ВЛИЯНИЕ УДАРНО-ВОЛНОВОГО НАГРУЖЕНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЕ И УПРУГИЕ СВОЙСТВА НИКЕЛИДА ТИТАНА.

Н.Н. Попов, А.М. Панченко, Н.Д. Севрюгина, В.А.Огородников

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ экспериментальной физики
г.Саров, пр. Мира, 37
E-mail: popov@astra.vniief.ru

Исследовано влияние ударно-волнового нагружения на изменение акустических, упругих и структурных свойств никелида титана. Показано значительное влияние интенсивности динамической нагрузки на характер изменения акустоупругих свойств сплава при фазовых переходах. Получено, что увеличение скорости нагружения вызывает прогрессирующее снижение упругих свойств и увеличение затухания ультразвуковых волн. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что главным источником изменений свойств никелида титана является эволюция субдефектной структуры – увеличение плотности дислокаций.

Введение

Сплавы на основе никелида титана являются одними из наиболее перспективных материалов с проявлением эффекта памяти формы. Особенностью их является сильная зависимость физических и структурных свойств от термомеханической обработки. Вместе с тем нами обнаружено, что задание предварительной деформации с динамическими скоростями приводит к ряду интересных эффектов, связанных с проявлением эффекта обратимой памяти. В данной работе приведены результаты исследования влияния ударно-волнового нагружения различной интенсивности, как одного из способов динамического нагружения, на изменение акустических и упругих свойств низкотемпературного никелида титана. Результаты ультразвукового контроля для повышения достоверности сопоставлялись с данными рентгеноструктурного анализа.

Методика эксперимента

В качестве объекта исследования выбран никелид титана марки ТН1К следующего состава: Ti – основа, Ni – 51,2%, Fe - 3,0%. Образцы в виде цилиндров Ø25х20 мм вырезали из прутков Ø40 мм и отжигали в вакууме при 800 °С. Часть образцов подвергалась динамическому нагружению, другая группа использовалась для исследования исходного состояния сплава.

При проведении ударно-волновых испытаний на установке, описанной в работе [2], исследуемый образец запрессовывался в стальную обойму с наружным диаметром 90 мм. Такая мишень нагружалась ударником из стали Ø75х22 мм при температуре 20 °С и тормозилась в малоплотной среде. Скорость ударника изменялась от 4 до 160 м/с, что позволяло создавать режимы нагружения никелида титана, как в упругой, так и в пластической области.

При ультразвуковом обследовании импульсным методом на частоте 2,5 МГц по методикам работ [3,4] проводили измерение скорости и затухания продольных и поперечных волн. По результатам опыта определяли значение динамического модуля нормальной упругости. По данным рентгеноструктурного анализа (аналогично [1]) определяли температуры фазовых переходов и параметры тонкой структуры материала.

При рентгеноструктурном обследовании материала в исходном и постопытном состояниях зафиксировано два мартенситных перехода: B2↔R↔B19′ (см. таблицу).

Т а б л и ц а. Изменение температур фазовых переходов, акустических и упругих свойств сплава ТН1К после приложения импульсных ударных нагрузок

Контролируемый параметр	Скорость нагружения Wуд = 0м/с	Скорость нагружения Wуд = 14.4м/с	Скорость нагружения Wуд = 18.5м/с	Скорость нагружения Wуд = 91.4м/с	Скорость нагружения Wуд = 150.8м/с
T_R, °C	-16	-20	-20	-20	-20
M_S, °C	-140	-145	-145	-160	-180
M_F, °C	<-196	<-196	<-196	<-196	<-196
A_S, °C	-82	-82	-82	-80	-80
A_f, °C	-50	-55	-55	-57	-68
C_{l0}, м/с	5440	5440	5440	5430	5420
C_{t0}, м/с	2270	2270	2260	2240	2240
E_0, ГПа	84.8	84.8	83.4	82.5	82.1
ΔC_{lR}, %	5.9	6.2	6.4	7.2	8.1
ΔC_{tR}, %	25	27	28	32	38
ΔE_R, %	30.2	35.3	41.6	47	56.1
ΔC_{lm}, %	0.5	0.8	085	1.7	2.2
ΔC_{tm}, %	0.8	2.2	4	8.8	14.2
$\Delta E_м$, %	6.2	7.5	10.5	15.7	20.1

