

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ FeMn ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Беляев Ф.С., Евард М.Е., Волков А.Е.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург,  
Российская Федерация  
f.belyaev@spbu.ru

Сплавы с памятью формы (СПФ) на основе железа, такие как сплавы FeMn с содержанием 17-18% Mn, а также сплавы FeMnSi, представляют большой интерес исследователей и инженеров в связи с их возможным применением в устройствах сейсмозащиты [1-5]. Одним из основных требований к таким устройствам является высокая усталостная прочность, так как землетрясения с большой магнитудой могут сопровождаться большими сейсмическими колебаниями.

Разработка устройств, использующих СПФ на основе FeMn, требует надежных средств расчета их деформации и оценки срока службы. В данной работе была построена микроструктурная модель описывающая деформационное поведение и усталостное разрушение этих сплавов и были проведены расчеты усталостного разрушения при различных циклических воздействиях. Модель достаточно подробно описана в [6, 7], здесь же представлены основные ее особенности.

В СПФ на основе FeMn происходит превращение кристаллографических решеток ГЦК ↔ ГПУ и для построения модели было необходимо учесть особенности данного превращения. Известно, что ГЦК ↔ ГПУ мартенситное превращение осуществляется путем сдвига на вектор  $1/6\langle 11\bar{2} \rangle_{\text{ГЦК}}$  в каждой второй плоскости  $\{111\}_{\text{ГЦК}}$ . Из-за наличия оси симметрии 3-го порядка в плоскости сдвига для каждой из четырех плоскостей  $\{111\}_{\text{ГЦК}}$  (далее будем называть их зонами) существует три возможных вектора сдвига. Таким образом для СПФ на основе FeMn существует  $3 \cdot 4 = 12$  возможных вариантов образования мартенсита.

Мартенситная фаза также имеет ось симметрии 3-го порядка на плоскости сдвига и благодаря этому возможны три направления сдвига при обратном превращении. Эта возможность многовариантного обратного превращения отличает данные СПФ от таких, в которых обратное превращение происходит единственным образом, например, от распространенного сплава TiNi. Многовариантность обратного превращения порождает особенности функциональных свойств этих СПФ, в частности, при термоциклировании под постоянным напряжением деформация может возрастать как при охлаждении, так и при нагреве.

Предполагается что рост мартенситных кристаллов при фазовой деформации сопровождается аккомодационной микропластической деформацией. Мера такой деформации, связанная с соответствующим вариантом мартенсита ( $i$ -м вариантом из  $p$ -й зоны), будем обозначать переменной  $\varepsilon_{pi}^{MP}$  и связывать с соответствующими плотностями ориентированных  $b_{pi}$  и рассеянных  $f_{pi}$  дефектов посредством следующих эволюционных уравнений:

$$\dot{b}_{pi} = \dot{\varepsilon}_{pi}^{MP} - \left(\frac{1}{\beta^*}\right) |b_{pi}| \dot{\varepsilon}_{pi}^{MP} H(b_{pi} \dot{\varepsilon}_{pi}^{MP}),$$

$$\dot{f}_{pi} = |\dot{\varepsilon}_{pi}^{MP}| + r(f_{pi} - f_0) \Phi_{pi} H(-\dot{\Phi}_{pi}),$$

где  $\Phi_{pi}$  – меры мартенсита, полученные через  $i$ -е скольжение в  $p$ -й зоне,  $\beta^*$ ,  $r$ ,  $f_0$  – материальные постоянные,  $H$  – функция Хевисайда.

Для описания разрушения модельного образца был взят деформационно-силовой критерий разрушения, предложенный в работе [8]:

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

где  $T_\sigma$  – интенсивность тензора напряжений,  $\tau_F$  – предел прочности материала,  $k_1, k_2$  – материальные постоянные,  $p$  – поврежденность материала. В модели скорость роста поврежденности пропорциональна суммарной микропластической деформации в этом зерне:

$$\dot{p} = B \sum_{p,i} |\dot{\epsilon}_{pi}^{MP}|.$$

где  $B$  – материальная постоянная.

Данный критерий реализует идеи, лежащие в основе критерия Мизеса и теории накопления повреждений Работнова – Качанова, и позволяет описывать разрушение как при циклических механических нагружениях, так и при циклических термомеханических воздействиях. Критерий учитывает следующие факты: гидростатическое давление препятствует разрушению, скопления ориентированных дефектов являются концентраторами внутренних напряжений и таким образом способствуют разрушению, накопление поврежденности материала вследствие микропластической деформации снижает прочность материала.

Построенная модель использовалась для расчета усталостного разрушения элементов из СПФ на основе FeMn при различных циклических нагружениях. На рис. 1 (а) представлены деформационные диаграммы для изотермического двустороннего деформирования (растяжение-сжатие) в мартенситном состоянии. Данный режим представляет наибольший интерес для разработки демпферов и изоляторов из СПФ на основе FeMn. Для этого режима были проведены расчеты усталостного разрушения при различных амплитудах деформации от 0.5% до 2%. Полученные расчетные результаты в сравнении с экспериментальными данными [5] представлены на рис. 1 (б). Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментом.

