3 \cdot T + a_4 \cdot \sigma \cdot T, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} a_1 &= -55,46; \\ a_2 &= -2,772 \cdot 10^{-2}; \\ a_3 &= 3,277 \cdot 10^{-2}; \\ a_4 &= 5,997 \cdot 10^{-5}. \end{aligned} \quad (8)$$

Графическое изображение полученной зависимости (7) представлено на рис. 1.

Аппроксимирующая функция зависимости скорости ползучести от температуры и напряжения содержит также в неявном виде зависимость и от временного параметра.

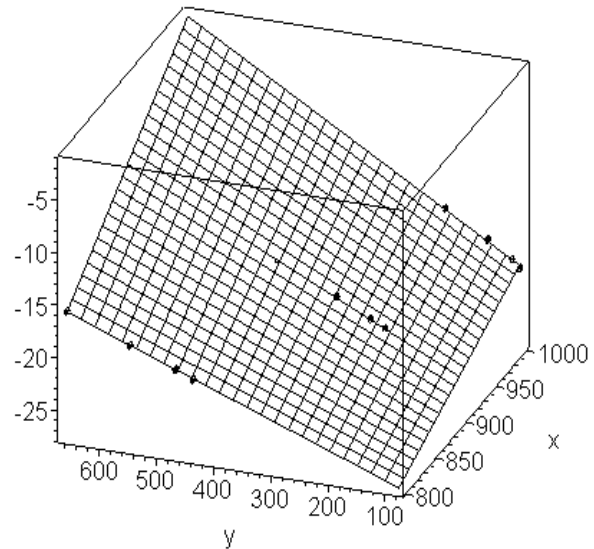


Рис. 1. Графическое изображение полученной зависимости (7)

Зависимость скорости ползучести от времени определяется изменением напряжения во времени, например, в процессе релаксации сплава под нагрузкой. В соответствии с этим, выражение (7) можно представить в виде

$$\dot{\epsilon}(t) = e^{a_1 + a_2 \cdot \sigma(t) + a_3 \cdot T + a_4 \cdot \sigma(t) \cdot T}. \quad (9)$$

Используя функцию (9) для описания процесса релаксации вместо уравнения (1), получим дифференциальное уравнение, имеющее решение. Для этого подставим выражение (3) в выражение (2), а затем в (9):

$$\dot{\epsilon}_{\text{рел}}(t) = e^{b - a \epsilon_{\text{рел}}(t)}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} a &= E(a_2 + a_4 T); \\ b &= a_1 + a_3 T + E \epsilon(0) \cdot (a_2 + a_4 T) \end{aligned} \quad (11)$$

или с учетом формулы (2):

$$\begin{aligned} a &= E(a_2 + a_4 T); \\ b &= a_1 + a_3 T + \sigma(0)(a_2 + a_4 T). \end{aligned}$$

Решим это дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon_{\text{рел}}(t)}{dt} &= e^{b - a \epsilon_{\text{рел}}(t)}; \\ e^{a \epsilon_{\text{рел}}(t) - b} d\epsilon_{\text{рел}}(t) &= dt. \end{aligned}$$

Проинтегрировав последнее, получим:

$$\int e^{a\varepsilon_{\text{рел}}(t)-b} d\varepsilon_{\text{рел}}(t) = \int dt ;$$

$$\frac{1}{a} \int e^{a\varepsilon_{\text{рел}}(t)-b} d(a\varepsilon_{\text{рел}}(t)-b) = \int dt ;$$

$$\frac{e^{a\varepsilon_{\text{рел}}(t)-b}}{a} = t + C ;$$

$$e^{a\varepsilon_{\text{рел}}(t)-b} = at + C ;$$

$$\varepsilon_{\text{рел}}(t) = \frac{\ln(at + C) + b}{a} .$$

Учитывая то, что $\varepsilon_{\text{рел}}(t) = 0$, найдем параметр C :

$$\varepsilon_{\text{рел}}(0) = 0 = \frac{\ln(C) + b}{a} ;$$

$$C = e^{-b} .$$

Решение дифференциального уравнения будет иметь вид временной функции деформации релаксации

$$\varepsilon_{\text{рел}}(t) = \frac{\ln(at + e^{-b}) + b}{a} \quad (12)$$

и скорости релаксации

$$\dot{\varepsilon}_{\text{рел}}(t) = \frac{1}{at + e^{-b}} . \quad (13)$$

Заключение

1. Полученные зависимости деформации релаксации (12) и скорости релаксации (13) в сочетании с заданными значениями температуры, исходного

уровня напряжений, модуля упругости Юнга (11) и численными значениями коэффициентов (8), позволяют выполнить расчеты изменения напряженного состояния лопаток турбины с течением времени эксплуатации двигателя. Полученные зависимости также позволяют оценить величину остаточных напряжений в лопатках после их охлаждения и рассчитать температурно-временные режимы релаксационного отжига деталей из жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ.

2. Аналитические зависимости скорости и величины деформации релаксации могут применяться для расчетов процесса релаксации других жаропрочных никелевых сплавов с учетом соответствующих этим сплавам аппроксимирующих полиномов высокотемпературной ползучести.

Литература

1. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. II. Деформация: Учебник для вузов. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
2. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. – М.: Машиностроение. 1998. – 464 с.

Поступила в редакцию 27.12.2004

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.Г. Николаев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.