

Министерство образования науки Российской Федерации

Тульский государственный университет

Кафедра «Физики металлов и материаловедения»

**Выпускная квалификационная работа**

**на тему:**

**«Влияние предварительной деформации на эффект  
памяти формы в интерметаллиде TiNi»**

Подготовил: студент гр. 622611 Барынин В. В.

Руководитель: проф., д. т. н. Маркова Г. В.

# Сокращения

ЭПФ	– эффект памяти формы;
ЭСУ	– эффект сверхупругости;
ОМП	– обратное мартенситное превращение;
ПМП	– прямое мартенситное превращение
$A'_H$	– температура начала ОМП;
$A'_K$	– температура конца ОМП;
$M'_H$	– температура начала ПМП;
$M'_K$	– температура конца ПМП;
$\gamma_{\text{пред}}$	– предварительная деформация;
$\gamma_{\text{восст}}$	– восстановленная деформация;
$\gamma_{\text{упр}}$	– упругая деформация;
$\gamma_{\text{ндв}}$	– недовосстановленная деформация;
$\gamma_{\text{ост}}$	– остаточная деформация;
$\gamma_{\text{обр.восст}}$	– обратно восстановленная деформация.

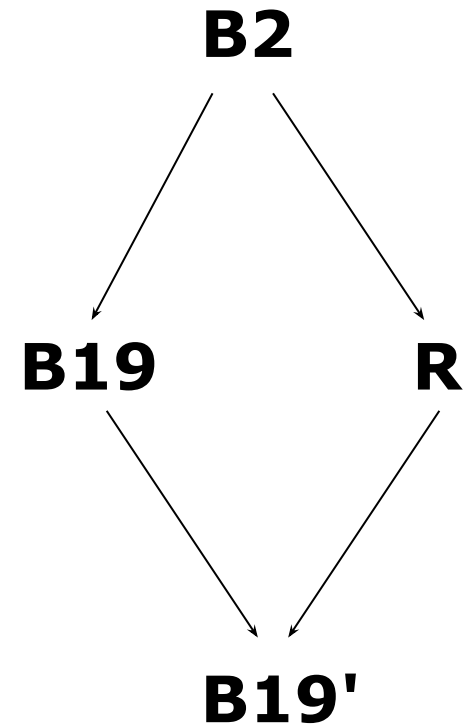
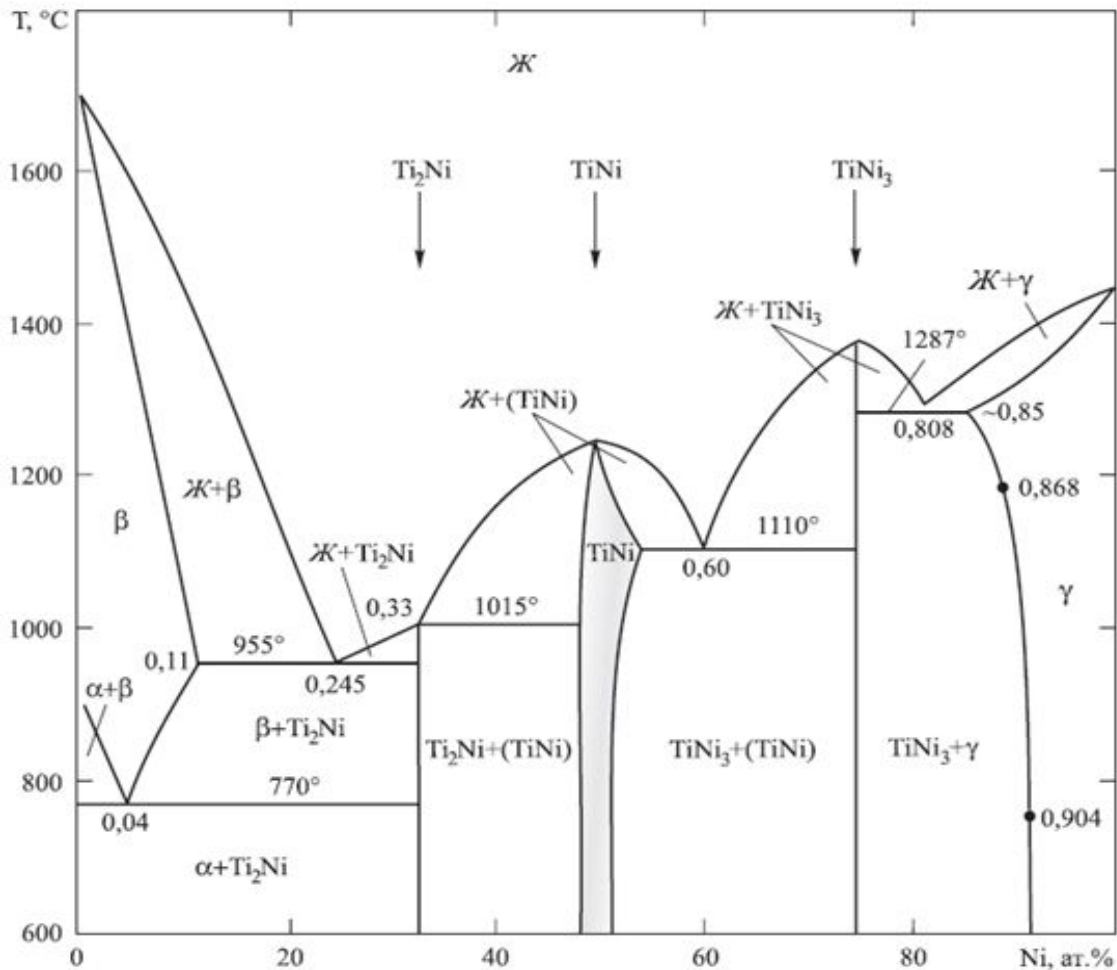
# Цель работы:

