

Краткие сообщения

05;12

Исследование эффекта осесимметричного выпучивания круглых пластин

© М.А. Хусаинов

Новгородский государственный университет,
173003 Новгород, Россия

(Поступило в Редакцию 8 февраля 1996 г.)

Исследовано деформационно-силовое поведение круглой пластины при термоциклировании через интервал мартенситных превращений. Показано, что при достижении определенной температуры $A_n < T_{пу} \leq A_k$ пластина теряет устойчивость и восстанавливает форму хлопком. Приведены результаты измерений силы удара и реактивных усилий. Определены условия реализации хлопка.

Круглые пластинки в измерительных приборах обычно выполняют роль чувствительных элементов (мембран), реагирующих на изменение давления и температуры. Если элементы не связаны по контуру с жестким кольцом и воспринимают при изменении температуры только поперечное давление, то они выпучиваются. В работе [1] показано, что при больших прогибах пластинки образуется сжатая зона, которая и является очагом потери устойчивости пластины. Выпучивание биметаллических пластин изменяется пропорционально температуре, у сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) прогиб изменяется резко при характеристической температуре. Потеря устойчивости пластины, сопровождающаяся мгновенным выпучиванием (хлопком), наблюдалась на этапе реализации эффекта памяти формы [2]. Температура, соответствующая резкому осесимметричному выпучиванию хлопком, в некоторых случаях совпадала с температурой окончания обратного мартенситного превращения (A_k). При повторении термических циклов отмечалась доля самопроизвольного восстановления формы на этапе нагрева и недовозврат деформации после воспроизведения хлопка.

Представляет интерес дальнейшее изучение особенностей термомеханического поведения круглых пластин из никелида титана в связи с резким восстановлением сообщенной мартенситу деформации.

Эксперименты проводили на пластинках различных размеров, изготовленных из сплава TiNi эквиатомного состава. Для задания материалу "памяти формы" пластинку диаметром D прогибали в оправке на величину f в мартенситном состоянии. Радиус прогиба R выбирали из условия $f/h \geq 2$, где h — толщина пластины [1]. Защемленную пластинку в оправке отжигали при температуре 500°C (20 мин).

Методика исследования заключалась в следующем: пластинку в мартенситном состоянии деформировали на величину $2f$ действием нагрузки P в поперечном направлении так, чтобы обеспечивалось осесимметрич-

ное выпучивание, обусловленное переходом срединной плоскости пластинки в поверхность вращения (рис. 1). Затем осуществлялся нагрев до температуры A_k . На этой стадии у контура появлялись значительные сжимающие реактивные напряжения, которые приводили к потере устойчивости и мгновенному восстановлению формы.

На рис. 2 графически показаны характерные кривые формовосстановления мембраны при отогреве. Прямые $1, 1'$ иллюстрируют деформации, вызванные нагрузками P и P' , осуществляющими прогиб мембраны на $2f, 2f'$ в мартенситном состоянии. Начало нагрева на первом цикле отражается кривыми $2, 2'$. Возврат деформации, сопровождаемый хлопком при температурах $T_{пу}, T'_{пу}$, иллюстрирует прямые $3, 3'$. Полное восстановление наперед заданной формы завершается при температуре A_k, A'_k .

Приведенные данные свидетельствуют о том, что основной возврат деформации хлопком происходит при температуре $T_{пу}$ (момент потери устойчивости), которая отличается от A_k исходного образца. При этом смещение $T_{пу}$ и A_k в область повышения температуры связано с величиной деформации (прогиба), сообщенной мартенситу. Недовосстановление формы $\Delta f_{нв}$ при реализации хлопка на первом цикле незначительное. Повторение термических циклов, прогиб в мартенситном состоянии — нагрев до A_k и охлаждение до M_k , обусловлено увеличением параметров Δf и $\Delta f_{нв}$, а также смещением температур $T_{пу}$ и A_k (прямые $4, 4'$). Здесь же кривой 5 представлен исходный гистерезис.

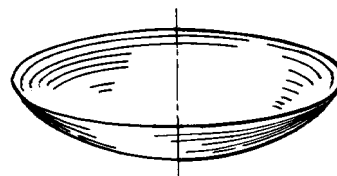


Рис. 1. Осесимметричное выпучивание круглой пластины.

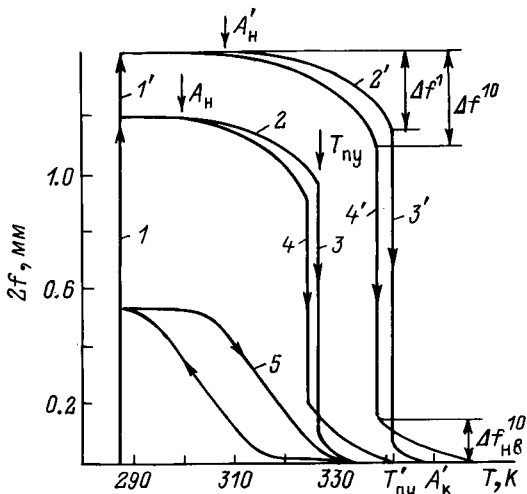


Рис. 2. Типичные диаграммы термомеханического гистерезиса хлопнунов из никелида титана. Δf^1 — величина прогиба до момента потери устойчивости на 1-м цикле, Δf^{10} — то же на 10-м цикле.

