

05

Функциональная усталость сплавов с эффектом памяти формы систем Ni–Mn–Ga и Ni–Ti в условиях термоциклирования под постоянной нагрузкой

© В.С. Калашников,¹ И.И. Мусабилов,² В.В. Колецов,¹ В.А. Андреев,^{3,4} Д.В. Гундеров,^{5,6} В.Г. Шавров¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009 Москва, Россия

² Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001 Уфа, Россия

³ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, 119334 Москва, Россия

⁴ Промышленный центр МАТЭК-СПФ, 117449 Москва, Россия

⁵ Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН, 450055 Уфа, Россия

⁶ Уфимский государственный авиационный технический университет, 450000 Уфа, Россия

e-mail: vladimir.kalashnikovS@gmail.com

Поступило в Редакцию 25 марта 2019 г.

В окончательной редакции 25 сентября 2019 г.

Принято к публикации 25 сентября 2019 г.

Проведено сравнительное исследование функциональных свойств и функциональной усталости сплавов системы Ni–Mn–Ga в исходном литом состоянии и Ni–Ti в исходном горячекованном состоянии без термообработки. Показано, что сплав Ni₂MnGa в литом состоянии предпочтительно использовать для слабо нагруженных исполнительных элементов (до 100 МПа) и небольших обратимых деформаций (до 1.5%) в температурном диапазоне от –85 до –75°С; сплав системы Ni–Ti в горячекованном состоянии рекомендуется использовать для сильно нагруженных исполнительных элементов (до 500 МПа), высоких обратимых деформациях (до 8.5%) в температурном диапазоне от –40 до 40°С.

Ключевые слова: эффект памяти формы, термоциклирование, трехточечный изгиб, усталость, функциональные свойства.

DOI: 10.21883/JTF.2020.04.49084.110-19

Введение

Сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) нашли широкое применение во многих областях — от медицины до космонавтики [1]. Поиск новых сплавов и совершенствование технологий обработки ныне существующих играет ключевую роль в материаловедении. Однако в части сплавов с ЭПФ задача требует использования адекватных методик испытаний и определения границ применимости этих сплавов.

К наиболее распространенным методам исследования функциональных характеристик (ФХ) сплавов с ЭПФ относятся методы испытания на растяжение и изгиб при переменной температуре, а также дифференциальная калориметрия, измерение электросопротивления при переменных температурах и нагрузках и изгиб об оправки разного диаметра. Эти методики предполагают измерение ФХ в условиях, когда сплав не совершает работу, а работа совершается над ним — такие условия свойственны в основном конструкционным материалам. В настоящей работе предлагается исследовать свойства материалов с ЭПФ в условиях, когда они совершают ра-

боту, что позволит правильно оценить их ФХ для практически важных случаев: формовозврат под нагрузкой при термоциклировании (функциональная усталость для устройств периодического действия таких как клапана, актуаторы, пинцеты) и однократный формовозврат под заданной нагрузкой (генерация требуемых реактивных напряжений для устройств однократного действия, таких как ортодонтические дуги, хирургические импланты).

Усталостная прочность — неотъемлемая составляющая расчетов ресурса различных устройств и машин. Однако для сплавов с ЭПФ не существует на сегодняшний день единой общепринятой методики определения характеристик функциональной усталости, и, более того, не существует строгого определения самой функциональной усталости для таких сплавов [2–29]. Таким образом, в настоящей работе авторами предлагается ввести определение функциональной усталости сплава с эффектом памяти формы с учетом особенностей функционирования устройств периодического действия, в которых они могут применяться в качестве исполнительных элементов (актуаторы, подвижки, толкатели, клапана, терморегуляторы и т.п.).

