

Царегородцев Рафаэль Сергеевич, магистр,

Российский университет транспорта, Российская Федерация, г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

Аннотация: Цель исследования – применение металлических изделий с комбинированным покрытием на примере сплава Нитинол (NiTi), а также экспериментальные наблюдения за усталостным разрушением сплавов для прогнозирования усталостного срока службы.

Ключевые слова: Нитинол (NiTi), усталостное разрушение сплавов, термомеханическая усталость, усталостная долговечность сплавов.

Abstract: The purpose of the study is the use of metal products with a combined coating on the example of the Nitinol alloy (NiTi), as well as experimental observations of fatigue failure of alloys to predict fatigue life.

Keywords: Nitinol (NiTi), fatigue failure of alloys, thermomechanical fatigue, fatigue durability of alloys.

Механическая усталость металлов с покрытием PVD Ti-Ni.

В настоящее время в машиностроении широко применяют металлы с напылением сплавов, которые используются для улучшения эксплуатационных характеристик изделия.

Для сплава с NiTi было проведено достаточно много исследований, чтобы определить их усталостное разрушение, вызванное циклическим нагружением, контролируемым напряжением или деформацией, которым является механическая усталость. Поскольку сплав NiTi впервые использовались в основном в виде проволоки, ранние исследования механической усталости были

сосредоточены на усталостных повреждениях при изгибе и вращении в условиях циклического нагружения, контролируемого деформацией или перемещением. Репрезентативными исследованиями являются исследования, проведенные Микурией и др., Tobushi et al., Sawaguchi et al.), Вагнер и др., Yan et al., Коллеров и др. и так далее.

Например, Tobushi et al. изучили малоцикловую усталость проводов, изготовленных из сплавов NiTi, выполнив испытания на усталость при вращении и изгибе в воздухе, воде и кремниевом масле, соответственно, и выявили влияние температуры испытания на усталость, температуры обработки памяти формы и окружающей среды на усталостную долговечность. Наконец, они пришли к выводу, что в области усталости с низким циклом коррозия, вызванная водой, и температура обработки практически не влияют на усталостную долговечность проводов, а усталостная долговечность, полученная при повышенной температуре воздуха, такая же, как и при одинаковой температуре воды.

