

## ЭФФЕКТЫ МАРТЕНСИТНОЙ НЕУПРУГОСТИ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА ПОСЛЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Беляев С.П., Волков А.Е., Иночкина И.В., Пантелеева Н.В.

*НИИ Математики и Механики СПбГУ  
198904, С.-Петербург, Библиотечная пл., 2  
spb@smel.math.spbu.ru*

В работе исследовали температурную кинетику деформирования и эффекты памяти формы в сплаве TiNi, подвергнутом предварительной пластической деформации. Установлено, что с нарастанием пластической деформации расширяются температурные интервалы мартенситных превращений; экспоненциально снижается величина эффекта пластичности превращения, а величина эффекта обратимой памяти формы увеличивается. Отжиг при 600 – 700 К восстанавливает додеформационные свойства сплава.

Неупругая деформация в сплавах с памятью формы обусловлена, главным образом, мартенситным превращением, сопровождающимся микросдвигами в превращенных областях кристалла. Наряду с этим при превращении реализуется и необратимая деформация, которую, в отличие от обратимой фазовой, будем называть пластической. Последняя обусловлена обычным дислокационным скольжением и поэтому имеет необратимый характер. Развитие пластической деформации при мартенситных переходах приводит к нестабильности свойств памяти формы при многократных превращениях, образованию микронесплошностей и, в итоге, к макроразрушению. Поэтому исследование и моделирование эффектов памяти формы в сплавах с учетом возможности реализации двух механизмов деформации является важной и актуальной задачей [1].

Не менее важным, однако, представляется изучение влияния предварительной пластической деформации на эффекты мартенситной неупругости в сплавах с памятью формы. Это связано с тем, что мартенситные переходы всегда происходят в реальных кристаллах, структура которых сформирована предварительными технологическими переделами и термомеханической обработкой, не говоря уже об исходном химическом составе материала. Дефектная структура, безусловно, оказывает влияние на кинетику мартенситных переходов и на способность сплавов к обратимому деформированию при фазовых превращениях. Это влияние, как следует из современных представлений, обусловлено, во-первых, близкодействующим взаимодействием движущихся межфазных и двойниковых границ с дефектами «леса» и, во-вторых, с формированием дальнедействующих полей напряжений, оказывающих ориентирующее действие на зарождающиеся и растущие кристаллы новой фазы.

Имеющиеся сведения об эффектах памяти формы в сплавах, подвергнутых различным предварительным термомеханическим воздействиям, весьма неполны и противоречивы [2,3]. Систематические исследования влияния пластической деформации на эффекты мартенситной неупругости начаты в работе [4]. Выбранная в [4] методика проведения экспериментов позволила исключить возможность стимуляции фазового канала пластичности в ходе предварительного деформирования и, тем самым, выделить необходимый фактор в «чистом» виде. Пластическую деформацию в [4] задавали растяжением, а эффекты памяти формы исследовали в режиме кручения.

Настоящая работа является продолжением исследований, выполненных в [4]. Основным отличием в постановке экспериментов явилось то, что пластическое деформирование производили в условиях кручения цилиндрических образцов с последующим изучением обратимых неупругих эффектов также при кручении.

Предварительное деформирование производили до разных степеней деформации  $\gamma_{\text{пл}}$  при температуре  $T = 600 \text{ K} > M_d$ . Материал и образцы были такими же, как и в [4]. После задания пластической деформации образцы нагружали постоянным крутящим моментом до напряжения  $\tau = 20 \text{ МПа}$  и охлаждали через интервал температур мартенситного перехода. При этом наблюдали накопление деформации в процессе превращения (пластичность превращения) и измеряли ее величину  $\gamma_{\text{пл}}$ . После охлаждения до комнатной температуры крутящий момент снимали и производили нагрев, сопровождающийся возвратом деформации (эффект памяти формы). Образец полностью возвращал деформацию  $\gamma_{\text{пл}}$ , после чего производили термоцикл в области температур фазового перехода, определяя величину обратимой памяти формы. Далее вновь следовал нагрев до  $600 \text{ K}$ , дополнительное пластическое деформирование и повторение перечисленных процедур. Фактически пластическую деформацию образца ступенчато наращивали, осуществляя промежуточные измерения параметров обратимой деформации. Температуры мартенситных превращений определяли по зависимостям «деформация – температура», полученным в цикле охлаждения под нагрузкой и нагреве без нагрузки.

Опыты показали, что вид температурных зависимостей деформации при мартенситных превращениях существенно изменяется после пластической деформации. Прежде всего это выражается в изменении температурных интервалов деформирования. Рис. 1. показывает, что температуры превращений в TiNi с нарастанием  $\gamma_{\text{пл}}$  изменяются по сложному закону, но имеется явно выраженная тенденция, во-первых, к увеличению интервала прямого и обратного переходов ( $M_n - M_k$ ,  $A_k - A_n$ ) и, во-вторых, к возрастанию ширины температурного гистерезиса ( $A_k - M_n$ ,  $A_n - M_k$ ). Очевидно, эти изменения могут быть связаны с повышением плотности дислокаций в кристалле. Как следствие, затрудняется зарождение новой фазы и увеличивается сила, тормозящая превращение, обусловленная взаимодействием движущихся межфазных границ с дислокациями.