В зарубежной литературе в последнее время встречается не так много работ по функциональной усталости [2–7]. В основном авторы применяют методы анализа классической усталости, принятые для конструкционных материалов и примененные для сплавов с ЭПФ [8–15]. Одна из причин этого, по мнению авторов, заключается в отсутствии подходящих методик и техники для проведения подобных испытаний. Так, например, испытательные машины на разрыв или на усталость неэкономичны, требуют для работы в широком температурном диапазоне больших затрат хладагента, крупных образцов и т.п. Более того, в ряде работ к функциональной усталости относят характеристики усталостной прочности. Авторы [6,7] подробно исследовали и смоделировали функциональную усталость материала с ЭПФ в том смысле, в котором она представлена в настоящей работе. Однако в этих работах материал подвергается деформации кручения, а кручение, как известно, само по себе является сложным напряженным состоянием и редко встречается в известных устройствах с исполнительными элементами из сплавов с ЭПФ [1,16–29].

В настоящей работе предлагается ввести следующее определение функциональной усталости сплава с ЭПФ с учетом особенностей работы устройств периодического действия [1,17–29], в которых они применяются (актуаторы, подвижки, толкатели, клапана и т.п.): функциональная усталость сплава с ЭПФ — это величина постоянной нагрузки (МПа) σ и количество термоциклов (нагрев–охлаждение–нагрев или охлаждение–нагрев–охлаждение) N , при которых сохраняется постоянной (или не ниже требуемой) величина обратимой деформации ε_r^A . Количество термоциклов N при определенной нагрузке σ , при которой образец проявляет требуемую (или не ниже требуемой) обратимую деформацию ε_r^A , называется в данном случае базой испытаний. Очевидно, что функциональная усталость (наряду с такими свойствами, как температуры термоупругого мартенситного превращения, обратимая деформация и максимальные реактивные напряжения) относится к эксплуатационным характеристикам материала и непосредственно связана с его структурой и технологией получения. Параметры функциональной усталости наиболее важны для устройств периодического действия.

Сплав Ni_2MnGa является ферримагнитным материалом, в котором мартенситное превращение и ЭПФ могут быть инициированы внешним магнитным полем [20,21]. Сплавы системы Ni–Ti в группе функциональных материалов с ЭПФ обладают самыми высокими прочностными и пластическими свойствами, а также наиболее сильными эффектами однократно и многократно обратимой памяти формы и сверхупругости, и широко применяются на практике в качестве функциональных материалов [1,4]. Задача настоящей работы состоит в том, чтобы выявить основные различия в поведении при однократном нагружении и при исследовании функциональной усталости сплавов с ЭПФ, обладающих

существенно различными функциональными характеристиками, различными условиями эксплуатации и характером разрушения (хрупкого и пластического) таких, как Ni_2MnGa и Ni–Ti .

Материалы и методика испытаний

В качестве материала для исследований и сравнения выбраны два сплава. Обозначим как „сплав 1“ систему Ni–Mn–Ga (прецизионный состав $\text{Ni}_{53.8}\text{Mn}_{20.0}\text{Ga}_{24.3}\text{Si}_{1.7}$). Сплав выплавлен методом аргоно-дуговой плавки с последующей вакуумной переплавкой в кварцевом стакане [22,23]. Слиток сплава после вакуумной переплавки и удаления усадочной раковины имеет форму цилиндра высотой 15 мм и диаметром 15 мм. Для исследования кривых гистерезиса превращения при переменной температуре и различных уровнях напряжений из слитка были вырезаны образцы размерами $10 \times 0.5 \times 2.5$ мм вдоль оси цилиндрического слитка, т.е. поперек направления роста кристаллов. Анализ характерных температур мартенситного превращения в сплаве выполнен с помощью методики записи температурной зависимости термического расширения в области мартенситного превращения. Запись проводилась на dilatометре с датчиком перемещения на основе дифференциального трансформатора при нагреве и охлаждении образца в интервале температур от -100 до -20°C .

В качестве пластического „сплава 2“ в настоящей работе использовался $\text{Ni}_{50.2}\text{Ti}_{49.8}$ в виде прутка диаметром 20 мм в состоянии после горячей деформации методом ротационнойковки по серийной технологии, принятой на ООО „Промышленный центр МАТЭК-СПФ“. К особенностям этого сплава относятся высокие обратимые деформации до 10%, высокое (до 700 МПа) значение предела текучести — косвенный показатель максимальных реактивных напряжений, и высокая пластичность [1]. В настоящее время существует ряд технологий, позволяющих повышать функциональные и механические свойства этого сплава [24], однако в настоящей работе будет рассмотрено именно это состояние, как наиболее распространенное. Образцы 1 и 2 в настоящей работе следует рассматривать как модельные объекты в связи с тем, что их свойства достаточно хорошо изучены.