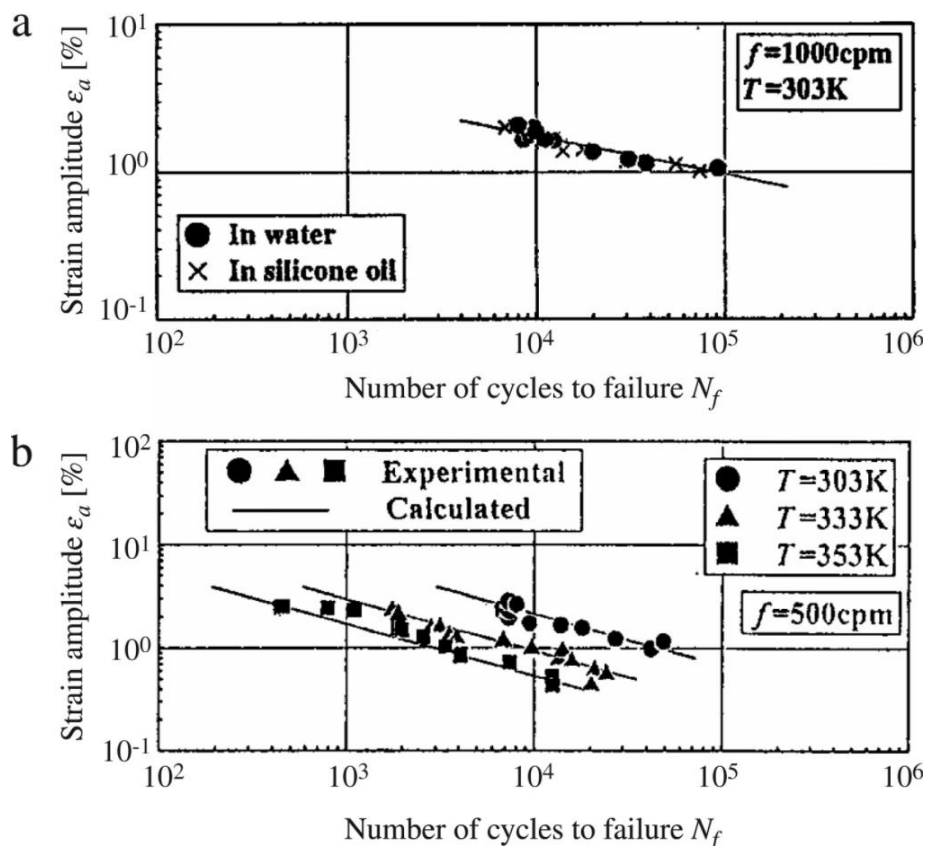


Рисунок 2 - Амплитуда деформации в зависимости от усталостной долговечности: (а) в воде и в силиконовом масле; (б) при различных температурах испытания в воде.

Термомеханическая усталость.

Поскольку приводы, изготовленные из сплавов NiTi, часто подвергаются термически активируемому циклическому преобразованию и используются для преодоления силы смещения, которая может быть постоянной или переменной во время работы, ухудшение эффекта памяти формы и структурный усталостный разрыв также являются основными режимами разрушения сплавов при термоциклировании. Таким образом, необходимо понять термомеханическое усталостное поведение данных сплавов при различных условиях приложенных напряжений. Бигеон и Морин впервые провели экспериментальное наблюдение за термомеханическим усталостным разрушением проводов из сплавов с NiTi, испытывающих циклическое температурно-индуцированное мартенситное превращение. Основываясь на построении экспериментальной установки по термомеханической усталости (показанной на рис. 3(a)) Карху и Линдрос [2] были проведены некоторые термомеханические усталостные испытания проволок и пластин NiTi, подвергнутых термоциклированию с постоянным осевым напряжением или деформацией, а затем исследовалось влияние постоянного напряжения (или деформации), степени трансформации во время термоциклирования, амплитуды приложенной температуры и термообработки на циклически накопленную остаточную деформацию и усталостную долговечность материала.