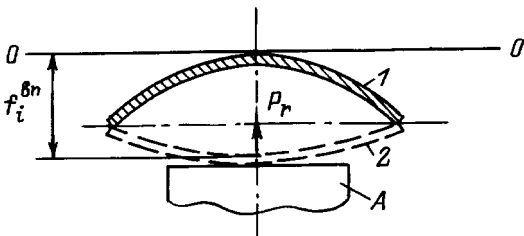


Рис. 3. Положение круглой пластины (хлопуна) относительно противодействующего тела. 1 — исходное положение пластины, 2 — в момент удара о противодействующее тело A при отогреве, f_i^{bn} — величина восстанавливаемого прогиба пластины от центра кривизны.

В работе [2] отмечалось, что в процессе хлопка круглой пластины возникает силовой импульс. Однако количественные данные в работе не приводятся. Здесь представлены результаты экспериментальных исследований термомеханического поведения пластинок (хлопунов) в условиях заданной величины восстанавливаемой деформации при температуре T_{ny} и последующем жестком защемлении для генерации реактивных напряжений.

Для получения систематических результатов динамометр с помощью микрометрического винта устанавливался на заданную величину (рис. 3). Сила удара фиксировалась по отклонению стрелки на шкале прибора, а реактивные усилия P_r и температура записывались на двухкоординатном потенциометре типа ЛКД. Опыты показали, что динамометр, установленный на расстоянии f_i^{bn} , фиксирует силу удара ($P_{уд}$) и обеспечивает жесткое защемление пластины, препятствуя свободному формовосстановлению. В результате этого в материале хлопнуна генерируются реактивные усилия, величина которых при заданной жесткости системы определяется степенью

предварительного выпучивания (деформации). Кинетика развития реактивных усилий в режиме реализации хлопка и стесненной деформации показана на рис. 4. Видно, что при температуре, близкой к A_k , происходит скачок усилия. Этот момент сопровождается хлопком и ударом о противодействующее тело (динамометр). При дальнейшем продолжении нагрева, теперь уже в заневоленном состоянии, в материале пластины возникают реактивные усилия P_r , уровень которых зависит от заданной величины свободного прогиба f_i^{bn} .

Явление резкого возврата формы с ударом при некоторой температуре T_{ny} еще подлежит изучению. Однако можно назвать ряд факторов, безусловно инициирующих

