

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. |

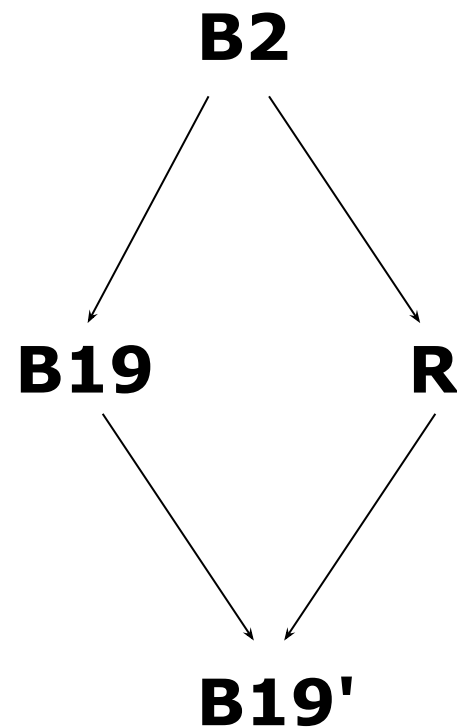
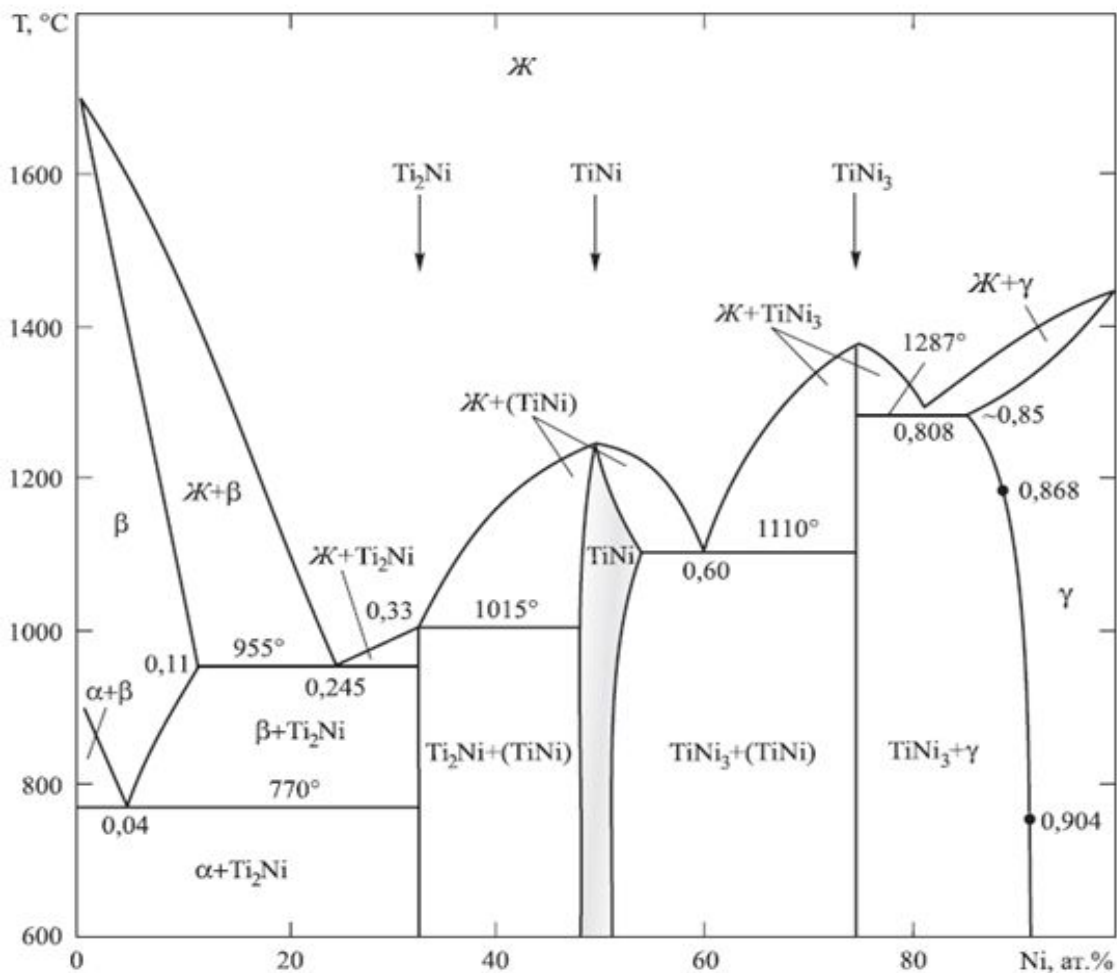
# Цель работы:

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

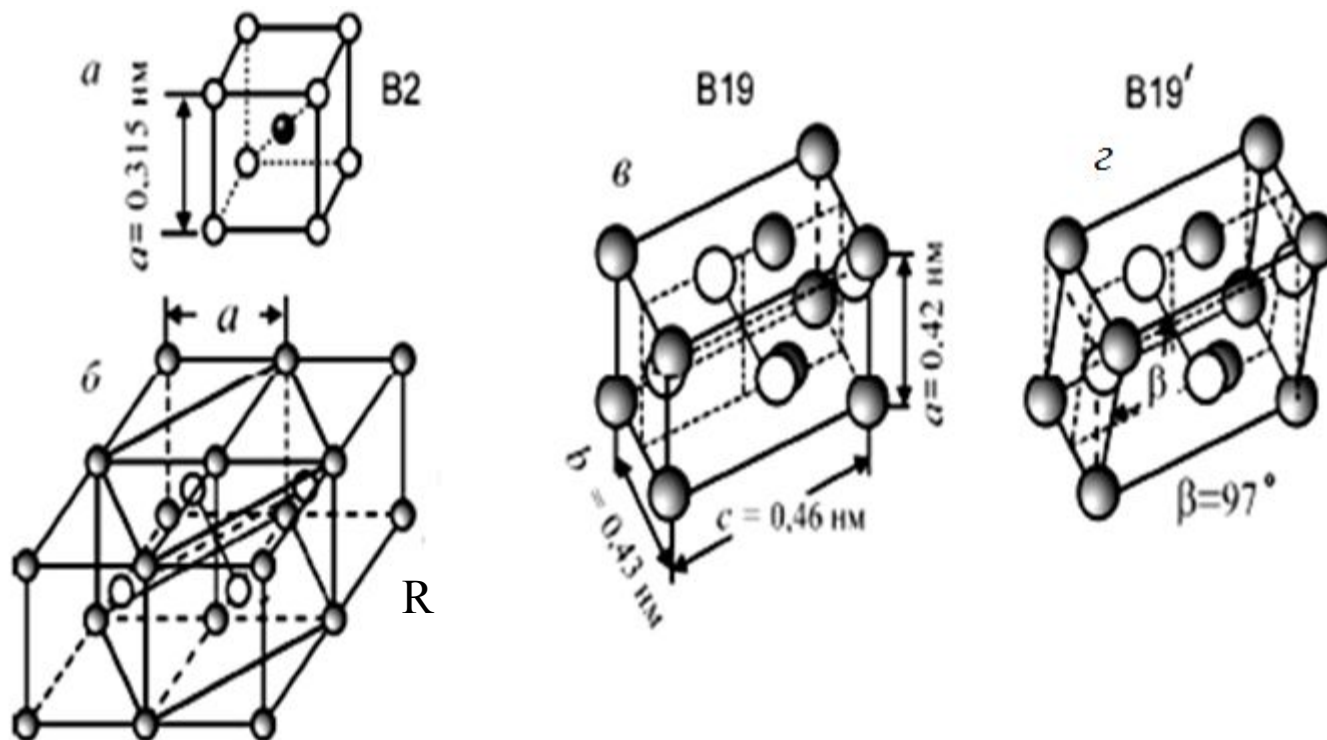
# Задачи:

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

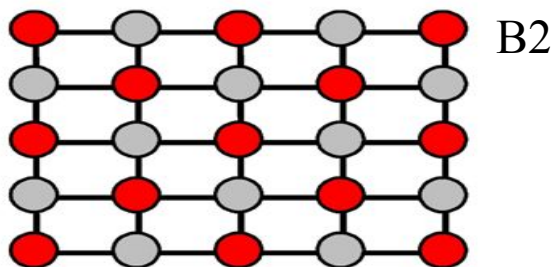


# Элементарные ячейки фаз интерметаллида TiNi



# Эффект памяти формы

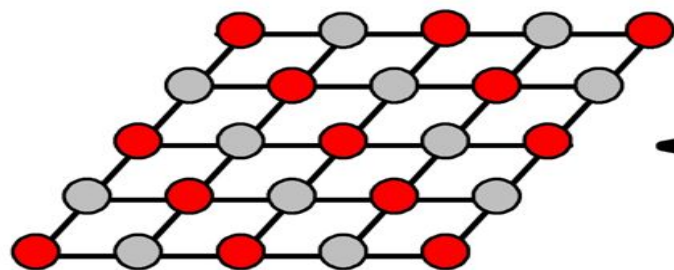
Аустенит



Нагрев

Охлаждение

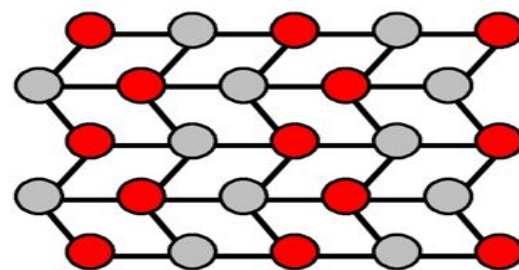
B19'



Мартенсит

Деформация

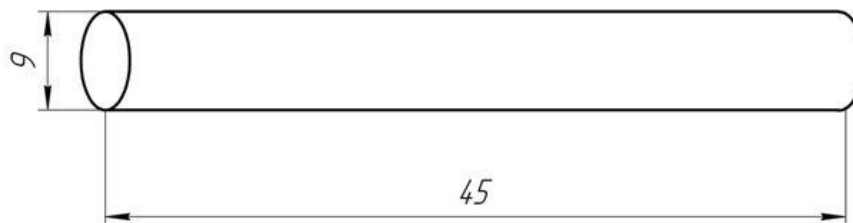
B19'



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.

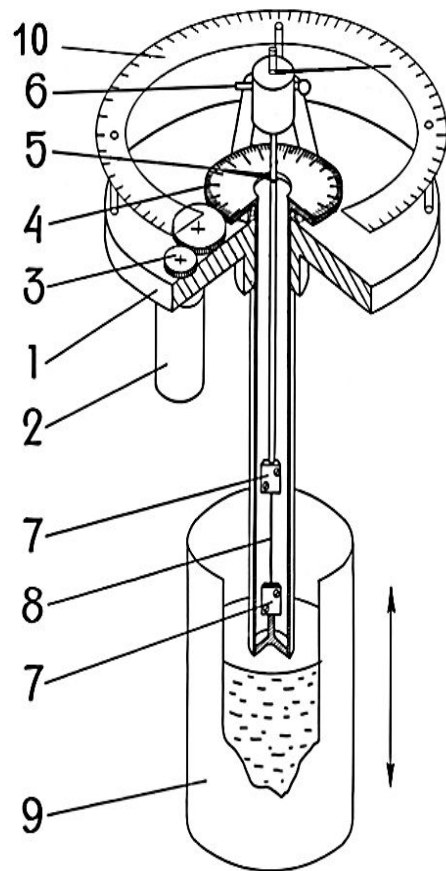
## Травление

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:

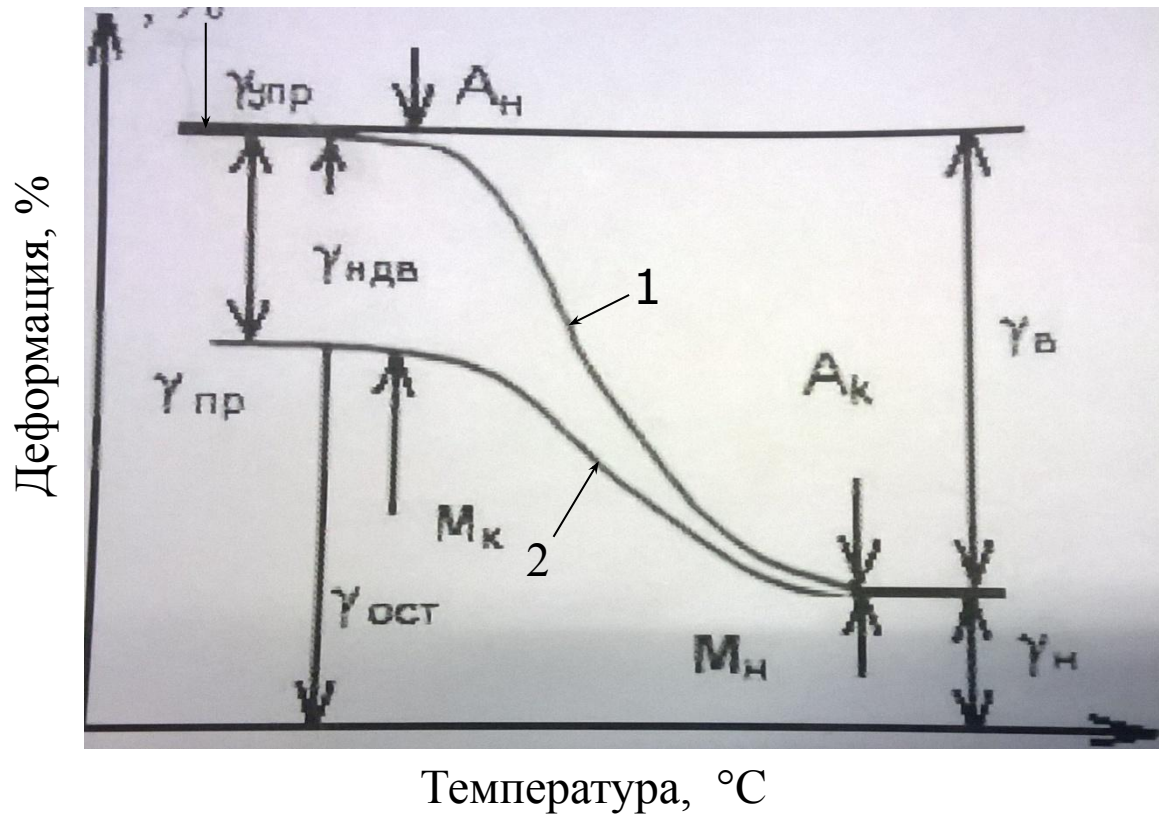
$$\gamma = \frac{\pi \times r \times \varphi}{180 \times l_{\text{раб}}} \times 100 \%$$

Условия измерения:

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

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

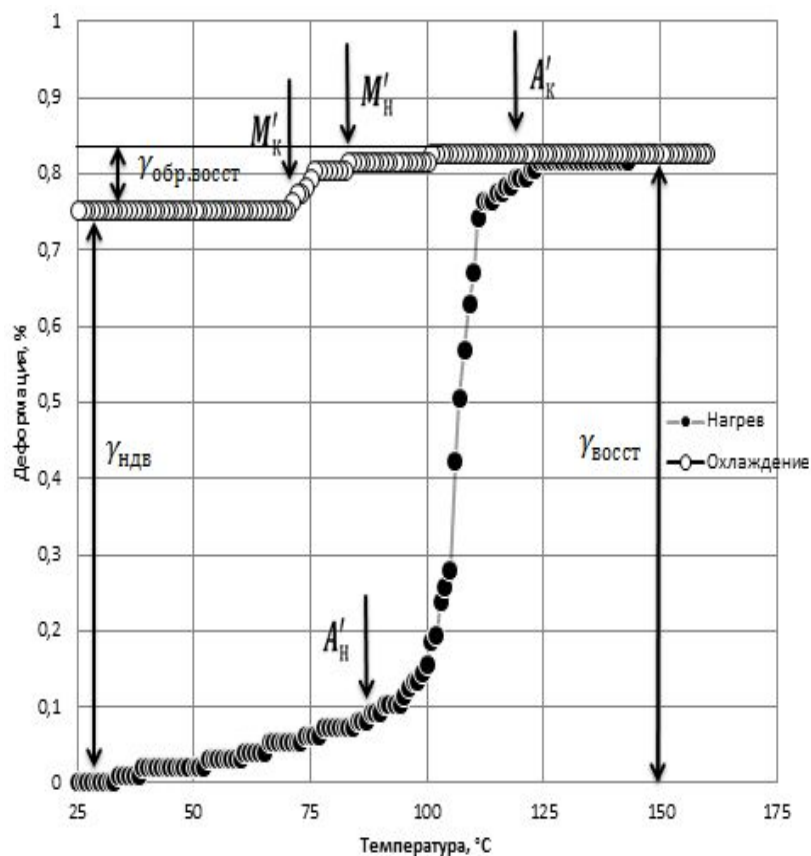
# Схема определения характеристик формовосстановления



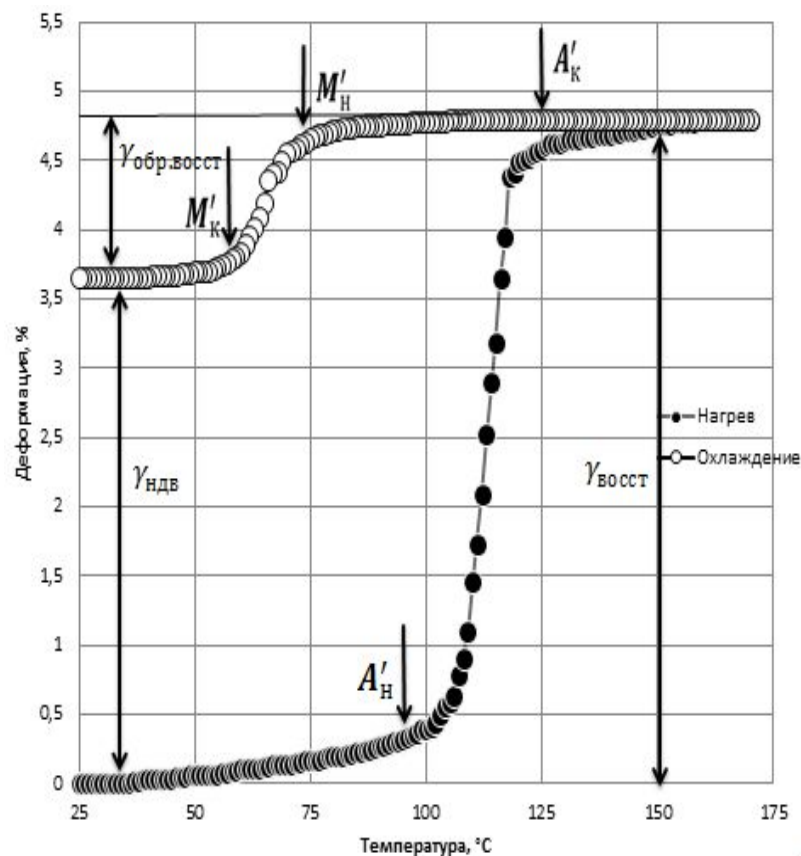
1 — кривая формовосстановления при нагреве.

2 — кривая формовосстановления при охлаждении.

# Зависимости деформации от температуры при нагреве и охлаждении



$$\gamma_{\text{пред}} = 2 \%$$

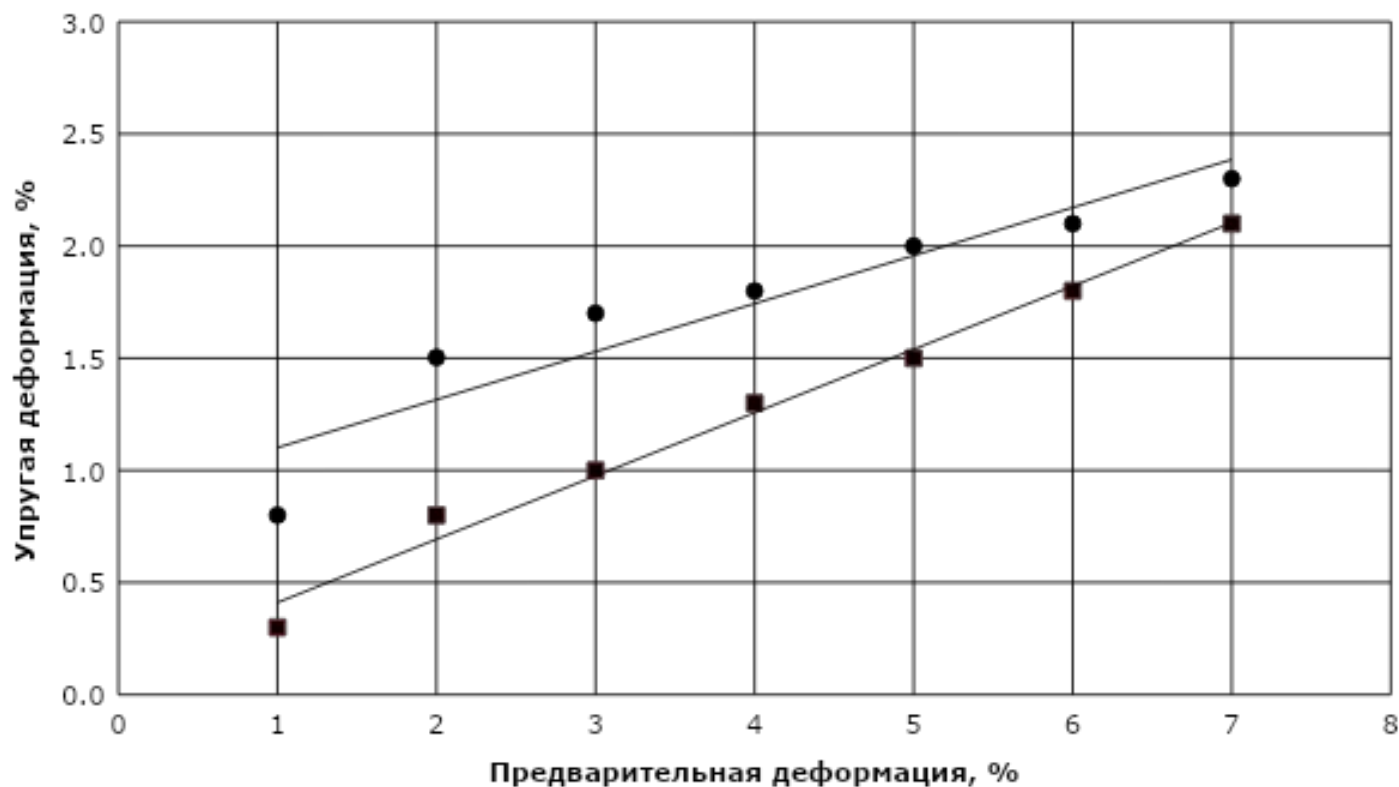


$$\gamma_{\text{пред}} = 6 \%$$

# Характеристики формовосстановления и интервалы критических температур