C_{l0}, C_{t0}, E_0 – значения скорости продольных и поперечных волн и модуля нормальной упругости при 20°C;

ΔC_{lR}, ΔC_{tR}, ΔE_R – относительное (по сравнению со значением при 20°C) уменьшение скорости продольных, поперечных волн и модуля упругости в ходе фазового перехода аустенит → R-фаза;

ΔC_{lm}, ΔC_{tm}, $\Delta E_м$ – относительное (по сравнению со значением при 20°C) уменьшение скорости продольных, поперечных волн и модуля нормальной упругости в ходе фазового перехода R-фаза → мартенсит.

При изменении скорости T_R незначительно снижалась и в дальнейшем не зависела от скорости нагружения. Температура начала мартенситного превращения M_S уменьшалась с ростом скорости нагружения. Температуры обратного мартенситного превращения A_S и A_f слабо зависели от скорости нагружения. Фазовый переход R↔B19′ характеризовался неполнотой, поэтому в интервалах температур от M_S до –196 °C (при охлаждении) и от –196 °C до A_S (при нагреве) сплав находился в двухфазном состоянии. Изменение параметров тонкой кристаллической структуры – области когерентного рассеяния (ОКР) и плотности дислокаций – в зависимости от скорости движения ударника свидетельствовало (рис. 1), что плотность дислокаций практически линейно зависела от скорости нагружения, а ОКР резко уменьшалась в интервале скоростей ударника от 0 до 30 м/с, а в дальнейшем слабо изменялась.

При ультразвуковом обследовании никелида титана в исходном состоянии и после нагружения получено, что изменение акустических и упругих характеристик материала имело аномалии на температурных кривых в интервалах фазовых переходов (рис. 2-4). При температурах, предшествующих фазовым переходам аустенит↔R-фаза, зарегистрированы локальные минимумы скорости ультразвуковых волн, упругого модуля и интенсивные пики затухания. Указанные акустоупругие эффекты носили без-

гистерезисный характер. Начало прямого фазового перехода R фаза → мартенсит характеризовалось снижением скоростей ультразвуковых волн и монотонным увеличением затухания. При нагреве образцов зарегистрирован температурный гистерезис изменения свойств (рис.4). С увеличением скорости ударника динамическое нагружение вызывало прогрессирующее изменение величины акустоупругих аномалий (таблица и рис. 5) в температурных интервалах фазовых переходов, особенно значительное для превращения аустенит↔R-фаза.