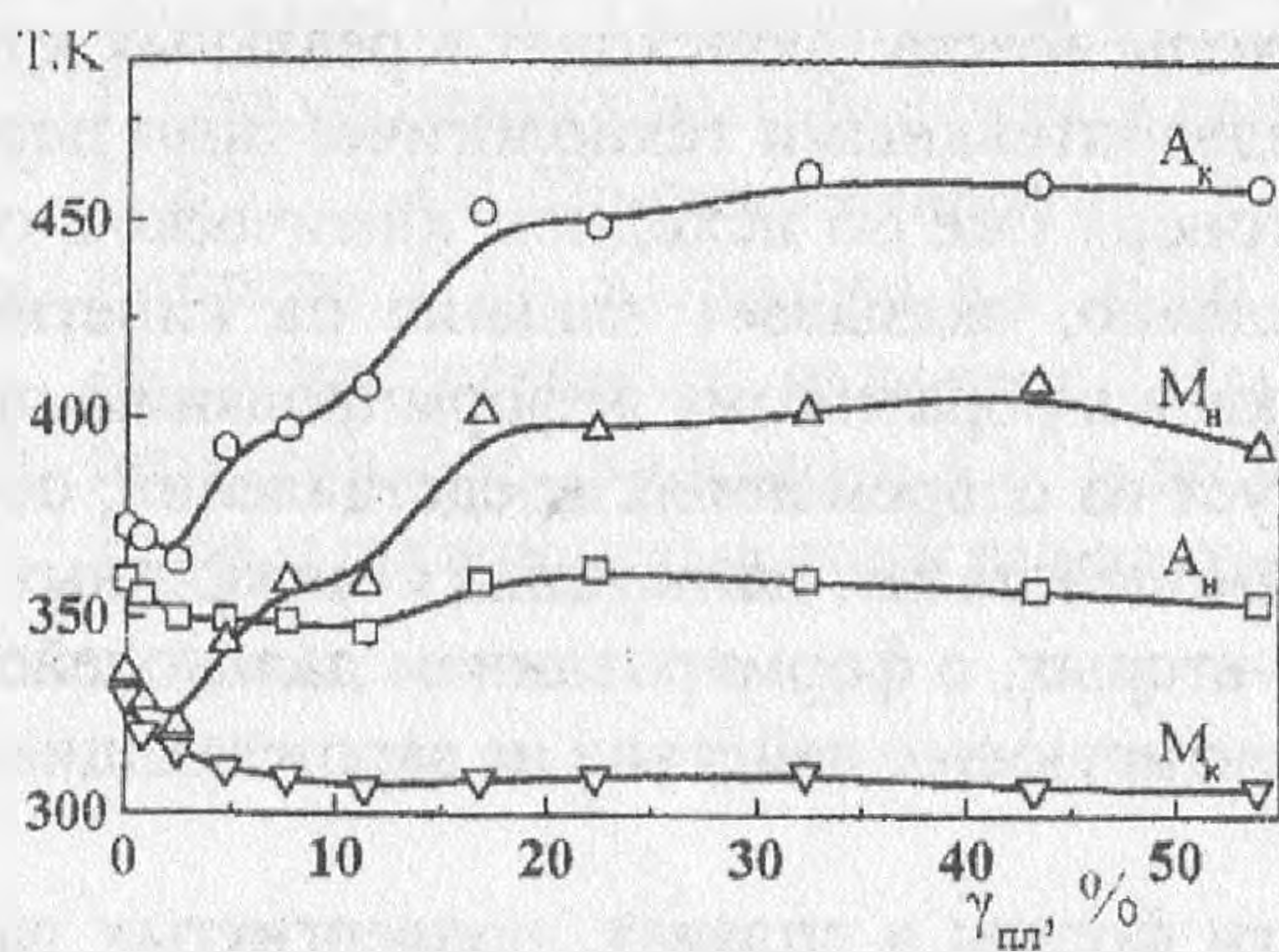


Рис. 1. Зависимости температур мартенситных превращений в TiNi от величины пластической деформации.