Для измерения функциональных свойств и характеристик функциональной усталости выбранных образцов использовалась установка, описанная в [25]. Для выявления существенных различий в поведении сплавов применялась следующая методика. Первоначально оба образца были испытаны в условиях однократного нагружения для определения примерного уровня напряжений, при которых должны проводиться длительные испытания при постоянной нагрузке. Затем образцы проходили термоциклирование, но под постоянной нагрузкой, соответствующей выбранным ранее значениям. При этом база испытаний (количество термоциклов „нагрев–охлаждение“)

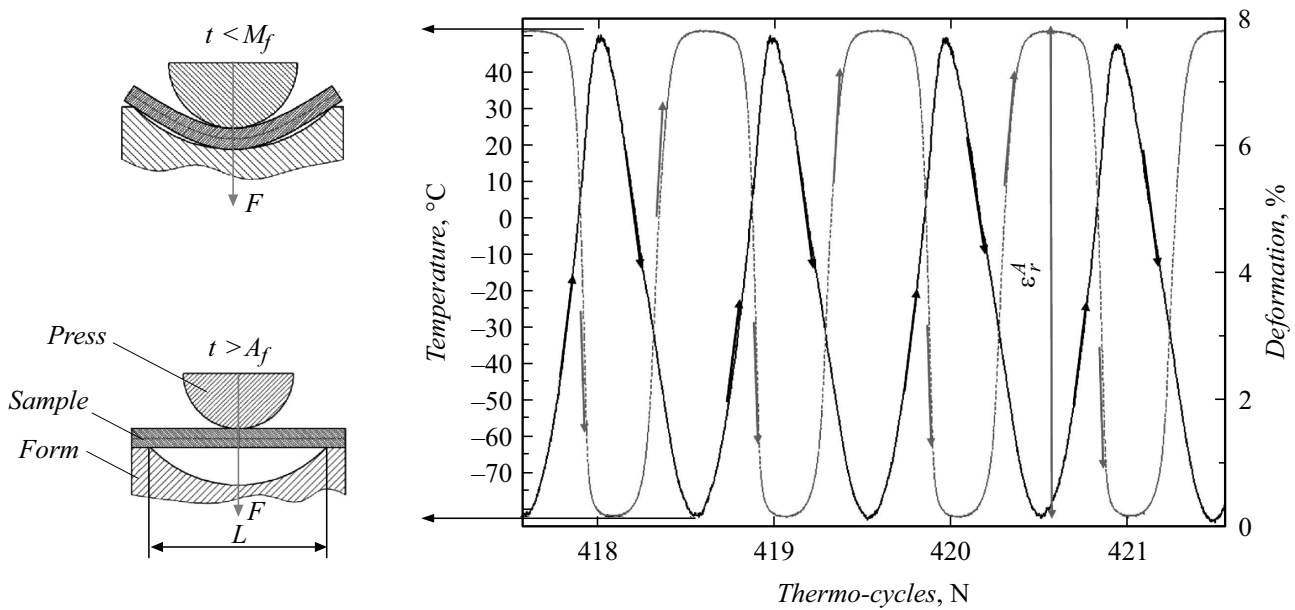


Рис. 1. Участок зависимости деформации образца 2 от количества термоциклов. Черными стрелками указано направление повышения температуры (стрелка вверх) и снижения (стрелка вниз). Серыми стрелками указано направление увеличения деформации образца (стрелка вверх — прогиб под нагрузкой) и уменьшения (стрелка вниз — выпрямление образца под нагрузкой).