На основе анализа литературных данных и собственных исследований установить влияние предварительной (наведенной) деформации на характеристики восстановления формы интерметаллида TiNi.

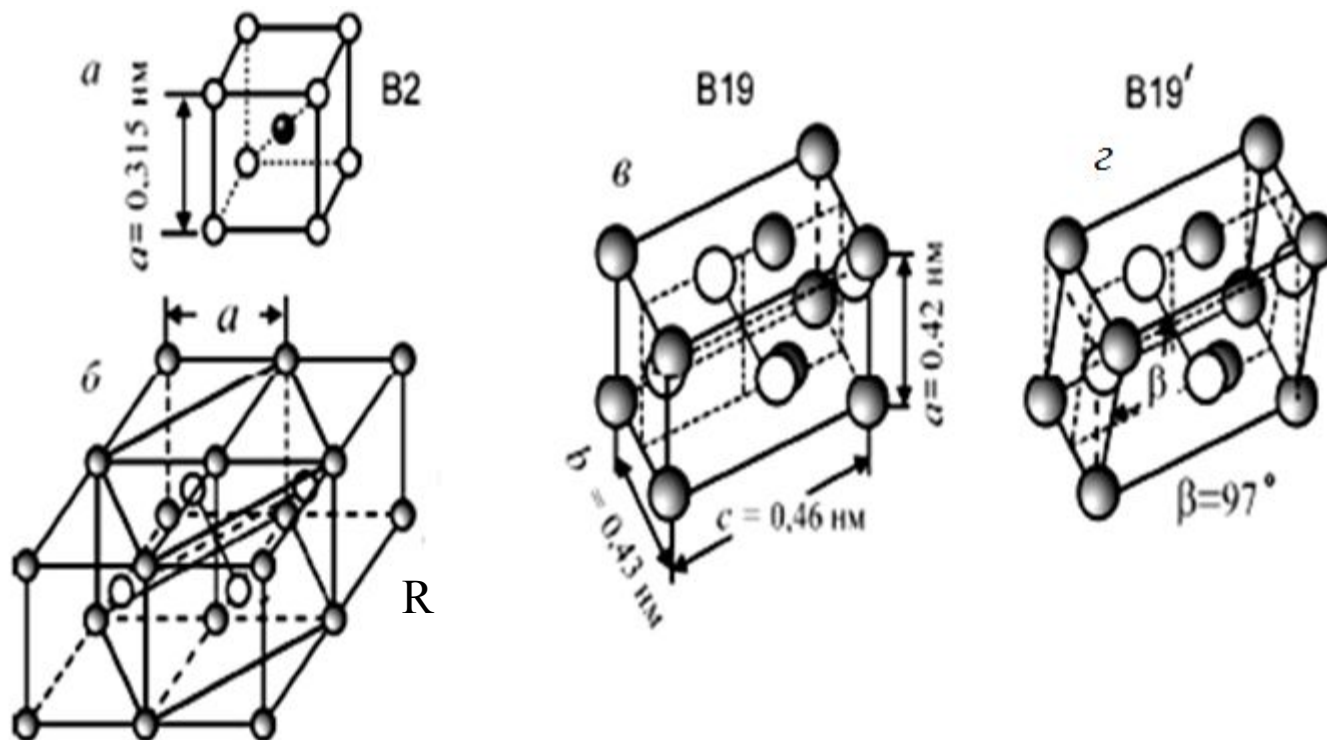
# Задачи:

1. Познакомиться с современной литературой, дающей представление о физической основе развития ЭПФ в интерметаллиде TiNi.
2. Овладеть методом измерения ЭПФ при деформации кручением на установке кафедры ФММ.
3. Получить данные о формоизменении образцов TiNi при нагреве и охлаждении после предварительной деформации  $\gamma_{\text{пред}} = 1 \dots 7 \%$ .
4. На основе полученных экспериментальных результатов рассчитать характеристики ЭПФ и установить их зависимость от степени предварительной деформации ( $\gamma_{\text{пред}}$ ).

# Диаграмма состояния и фазовые превращения системы Ti-Ni

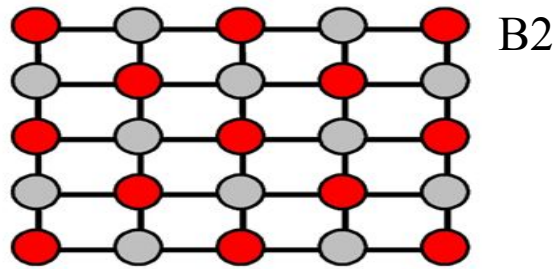


# Элементарные ячейки фаз интерметаллида TiNi



# Эффект памяти формы

Аустенит

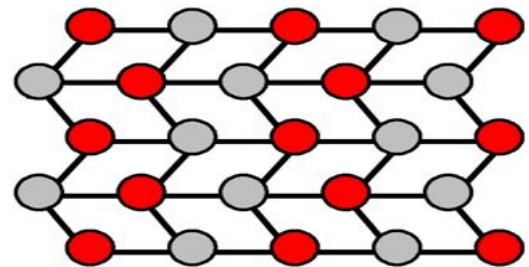
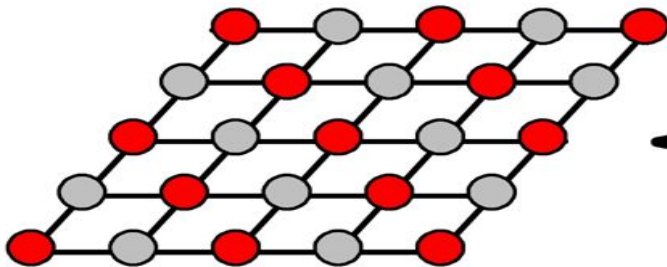


Нагрев

Охлаждение

B19'

B19'



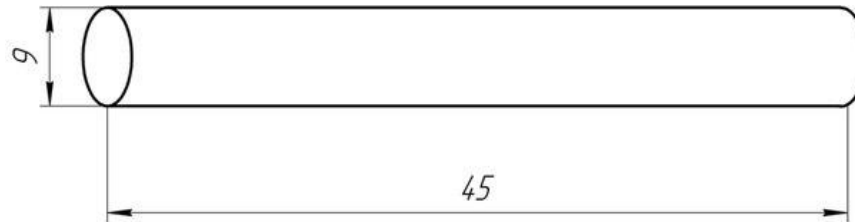
Деформация

Мартенсит

Мартенсит

# Материалы и методы исследования

Сплав Ti –50,6 % (ат.) Ni использовали для исследования в виде проволоки.



## Термообработка

Отжиг  $T_{\text{отж}} = 650 \text{ } ^\circ\text{C}$ , выдержка в течение 1 часа, охлаждение с печью.

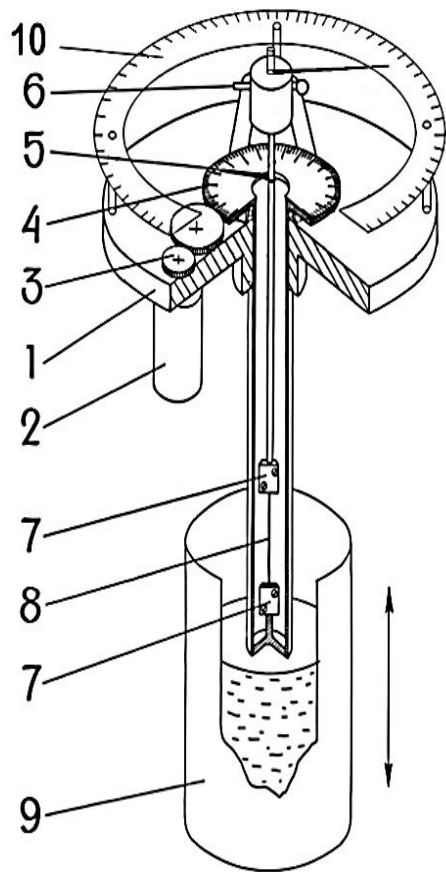
## Травление

Произвели травление в смеси кислот:  $1\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O}_2$ .