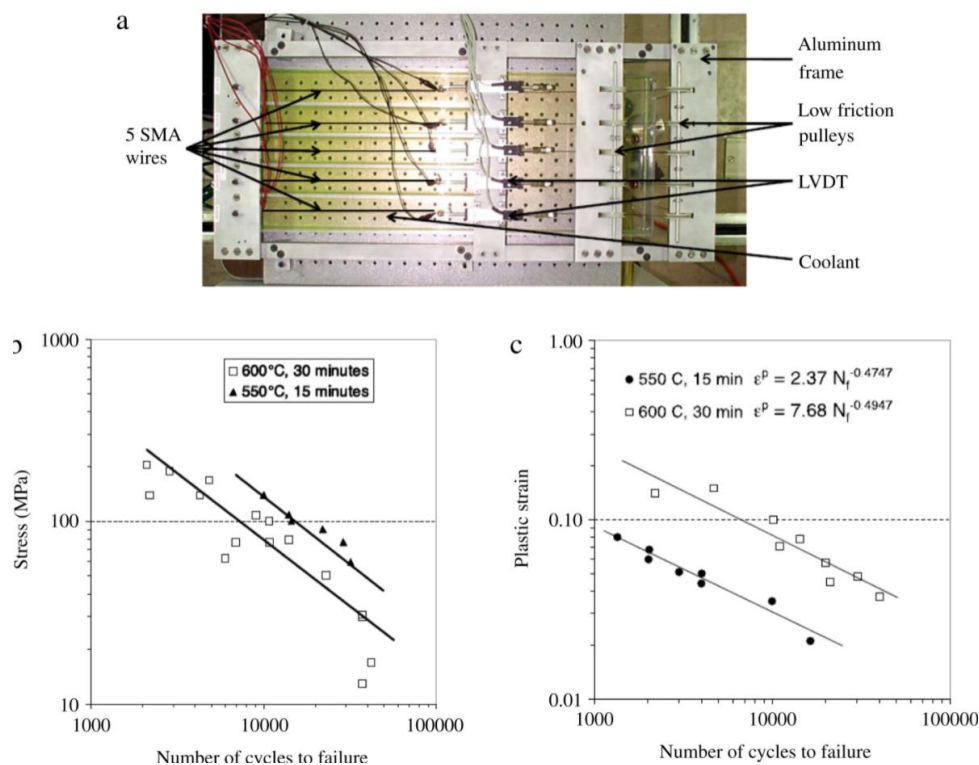


Рисунок 3 - Термомеханическая усталость сплавов NiTi: (а) экспериментальная установка, вид сверху; (б) постоянное осевое напряжение и усталостная долговечность; (в) пластическая деформация и усталостная долговечность в случае полного преобразования [2]

Результаты показывают, что во время термического цикла с постоянным осевым напряжением пиковые и долинные деформации постепенно увеличиваются с увеличением числа термических циклов и становятся более заметными с увеличением постоянного осевого напряжения; в то время как начальная температура превращения мартенсита уменьшается с увеличением числа циклов, что означает, что движущая сила превращения мартенсита будет увеличиваться во время термического цикла, и превращение мартенсита становится все более и более трудным. Между тем, термомеханическая усталостная долговечность сплавов с NiTi сильно зависит от приложенного постоянного осевого напряжения и амплитуды температуры и монотонно уменьшается с увеличением осевого напряжения, и амплитуды температуры (которая определяет, происходит ли полное или частичное преобразование вовремя термоциклирования).

Модель усталостного разрушения.

На основе экспериментальных наблюдений за усталостным разрушением

сплавов были созданы некоторые модели усталостного разрушения для прогнозирования усталостного срока службы, как это было сделано Тобуши и др., Lagoudas et al., Runciman et al., Малетта и др.

На основе данных об усталости проволок сплавов NiTi с низким циклом, полученных при испытаниях на изгиб при вращении в воздухе, воде и кремниевом масле, Tobushi et al. Получено уравнение:

$$\varepsilon_a N_f^\beta = \alpha$$

где ε_a - амплитуда деформации, N_f^β - количество циклов до усталостного разрушения, и, α и β - параметры, представляющие с и наклон кривой, соответственно. Чтобы рассмотреть зависимость усталостной долговечности от температуры испытания, параметр α дополнительно задается следующим образом:

$$\alpha = 8,56 \cdot 10^{-0,012(T-M_s)}$$

где T- температура испытания и M_s - начальная температура мартенситного превращения.

Данная модель усталостного разрушения не учитывает особенности мартенситного превращения сверхупругих сплавов. Для этого предложена модифицированная модель Мэнсона–Коффина для прогнозирования усталостной долговечности сплавов NiTi в условиях циклического нагружения, контролируемого напряжением, которое учитывает различные механизмы деформации, задействованные при трансформации, вызванной напряжением, в сверхупругих сплавах NiTi, и выглядит следующим образом:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ai} = C(2N_f)^c + D(2N_f)^d$$

где и $\varepsilon_a, \varepsilon_{ae}, \varepsilon_{ai}$ - суммарная амплитуда упругой и неупругой деформации соответственно. Амплитуда ε_{ai} неупругой деформации может рассматриваться как сверхупругая деформация, т.е. она может быть отнесена к обратимому фазовому превращению, вызванному напряжением, и может быть получена из измеренной общей амплитуды деформации и амплитуды ε_{ae} упругой деформации. Коэффициенты C и D и показатели d и c могут быть получены из

экспериментальных данных.

Для термомеханического усталостного разрушения сплавов NiTi модель имеет вид модифицированной зависимости Мэнсона–Коффина между числом циклов до разрушения (N_f) и накопленной пластической деформацией (ε^p) следующим образом:

$$\varepsilon^p = \alpha N_f^\beta$$

Параметры α и β называются коэффициентом усталостной пластичности и показателем усталостной пластичности соответственно. Эти параметры материала получены путем подгонки данных испытаний на усталость сплавов NiTi.