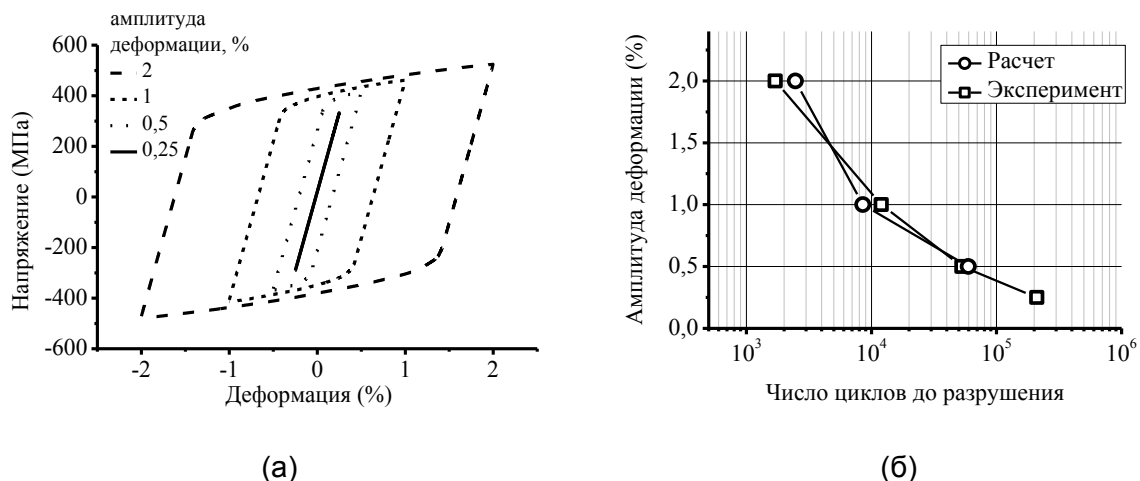


Рисунок 1 - Диаграмма деформация-напряжения (а) и число циклов до разрушения (б) эксперимент [5] и расчетные данные для изотермического двустороннего нагружения

Были проведены расчеты усталостного разрушения СПФ на основе FeMn за счет циклического изменения температуры. На рис. 2 представлена зависимость числа циклов до разрушения от действующего напряжения при термоциклировании через интервал мартенситных превращений под постоянной нагрузкой.

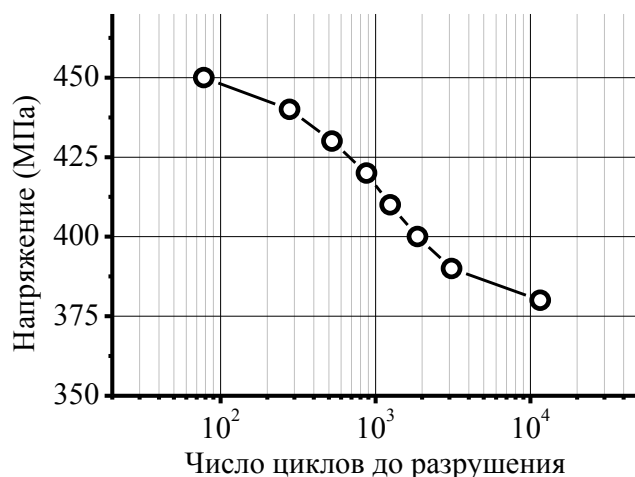


Рисунок 2 - Рассчитанное число циклов до разрушения в зависимости от действующего напряжения при термоциклировании

Таким образом, разработана модель механического поведения СПФ на основе FeMn, описывающая их основные функциональные свойства. Кроме того, показано что предложенный ранее деформационно-силовой критерий разрушения позволяет описывать усталостное разрушение и этих сплавов как при изотермических нагружениях, так и в условиях с циклически изменяющейся температурой. Расчетные значения числа циклов до разрушения при изотермическом двустороннем деформировании хорошо согласуются с экспериментальными данными.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант №. 19-01-00685*

#### Литература

- [1] Ghafoori, E., Hosseini, E., Leinenbach, C., Michels, J., Motavalli, M., 2017. Fatigue behavior of a Fe-Mn-Si shape memory alloy used for prestressed strengthening. *Materials and Design* 133, 349–362.
- [2] Sawaguchi, T., Kikuchi, T., Ogawa, K. et al., 2006. Development of prestressed concrete using Fe-Mn-Si-based shape memory alloys containing NbC. *Materials Transactions* 47, 580-583.
- [3] Sawaguchi, T., Nikulin, I. Ogawa, K. et al., 2015. Designing Fe-Mn-Si alloys with improved low-cycle fatigue lives. *Scripta Materialia* 99, 49-52.
- [4] Nikulin, I., Sawaguchi, T., Ogawa, K., Tsuzaki, K., 2015. Microstructure Evolution Associated with a Superior Low-Cycle Fatigue Resistance of the Fe-30Mn-4Si-2Al Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A* 46, 5103-5113.
- [5] Nikulin, I., Sawaguchi, T., Kushibe, A., Inoue, Y., Otsuka, H., Tsuzaki, K., 2016. Effect of strain amplitude on the low-cycle fatigue behavior of a new Fe-15Mn-10Cr-8Ni-4Si seismic damping alloy. *Int. J. of Fatigue* 88, 132-141.
- [6] Evard, M., Volkov, A., Belyaev, F., Ignatova, A., 2018. About the choice of Gibbs' potential for modelling of FCC → HCP transformation in FeMnSi-based shape memory alloys. *AIP Conference Proceedings* 1959, 070010.
- [7] Fedor S. Belyaev, Margarita E. Evard, Aleksandr E. Volkov, 2018. Simulation of Fatigue Fracture of FeMn-based Shape Memory Alloys at Cyclic Mechanical Tests. *Procedia Structural Integrity* 13C, 988-993.
- [8] Belyaev, F., Volkov, A., Evard, M., 2018. Microstructural modeling of fatigue fracture of shape memory alloys at thermomechanical cyclic loading. *AIP Conference Proceedings* 1959, 070003.