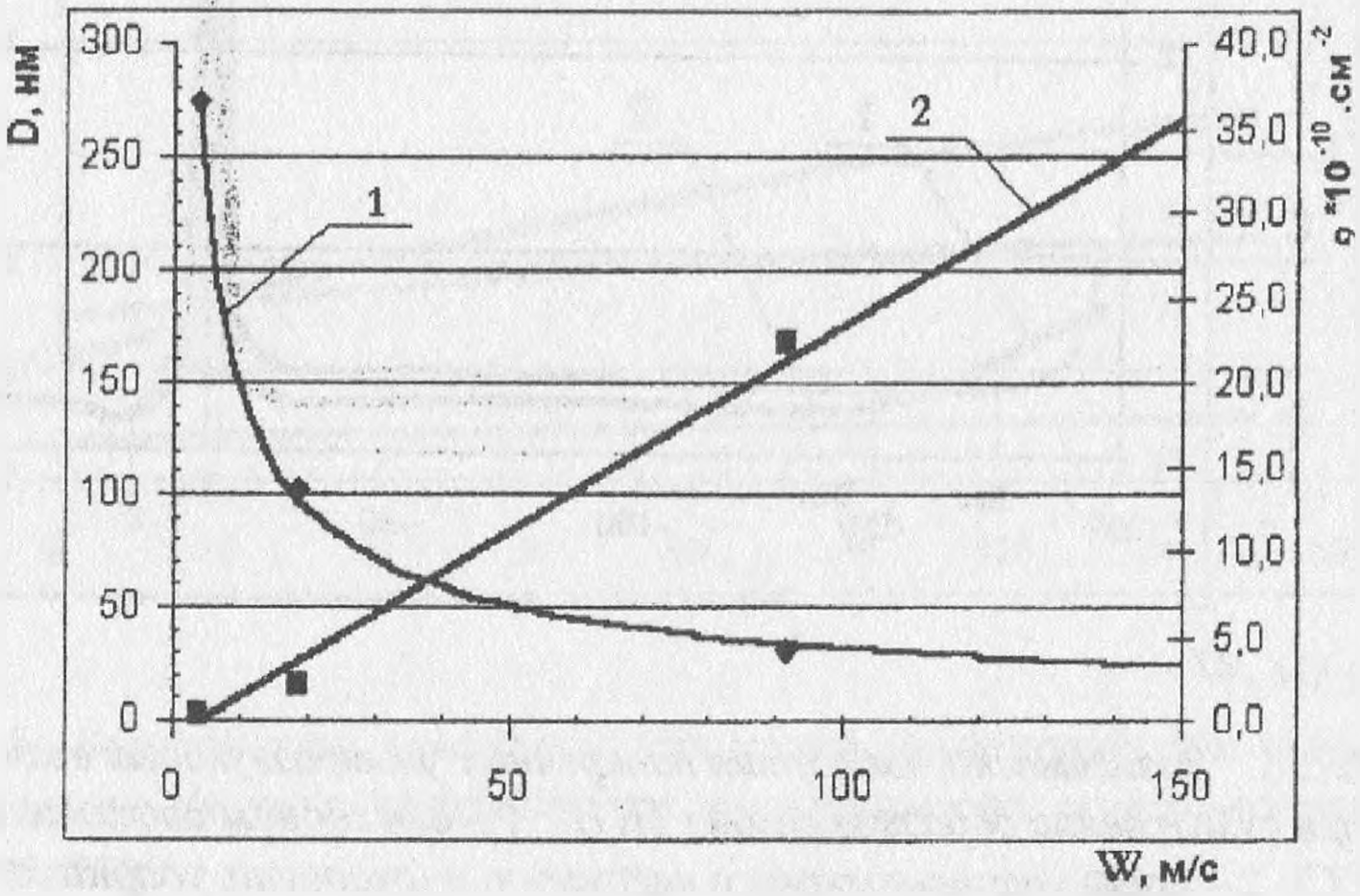

Рис.1. Изменение параметров тонкой структуры в зависимости от величины ударно-волновой нагрузки (скорости ударника): 1 - область когерентного рассеяния; 2 - область интегральной плотности дислокаций.