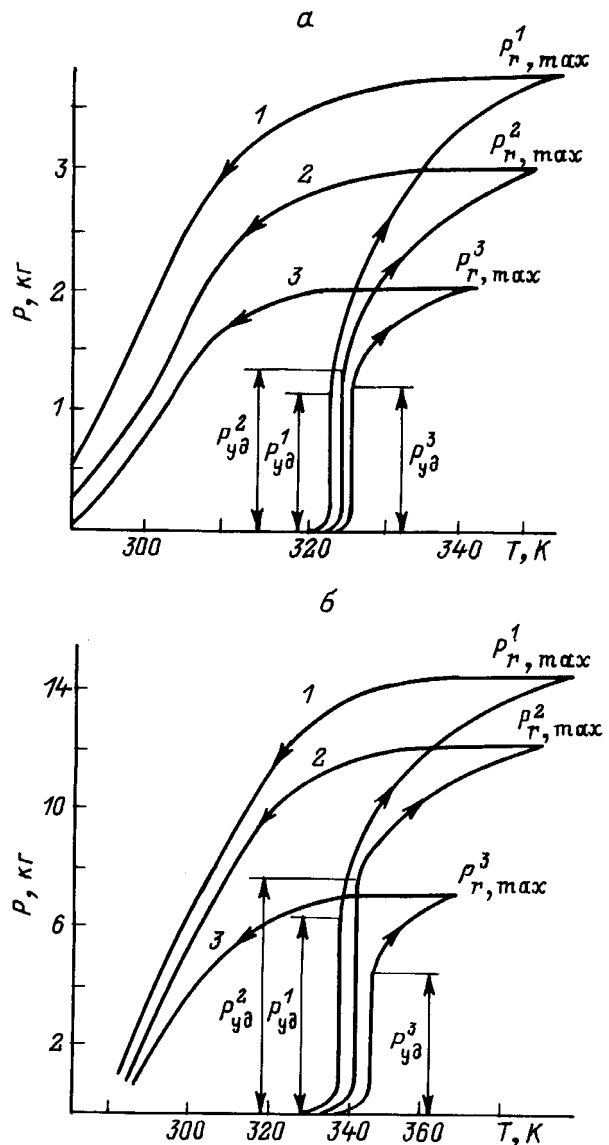


Рис. 4. Характерные зависимости силы удара $P_{уд}$ и реактивного усилия P_r от температуры при различных величинах восстанавливаемого прогиба круглой пластины от центра кривизны (f_i^{bn}) и жесткости противодействия $K \rightarrow \infty$. а — $D = 20$ мм, $2f = 1.2$ мм; f_i^{bn} , мм: 1 — 0.48, 2 — 0.64, 3 — 0.83; б — $D = 11$ мм, $2f = 1.4$ мм; f_i^{bn} , мм: 1 — 0.78, 2 — 0.93, 3 — 1.2.

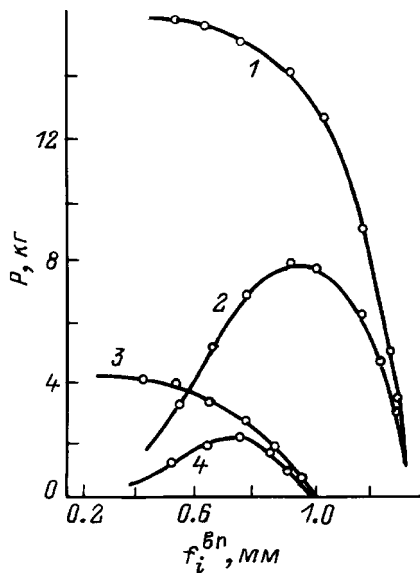


Рис. 5. Зависимость силы удара (2, 4) и реактивного усилия (1, 3) от восстанавливаемого прогиба пластины в момент хлопка. $D = 11$ (1, 2), 20 мм (3, 4).

хлопок. Известно, что вблизи температуры A_n решетки мартенсита приобретает неустойчивость, в результате чего появляются химические и механические силы возврата. Одновременно с этим в материале пластины генерируются реактивные усилия, действующие в поперечном направлении. Под влиянием этих сил в области контура круглой пластины образуется сжатая зона, которая и является очагом потери устойчивости. Надо также учесть, что если высокотемпературная псевдоупругость наиболее отчетливо выражена вблизи температуры A_k , то потеря устойчивости, возможно, связана с проявлением и этого эффекта, так как всегда выполняется условие $A_n < T_{пу} \leq A_k$.

Анализ кривых $P = f(f_i^{bn})$ показал (рис. 5), что сила хлопка, или ударная сила хлопуна, постепенно возрастает, достигая максимальной величины при некотором значении f_i^{bn} , а затем при ее увеличении достаточно резко убывает. Расстояние f_i^{bn} , соответствующее наивысшему эффекту хлопка (максимальная сила удара), составляет $f_{max}^{bn} = (0.65-0.75)2f$, где $2f$ — прогиб пластины в мартенсите. При этом обращается внимание на то, что как сила удара $P_{уд}$, так и реактивное усилие P , генерируемое в материале после действия хлопка, определяются геометрическими параметрами хлопуна (D, h, f, R) и зависят от состава и структурного состояния сплава.

Тщательные наблюдения за формоизменением пластинок в процессе термоциклирования показали, что имеет место формирование обратной памяти формы. Надо полагать, что активный прогиб круглой пластины в мартенсите на заданную величину $2f$ способствует возникновению ориентированных зародышей образующейся фазы и появлению микронапряжений в направлении силы. Последующий нагрев до $T_{пу}$ вызывает осесимметричное

выпучивание пластины хлопком, связанное, как надо полагать, с действием ориентированных микронапряжений и частичным недовозвратом деформации. В результате этих событий формируется устойчивый эффект обратной памяти формы, способствующий многократному формоизменению хлопуна при уменьшенной величине прогиба.

Образцы, прошедшие термотренинг в течение 160–200 циклов, демонстрировали самопроизвольное выпучивание пластинки при охлаждении и восстановлении формы с хлопком на этапе нагрева.

1. Выводы

1. Формовосстановление предварительно деформированной пластинки в мартенсите происходит хлопком вследствие потери устойчивости вблизи температуры A_k .
2. Эффект хлопка реализуется при определенном соотношении геометрических параметров круглой пластины (D, h, f, R).
3. Термоциклирование через интервал мартенситных превращений способствует формированию многократно-обратимой памяти в материале диска.
4. Ударная сила хлопуна возрастает по мере увеличения доли возвращаемой деформации и достигает максимальной величины при $f_{max}^{bn} = (0.65-0.75)2f$.

Список литературы

- [1] Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1987. 984 с.
- [2] Хусаинов М.А., Беляков В.Н., Пазгалов А.Ф. // Материалы со сложными функционально-механическими свойствами. Новгород, 1994. Ч. 2. С. 152–158.