С другой стороны, некоторые модели усталостного разрушения устанавливаются путем принятия энергии диссипации в стабилизированном цикле в качестве основной переменной. Используя энергию насыщенной диссипации, получили эмпирическую модель усталостного разрушения на основе энергии для прогнозирования усталостной долговечности сверхупругих сплавов NiTi:

$$D = \alpha \cdot N_f^\beta$$

где D - рассеянная энергия в стабилизированном цикле, N_f - количество циклов при отказе, α и β - параметры материала.

После этого Кан и др. модифицировали модель Мумни, заменив степенное уравнение логарифмическим, и подтвердил улучшение возможностей прогнозирования в модифицированной модели путем сравнения прогнозируемых жизней с экспериментальными, рис. 18а:

$$N_f = \alpha \cdot \ln\left(\frac{W_{sat}}{\beta}\right)$$

где W_{sat} - рассеянная энергия в стабилизированном цикле, N_f - количество циклов при отказе, α и β - параметры материала.

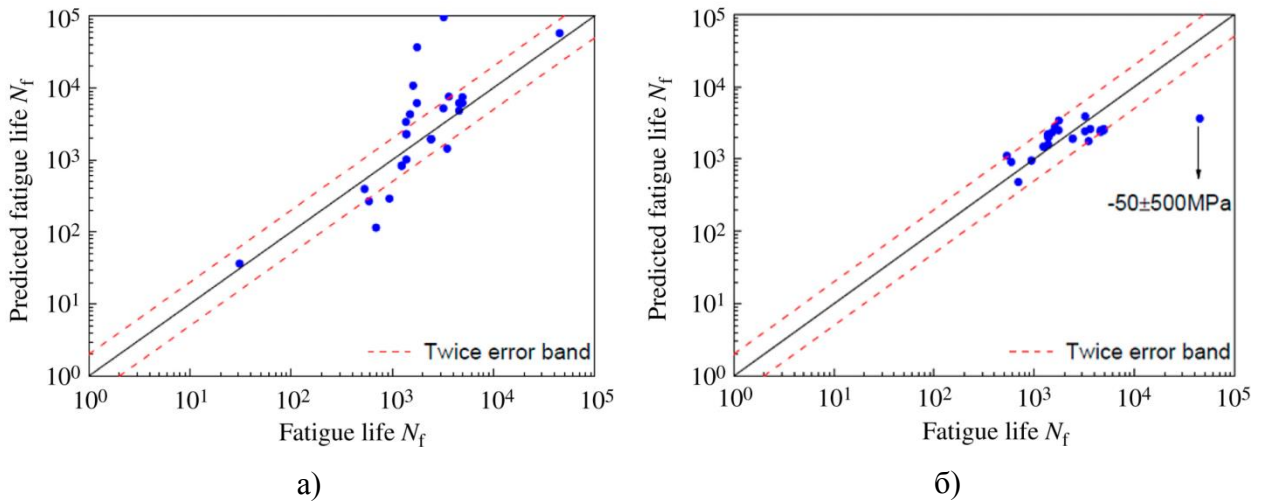


Рисунок 4 - Сравнение экспериментальных усталостных долговечностей и прогнозируемых по двум энергетическим моделям: а) Модель Мумни, б) Модель Кана [3]

Следует отметить, что модели усталостного разрушения, рассмотренные выше, были установлены непосредственно на основе экспериментальных данных усталостной долговечности, в них не учитывалась физическая природа усталостного разрыва, а различные вклады времени зарождения и распространения трещин в общий усталостный срок еще не были затронуты. В последнее время, основываясь на экспериментальных исследованиях одноосного преобразования в течение всего срока службы и усталостного разрушения микротрубок сплавов NiTi получена модель усталостного разрушения на основе повреждений, разделив общие источники повреждений на три части, т. е., инициирование микротрещин, распространение микротрещин и повреждение, вызванное превращением мартенсита. Для этого определена переменная повреждения как отношение накопленной энергии диссипации после заданного числа циклов N к энергии, полученной в течение срока службы отказа N_f , т. е.,

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N W}{\sum_{i=1}^{N_f} W}$$

Такое определение переменной повреждаемости учитывает влияние циклической деформации на усталостную долговечность сплавов до достижения стабилизированного цикла. Основываясь на экспериментально полученных кривых эволюции переменной повреждения в зависимости D от количества

циклов, модель усталостного разрушения на основе повреждения предлагается в виде

$$N_f = N_{sat} + 1 + \frac{1 - \left[g_1 + g_3 \int_0^N W_N dN \right]}{g_2 + W_{sat} g_3}$$

где N_{sat} - число циклов, при которых достигается стабилизированный цикл, W_{sat} - энергия диссипации в стабилизированном цикле, и W_N - энергия диссипации N-м цикле, g_1 , g_2 и g_3 - константы, которые могут быть получены из экспериментальных данных.