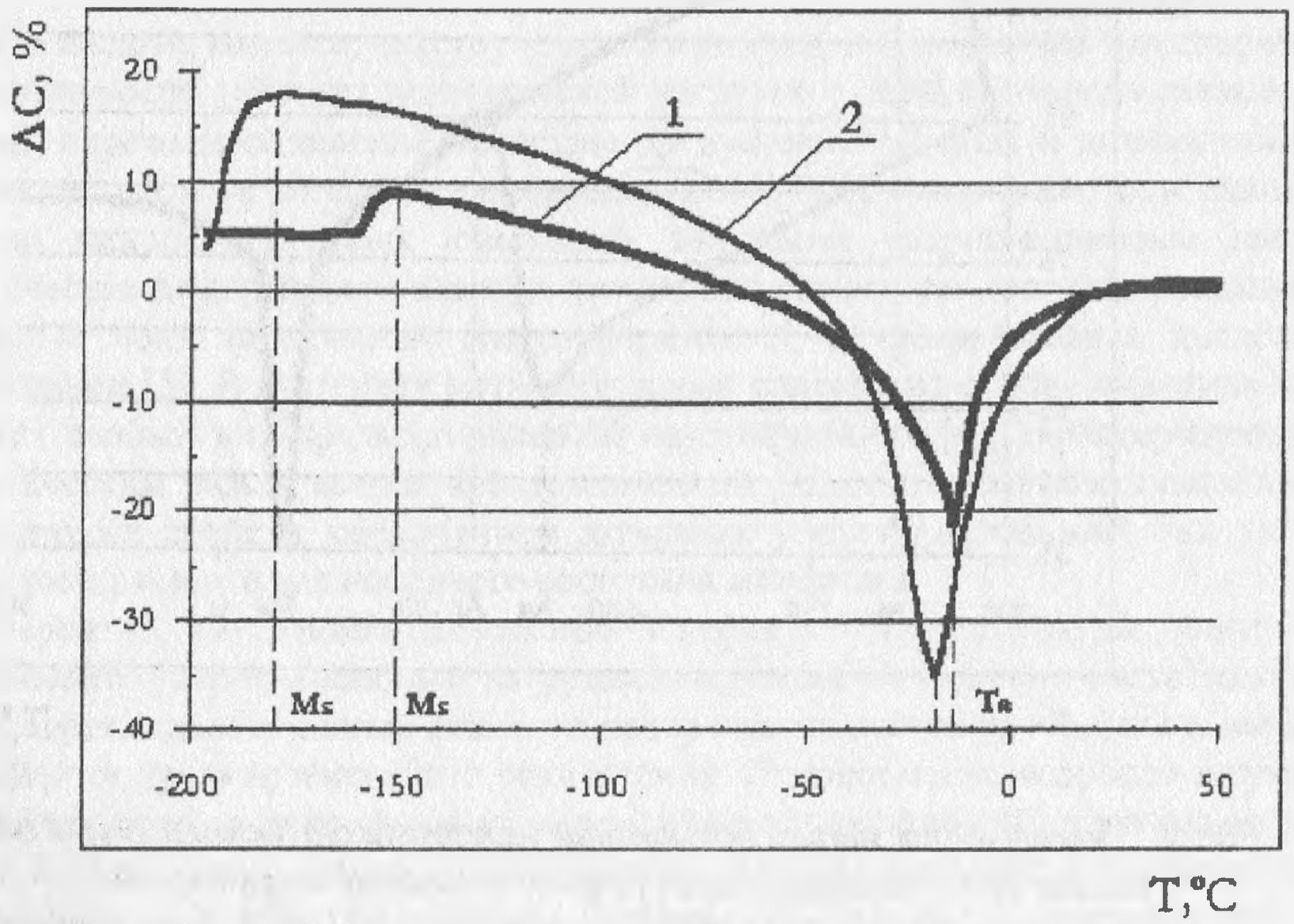

Рис. 2. Зависимость скорости поперечных ультразвуковых волн от температуры при охлаждении образцов сплава ТН1К: 1 – в исходном состоянии (отжиг при 800°С); 2 – после ударно-волнового нагружения (скорость ударника 150,8 м/с).

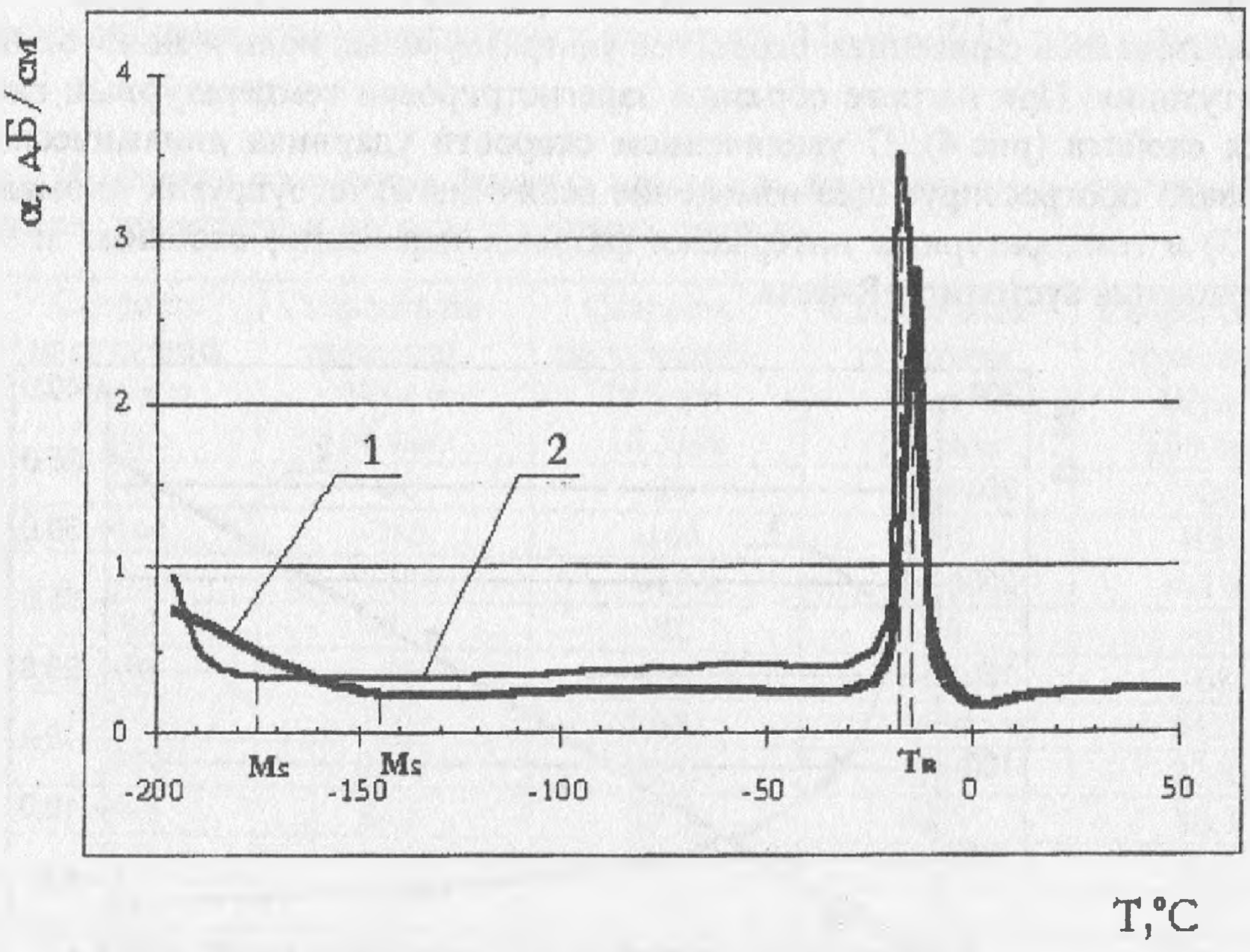

Рис. 3. Зависимость затухания поперечных ультразвуковых волн от температуры при охлаждении образцов сплава ТН1К: 1 – в исходном состоянии (отжиг при 800°С); 2 – после ударно-волнового нагружения (скорость ударника 150,8 м/с).