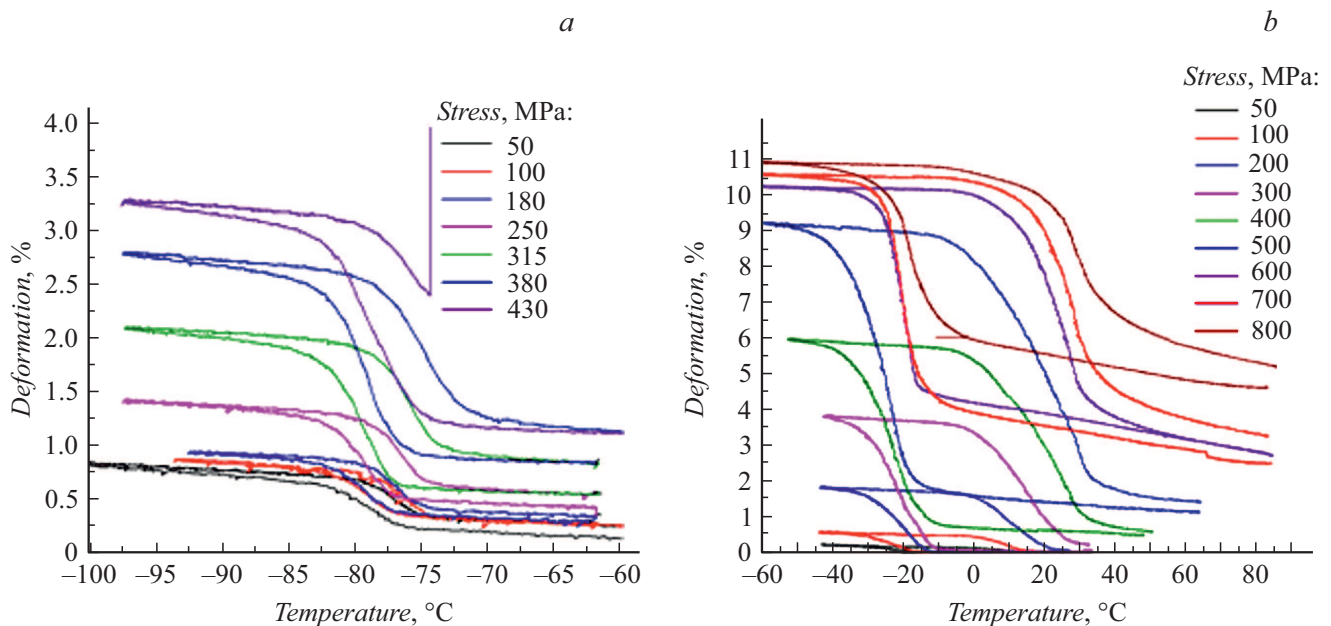


Рис. 2. Зависимости обратимой деформации от температуры и нагрузки для образцов 1 и 2 соответственно сплавов Ni₂MnGa (a), и Ni–Ti (b).

дение–нагрев“) определялась по ходу эксперимента. На рис. 1 приведен участок зависимости деформации образца от температуры под нагрузкой 500 МПа.

Авторами предлагается считать основным результатом эксперимента для каждого отдельного образца и каждого уровня напряжения зависимость обратимой деформации при формовозврате (при обратном термоупругом мартенситном превращении) ϵ_r^A под задан-

ной нагрузкой σ при прохождении полного термоцикла.

Таким образом, в настоящей работе применена экспериментальная методика, которая позволяет определить значение „функциональной усталости“, согласно принятому выше определению для модельных сплавов с ЭПФ, а также показать основные различия в поведении сплавов с ЭПФ систем Ni–Mn–Ga и Ni–Ti, имеющих

различную природу разрушения в условиях, когда они совершают механическую работу.

