

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА



УДК 669.018

А.Б.Бондарев*, М.А.Хусаинов, М.В.Чухонкин, О.В.Летенков, В.А.Андреев*

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СФЕРИЧЕСКИХ СЕГМЕНТОВ ИЗ СПЛАВОВ TiNi С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Политехнический институт НовГУ, Mikhail.Khusainov@novsu.ru

* Промышленный центр «МАТЕКС», Москва, andreev@mateks.ru

The article is devoted to investigation of generation mechanism and reactive force relaxation developing in material of spherical segments depending on degree of overheat and existence of strain concentrators. It has been established that if a spherical segment, deformed in martensite, is exposed to overheat in constrained condition, then the maximum temperature of heating is 150°C; above this temperature shape memory effect is suppressed.

Ключевые слова: сферический сегмент, эффект памяти формы, реактивные усилия

Введение

Явление скачка деформации с хлопком, наблюдаемое на сферических сегментах в процессе отогрева, было обнаружено нами в 1989 г. Необычное поведение этих объектов [1-4] способствовало развитию исследований в этом направлении.

Процедура изготовления сегментов включает получение круглой пластинки из листа сплавов Ti-Ni электроискровой резкой, деформирование в пресс-форме сферическим пуансоном заданного радиуса, жесткое защемление и отжиг при 500°C, 30 мин. Изготовленный таким образом сферический (выпуклый) сегмент после прогиба в мартенситном состоянии зеркально исходному очертанию при отогреве восстанавливает форму. Однако при определенном соотношении размеров (диаметр, толщина и радиус) сферический сегмент на этапе фазового перехода М→А теряет устойчивость и прощелкивает с хлопком при $T_{пу} = A_f$ как при отсутствии противодействующего тела, так и при его наличии. В последнем случае если противодействующим телом является динамометр, то фиксируется сила удара $P_{уд}$ и реактивные усилия P_r .

Систематические исследования взаимосвязи геометрических размеров сегмента позволили найти их оптимальные соотношения [5,6], при которых реализуется удар максимальной силы. Влияние надрезов как концентраторов напряжений изучали по темпу изменения силовых параметров сферических сегментов. Показано, что с увеличением длины надреза силы $P_{уд}$ и P_r закономерно снижаются. Установлена критическая длина заторможенных и распространяющихся трещин.

Методика и результаты исследования

Исследования проводились на сферических сегментах оптимальной геометрии: $D = 16,8-17$ мм, $h = 0,43-0,46$ мм, $R = 20-23$ мм, изготовленных из сплава Ti-50,3ат.-%Ni с температурами мартенситных

превращений $M_s = 19^\circ\text{C}$, $M_f = 8^\circ\text{C}$, $A_s = 32^\circ\text{C}$, $A_f = 44^\circ\text{C}$ и механическими свойствами: $\sigma_\phi = 130$ МПа, $\sigma_T = 820$ МПа, $\sigma_B = 1130$ МПа, $\delta = 24\%$, HRA = 77. Надрезы на краях выпуклых сегментов выполнялись на электроискровом станке проволочным электродом $\varnothing 0,1$ мм.



Рис.1. Общий вид сферического сегмента

Силовые параметры сферических сегментов (рис.1) определялись на разрывной машине FPZ-1.0 (Германия) по следующей методике: на нижней траверсе устанавливалось устройство с исследуемым образцом (сферическим сегментом). Верхняя траверса, связанная с динамометром, осуществляла прогиб сферического сегмента в мартенсите и воспринимала ударные ($P_{уд}$) и реактивные (P_r) нагрузки (рис.2), генерируемые при отогреве. На диаграмме, приведенной на рис.3, показано, что деформирующее усилие возрастает до верхнего критического значения P_B , при котором отмечается слабый хлопок и достаточно резкое снижение действующей нагрузки до уровня P_H . Дальнейшее нагружение до полного прогиба сопровождается увеличением приложенного усилия до P_{max} . После разгрузки по DE наблюдается небольшое изменение величины прогиба. Отрезок ЕК характеризует упругую часть полного прогиба сегмента. Теперь если начать отогрев с точки Е на деформационной оси, то произойдет восстановление первоначальной формы (точка А), но характер возврата формы может сильно различаться. Либо произойдет обычное восстановление формы по мере повышения температуры образца, либо форма сегмента восстановится скачком.

