

2. Stolyarov V.V., Deformability and nanostructuring of shape memory TiNi alloys during the electroplastic rolling, Mater. Sci. Eng. A, 503 (2009), 18-20.

3. Misochenko A.A., Fedotkin A.A., Stolyarov V.V., Influence of grain size and electric current regimes on deformation behavior under tension of shape memory alloy $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$, Materials Today Proceedings, 4 (2017) 4753-4757.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Ф.С. Беляев, А.Е. Волков, М.Е. Евард, А.А. Хворов

*Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: belyaev_fs@mail.ru*

Сплавы с памятью формы (СПФ) в приложениях часто применяются в условиях циклически изменяющихся температур, деформаций и напряжений, что может привести к их усталостному разрушению. В связи с этим возникает задача расчета усталостной прочности и прогнозирования срока службы элементов из СПФ. В данной работе предлагается метод описания усталостного разрушения с помощью разработанного критерия разрушения, встроенного в ранее разработанную микроструктурную модель деформационного поведения СПФ [1]. Данная модель описывает механизмы деформации СПФ с использованием физических закономерностей этих процессов на микроуровне и с учетом влияния структурных уровней деформации. Построение условий превращения и микропластического течения производится в терминах обобщенных термодинамических сил. Модель учитывает энергию взаимодействия вариантов мартенсита и их рост в виде согласованных пар, что позволяет более точно описать обратимую фазовую деформацию. Расчет необратимой микропластической деформации, обусловленной аккомодацией мартенсита, производится совместно с расчетом плотностей ориентированных и рассеянных деформационных дефектов, ответственных за трансляционное и изотропное упрочнение.

Для описания разрушения предложен новый критерий разрушения на микроуровне, учитывающий влияние гидростатического давления, касательных напряжений, их концентрацию, создаваемую ориентированными дефектами, а также снижение предела прочности из-за поврежденности материала:

$$k_1 \frac{tr(\sigma)}{3} + \left(1 + k_2 \frac{b_n}{\beta^*}\right) T_\sigma = \frac{\tau_F}{(1+p)},$$

где $T_\sigma = (1/2 dev \sigma_{ij} dev \sigma_{ij})^{1/2}$ интенсивность тензора напряжений, b_n плотность ориентированных дефектов, τ_F предел прочности материала, k_1 , k_2 и β^* материальные постоянные, p поврежденность материала. В модели принимается что параметр p пропорционален суммарной микропластической деформации в этом зерне:

$$\dot{p} = B \sum_{m=1}^N |\dot{\varepsilon}_n^{mp}|,$$

где B материальная постоянная; ε_n^{mp} микропластическая деформация, вызванная ростом n -го варианта мартенсита; N количество мартенситных вариантов.

В основе этого критерия лежит критерий разрушения Мизеса $T_\sigma = \tau_F$. Этот критерий был дополнен и усовершенствован для описания разрушения на микроуровне. Для учета того факта что всестороннее сжатие препятствует разрушению, было введено слагаемое определяющее влияние гидростатического давления на разрушение, коэффициент k_1 определяет силу этого влияния. Скопления ориентированных дефектов создают поля внутренних напряжений, которые локально суммируются с внешним напряжением. Для их учета в формуле был введен коэффициент $(1+k_2 b_n/\beta^*)$ перед T_σ , который увеличивается с ростом плотности дефектов b_n . Постоянная k_2 определяет максимальный вклад внутренних напряжений от ориентированных дефектов в локальную интенсивность напряжений. В процессе деформирования в материале образуются микроповреждения, снижающие его прочность. В критерии это учитывается путем введения эффективного предела прочности $\tau_F/(1+p)$, при этом с ростом параметра поврежденности p снижается предел, который надо преодолеть напряжению для разрушения.

Для верификации модели и проверки ее предсказательной способности были проведены численные эксперименты по термоциклированию и механоциклированию до разрушения и рассчитанные значения числа циклов до разрушения были сопоставлены с результатами реальных экспериментов. На рис. 1(а) приведены расчетная и экспериментальная [2] зависимости числа циклов до разрушения от величины действующего напряжения при термоциклировании через интервал мартенситных превращений под постоянным напряжением от 100 до 300 МПа. Также был проведен расчет усталостного разрушения никелида титана в двух различных режимах изотермического деформирования при температуре начально аустенитного состояния (450 К). На рис. 1(б) представлены расчетные зависимости числа циклов до разрушения от амплитуды деформации, варьировавшейся в интервале 1.5 – 3.5 %, при двустороннем деформировании (растяжение-сжатие) в сравнении с экспериментальными результатами [3]. На рис. 1(в) представлены аналогичные расчетные зависимости для цикла растяжение-разгрузка в сравнении экспериментом [4]. Из рис. 1(а-в) видно, что результаты расчетов, полученные с помощью разработанного критерия разрушения, имеют хорошее соответствие с экспериментальными данными по усталостному разрушению сплава TiNi.