Результаты и обсуждение

На рис. 2, *a, b* показаны зависимости деформации от температуры и нагрузки для обоих образцов при однократном нагружении. Максимальная обратимая деформация ϵ_r образца сплава Ni–Mn–Ga составила 2% под нагрузкой $\sigma_{cr} = 380$ МПа, при этом температура конца превращения аустенит–мартенсит M_s составила -85°C , температура конца превращения мартенсит–аустенит A_f составила -75°C . Для сравнения температуры мартенситного превращения данного сплава определены на dilatометре путем измерения термического расширения. Образец размерами $1 \times 1 \times 7$ mm вырезан поперек роста кристаллов в слитке. Результаты записи термического расширения при нагреве и охлаждении в интервале температур от -100 до -20°C представлены на рис. 3. Такое поведение характерно для сплавов данной системы и свидетельствует о протекании в материале мартенситного превращения, в результате которого при охлаждении происходит формирование преимущественной ориентации мартенситных пластин. В области мартенситного превращения наблюдается скачкообразное изменение геометрических размеров образца. Величина скачка составляет 0.04%. В процессе прямого мартенситного превращения в интервале от $M_s = -69$ до $M_f = -79^\circ\text{C}$ образец скачкообразно сокращается, а в процессе обратного превращения в интервале от $A_s = -66$ до $A_f = -59^\circ\text{C}$ он удлиняется.

Температуры превращений образца 1, измеренные на установке трехточечного изгиба при минимальной нагрузке 50 МПа, составили $M_s = -76$ и $M_f = -83^\circ\text{C}$ при прямом мартенситном превращении и $A_s = -80$ и $A_f = -73^\circ\text{C}$ при обратном превращении (рис. 2, *a*). Максимальная ширина температурного интервала превращения образца 1 составила 10°C при напряжении 380 МПа.

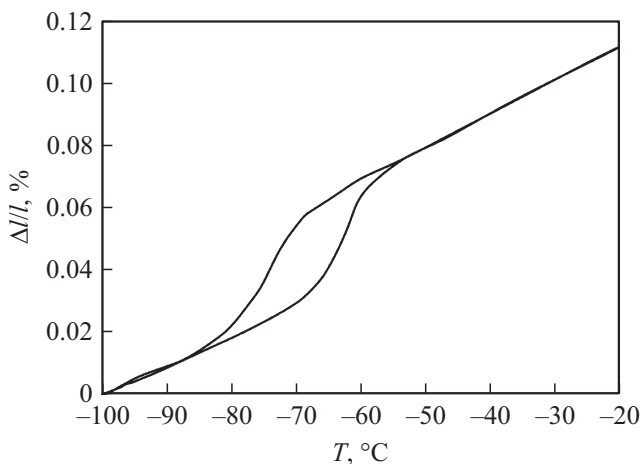


Рис. 3. Температурная зависимость термического расширения сплава $\text{Ni}_{54.1}\text{Mn}_{19.6}\text{Ga}_{24.6}\text{Si}_{1.7}$ в литом состоянии (образец 1).

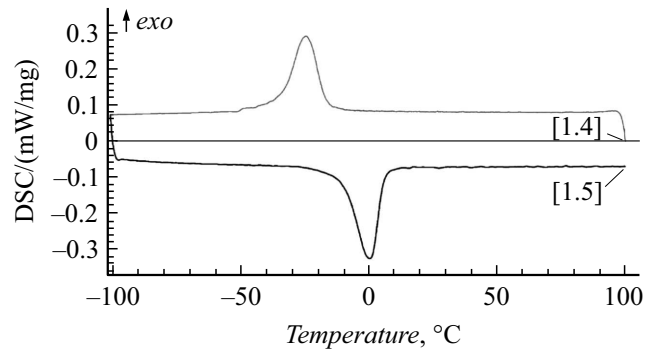


Рис. 4. Измерение температур фазовых превращений в образце 2 методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

При напряжении 430 МПа в процессе обратного термоупругого мартенситного превращения образец разрушился без видимой пластической деформации, т.е. хрупко.

Максимальная обратимая деформация ϵ_r образца сплава Ti–Ni составила 9.5% под нагрузкой $\sigma_{cr} = 600$ МПа, при этом температура конца превращения аустенит–мартенсит M_s при этой нагрузке составила -35°C , температура конца превращения мартенсит–аустенит A_f составила 90°C . Температуры превращений, определенные методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе NETZSCH DSC 204 на образце массой 4 g составили $M_s = -9$ и $M_f = -51^\circ\text{C}$, $A_s = -26$ и $A_f = 12^\circ\text{C}$ (рис. 4).