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

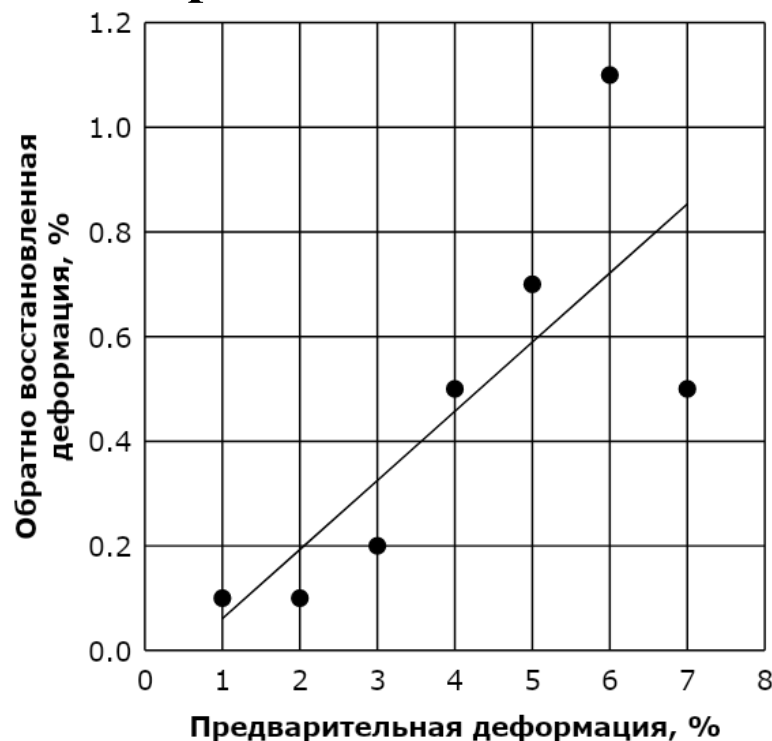
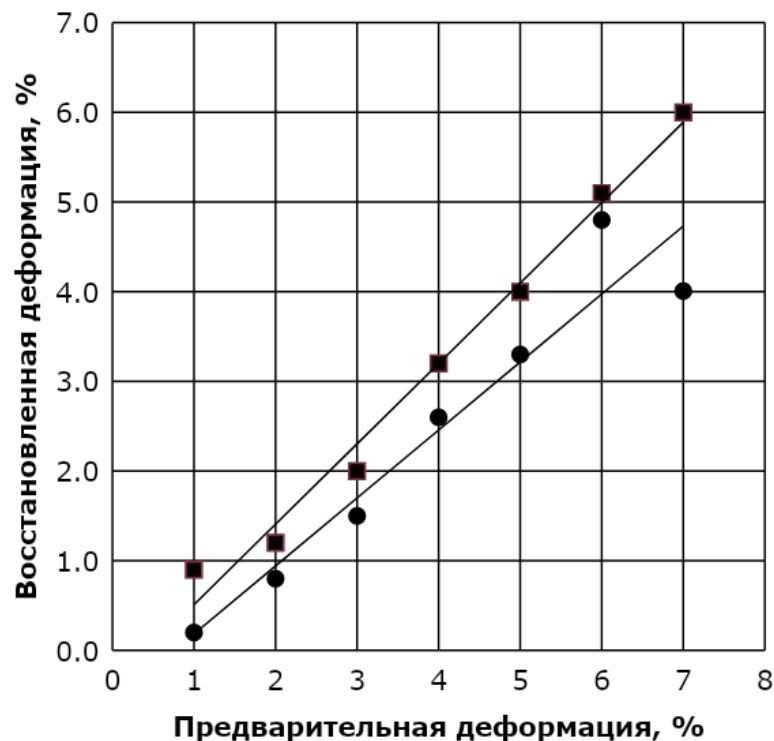
# График зависимости упругой деформации ( $\gamma_{\text{упр}}$ ) от предварительной деформации ( $\gamma_{\text{пред}}$ )