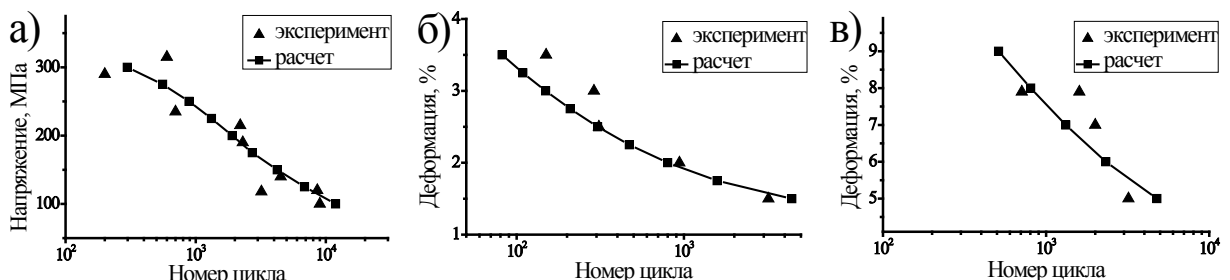


Рисунок 1 - Число циклов до разрушения расчет и эксперимент для термоциклирования (а), для двустороннего деформирования (б), для цикла деформация-разгрузка (в).

Элементы из СПФ часто используются в качестве рабочих элементов приводов и мартенситных двигателей. При этом обычно реализуется мягкий (управляемый

напряжением) или жесткий (управляемый деформацией) рабочий цикл. Проведено моделирование усталостного разрушения рабочего элемента из никелида титана в условиях жесткого (управляемого деформацией) и мягкого (управляемого напряжением) циклов мартенситного двигателя. Изучено влияние параметров циклов на долговечность рабочего элемента. На рис. 2(а) представлена схема мягкого цикла в координатах температура-деформация. На рис. 2(б) представлены расчетные зависимости числа циклов до разрушения от максимального напряжения в мягком цикле для фиксированных значений напряжения при охлаждении.



Рисунок 2 - Схема мягкого рабочего цикла (а), число циклов до разрушения в зависимости от напряжения при нагреве в мягком цикле (б).

На рис. 3(а) представлена схема жесткого цикла в координатах деформация-напряжение. На рис. 3(б) представлена расчетная зависимость числа циклов до разрушения от максимальной деформации в жестком цикле. На рис. 3(в) представлены расчетные зависимости числа циклов до разрушения от жесткости устройства для двух фиксированных амплитуд деформации.

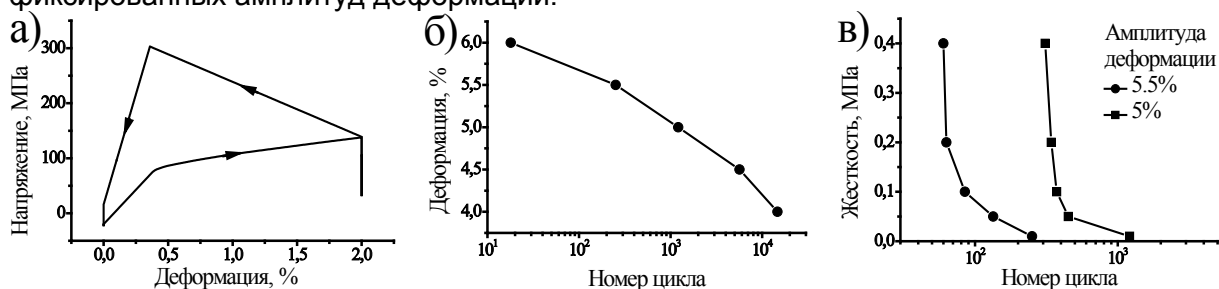


Рисунок 3- Схема жесткого рабочего цикла (а), число циклов до разрушения в зависимости от максимальной деформации (б) и от жесткости устройства (в).