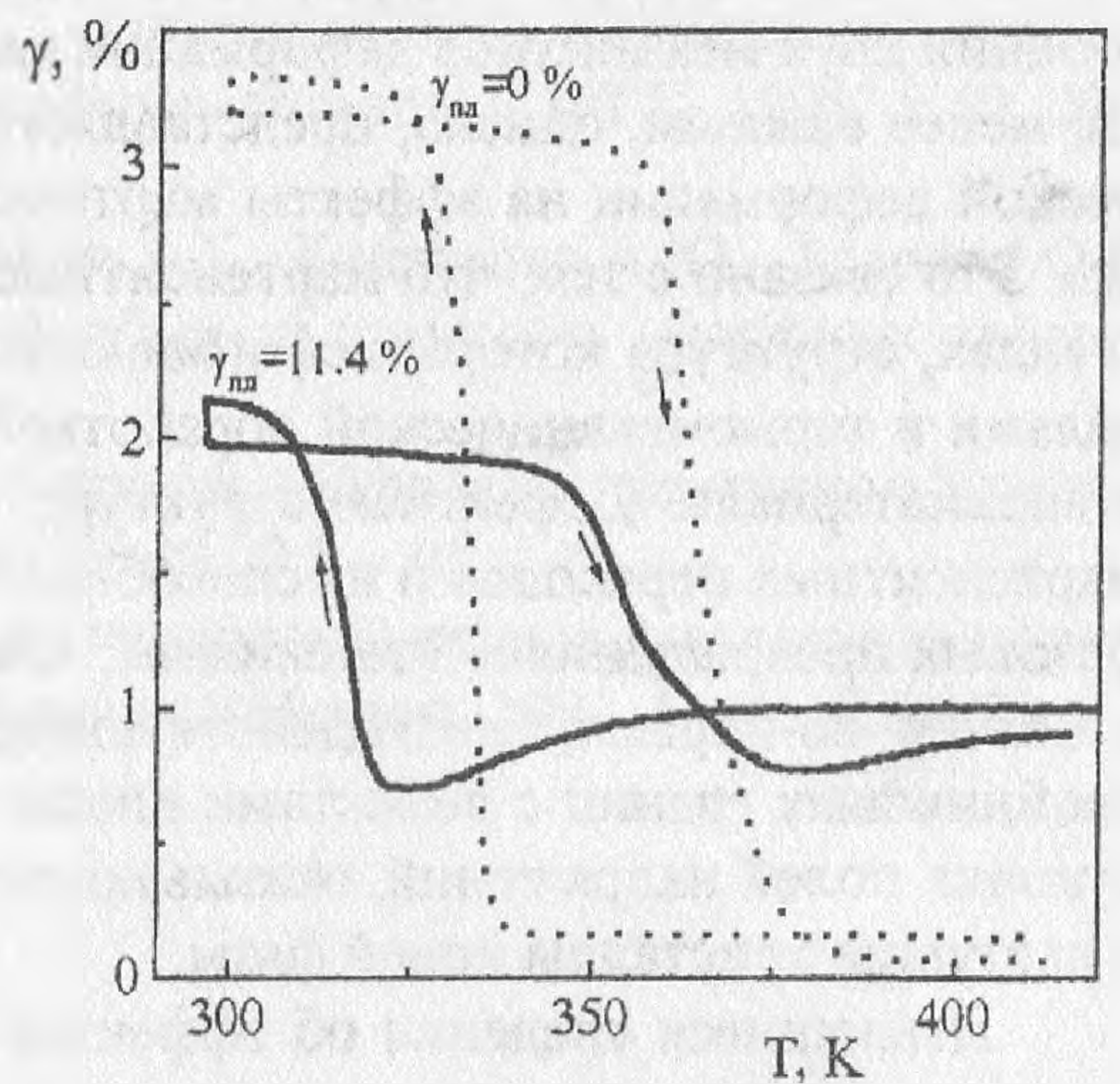


Рис. 2. Зависимость деформации образца из сплава TiNi от температуры при охлаждении под нагрузкой 20 МПа и нагревании в разгруженном состоянии. Величина предварительной пластической деформации показана у кривых.

На рис. 2 для сравнения показаны температурные зависимости деформации образца до пластического деформирования и после деформации на 11,4%. В последнем случае наблюдается немонотонное формоизменение материала при нагреве и охлажде-

нии. Кроме того, существенно снижается величина полной деформации, накапливаемой в ходе охлаждения и возвращаемой при нагревании. Такое снижение происходит наиболее интенсивно до значений  $\gamma_{пл} \approx 20\%$ . Как видно из рис.3, величина эффекта пластичности превращения экспоненциально снижается по мере нарастания  $\gamma_{пл}$ .

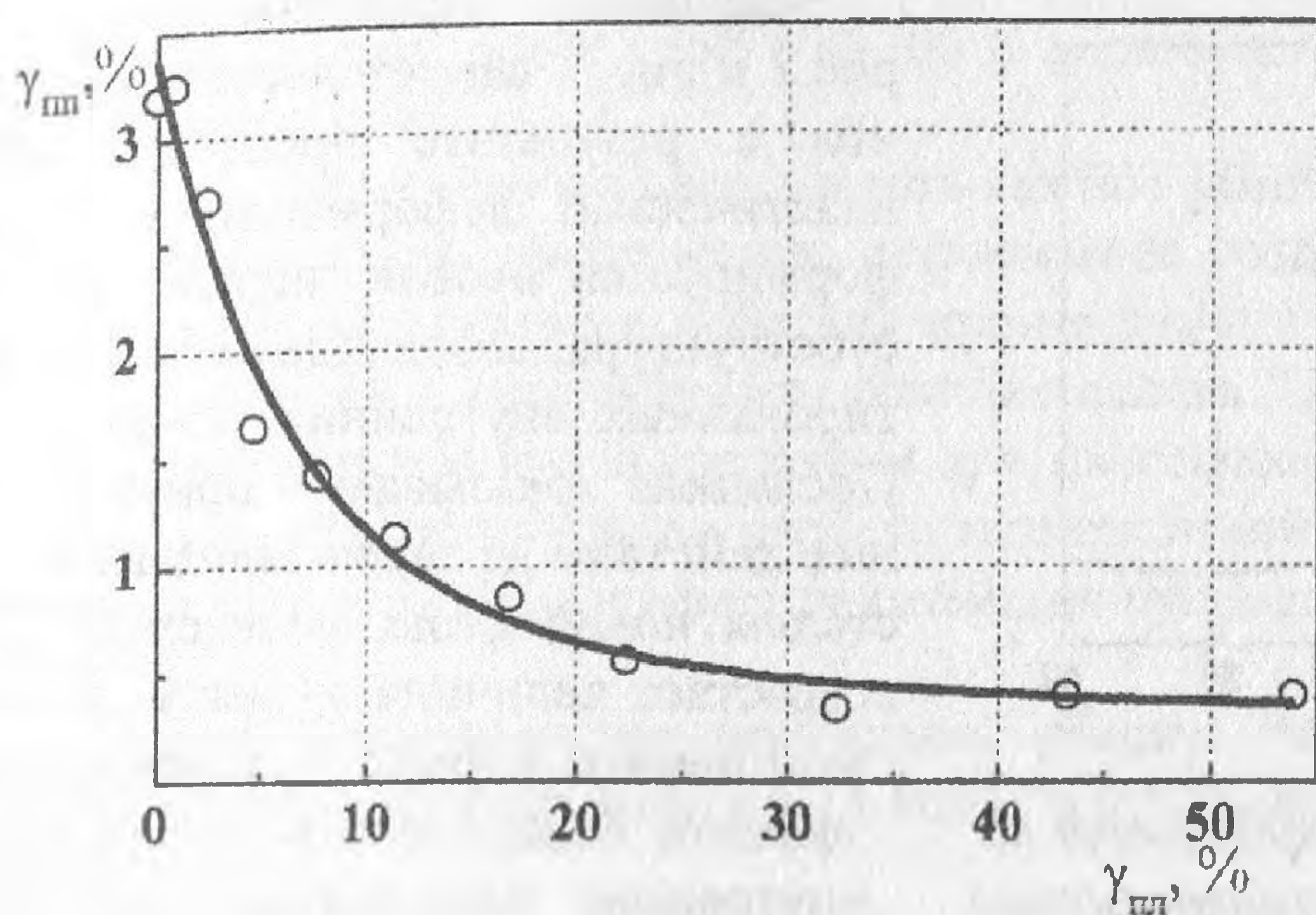


Рис.3. Влияние пластической деформации на величину эффекта пластичности превращения.

Не менее существенное действие пластическая деформация оказывает и на способность сплава TiNi самопроизвольно деформироваться при теплообменах, т.е. на эффект обратимой памяти формы. При анализе этого явления необходимо учитывать, что охлаждение сплава под нагрузкой стимулирует возникновение обратной памяти формы мартенситного типа, а деформирование в аустенитном состоянии приводит к формированию аустенитного типа обратимой па-

мяти формы [5]. Поэтому по мере пластического деформирования происходит переход от одного типа обратимой памяти к другому, как показано на рис.4. Эти два эффекта связаны с различным направлением закручивания образца, и им можно условно приписать разные знаки.

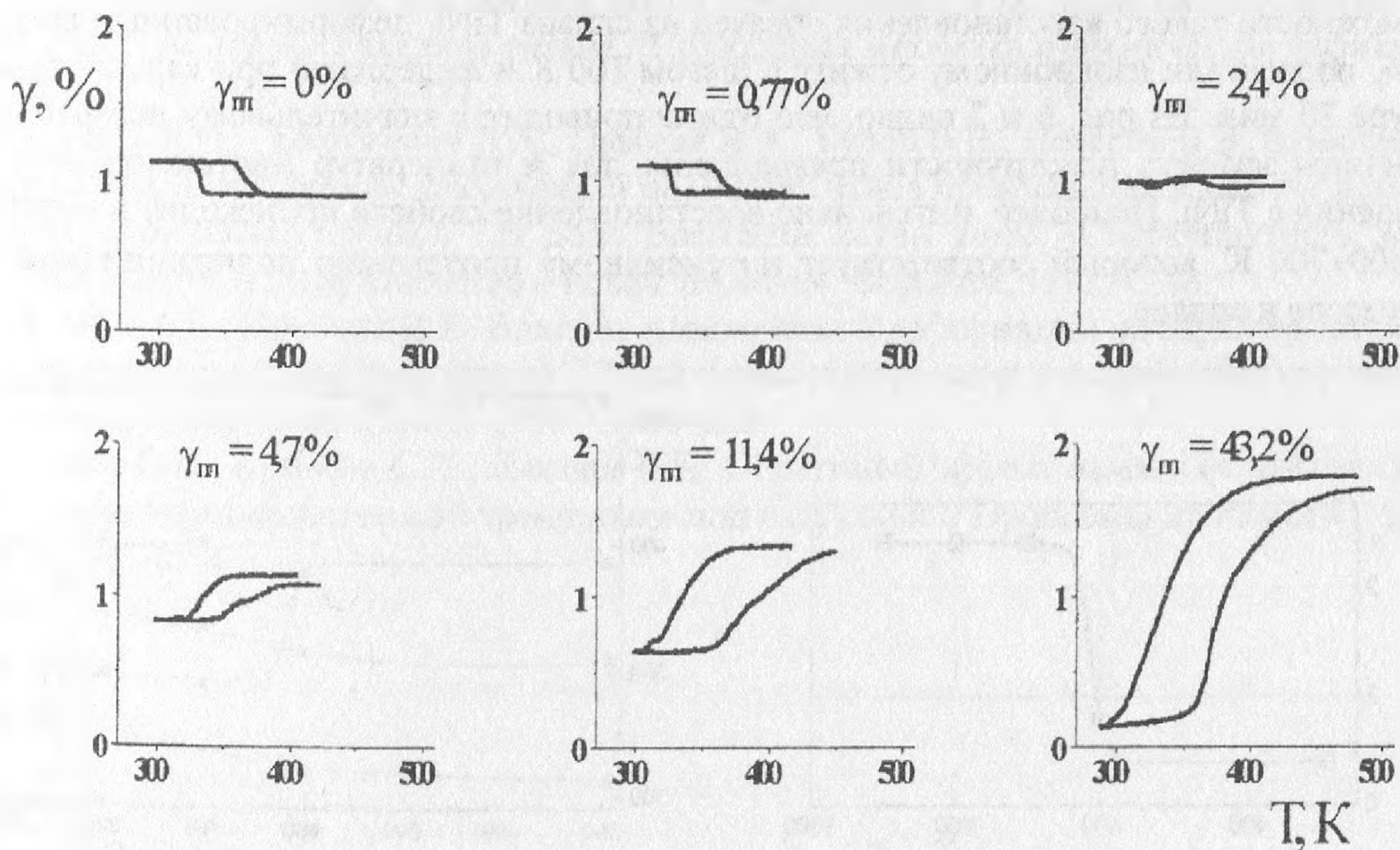


Рис.4. Изменение вида температурных зависимостей деформации при реализации обратимой памяти формы по мере пластического деформирования сплава TiNi.

Если эффекту мартенситной разновидности приписать знак «+», а аустенитной — знак «-», то обобщенную картину влияния пластической деформации на величину эффекта обратимой памяти формы можно изобразить так, как показано на рис.5. По абсолютной величине значение обратимой деформации  $\gamma_{\text{опф}}$  нарастает с увеличением  $\gamma_{\text{пл}}$ , и после деформирования на 54 % образец приобретает способность самопроизвольно закручиваться при термоциклировании на 1,7%.

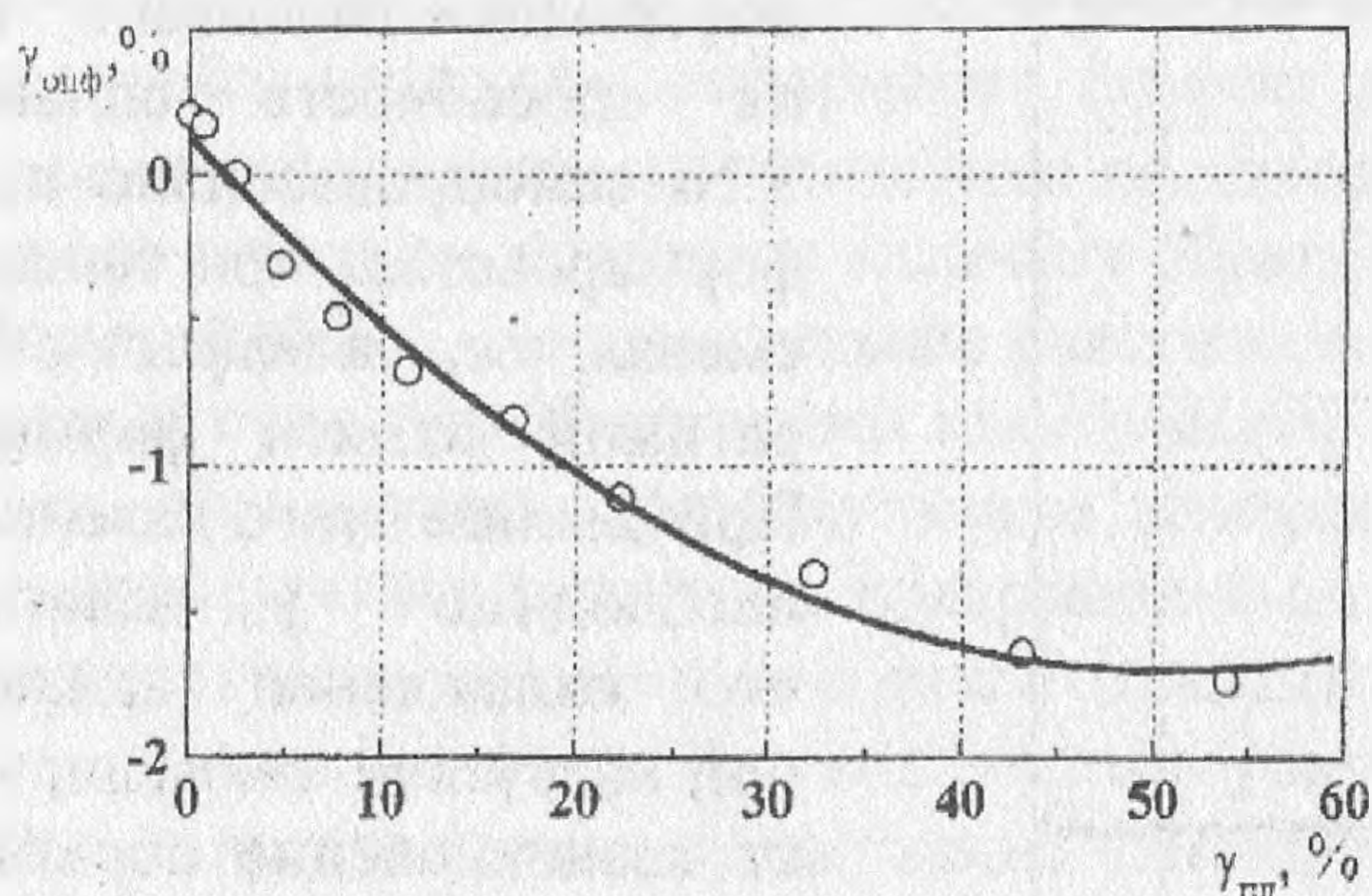


Рис.5. Влияние пластической деформации на величину эффекта обратимой памяти формы.

приводит к немонотонному формоизменению при охлаждении и нагреве образца (рис.2).

Известно, что дефектная структура деформированных металлов может быть в значительной степени изменена при нагреве до температур, соответствующих началу процессов полигонизации и рекристаллизации. При этом дислокационная субструктура перестраивается, плотность дислокаций снижается, и механические свойства металла восстанавливаются до значений, которые имели место до деформации. Для изучения возможности такого восстановления образец из сплава TiNi, деформированный до  $\gamma_{\text{пл}} = 54\%$ , подвергали изохронному отжигу с шагом 100 К и выдержкой при каждой температуре 20 мин. Из рис. 6 и 7 видно, что отжиг приводит к значительному возврату как величины эффекта пластичности превращения, так и температур мартенситного превращения в TiNi. Наиболее интенсивно восстановление свойств происходит в интервале 600÷700 К, который соответствует интенсивному протеканию полигонизационных процессов в сплаве.

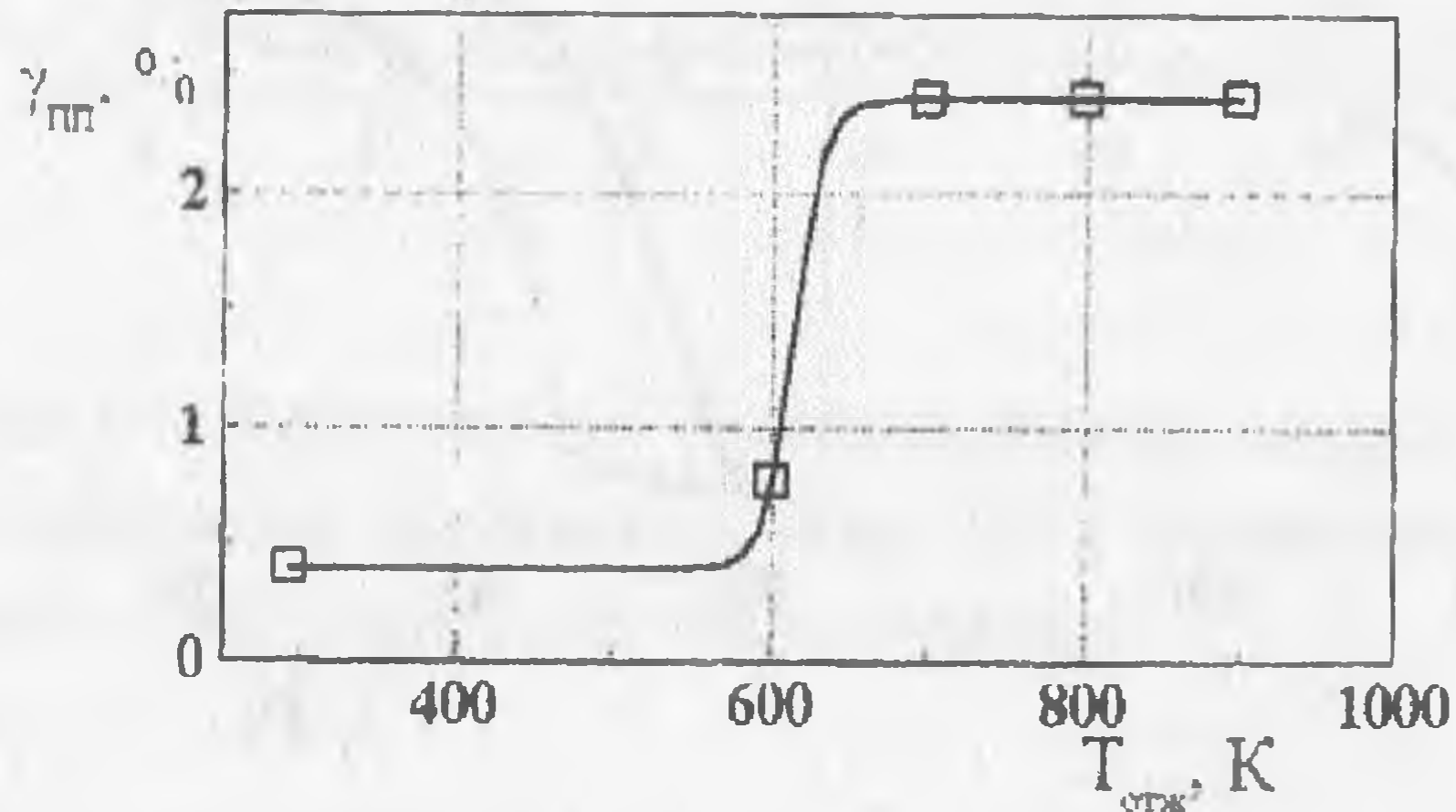


Рис.6. Изменение величины эффекта пластичности превращения при изохронном отжиге образца, предварительно деформированного до деформации  $\gamma_{\text{пл}} = 54\%$ .

Данные, представленные на рис.2 и рис.5, свидетельствуют о том, что в результате предварительной пластической деформации в сплаве формируется особая дислокационная субструктура, создающая поля ориентированных внутренних напряжений. Последние оказывают ориентирующее действие на зарождающиеся кристаллы новой фазы, вследствие чего возрастает величина эффекта обратимой памяти формы. При реализации эффекта пластичности превращения внутренние напряжения «конкурируют» с внешней нагрузкой, что

