

# ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦА СПЛАВА $Ti_2NiCu$ С ТЕРМОУПРУГИМ МАРТЕНСИТНЫМ ПЕРЕХОДОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАСТЯГИВАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯХ

<sup>1,2</sup>Метлов Л.С., <sup>3</sup>Коледов В.В., <sup>3</sup>Шавров В.Г., <sup>3</sup>Морозов Е.В., <sup>3</sup>Кузнецов Д.Д., <sup>3</sup>Быбик М.С., <sup>3</sup>Дильмеева Э.Т.,  
<sup>3</sup>Калашников В.С., <sup>1,4</sup>Техтелев Ю.В.

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт имени А.А. Галкина, Украина

<sup>2</sup>Донецкий национальный университет, Украина

<sup>3</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Луганский национальный университет им. Т.Г. Шевченко, Луганск, Украина

## Введение

Наиболее распространенный вариант теории Ландау фазовых переходов (ФП) предполагает зависимость (критическую) от температуры коэффициента при второй степени параметра порядка (ПП). В то же время, в соответствии с общей методологией теории, от температуры, а также от напряжения могут зависеть все коэффициенты в разложении свободной энергии. Особое значение это имеет в случае материалов и сплавов, с термоупругим мартенситным ФП, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ), который существенно усложняет протекание ФП.

Влияние растягивающих напряжений на протекание мартенситного фазового перехода в материалах с ЭПФ изучалось ранее [1, 2]. В некоторых случаях важной особенностью таких кривых является отсутствие зависимости параметра порядка (ПП) в форме деформации от температуры ниже  $T_M$  (левее гистерезисной петли) и сильная зависимость от внешнего напряжения (рис. 1,а в [2]). В рамках стандартного варианта теории Ландау, такого соответствия экспериментально наблюдаемым кривым не удается добиться. