

О влиянии предварительного пластического деформирования на малоцикловую усталость титанового сплава в условиях глубокого охлаждения

В. А. Стрижало

Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

Рассмотрены результаты исследования малоцикловой усталости титанового сплава ПТЗВ (основа – Ti, 4,5%Al, 2,1%V) при температурах 293, 77 и 4,2 К с учетом влияния на долговечность величины предварительной пластической деформации (0,05; 1,0; 3,0%), реализованной в материале при тех же температурах. Для уменьшения трудоемкости и стоимости испытаний при их планировании и обработке результатов использованы методы математического планирования эксперимента и факторного анализа. Установлено, что наиболее существенно долговечность исследованного сплава снижается при температуре испытаний 4,2 К для деформации 3,0%, реализованной в жидком гелии.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, криогенные температуры, планирование эксперимента, факторы, долговечность

Особенности упругопластического деформирования и разрушения материалов при малоцикловом нагружении обусловлены рядом эксплуатационных и технологических факторов, среди которых можно выделить температурные условия эксплуатации и предварительное пластическое деформирование материала в процессе изготовления конструкции и ее транспортировки. При оценке несущей способности и долговечности криогенных конструкций ограниченного ресурса влияние этих факторов необходимо учитывать, поскольку, как показали исследования, оно может быть весьма существенным для определенного сочетания низких температур и уровней пластических деформаций [1]. Ниже рассмотрены результаты экспериментального исследования такого влияния на малоцикловую усталость титанового сплава ПТЗВ (основа – Ti, 4,5%Al, 2,1%V) в области криогенных температур.

Испытания проводили на плоских образцах (размеры рабочей части $4 \times 3,5 \times 30$ мм) при температурах 293 К (на воздухе), 77 К (в жидком азоте) и 4,2 К (в жидком гелии). Образцы подвергали повторному пульсирующему нагружению с частотой, близкой к 2 цикл/мин, при этом максимальная нагрузка поддерживалась постоянной в течение всей длительности испытаний.

Величину предварительной деформации задавали при однократном статическом нагружении образца на трех уровнях: 0,05; 1,0 и 3,0% при температурах 293; 77 и 4,2 К.

Низкотемпературные испытания проводили в специальных камерах и криостатах, обеспечивающих поддержание постоянной температуры в течение всей длительности испытаний и малые расходы хладагентов [2].

По долговечности область малоцикловой усталости соответствует интервалу числа циклов от 0,5 до $5 \cdot 10^4$, и на больших базах такие испытания

характеризуются достаточно большой продолжительностью по времени и трудоемкостью, что при испытаниях в условиях криогенных температур приводит к значительным материальным затратам ввиду использования дорогостоящих хладагентов, в частности жидкого гелия, и прецизионной технической базы для глубокого охлаждения. В нашем случае необходимо было исследовать влияние нескольких факторов на малоцикловую усталость, что при реализации традиционных подходов к изучению многофакторных процессов на основе классического планирования эксперимента обуславливает его усложнение и удорожание. При таком планировании весь цикл исследований представляет собой набор однофакторных экспериментов, в каждом из которых изучается влияние какого-либо одного фактора при постоянстве других. При этом общее число опытов весьма большое даже при сравнительно небольшом количестве изучаемых факторов и принятых их уровней.

Один из возможных путей решения проблемы многофакторного эксперимента, обеспечивающий уменьшение трудоемкости и стоимости проводимых исследований наряду с повышением точности результатов, – применение методов математического планирования эксперимента и факторного анализа [3, 4]. Это позволит существенно сократить общее число опытов и оптимально использовать факторное пространство при одновременном варьировании всеми независимыми переменными, обеспечивая тем самым повышение точности результатов.

В зависимости от характера факторов (непрерывный, дискретный или смешанный), включенных в эксперимент, и их количества можно применять различные планы. В нашем случае изучалось влияние предварительной деформации (X_2) и температуры (X_3), при которой эта деформация задается, на долговечность в зависимости от уровня максимальных напряжений цикла (X_1) и температуры испытаний на малоцикловую усталость (X_4). В качестве функции отклика принят логарифм долговечности $y = \lg N_p$, где N_p – число циклов до разрушения.

Полученные ранее [5, 6] результаты для образцов в исходном состоянии при температурах 293, 77 и 4,2 К свидетельствуют, что при малоцикловой усталости функция отклика нелинейно зависит от X_1 , а ряд дисперсий однороден. Поэтому представляется целесообразным использовать нелинейную по независимым параметрам X_i модель, а для этого необходимо, чтобы все факторы варьировались не менее чем на трех уровнях, что и было реализовано, как отмечалось выше, для факторов X_2 и X_3 . Величину уровней X_1 устанавливали по кривой малоцикловой усталости для образцов в исходном состоянии.

Анализ известных данных о малоцикловой усталости также показывает, что циклическая прочность материала существенно зависит от температуры испытаний [5, 6]. Следовательно, поскольку факторы X_1 и X_4 являются зависимыми, они не могут быть включены в план эксперимента. В связи с этим весь объем рассматриваемых исследований был разбит на блоки по параметру X_4 , в каждом из которых исследования проводились только для факторов X_1, X_2, X_3 отдельно при температурах 293, 77 и 4,2 К.

Дискретный характер уровней X_3 и их несимметричное расположение обусловило использование факторного планирования эксперимента.

План полного факторного эксперимента, в котором три фактора варьируются на трех уровнях (3^3), включает 27 опытов (рис. 1). По результатам такого эксперимента можно построить полную факторную модель, содержащую 27 членов и поэтому обеспечивающую получение избыточной информации, так как эффекты взаимодействий высших порядков редко оказываются статистически значимыми.

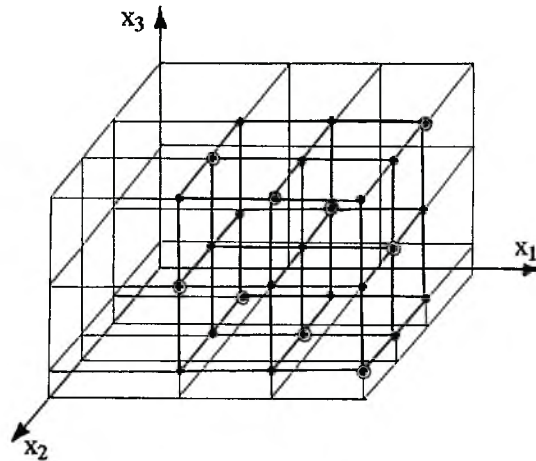


Рис. 1. Схема полного 3^3 (●) и дробного 3^{3-1} (○) факторного эксперимента.

Поскольку на практике чаще всего применяют неполные факторные модели и соответствующие им дробные факторные планы, в нашем случае для описания зависимости долговечности от исследуемых факторов использована модель главных эффектов, содержащая семь членов:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{11}(X_1)^2 + \beta_{22}(X_2)^2 + \beta_{33}(X_3)^2, \quad (1)$$

где X_i и $(X_i)^2$ – натуральные значения уровней факторов. Ближайшим по числу опытов планом, в котором факторы варьируются на трех уровнях, является план дробного факторного эксперимента 3^{3-1} . По результатам такого эксперимента, содержащего всего девять опытов, условия проведения которых представлены на рис. 1, можно получить выборочные оценки параметров модели (1).

Реализацию опытов факторного плана производили в случайном порядке.

Оценка статистической значимости коэффициентов модели (1), полученных в результате эксперимента, показала, что их количество зависит от температуры испытаний. Адекватные модели, записанные в натуральных значениях факторов для исследованных температур с учетом статистически значимых коэффициентов, имеют следующий вид:

для температуры 293 К –

$$y = -22,015 + 0,94\sigma_{\max} - 0,059\varepsilon_{\text{п.п}} - 0,0000833\sigma_{\max}^2; \quad (2)$$

для температуры 77 К –

$$y = -53,652 + 0,1072\sigma_{\max} - 0,0677\varepsilon_{\text{п.п}} - 0,0000499\sigma_{\max}^2; \quad (3)$$

для температуры 4,2 К –

$$y = 5,3240 + 0,0131\sigma_{\max} - 0,2060\varepsilon_{\text{п.п}} + 0,0046T_{\text{п.п}} - 0,0000122T_{\text{п.п}}^2, \quad (4)$$

где σ_{\max} – максимальные напряжения цикла; $\varepsilon_{\text{п.п}}$ – величина предварительной пластической деформации; $T_{\text{п.п}}$ – температура предварительного деформирования.