## Исходное состояние до деформации

A +M

# Устройство для измерения параметров восстановления формы



Формула для расчета угла закручивания:

$$\varphi = \frac{180 \times l_{\text{раб}} \times \gamma_{\text{пред}}}{\pi \times r \times 100 \%}$$

Формула для расчета деформации образца кручением:

$$\gamma = \frac{\pi \times r \times \varphi}{180 \times l_{\text{раб}}} \times 100 \%$$

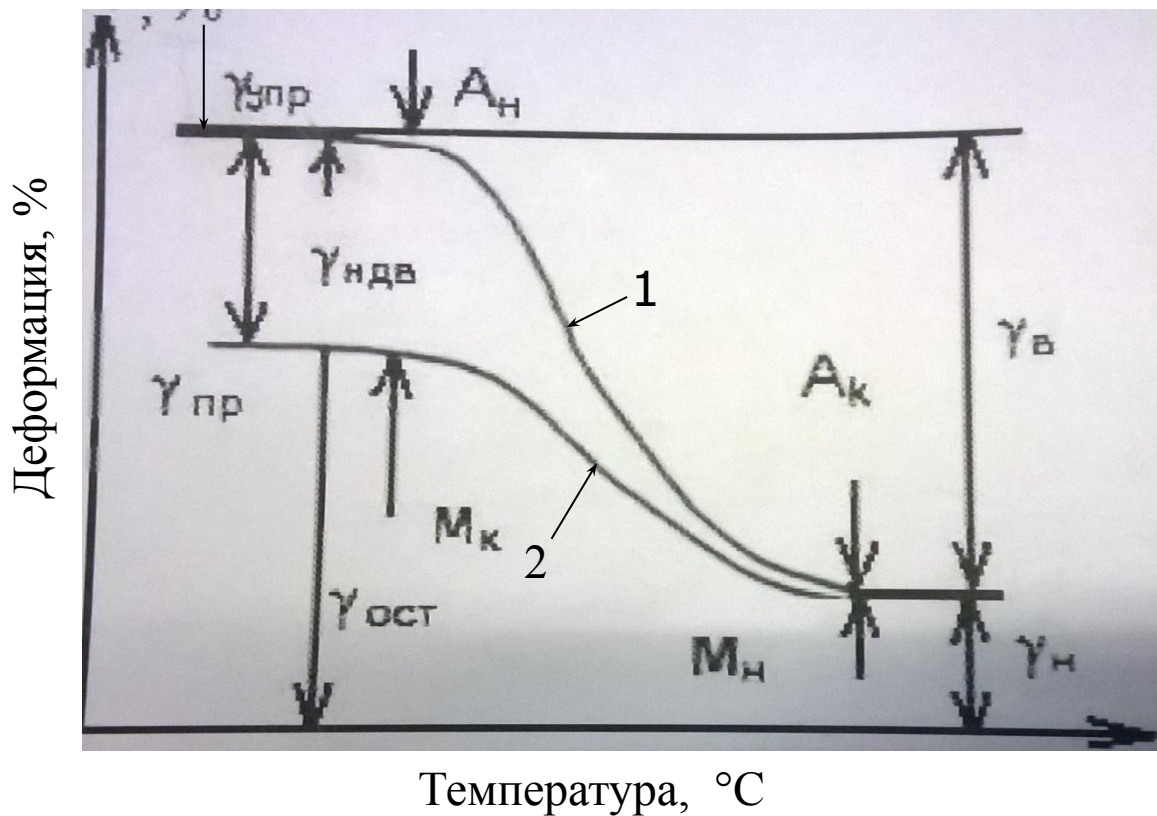
Условия измерения:

$$v_{\text{нагр}} = v_{\text{охл}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{мин}$$

$$\gamma_{\text{пред}} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \%$$



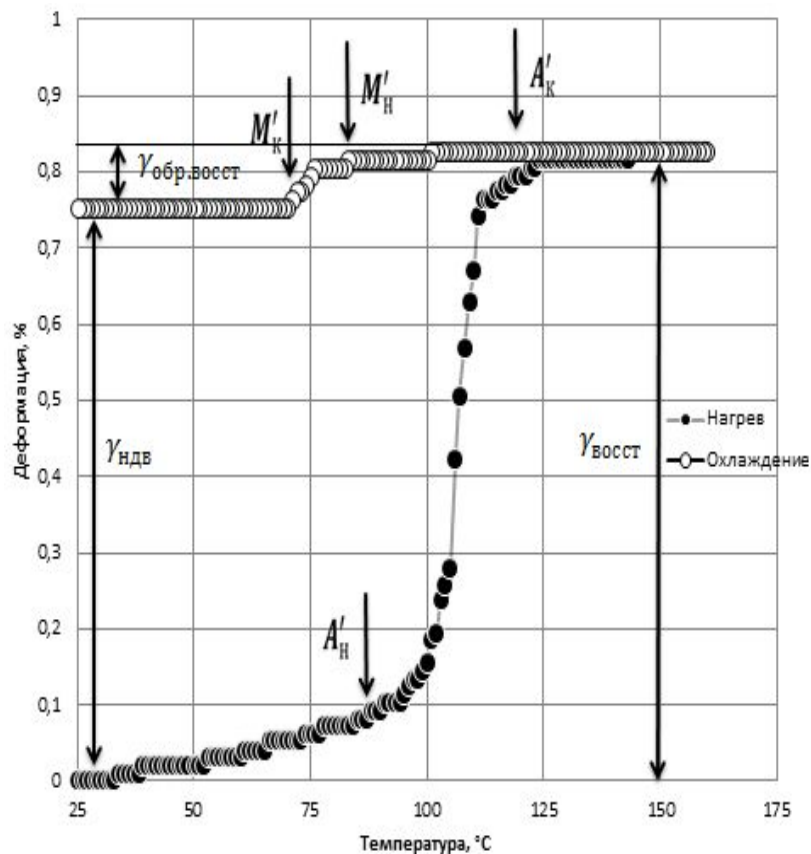
# Схема определения характеристик формовосстановления



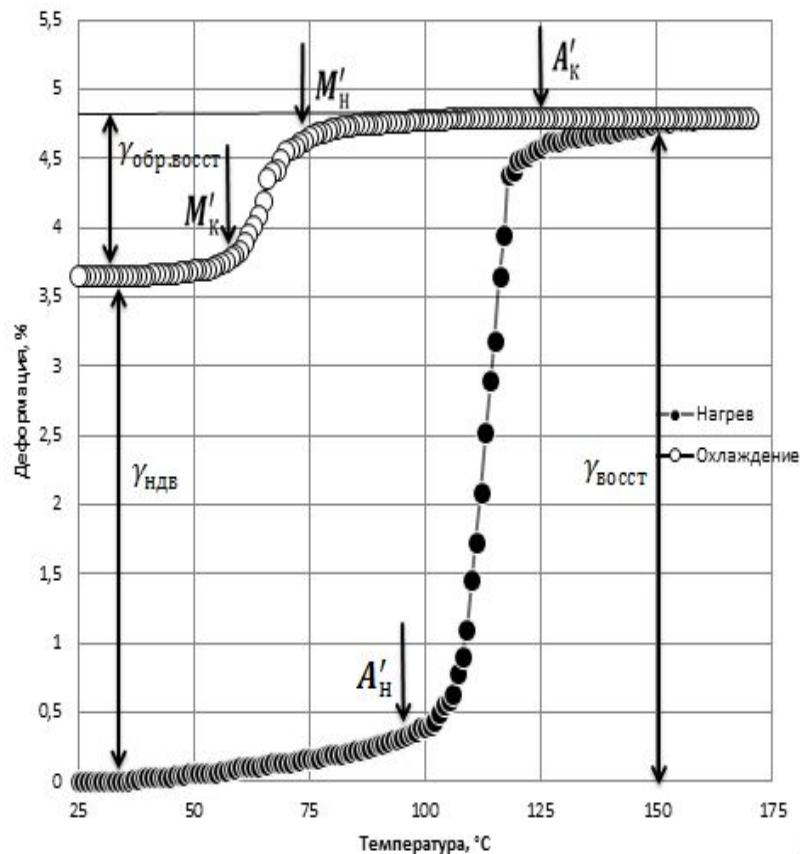
1 – кривая формовосстановления при нагреве.

2 – кривая формовосстановления при охлаждении.