Достаточно интересным для исследований является режим циклического деформирования между верхним и нижним плато псевдоупругости (см. рис 4(а)). Такой режим считается наилучшим для работы эндоваскулярных стентов. В работе [5] проведены исследования долговечности сплава при циклическом двустороннем деформировании относительно некоторого среднего значения (ϵ_m) после предварительного тренировочного деформирования (ρ_s). Расчетные значения числа циклов до разрушения для данных режимов в сравнении с экспериментальными данными представлены на рис. 4(б). Как видно из этого рисунка, результаты, полученные с помощью разработанного критерия, неплохо соотносятся с результатами эксперимента.

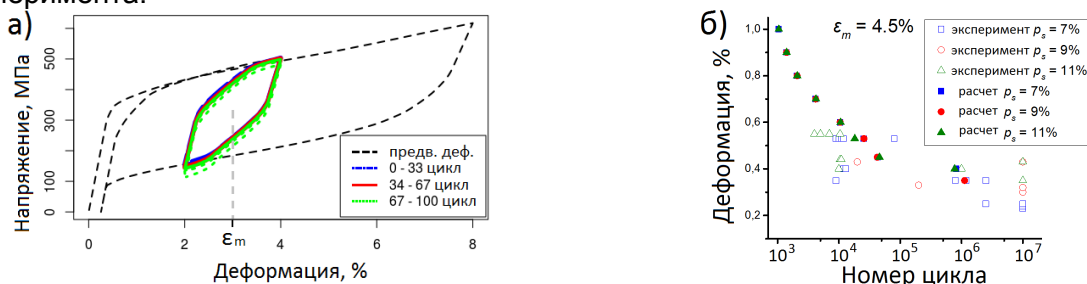


Рисунок 4 - Механоциклирование в режиме стента после предварительного деформирования (а), число циклов до разрушения в зависимости от амплитуды деформации

(б).

Таким образом показано что разработанный критерий разрушения в рамках микроструктурной модели способен описывать усталостное разрушение СПФ при различных режимах термоциклирования и механоциклирования. Данный критерий может быть использован при расчетах усталостной прочности СПФ и прогнозирования срока службы элементов из этих сплавов, а также для выбора оптимальных параметров рабочего цикла и предварительной тренировки сплава, обеспечивающих требуемый срок службы рабочих элементов из СПФ в различных устройствах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 18-01-00594.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Volkov A.E., Belyaev F.S., Evard M.E., Volkova N.A. MATEC Web of Conf. 2015. V. 33. Art. 03013 (5 pages).
2. Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Ковалев С.М. Физика металлов и металловедение. 1987. Т. 63. Вып. 5. С. 1017–1023.
3. Miyazaki S., Mizukoshi K., Ueki T., Sakuma T., Liu Y. Mater. Sci. Eng. 1999. V. A273–275. P. 658–663.
4. Андреев В.А., Евард М.Е., Бондарев А.Б., Хусаинов М.А. Вестник Новгородского государственного университета. 2007. № 44. С. 4–8.
5. P. Junker, S. Jaeger et al., Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2015. V. 80, P. 86–102.

ОСЦИЛЛЯЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Макаров С.В., Плотников В.А.

*Алтайский государственный университет, Барнаул
makarov@phys.asu.ru*

Введение.

Эффект прерывистой текучести есть характерный отклик алюминидо-магниевого сплава на механическое нагружение, являющийся следствием эффекта Портевена – Ле Шателье [1], реализующийся на микроструктурном уровне в виде формирования деформационных полос, которые представляют собой области локализации пластической деформации [2]. Прерывистая текучесть на зависимости напряжение - деформация представляет собой скачки (зубцы) напряжения, причем полоса деформации, ответственная за акты прерывистой текучести, является макроскопическим объектом и развивается из критического зародыша полосы. Другим проявлением прерывистой текучести является прерывистая ползучесть (или эффект Савара-Массона [3]), проявляющаяся сплавах на кривых ползучести в виде последовательности скачков деформации величиной до $1 \mu\text{m}$ [4]. Прерывистая ползучесть при комнатной температуре развивается как спонтанное, потеря механической устойчивости путем зарождения и распространения по поверхности образца полос макролокализации деформации, сопровождающейся формированием деформационного скачка. Структурно локализация деформации – это последовательное зарождение и рост деформационных полос и деформационный скачек представляет собой пространственную и временную организацию, характеризующую пластическую неустойчивость нагруженного материала [4]. Эстафетная передача деформации от одной полосы к другой является главным структурным признаком прерывистой текучести, распространяющаяся по образцу в виде области локализации деформации [5]. Характерным является осциллирующий вид силового отклика системы машина-образец в ответ на скачкообразный прирост