На рис. 2 приведены результаты эксперимента и расчета для титанового сплава ПТЗВ в исходном состоянии и предварительно деформированного при заданных температурах. Данные о малоциклового усталости материала в исходном состоянии представлены доверительными областями 1 без соответствующих экспериментальных точек для ясности графиков. Там же показаны рассчитанные по моделям (2)–(4) 95%-ные доверительные области кривых малоциклового усталости при $\varepsilon_{\text{п.п}} = 3\%$ и $T_{\text{п.п}} = 77$ К (область 3) и 4,2 К (область 2).

Общая закономерность полученных экспериментальных данных заключается в том, что с понижением температуры испытаний циклическая прочность материала в исходном состоянии и предварительно деформированного увеличивается. При этом предварительное деформирование вызывает в общем случае снижение долговечности по сравнению с исходным материалом, особенно при температуре 4,2 К. Температура предварительного деформирования оказывает существенное влияние на долговечность также при температуре испытаний на малоциклового усталость 4,2 К.

Сопоставление рассчитанных по моделям данных с экспериментальными свидетельствует о том, что при принятом 5%-ном уровне значимости полученные модели в соответствии с критерием Фишера достаточно точно описывают кривые малоциклового усталости предварительно деформированных образцов из сплава ПТЗВ. Отметим, что при $X_2 = 0$ построенные по уравнениям (2)–(4) кривые малоциклового усталости совпадают с экспериментальными кривыми для недеформированных образцов.

Необходимо подчеркнуть, что в отличие от коэффициентов интерполяционных уравнений, которые можно получить по результатам однофакторного эксперимента, коэффициенты модели (1) имеют определенный физический смысл: их величина и знак отражают степень и характер влияния того или иного фактора или их взаимодействия. Так, сопоставление уравнений (2)–(4) показывает, что температура предварительного деформиро-

вания для области исследованных деформаций 0,05...3,0% практически не оказывает влияния на долговечность сплава ПТЗВ при температурах испытаний 293 и 77 К (коэффициенты β_3 и β_{33} статистически незначимы) и вызывает изменение долговечности при 4,2 К (коэффициенты β_3 и β_{33} статистически значимы). Этот вывод подтверждается результатами эксперимента (рис. 2).