# Зависимости деформации от температуры при нагреве и охлаждении



$$\gamma_{\text{пред}} = 2\%$$

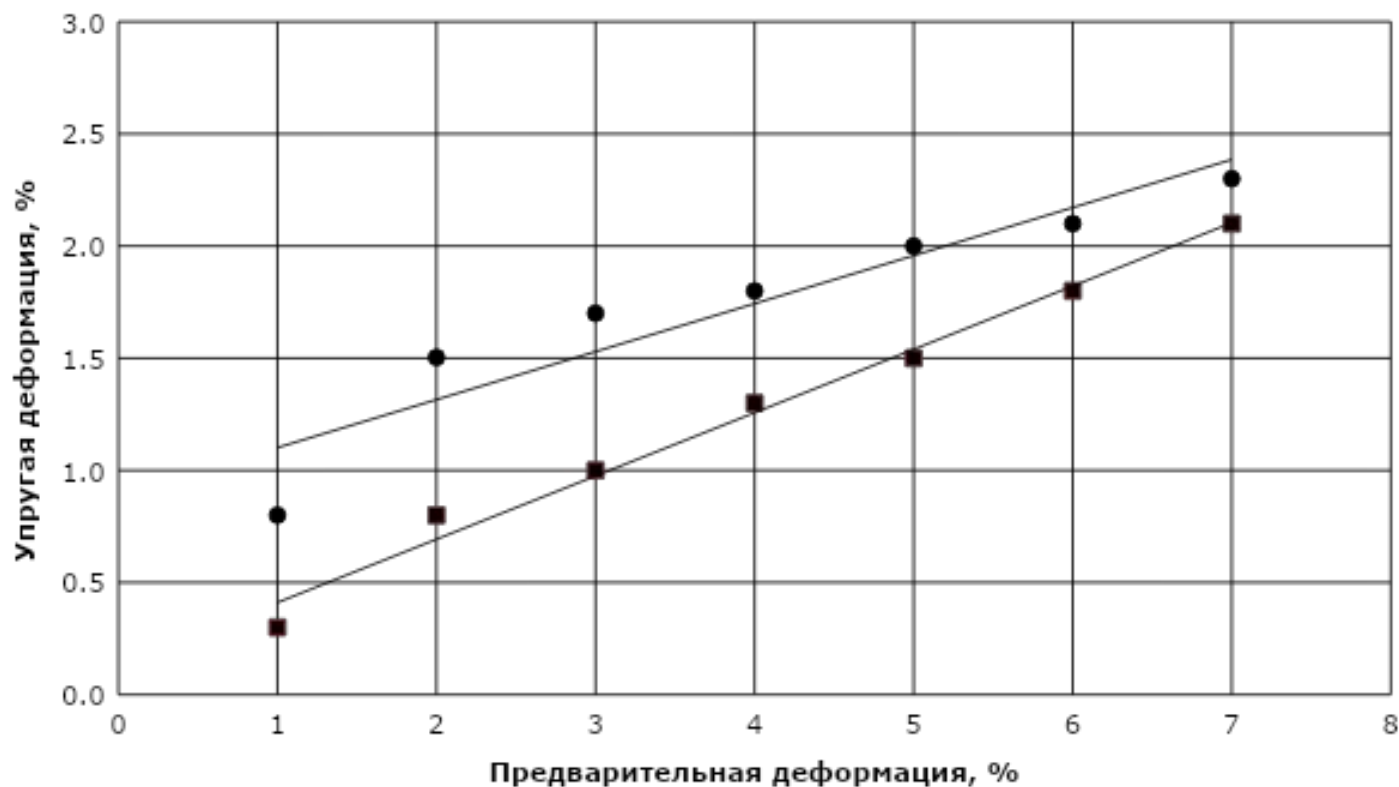


$$\gamma_{\text{пред}} = 6\%$$

# Характеристики формовосстановления и интервалы критических температур

Пред. ( $\gamma_{\text{пред}}$ ), %	Восст. ( $\gamma_{\text{восст}}$ ), %	Упругая ( $\gamma_{\text{упр}}$ ), %	Ндв. ( $\gamma_{\text{ндв}}$ ), %	Ост. ( $\gamma_{\text{ост}}$ ), %	Обр.восст. ( $\gamma_{\text{обр.восст}}$ ), %	Интервалы критических точек, °С	
1	0,2	0,8	0,1	0,2	0,1	$A'_k - A'_n$	120 - 93
						$M'_n - M'_k$	105 - 65
2	0,8	1,5	0,8	0,5	0,1	$A'_k - A'_n$	120 - 85
						$M'_n - M'_k$	80 - 68
3	1,5	1,7	1,3	1,3	0,2	$A'_k - A'_n$	125 - 90
						$M'_n - M'_k$	91 - 70
4	2,6	1,8	2,1	2,2	0,5	$A'_k - A'_n$	123 - 90
						$M'_n - M'_k$	72 - 66
5	3,3	2	2,6	3,0	0,7	$A'_k - A'_n$	135-100
						$M'_n - M'_k$	85 - 65
6	4,8	2,1	3,7	3,9	1,1	$A'_k - A'_n$	125-95
						$M'_n - M'_k$	72 - 58
7	4,0	2,3	3,5	4,7	0,5	$A'_k - A'_n$	135-100
						$M'_n - M'_k$	84 - 68