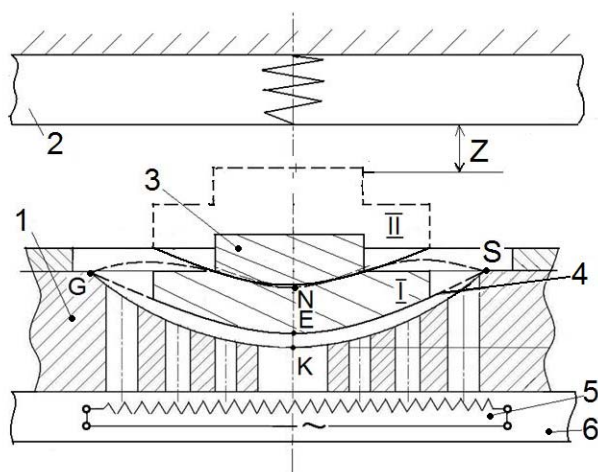


Рис.2. Схема устройства для измерения силовых параметров сферических сегментов. 1 — корпус; 2 — верхняя траверса; 3 — пуансон; 4 — нейтральные линии сегментов, после нагружения (М) и снятия разгрузки; 5 — нагреватель; 6 — нижняя траверса. I — начальное и II — конечное положения пуансона до удара при отогреве сегмента

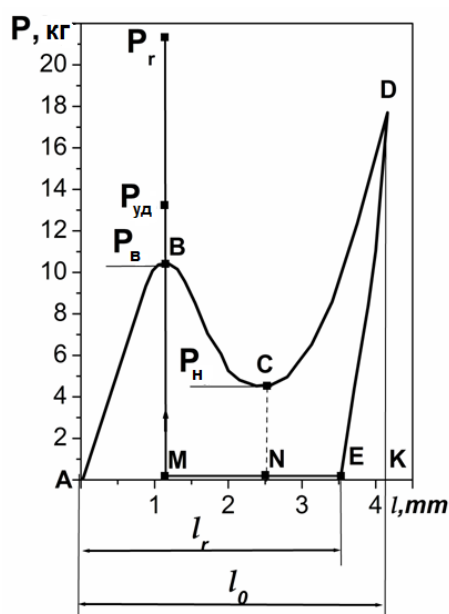


Рис.3. Диаграмма прогиба сферического сегмента в мартенсите ABCDE и последующего отогрева по ENM с генерацией силовых характеристик $P_{уд}$ и P_r

Следует обратить внимание на то, что от точки E на деформационной оси до точки N происходит нагрев образца. В точке N сегмент теряет устойчивость и мгновенно прощелкивает с хлопком и ударом о противодействующее тело в точке M. Продолжение нагрева заземленного сегмента способствует развитию реактивных напряжений. Такие условия реализуются после прогиба сегмента зеркально исходному состоянию. Для этого нижняя траверса разрывной машины с пресс-формой опускается на расстояние $I = 1/3 I_{в}$, тем самым устанавливается оптимальный рабочий ход пуансона Z до силоизмерителя (рис.2). Последующий нагрев сферического сегмента до $T_{пу}$ инициирует эффект скачка деформации с ударом о верхнюю траверсу с максимальной силой.

В данной работе представлены экспериментально полученные данные по влиянию перегревов и

надрезов на силовые параметры ($P_{уд}$, P_r) сферических сегментов. Перегревы сферических сегментов относительно $A_f \approx 48^\circ\text{C}$ проводились в муфельной печи как в незащемленном, так и в защемленном состоянии. На рис.4 приведены данные изменения силы удара и реактивных усилий, развивающихся при температурах от 100 до 550°C . Видно, что при повышении температуры нагрева до 450°C , $\tau = 1$ ч, сила удара и реактивные усилия возрастают. Это можно связать с механизмом упрочнения сплава, обусловленного образованием высокодисперсных частиц, когерентных с B2 матрицей [3]. Однако при дальнейшем повышении температуры отжига до 550°C наблюдается резкое снижение уровня силовых характеристик. Вероятной причиной такого поведения является укрупнение частиц вторых фаз, релаксация упругих напряжений и развитие рекристаллизационных процессов, существенно снижающих способность сегмента генерировать реактивные напряжения при отогреве. Полученные данные позволяют установить критическую температуру перегрева в 400°C , выше которой нагрев исследуемых объектов недопустим.