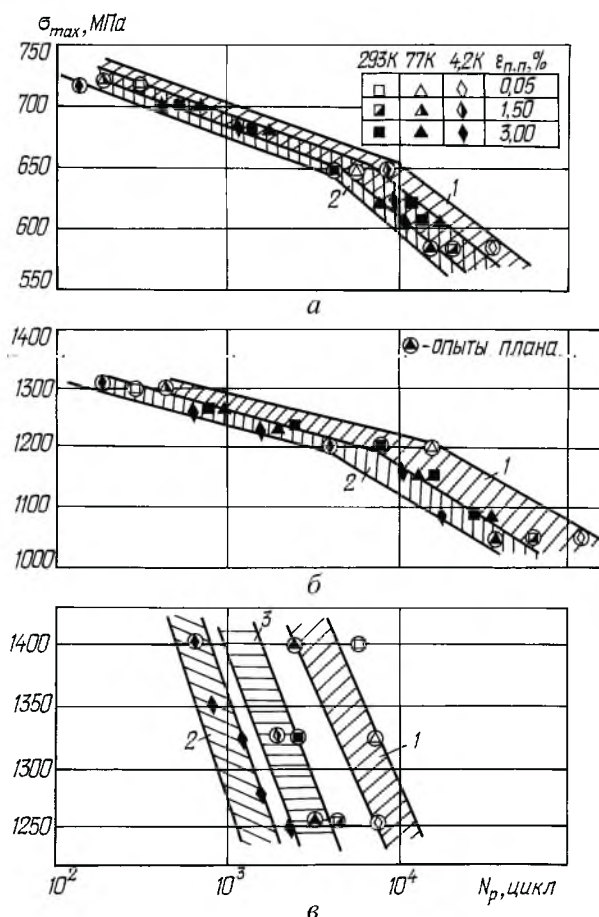


Рис. 2. 95%-ные доверительные области кривых малоциклового усталости сплава ПТЗВ при температурах 293 К (а), 77 К (б) и 4,2 К (в): точки без кружков – результаты прямых экспериментов для проверки разработанных моделей; точки с кружками – результаты опытов дробного факторного плана.

Разработанные модели также позволяют учесть экспериментально установленный факт усиления влияния предварительной деформации на долговечность при понижении температуры испытаний на малоцикловую усталость: величина деформации является определяющей в формировании долговечности при температуре жидкого гелия (4,2 К). Наиболее существенное смещение кривых малоциклового усталости в область меньших долговечностей наблюдается для сплава ПТЗВ при температуре испытаний 4,2 К для деформации 3,0%, реализуемой в жидком гелии (рис. 2,в).

Выводы

1. Экспериментальная проверка показала достаточно хорошую адекватность разработанных математических моделей для описания малоциклового усталости конструкционного сплава после его предварительного деформирования в низкотемпературных условиях. Как следует из приведенных на рис. 2 данных, все экспериментальные точки попадают в 95%-ные доверительные области 2 и 3, рассчитанные по моделям для соответствующих условий нагружения.

2. Использование дробных факторных планов позволяет существенно сократить трудоемкость и стоимость многофакторных испытаний на малоцикловую усталость. Для решения поставленной задачи традиционными методами потребовалось бы испытать в соответствии с требованиями стандартов на малоцикловую усталость до 150 образцов; использование методов планирования дало возможность сократить объем испытаний более чем на один порядок. При этом с помощью полученных моделей можно прогнозировать долговечность для любых значений факторов из области планирования.

Резюме

Розглянуто результати дослідження малоциклової втоми титанового сплаву ПТЗВ (основа – Ti, 4,5%Al, 2,1%V) за температур 293, 77 та 4,2 К з урахуванням впливу на довговічність величини попередньої пластичної деформації (0,05; 1,0; 3,0%), що реалізується в матеріалі за вказаних температур. Для зменшення трудомісткості та вартості випробувань при їх плануванні й обробці результатів використано методи математичного планування експерименту і факторного аналізу. Встановлено, що найбільш суттєво довговічність досліджуваного сплаву знижується за температури випробувань 4,2 К для деформації 3,0%, що реалізується в рідкому гелії.

1. *Стрижало В. А., Медведь И. И.* Влияние предварительного пластического деформирования на малоцикловую усталость хромомарганцевой стали 03X13AG19 при температуре 4,2 К // Пробл. прочности. – 1986. – № 5. – С. 62 – 67.
2. *Писаренко Г. С., Стрижало В. А.* Экспериментальные методы в механике деформируемого твердого тела. – Киев.: Наук. думка, 1986. – 246 с.
3. *Стрижало В. А., Медведь И. И.* Планирование эксперимента при механических испытаниях. – Киев, 1985. – 51 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т пробл. прочности.)
4. *Новик Ф. С., Арсов Л. Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования эксперимента. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

5. *Стрижало В. А., Зинченко А. И.* Влияние глубокого охлаждения на особенности деформирования и разрушения титановых сплавов в малоцикловой области // Изв. АН СССР. Металлы. – 1980. – № 4. – С. 184 – 190.
6. *Стрижало В. А., Медведь И. И.* Влияние глубокого охлаждения на малоцикловую усталость титанового сплава ПТЗВ // Пробл. прочности. – 1986. – № 6. – С. 52 – 55.

Поступила 24. 12. 99