

## МИКРОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЕКРЕСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Казарина С.А., Мишустин И.В., Мовчан А.А.

*Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия*

*movchan47@mail.ru*

Явление перекрестного упрочнения сплавов с памятью формы (СПФ) было обнаружено экспериментально при изотермическом нагружении образца в мартенситном состоянии, полученном из аустенитного состояния путем охлаждения под действием постоянного напряжения с интенсивностью  $\sigma_i$  [1]. Оказалось, что после такого прямого фазового превращения и разгрузки неупругое деформирование материала под действием монотонно возрастающей нагрузки начинается при достижении интенсивностью напряжений значения, зависящего от  $\sigma_i$  и несколько большего этой величины. Таким образом, прямой фазовый переход приводит к деформационному упрочнению СПФ в отношении мартенситной неупругости.

Однако сам процесс накопления деформаций прямого превращения может происходить и при убывающих напряжениях и даже после их скачкообразного уменьшения, в том числе до нулевого значения (явление ориентированного превращения). Процесс возврата деформаций при обратном превращении, вызванном нагревом, также может происходить как при возрастающей, так и при убывающей интенсивности напряжений. То есть для процессов изменения неупругих деформаций, связанных с термоупругими фазовыми превращениями, деформационное упрочнение не характерно. С другой стороны, обеспечивающий мартенситную неупругость процесс структурного перехода обладает характерными свойствами деформационного упрочнения (линейная диаграмма разгрузки и повторного нагружения вплоть до порогового значения интенсивности напряжений, при котором началась разгрузка).

Мартенситная фаза СПФ формируется как множество мартенситных образований с определенной ориентацией ячеек, которые в общем случае зарождаются неодновременно и ориентированы по-разному. Описанные выше свойства перекрестного упрочнения позволяют предположить, что группы мартенситных образований, зародившиеся при разных напряжениях, имеют в момент зарождения не только разные собственные деформации, но и разные пороговые значения начала структурного перехода (раздвойникового и переориентации мартенситных образований). Если растущая интенсивность напряжений достигает порогового значения конкретной группы мартенситных образований, то в ней начинается

структурный переход, в ходе которого ее вышеперечисленные характеристики меняются. Таким образом, при росте интенсивности напряжений в структурном переходе в общем случае участвует не весь представительный объем СПФ, а только та его часть, которую составляют группы мартенситных образований с порогами, равными текущему значению интенсивности напряжений, и не участвуют группы мартенситных образований с более высокими порогами.

В разработанной ранее нелинейной модели деформирования СПФ [2] рассматриваются характеристики представительного объема в целом. В обобщенную модель [3] дополнительно введены характеристики отдельных групп мартенситных образований в нем, что позволяет учесть различия в поведении мартенситных образований под нагрузкой, вызванные разными условиями их формирования и историей нагружения. Если на каком-то этапе формирования мартенсита происходит падение интенсивности напряжений, то последующий ее рост может вызвать структурный переход не во всем представительном объеме.

В уравнение, описывающее изменение неупругой деформации СПФ за счет прямого фазового превращения [2], входит интегральная функция распределения интенсивности микронапряжений в аустените, которая идентифицируется по экспериментальной зависимости неупругой деформации (например, сжатия), достигнутой в результате полного прямого перехода под действием постоянного напряжения, от величины этого напряжения. В соответствующее уравнение структурного перехода [2] входит производная еще одной функции распределения, которая задает кривую мартенситной неупругости при активном пропорциональном нагружении хаотического (случайного) мартенсита в изотермических условиях и также может быть установлена экспериментально. Чтобы зарождающийся мартенсит не испытывал структурный переход без роста интенсивности напряжений, значение второй функции распределения не должно превышать значение первой функции при той же интенсивности напряжений.

Возможны сложные процессы термомеханического нагружения СПФ, при которых одновременно или последовательно происходят как фазовые, так и структурные изменения. Согласно известным представлениям о микромеханике фазовых и структурных превращений в СПФ и экспериментальным данным [4], интенсивность суммарных фазово-структурных деформаций в таких процессах не может превышать интенсивность кристаллографической деформации фазового превращения в рассматриваемом СПФ. Поэтому была принята гипотеза [3] о том, что структурный переход в конкретной группе мартенситных образований (ранее его не испытывавшей) не начинается до тех пор, пока интенсивность напряжений не

достигнет величины, при которой значение второй функции распределения равно отношению интенсивности деформации при зарождении этой группы к кристаллографической деформации СПФ. Это объясняет как сам факт перекрестного упрочнения, так и превышение пороговым значением начала структурного перехода величины  $\sigma_c$  (интенсивности постоянного напряжения при формировании мартенсита).

Предложенное описание структурного перехода является своеобразным аналогом теории пластического течения с изотропным упрочнением [5], в котором в качестве уравнения поверхности нагружения выступает конечное соотношение между максимальной достигнутой интенсивностью деформации и интенсивностью напряжений. В случае реверсивного и непропорционального нагружения можно использовать такое же уравнение, записанное не для полных, а для активных напряжений, вместе с зависимостью приращения добавочных напряжений от приращения неупругой деформации, то есть аналог теории пластического течения с комбинированным упрочнением.

Введено понятие объемной доли мартенсита, участвующего в структурном переходе, и описан алгоритм ее определения по графику зависимости интенсивности напряжений от объемной доли мартенсита [5]. Приведены результаты численных расчетов мартенситной неупругости и сверхупругости в рамках предложенной модели, а также расчет деформирования СПФ при заданных законах изменения напряжения и температуры. Немонотонное изменение напряжений в ходе прямого фазового превращения приводит к формированию совокупностей мартенситных образований с разными пороговыми значениями начала структурного перехода, одновременному протеканию на отдельных этапах фазового и структурного переходов с меняющейся долей мартенсита, участвующего в структурном переходе. Проведено сравнение предложенной модели с альтернативными вариантами учета структурного перехода в СПФ – гипотезами о едином пороговом напряжении для всего представительного объема и об отсутствии порогов.

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

1. Мовчан А.А., Казарина С.А., Тант Зин Аунг. Деформации и разрушение материалов. 2009. №9. С.2-6.
2. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Изв. РАН. МТТ. 2010. №3. С.118-130.
3. Мишустин И.В. Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т.18. №4. С.463-474.
4. Мовчан А.А., Казарина С.А. Физическая мезомеханика. 2012. Т.15. № 1. С.105-116.
5. Мишустин И.В., Мовчан А.А. Изв. РАН. МТТ. 2014. №1. С.37-53.