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

● - экспериментальные данные

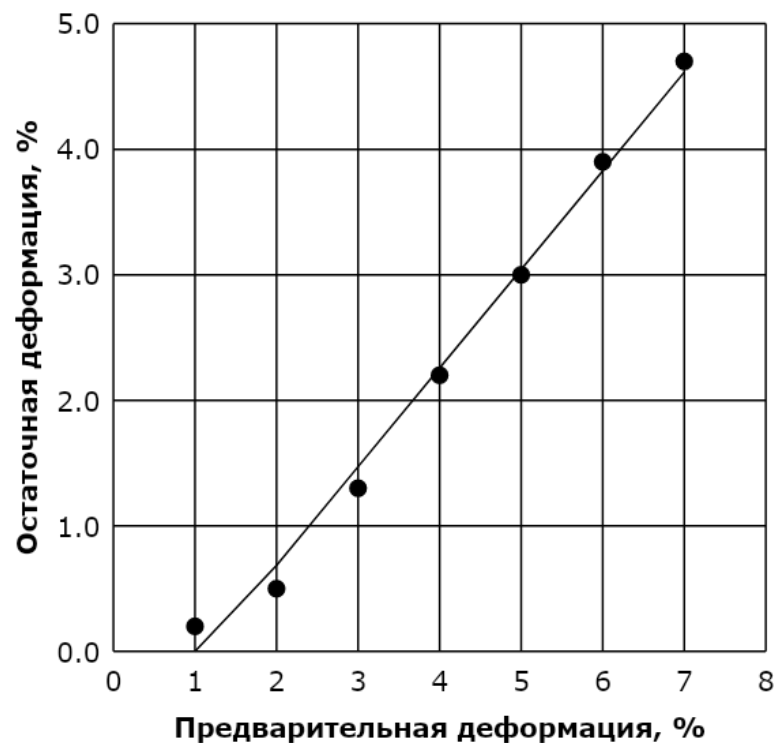
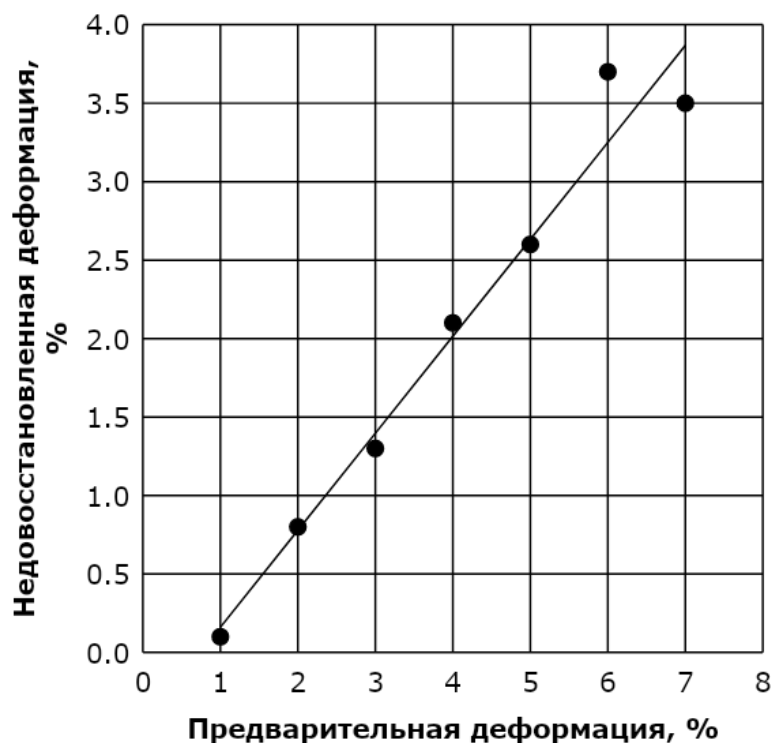
# Графики зависимостей ( $\gamma_{\text{восст}}$ ) и ( $\gamma_{\text{обр.восст}}$ ) деформаций от предварительной деформации ( $\gamma_{\text{пред}}$ )



■ - 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.