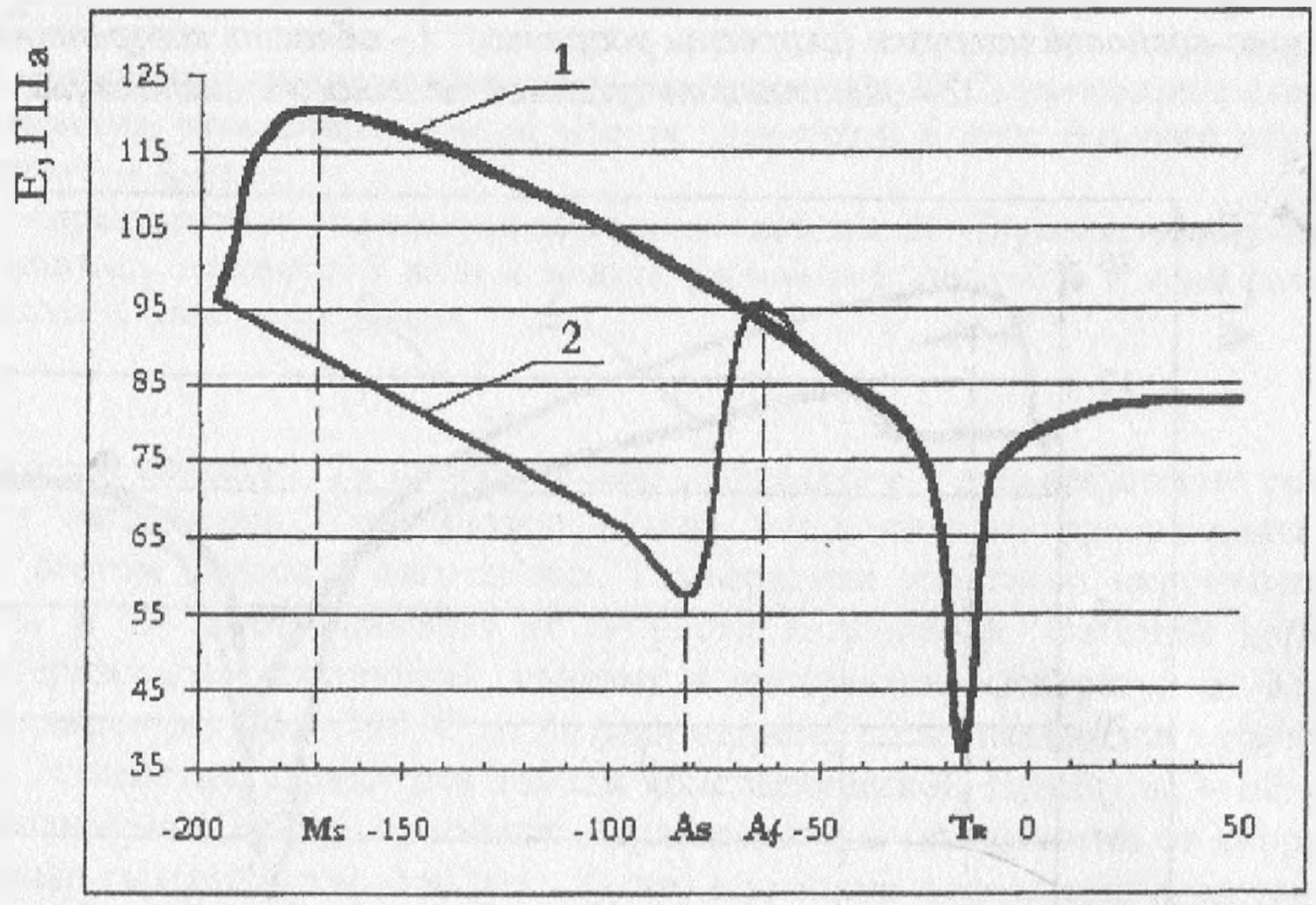

Рис. 4. Зависимость модуля нормальной упругости от температуры образца сплава ТН1К, подвергнутого ударно-волновому нагружению (скорость ударника 150,8 м/с): 1 – при охлаждении; 2 – при нагреве.