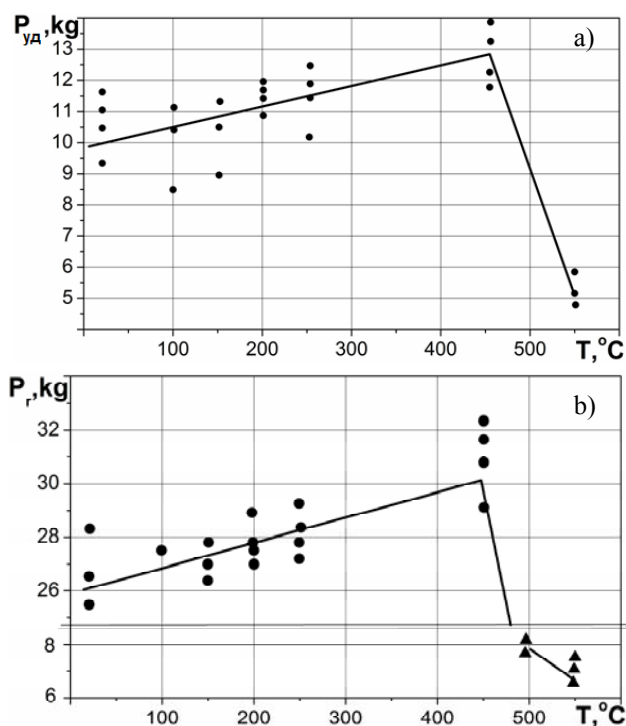


Рис.4. Зависимость силы удара (а) и реактивных усилий (б) от температуры нагрева сферических сегментов с размерами $D = 16,7-16,8$ мм, $h = 0,43-0,46$ мм

Сегменты, защемленные в пресс-форме, допускают перегрев не более чем на 100°C . Показано, что после отжига при 150°C в защемленном состоянии сферические сегменты отчетливо реализуют эффект прощелкивания с хлопком. При этом генерирующие в материале сегмента силы $P_{уд}$ и P_r на 10-20% выше по сравнению с обычным отжигом при той же температуре. Повышение температуры нагрева до 200°C приводит к подавлению эффекта памяти формы. Скачок деформации после отжига при этой температуре отсутствует и не реализуется после полного отогрева в свободном состоянии.

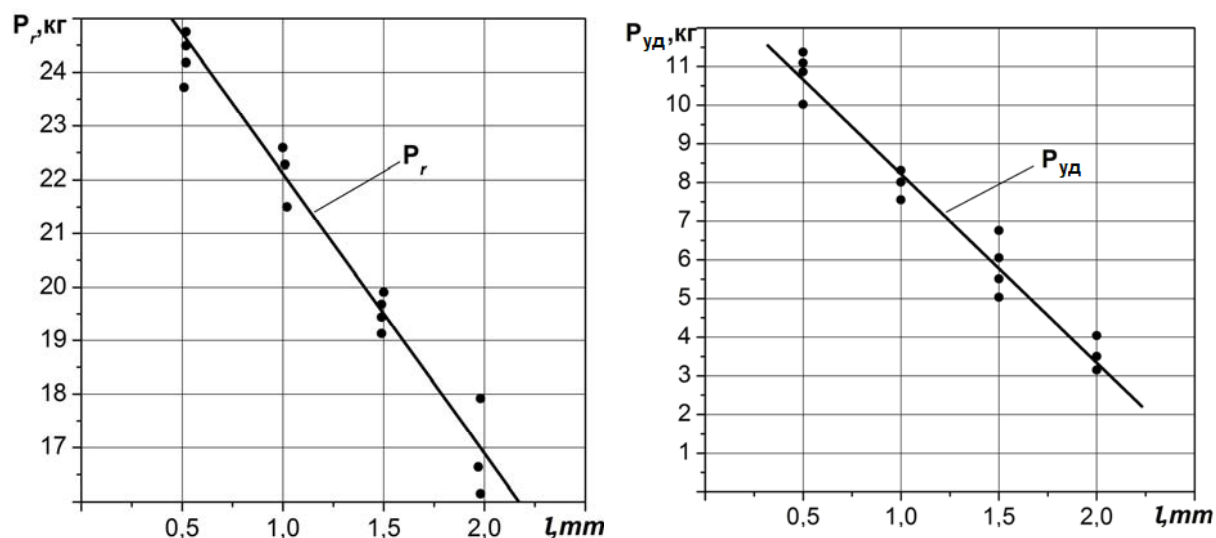
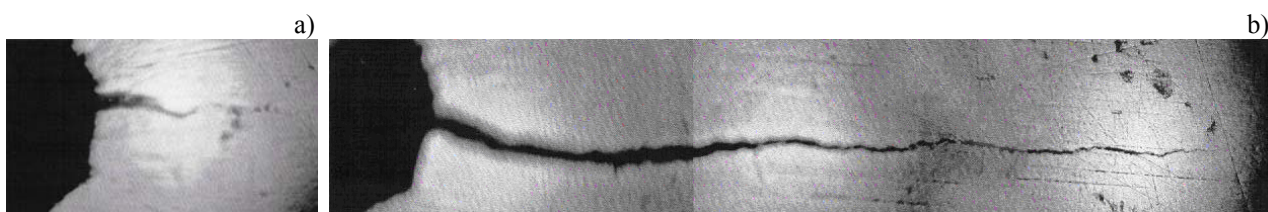
Рис.5. Зависимость силовых параметров сферических сегментов от длины надреза при ширине $l = 0,1$ мм