При минимальной нагрузке 50 МПа на образце 2 температуры превращений, измеренные на установке трехточечного изгиба, составили $M_s = -14$ и $M_f = -38^\circ\text{C}$ при прямом термоупругом мартенситном превращении, а в процессе обратного превращения — $A_s = -4$ и $A_f = 14^\circ\text{C}$ (рис. 2, *b*). Максимальная ширина температурного интервала превращения образца 2 составила 55°C при напряжении 500 МПа. После окончания испытаний образец не разрушился.

Различия в данных о температурах превращений, полученных разными методами, объясняется тем, что при использовании методов калориметрии и ДСК образцы находятся в ненагруженном состоянии, а их нагрев осуществляется практически полностью равномерно и с меньшей скоростью (не более $10^\circ\text{C}/\text{min}$). В установке трехточечного изгиба [24] передача тепла от нагревателя к образцу осуществляется через материал оправки, при этом термопара расположена максимально близко к образцу в отверстии в оправке. Область, в которой исследуется термоупругое превращение, не контактирует напрямую с материалом оправки, а передача тепла в центральную часть образца (рабочую), где происходит термоупругое превращение, осуществляется за счет теплопроводности самого образца.

На рис. 5 представлены результаты испытаний в условиях термоциклирования при постоянной нагрузке для образца сплава Ni_2MnGa в литом состоянии

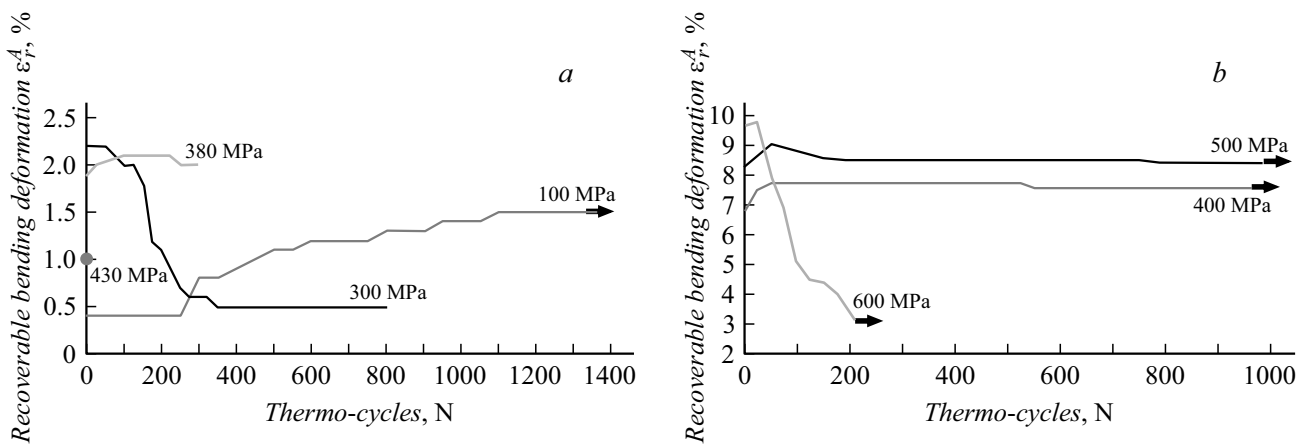


Рис. 5. Зависимость обратимой деформации при формовозврате (обратном термоупругом мартенситном превращении) ε_r^A под заданной нагрузкой σ ; *a* — образец 1 (сплав Ni₂MnGa в литом состоянии), *b* — образец 2 (сплав Ni–Ti в горячекованном состоянии).

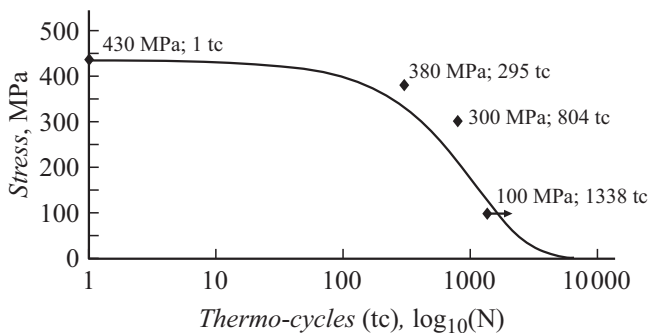


Рис. 6. Кривая усталости сплава 1 в условиях термоциклирования под нагрузкой. Черной стрелкой отмечено, что образец был снят без разрушения.