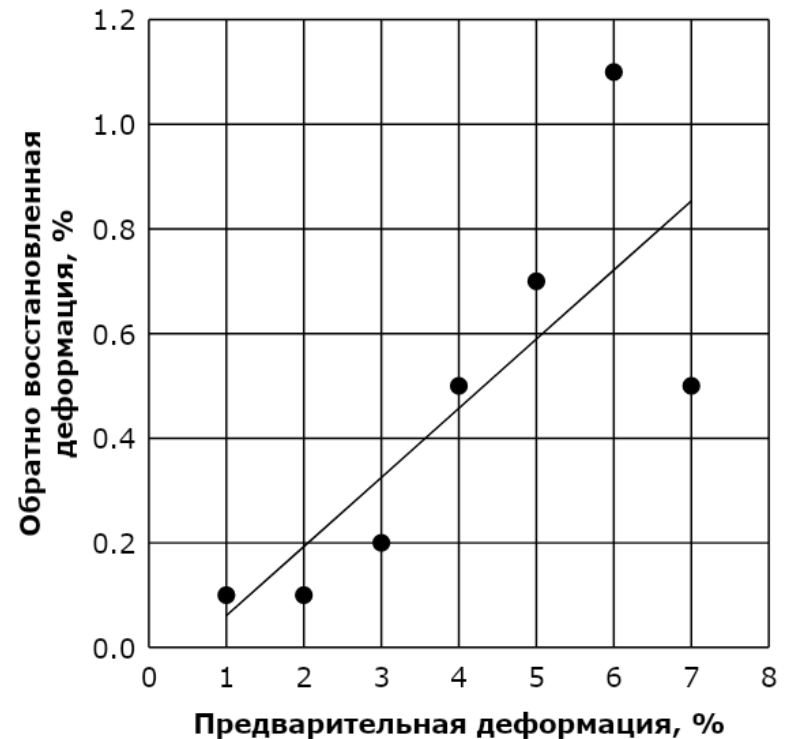
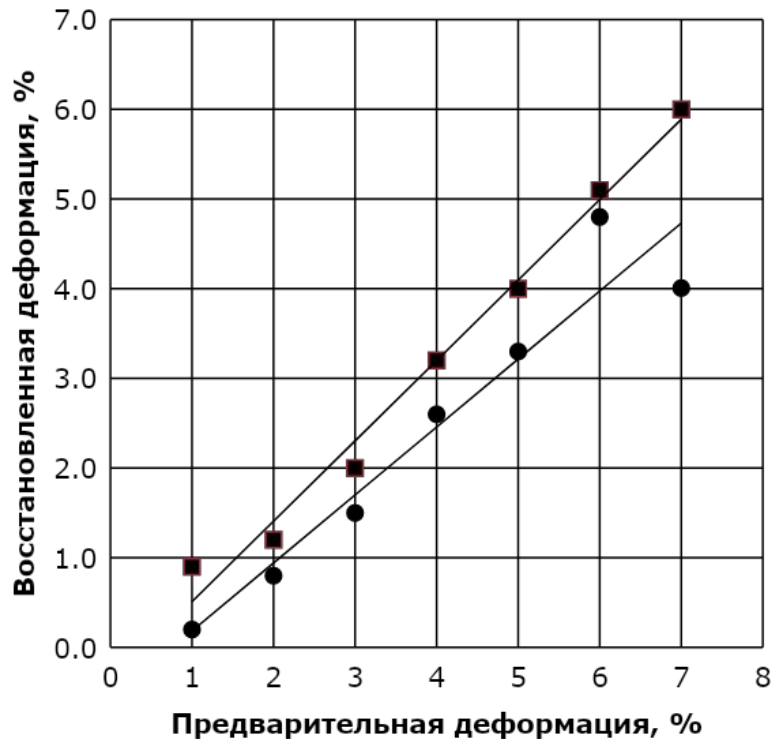
# График зависимости упругой деформации ( $\gamma_{\text{упр}}$ ) от предварительной деформации ( $\gamma_{\text{пред}}$ )



■ - литературные данные (А. А. Ильин и др.)