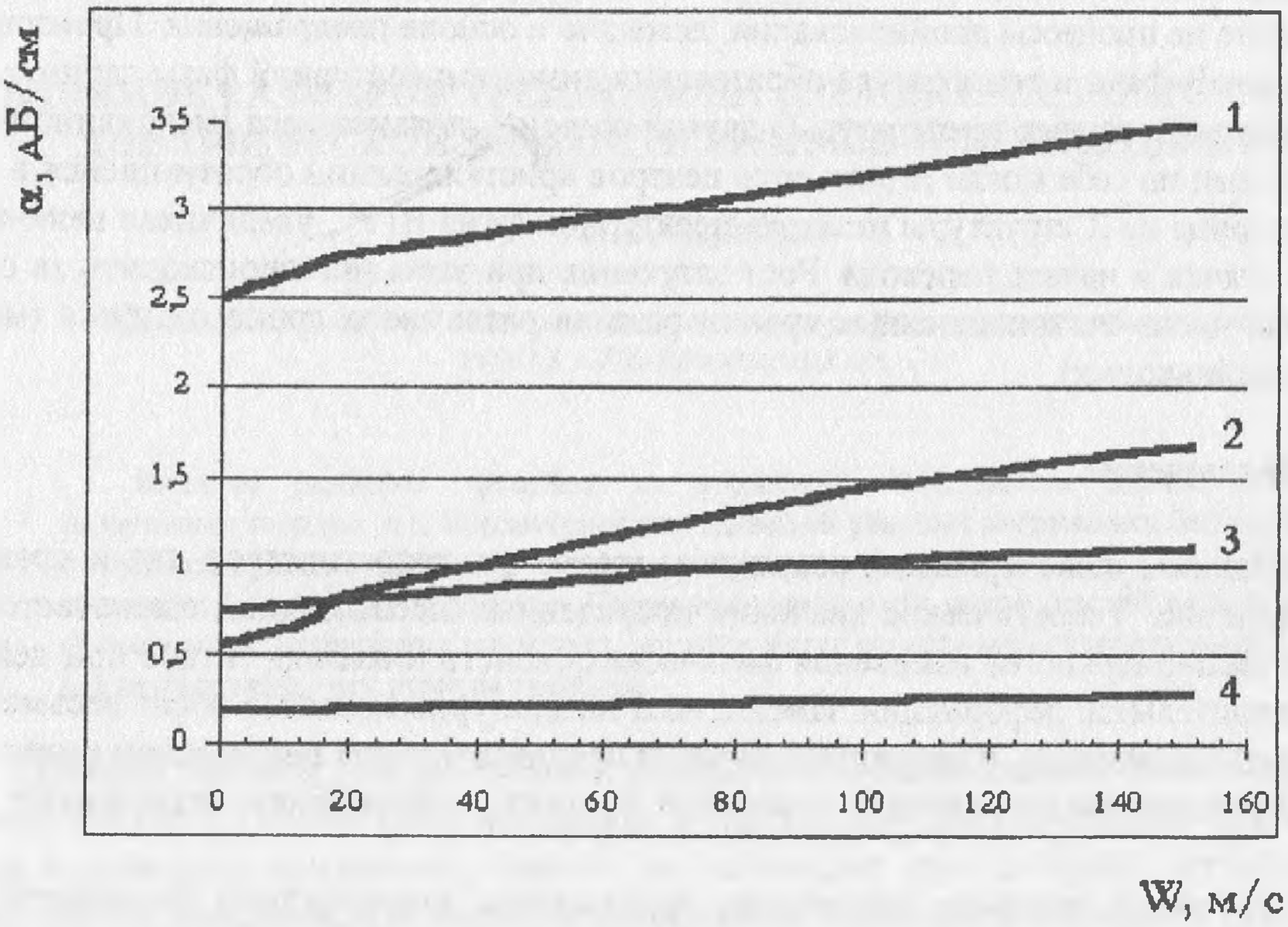

Рис. 5. Зависимость изменения затухания ультразвуковых волн в образцах сплава TH1K в ходе фазовых переходов от интенсивности ударно-волновой нагрузки (скорости ударника):

1 – поперечных волн при превращении B2 ↔ R;
2 – продольных волн при превращении B2 ↔ R;
3 – поперечных волн входе превращения R → B19';
4 – продольных волн в ходе превращения R → B19'.