и образца сплава Ni–Ti в горячекованном состоянии. Черная стрелка на представленных графиках означает, что образец был снят до достижения разрушения.

По результатам проведенных измерений показано, что для сплавов Гейслера с ЭПФ системы Ni–Mn–Ga возможно (с большими допущениями) построить классическую кривую усталостного разрушения (рис. 6). Однако для сплава Ti–Ni, обладающего более высоким уровнем механических и функциональных свойств, построение такой кривой затруднено.

Для разъяснения необходимости введения термина „функциональной усталости“ рассмотрим следующий пример. Исполнительный элемент некоего устройства выполнен из сплава с ЭПФ, при этом сам исполнительный элемент находится под действием постоянной механической силы F известной величины. Для его проектирования необходимо определить минимальные габаритные размеры исполнительного элемента, если известно, что его деформация должна быть не ниже ε_r^σ , при этом сам элемент при срабатывании должен преодолевать силу F не менее N раз за весь срок

службы. Примером такого устройства может служить толкатель, актуатор, затвор или сенсор. Сила элемента может быть увеличена или уменьшена за счет изменения габаритных размеров. Однако чтобы узнать, при каких условиях сплав будет в состоянии оказывать требуемую обратную постоянную силу F при заданных обратимой деформации ε_r^σ и количестве срабатываний (термоциклов N), не ниже заданных, необходимо обратиться к результатам, изображенным на рис. 5. Например, для сплава 1 определено, что выполнение условий поставленной задачи ($\varepsilon_r^\sigma \geq 1.5\%$, $N \geq 500$ термоциклов) возможно, когда сила, воздействующая на исполнительный элемент, которую он должен преодолеть, демонстрируя при этом обратимую деформацию не ниже 1.5%, не вызывает в нем (исполнительном элементе) напряжения свыше 100 МПа. При этом до введения в эксплуатацию такого элемента необходимо проведение предварительных работ в части приработки исполнительного элемента. В противном случае элемент не в состоянии будет преодолеть силу F . Для сплава 2 при условиях $\varepsilon_r^\sigma \geq 7\%$ и $N \geq 500$ термоциклов, расчет геометрических размеров исполнительного элемента необходимо проводить из условия, что напряжения F , возникающие в материале под действием силы F , должны лежать в диапазоне от 400 до 500 МПа (рис. 5, *b*).

Заключение

На основе анализа результатов исследования термо-механических и усталостных свойств сплавов Ni–Ti и Ni₂MnGa, полученных с применением новой экспериментальной методики, можно заключить, что к основным отличиям в усталостном поведении материалов с высокой и низкой пластичностью следует отнести то, что хрупкие сплавы, типа сплавов Гейслера системы Ni–Mn–Ga, обладая узким по сравнению со сплавами системы Ni–Ti интервалом превращения, достаточно