Из рис. 4(б) видно, что все точки расположены с полосами погрешности в 1,5 раза, и модель очень хорошо предсказывает усталостную долговечность сверхэластичных микротрубок сплавов NiTi, управляемую одноосным напряжением.

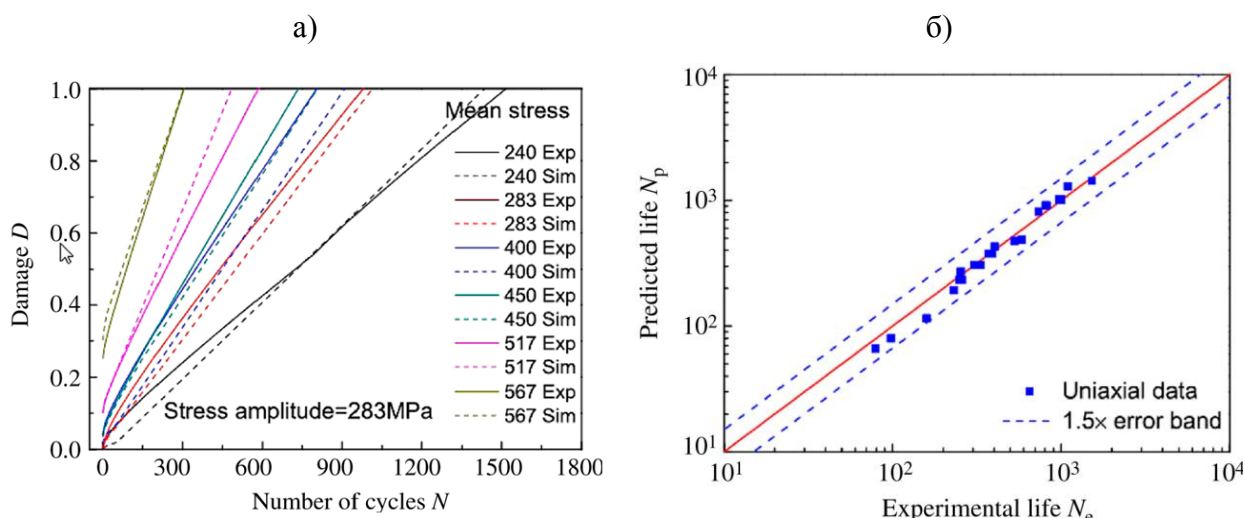


Рисунок 5 - Прогнозируемые результаты модели усталостного разрушения на основе повреждений: а) временная зависимость усталостного разрушения, б) усталостная долговечность [3]

Библиографический список:

1. А. Г. Колмаков, В. Ф. Терентьев, М. Б. Бакиров. Методы измерения твердости, Интернет инжиниринг. 2000. 125.
2. М.Б. Бакиров В.В. Потапов. Феноменологическая методика определения

механических свойств корпусных сталей ВВЭР по диаграмме вдавливания шарового индентора. Заводская лаборатория. N12. 2000. 35–44.

3. А.Г. Колмаков, Ю.И. Головин, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. Методы определения твердости металлических материалов. Учебно-справочное пособие. Воронеж. Изд-во Воронежского ГТУ. 2000. 80.

4. С.И. Булычев В.П. Алехин. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора. М., Машиностроение. 1990. 224.

5. В.П. Алехин, С.И. Булычев, А.В. Калмакова. Кинетическое индентирование в проблеме неразрушающего контроля и диагностики материалов. Заводская лаборатория. N6. 2004. 46–51.