Рис.6. Характерный вид зарождения (а) и развития (b) трещины

Анализ напряженного состояния выпуклых сегментов показал, что их края являются наиболее чувствительными к концентраторам упругих напряжений. Прямым доказательством этого является появление микротрещин на краях сегментов при их циклировании в незащемленном состоянии по схеме «прогиб в мартенсите $\leftrightarrow$ нагрев до аустенитного состояния» после 10^4 циклов [3]. В реальных условиях сферический сегмент, совершив удар о противодействующее тело, оказывается заневоленным, и такое состояние сохраняется до его охлаждения. Поэтому влияние надрезов на силовые параметры сферических сегментов изучалось в условиях, близких к реальным. На рис.5 приведены зависимости силы удара и реактивных усилий от длины надреза. Видно, что с увеличением длины надреза силовые параметры, генерирующие в материале сферического сегмента при отогреве, заметно снижаются. Эти данные дают наглядное представление о влиянии размера концентраторов напряжений на генерируемые усилия ($P_{уд}$, P_r), которые нельзя не учитывать при разработке запорных клапанов-отсекателей с использованием сферических сегментов.

Следует обратить внимание на то, что в области вершины надреза напряжения распределяются неравномерно. Подтверждением этого является одновременное зарождение нескольких микротрещин, преимущественно от одного надреза, при наличии четырех (диаметрально расположенных). Впоследствии, после нескольких десятков циклов с реализацией удара и реактивных напряжений, развитие получает та микротрещина, которая сформировалась первой.

Повторение циклов прогиб сегмента $\leftrightarrow$ отогрев с ударом и развитием реактивных усилий приводит к ее распространению в виде клина, направленного к куполу сегмента (рис.6). При длине трещины 0,073 мм уровень действующих напряжений снижается вследствие пластической деформации перед вершиной трещины. Трещина некоторое время не распространяется. Об этом можно судить по неизменяемости силовых характеристик, т.е. их значение в течение 5-10 последующих циклов остаются постоянными. Далее трещина подрастает до размеров 0,3 мм, при которых (рис.6b) эффект прощелкивания не реализуется.

Выводы

1. Разработана методика исследования кинетики развития реактивных усилий в материале сферических сегментов. Определены их геометрические параметры, при которых реализуется эффект скачка деформации с хлопком и ударом о контртело.

2. Изучено влияние перегревов, относительно температуры A_f . Установлены критические температуры перегревов, выше которых явление прощелкивания с хлопком и ударом не проявляется.

3. Проиллюстрировано влияние надрезов на развитие реактивных усилий. Показана высокая чувствительность сферических сегментов к надрезам. Выявлена линейная связь генерирующих в материале усилий с величиной надреза. Приведены микрофотографии, иллюстрирующие зарождение и характер распространения трещин.

-
1. Хусаинов М.А., Летенков О.В., Пазгалов А.В., Беляков В.Н. // Сб. докл. XXX Межресп. семинара «Актуальные проблемы прочности». Новгород, 16-19 мая 1994. Новгород, 1994. Ч.2. С.152-158.
 2. Khusainov M.A., Malukhina O.A., Belykov V.N., Letenkov O.V. Investigation of Resistance of Alloy Spherical Sheaths with Shape Memory Effect (SME) // Proceedings of the Second International Conference on Shape Memory and Supere-
lastic Technologies (SMST-97). California, USA. 2-4 March 1997. P.215-219.
 3. Хусаинов М.А. Сплавы никелида титана с памятью формы // Структура и фазовые превращения и свойства. Ч.1 / Под ред. В.Г.Пушина. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. С.226-242.
 4. Хусаинов М.А. // ЖТФ. 1997. Т.67. №6. С.118-120.
 5. Попов С.А., Хусаинов М.А., Бондарев А.Б., Андреев В.А. // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2005. №34. С.12-16.
 6. Попов С.А., Андреев В.А., Хусаинов М.А., Бондарев А.Б. // Вестник НовГУ. 2006. №39. С.28-30.