быстро накапливают пластическую деформацию, которая приводит к снижению обратимой деформации ε_r^A , а ее интенсивное накопление начинается с напряжений, соответствующих примерно $0.5\sigma_{cr}$. Для сплавов системы Ni–Ti интенсивное накопление пластической деформации, приводящее к резкому снижению обратимой деформации ε_r^A , начинается при напряжениях свыше $0.8\sigma_{cr}$.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Института радиотехники и фонда фундаментальных исследований, грант № 17-07-01524. Выплавка и анализ физических свойств сплава Гейслера выполнены в рамках государственного задания Института проблем сверхпластичности металлов РАН (Мусабиловым Иреком Ильфировичем).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Jani J.M., Leary M., Subic A., Gibson M.A. // *Materials & Design*. 1980–2015. Vol. 56. P. 1078–1113.
- [2] Leng J., Yan X., Zhang X., Qi M., Liu Z., Huang D. // *Smart Mater. Struct.* 2017. Vol. 26. N 10. P. 105020.
- [3] Wheeler R.W., Lagoudas D.C. // *Proc. SPIE*. 2017. Vol. 10172. 101720E-2.
- [4] Eggeler G., Hornbogen E., Yawny I A., Heckmann A., Wagner M. // *Mater. Sci. Engineer. A*. 2004. Vol. 378. P. 24–33.
- [5] Abuzaida W., Sehitoglu H. // *Mater. Sci. Engineer. A*. 2017. Vol. 696. P. 482–492.
- [6] Benafan O., Padula II S.A., Skorpenske H.D., An K., Vaidyanathan R. // *Rev. Scien. Instrum.* 2014. Vol. 85. P. 103901.
- [7] Owusu-Danquah J.S., Saleeb A.F. // *Europ. J. Mechan. A. Sol.* 2017. Vol. 64. P. 143e159.
- [8] Yin H., He Y., Moumni Z., Sun Q. // *Intern. J. Fatigue*. 2016. Vol. 88. P. 166–177.
- [9] Sherif M.M., Ozbulut O.E. // *Smart Mater. Struct.* 2018. Vol. 27. P. 015007.
- [10] Rahim M., Frenzel J., Frotscher M., Pfitzing-Micklich J., Steegmuller R., Wohlschlogel M., Mughrabi H., Eggeler G. // *Acta Mater.* 2013. Vol. 61. P. 3667–3686.
- [11] Guozheng Kang, Di Song // *Theor. Appl. Mechan. Lett.* 2015. Vol. 5. P. 245–254.
- [12] Yin H., He Y., Moumni Z., Sun Q. // *Intern. J. Fatig.* 2016. Vol. 88. P. 166–177.
- [13] Casati R., Saghafi F., Biffi C.A., Vedani M., Tuissi A. // *J. Mater. Engineer. Performance*. 2017. Vol. 26. N 10. P. 4964–4967.
- [14] Bartel T., Osman M., Menzel A. // *Meccanica*. 2017. Vol. 52. P. 973–988.
- [15] Haoxue Yan, Yvonne Marcoux, Ying Chen // *Intern. J. Fatig.* 2017. Vol. 105. P. 1–6.
- [16] Барвинок В.А., Богданович В.И., Ломовской О.В., Вишняков М.А., Грошев А.А. // *Известия Самарского НЦ РАН*. 2011. Т. 13. № 4 (2).
- [17] Furst S.J., Seelecke S. // *Smart Mater. Struct.* 2014. Vol. 23. P. 035008.
- [18] Вьюненко Ю.И. // *Вестник Тамбовского ун-та. Серия Естественные и технические науки. Физика*. 2016. Т. 21. Вып. 3.
- [19] Mirvakili S.M., Hunter I.W. // *ACS Appl. Mater. Interfac.* 2017. Vol. 9. N 19. P. 16321–16326.
- [20] Dikshtein I.E., Ermakov D.I., Koledov V.V., Koledov L.V., Takagi T., Tulaikova A.A., Shavrov V.G. // *J. Experiment. Theor. Phys. Lett.* 2000. Vol. 72. N 7. P. 373–376.
- [21] Cherechukin A.A., Dikshtein I.E., Ermakov D.I., Glebov A.V., Koledov V.V., Kosolapov D.A., Takagi T. // *Phys. Lett. A* 2001. Vol. 291. N 2–3. P. 175–183.
- [22] Мусабилов И.И., Сафаров И.М., Галеев Р.М., Афоничев Д.Д., Коледов В.В., Рудской Р.Р., Мулюков А.И. // *Физика и механика материалов*. 2017. Т. 33. № 1. С. 124–136.
- [23] Мусабилов И.И., Сафаров И.М., Галеев Р.М., Гайсин Р.А., Коледов В.В., Мулюков Р.Р. // *ФТТ*. 2018. Т. 60. Вып. 6. С. 1051–1057.
- [24] Калашников В.С., Андреев В.А., Коледов В.В., Гундеров Д.В. и др. // *МиТОМ*. 2019. № 8.
- [25] Калашников В.С., Коледов В.В., Кучин Д.С., Петров А.В., Шавров В.Г. // *Приборы и техника эксперимента*. 2018. № 2. С. 139–145.