● - экспериментальные данные

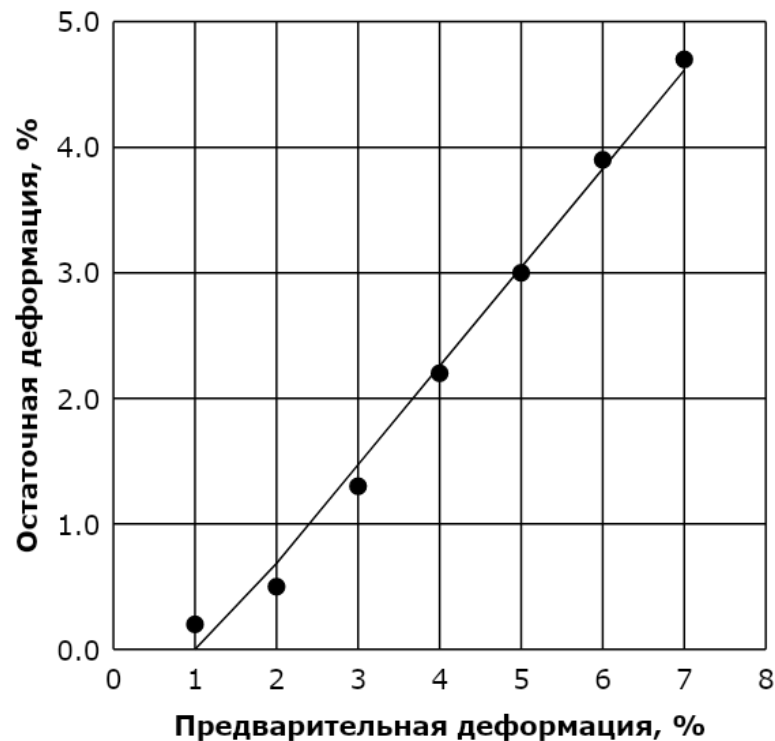
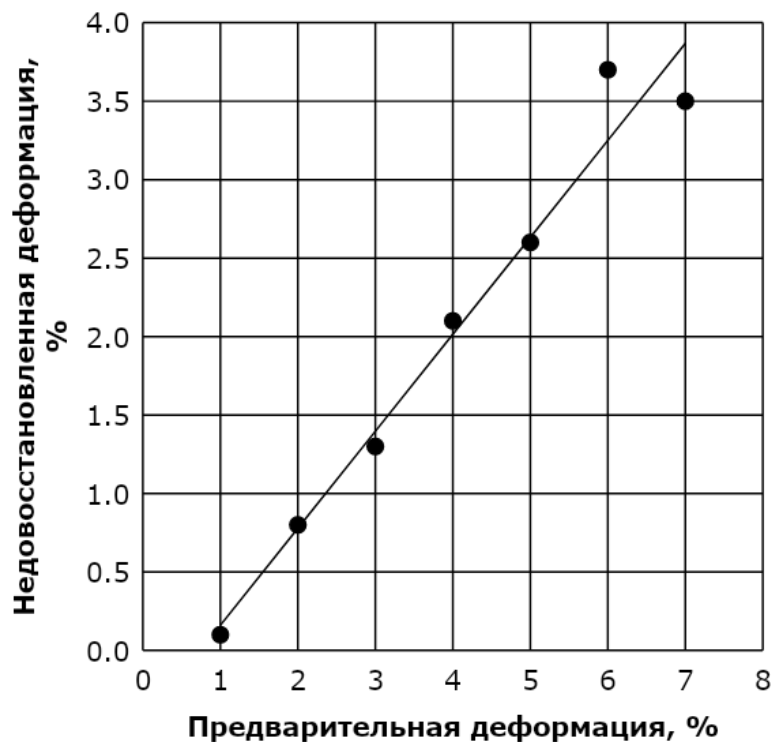
# Графики зависимостей ( $\gamma_{\text{восст}}$ ) и ( $\gamma_{\text{обр.восст}}$ ) деформаций от предварительной деформации ( $\gamma_{\text{пред}}$ )



■ - литературные данные (А. А. Ильин и др.)

● - экспериментальные данные

# Графики зависимостей ( $\gamma_{\text{ндв}}$ ) и ( $\gamma_{\text{ост}}$ ) деформаций от предварительной деформации ( $\gamma_{\text{пред}}$ )



# Выводы:

1. В работе были проанализированы данные литературных источников за последние десять лет отражающие состояние исследований в области ЭПФ. В работе показано, что наличие ТМП является необходимым условием для полного восстановления формы при реализации ЭПФ. Подробно рассмотрены виды ПФ, а также свойства и структура интерметаллида TiNi.

2. Показано, что исследованный сплав демонстрирует формовосстановление как при нагреве – в процессе ОМП, так и при охлаждении – в ходе ПМП. Двухстороннее формовосстановление обусловлено двухфазным исходным состоянием (А+М).

3. Получены зависимости характеристик формовосстановления – упругой деформации, восстановленной, остаточной, недовосстановленной и обратно восстановленной деформации от величины предварительной деформации. Установлено, что сплав TiNi проявляет сверхупругие свойства – упругая деформация возрастает до 2,3% при увеличении ( $\gamma_{\text{пред}}$ ) до 7 %. Величина восстановленной при нагреве деформации увеличивается по линейному закону до 4,8 %, что совпадает с данными, приведенными в литературе. Рост ( $\gamma_{\text{пред}}$ ) приводит к повышению обратно восстановленной деформации ( $\gamma_{\text{обр.восст}}$ ) при охлаждении в ходе ПМП.