По нашему мнению, акустоупругие аномалии, наблюдаемые в эксперименте, и их изменение после действия динамической нагрузки в первую очередь связаны с особенностями переходных явлений превращения аустенит↔R-фаза и динамикой изменения физических свойств сплава при превращениях R-фаза→мартенсит при одновременном влиянии микроструктурных изменений, вносимых ударно-волновым нагружением. Пластическая деформация никелида титана в аустенитном состоянии инициирует значительные поля внутренних микронапряжений, сформированные дислокационным скольжением [5]. В аустените метастабильных сплавов на основе никелида титана реализуется особый вид предмартенситной неустойчивости [6], характеризующийся макроскопическим размягчением кристаллической решетки и сопровождающийся снижением упругих свойств, увеличением затухания упругих колебаний, как это наблюдалось в эксперименте для исходного состояния материала.

Вероятно, внутренние напряжения и дефекты микроструктуры, инициируемые в эксперименте ударно-волновым нагружением, увеличили общую нестабильность сплава при переходных явлениях фазового превращения аустенит→R-фаза и вызвали дальнейший рост предмартенситного размягчения. Одновременно возросло затухание ультразвуковых волн за счет увеличения подвижности дислокаций, изначально закрепленных на барьерах скольжения. Примечательно, что наблюдаемое в эксперименте увеличение затухания в ходе превращения аустенит→R-фаза после динамической нагрузки, как и увеличение плотности дислокаций, носит линейный характер (рис. 5).

Влияние динамического нагружения на характер превращения R-фаза→мартенсит, по всей видимости, носило противоречивый характер. С одной сто-

роны, появление дислокаций и текстурирование материала сплава оказало блокирующее действие на процессы двойникования, лежащие в основе превращения. Произошла стабилизация R-фазы и температура образования низкотемпературной фазы сдвинулась в сторону отрицательных температур. С другой стороны, появившиеся дислокационные ансамбли сами по себе могли играть роль центров кристаллизации образующейся в исходной матрице из R структуры низкотемпературной фазы B19´ , увеличивая величину упругого скачка в начале перехода. Рост затухания при этом мог происходить за счет увеличения числа легкоподвижных границ раздела различного происхождения (межфазных, двойниковых).

Заключение

Полученные в эксперименте результаты имеют как теоретическое, так и практическое значение. Теоретическое значение проведенных исследований заключается в изучении закономерностей изменения физических свойств никелида титана при действии предварительной деформации. Имеющиеся литературные данные носят весьма ограниченный характер [7], и сведения о влиянии предварительной деформации никелида титана в аустенитном состоянии на изменение упругих свойств сплава отсутствуют вообще.

Практическое значение результатов проведенных исследований заключается в возможности количественной оценки структурных изменений никелида титана неразрушающим ультразвуковым методом после термомеханической обработки (в данном случае, воздействия ударно-волнового нагружения).

Список литературы

1. Попов Н.Н., Севрюгина Н.Д., Севрюгин И.В. Эффект обратимой памяти в никелиде титана после динамического задания формы//Материалы XXXV семинара “Актуальные проблемы прочности” 15-18 сентября 1999г, Псков. 1999. Ч. 4.1. С. 79-84.
2. Минеев В.А., Погорелов В.П., Иванов А.Г. Установка для исследования поведения материалов и конструкций при динамическом нагружении // Физика горения и взрыва, Т. 14, № 3. С. 123-133.
3. Ермолов И.Н. Методики измерения затухания ультразвуковых волн // Дефектоскопия. 1995. № 7. С. 3-12.
4. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения: Стандарты. М., 1970. С. 55-61.
5. Хачин В.Н., Гюнтер В.Э., Чернов Д.Б. Два эффекта обратимого изменения формы в никелиде титана. // Физ. мет. и металловед. 1976. Т. 42, № 3. С. 658-661.
6. Хачин В.Н., Муслов С.А., Пушин В.Г., Чумляков Ю.Ч. Аномалии упругих свойств монокристаллов TiNi – TiFe. // ДАН СССР. 1987. Т. 295, № 3. С. 606-609.
7. Волков АЕ., Иночкина И.В. Влияние пластической деформации на характеристики памяти формы никелида титана. // Материалы XXXV семинара “Актуальные проблемы прочности” 15-18 сентября 1999г, Псков. 1999. Ч. 2. С. 619-623.