

## РЕОНОМНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

<sup>1</sup>Мовчан А.А., <sup>1</sup>Казарина С.А., <sup>1</sup>Сильченко А.Л., <sup>2</sup>Климов К.Ю.

<sup>1</sup>*Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет, Москва, Россия*

movchan47@mail.ru

Приводятся экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что сплавы с памятью формы (СПФ) обладают реономными свойствами. Предложен ряд моделей, описывающих реономные свойства СПФ.

Некоторые реономные эффекты поведения СПФ, в частности, факты влияния скорости нагружения на форму петли сверхупругого гистерезиса, известны достаточно давно. Однако большинство исследователей считают, что собственно деформационные свойства сплавов с памятью формы являются полностью склерономными, а наблюдаемые зависимости поведения СПФ от масштаба времени связаны с неизотермичностью исследуемых явлений, реономностью процесса теплопроводности и теплообмена. В процессах, сопровождающихся термоупругими фазовыми переходами сложно поддерживать изотермический режим из-за явлений выделения (при прямом превращении) и поглощения (при обратном переходе) достаточно больших количеств латентного тепла фазовых переходов.

Чтобы избежать этих трудностей, проведены экспериментальные исследования мягкого ступенчатого изотермического нагружения образцов из никелида титана (TiNi). Установлено, что на каждой ступени процесса после мгновенного скачка неупругих деформаций, соответствующего скачку напряжений, наблюдается рост деформаций при постоянном напряжении и постоянной температуре, напоминающий явление ограниченной ползучести. Наибольшие скорости деформирования и накапливаемые со временем деформации наблюдаются при напряжении, соответствующем точке перегиба на диаграмме мартенситной неупругости, соответствующей минимальному значению касательного модуля. Аналогичные явления обнаружены при мягком ступенчатом нагружении образцов из TiNi в режиме вызванного напряжениями прямого мартенситного превращения. В случае мягкой ступенчатой разгрузки в режиме сверхупругости на каждой ступени процесса наблюдается ограниченное уменьшение деформаций со временем при постоянных напряжениях после их скачкообразного уменьшения. В двух последних случаях происходят, соответственно, прямое и обратное фазовое превращение с выделением или поглощением латентного тепла. Можно показать, однако, что эффекты

неизотермичности в данном случае не способствуют, а препятствуют наблюдаемым явлениям, и поэтому не могут объяснить такого поведения СПФ.

Проведены опыты на релаксацию напряжений в образцах из TiNi после их сжатия в жестком режиме с фиксированной скоростью движения активного захвата до определенного значения напряжения  $\sigma_0$  и последующей фиксации величины полной деформации. Обнаружено убывание напряжений со временем при фиксированных деформации и температуре, сначала весьма интенсивное, но затухающее с течением времени. После выдержки в течении примерно 1 часа направленное уменьшение напряжений заканчивается, достигается стационарное значение  $\sigma_{\min} < \sigma_0$ . Скорость убывания напряжений и величина падения  $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_{\min}$  возрастают с ростом скорости предварительного нагружения. Те же величины немонотонно зависят от уровня предварительного напряжения  $\sigma_0$ , достигая максимума при значении  $\sigma_0$ , соответствующем точке перегиба на диаграмме мартенситной неупругости.

Обсуждается возможность описания обнаруженных явлений в рамках различных феноменологических моделей. Предложен подход, постулирующий существование двух классов процессов в СПФ – предельно медленных и предельно быстрых. Процессы каждого из этих классов являются склерономными и описываются соответствующими системами определяющих соотношений.

Деформация объемного эффекта реакции мартенситного превращения считается склерономной. Девиатор неупругой деформации для процессов, происходящих с конечной скоростью в рамках теории малых деформаций представляется как сумма девиаторов мгновенной и реономной составляющих:  $\varepsilon_{ij}^{ne'} = \varepsilon_{ij}^{f'} + \varepsilon_{ij}^{r'}$ . Мгновенная неупругая деформация  $\varepsilon_{ij}^{f'}$  подчиняется определяющим соотношениям для предельно быстрых процессов.