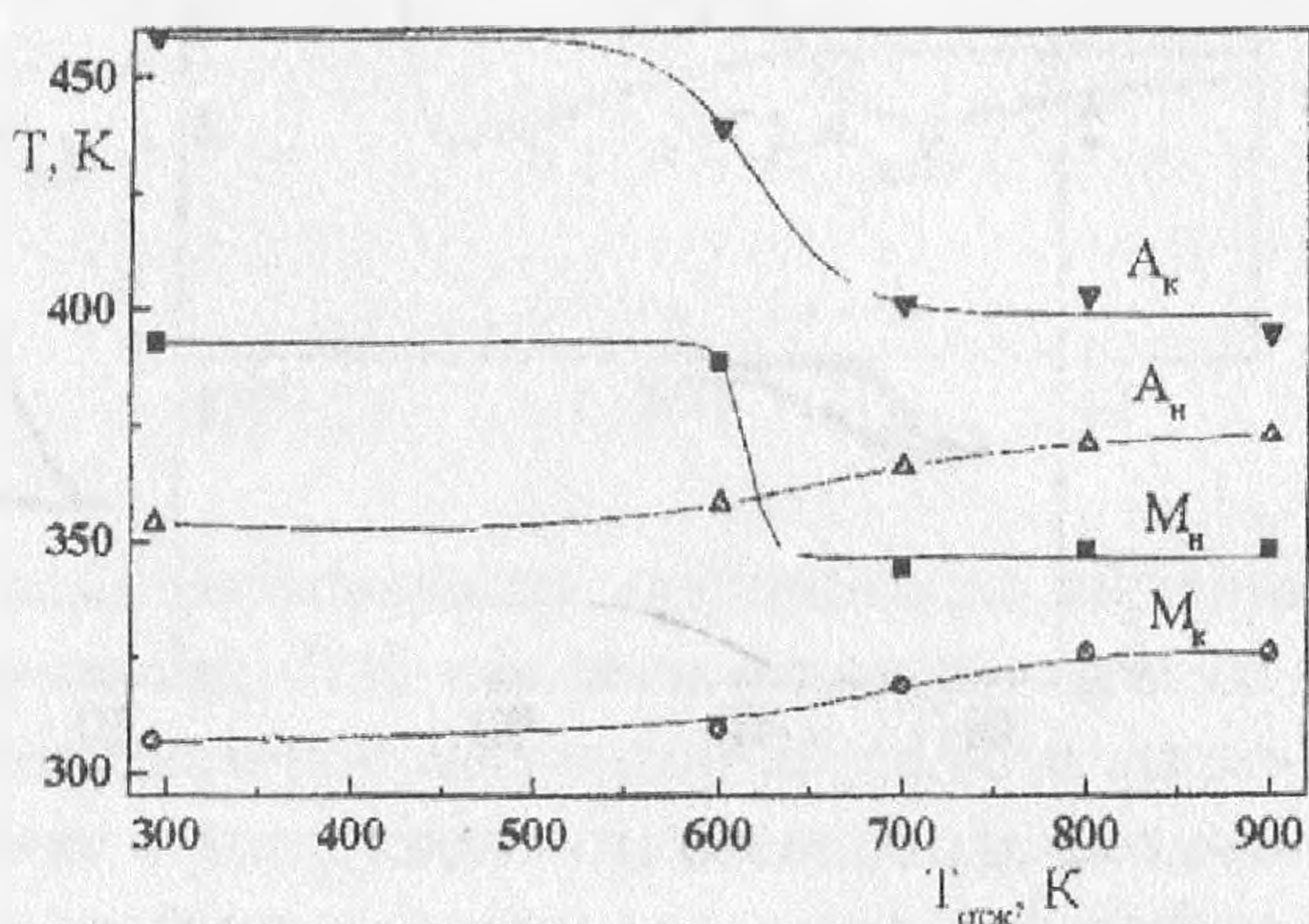


Рис.7. Восстановление характерных температур превращений в TiNi при отжиге.

Таким образом, выполненные исследования показали, что пластическая деформация кручением сильно изменяет температурную кинетику деформации при мартенситных переходах и способность сплава TiNi к обратимому неупругому деформированию. С ростом пластической деформации величины эффектов пластичности превращения и памяти формы экспоненциально снижаются; увеличиваются температурные интервалы прямого и обратного превращений и гистерезис; величина эффекта обратимой памяти формы повышается. Отжиг при 600-700 К вызывает частичное восстановление исходных свойств сплава.

В заключение необходимо сделать важное замечание. Сравнение результатов настоящей работы, где пластическую деформацию создавали путем кручения, и работы [4], в которой аналогичные действия производили в режиме растяжения, показывает сильные различия в механическом отклике сплава TiNi на эти воздействия. Другими словами, вид напряженного состояния при пластическом деформировании играет важнейшую роль в формировании свойств мартенситной неупругости. Подробный анализ этого феномена составит предмет дальнейших публикаций.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 99-01-00987, грантов поддержки ведущих научных школ 00-15-96027 и 00-15-96023, гранта INTAS 97-1140.*

#### Список литературы

1. Беляев С.П., Волков А.Е., Евард М.Е. Моделирование микропластических явлений в сплавах с памятью формы типа никелида титана // Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естественные и техн. науки. 1998. Т.3. Вып. 3. С. 306-309.
2. Гюнтер В.Э., Малеткина Т.Ю., Клопотов А.А. Влияние деформации и внешней нагрузки на характеристики мартенситных превращений и эффекты памяти формы в сплавах на основе никелида титана // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т.39, № 2. С. 175-181.
3. Паскаль Ю.И., Монасевич Л.А., Павская В.А., Буров В.Н., Неверов В.В. Влияние больших пластических деформаций на мартенситное превращение и эффект памяти формы никелида титана // Тез. докл. Всесоюзн. научн. конф. «Сверхупругость, эффект памяти и их применение в новой технике». Воронеж, 1982. С.78.
4. Волков А.Е., Иночина И.В. Влияние пластической деформации на характеристики памяти формы никелида титана // Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов. Псков. 1999. С.619-623.
5. Беляев С.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А. Обратимый эффект памяти формы как результат термоциклической тренировки под нагрузкой // Проблемы прочности. 1988, № 7, С.50-54.