Предполагается, что девиатор скорости реономной деформации направлен таким образом, чтобы расстояние между точками в девиаторном пространстве, одна из которых соответствует предельно медленному процессу деформирования, а другая - суммарным неупругим деформациям процесса, происходящего с конечной скоростью, убывало. При этом движение самой точки, изображающей предельно-медленный процесс и изменение мгновенной неупругой деформации не учитываются. Соответствующее условие может быть записано в форме:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{r'} \Delta\varepsilon_{ij} > 0, \quad \Delta\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{s'} - \varepsilon_{ij}^{f'} - \varepsilon_{ij}^{r'}, \quad (1)$$

Здесь  $\varepsilon_{ij}^s$  - деформация соответствующего предельно медленного процесса, штрихом обозначаются компоненты девиаторов.

Одним из вариантов определяющих соотношений, удовлетворяющим (1) является

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^r = k\psi(\Delta\varepsilon_i) \frac{\Delta\varepsilon_{ij}}{\Delta\varepsilon_i}, \quad \Delta\varepsilon_i = \sqrt{2\Delta\varepsilon_{ij}\Delta\varepsilon_{ij}}/3 \quad (2)$$

Здесь  $\psi(\Delta\varepsilon_i)$  - монотонно возрастающая функция,  $\psi(0) = 0$ . Геометрический смысл соотношения (2) состоит в том, что точка, изображающая в девиаторном пространстве деформированное состояние преследует точку, изображающую деформированное состояние предельно медленного процесса по линии погони. Модуль скорости является возрастающей функцией расстояния между этими точками.

К соотношению (2) следует добавить определяющие уравнения для величин  $\varepsilon_{ij}^{s'}$  и  $\varepsilon_{ij}^{f'}$ , например, в форме:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{s'} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ij}'}{\sigma_i} \left[ \rho_{D1} \varphi_1(\sigma_i) \dot{q} + \rho_{D2}^s q \varphi_2^s(\sigma_i) \dot{\sigma}_i \right], \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^{f'} = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ij}'}{\sigma_i} \left[ \rho_{D1} \varphi_1(\sigma_i) \dot{q} + \rho_{D2}^f q \varphi_2^f(\sigma_i) \dot{\sigma}_i \right]$$

$$q = \frac{1}{2} (1 - \cos(\pi t)), \quad t = \frac{M_s^\sigma - T}{M_s^0 - M_f^0}, \quad M_s^\sigma = M_s^0 + \frac{\rho_{D1} \sigma_i \varphi_1(\sigma_i)}{\Delta S}$$

являющейся частным случаем определяющих соотношений модели нелинейного деформирования СПФ при фазовых и структурных превращениях [1-3] для случая прямого мартенситного перехода. Здесь  $\sigma_{ij}', \sigma_i$  - девиатор и интенсивность напряжений;  $q$  - объемная доля мартенситной фазы;  $M_s^0, M_f^0$  - температуры начала и окончания прямого мартенситного превращения в отсутствие напряжений;  $\rho_{D1}, \rho_{D2}^s, \rho_{D2}^f$  - параметры материала, имеющие смысл предельных значений интенсивности неупругих деформаций при прямом превращении и при структурном переходе для предельно медленных и предельно быстрых процессов;  $\varphi_1(\sigma_i), \varphi_2^s(\sigma_i), \varphi_2^f(\sigma_i)$  - материальные функции. Данная модель качественно правильно описывает упомянутые выше реономные эффекты.

Работа выполнена при финансовом содействии РФФИ, проект 14-01-00189

1. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Изв. РАН. МТТ. 2010. №3. С. 118-130.
2. Мовчан А.А., Сильченко Л.Г., Сильченко Т.Л. Изв. РАН. МТТ. 2011. №2. С. 44-56.
3. Мовчан А.А., Казарина С.А., Мишустин И.В., Мовчан И.А. Деформации и разрушение материалов. 2009. №8. С. 2-9.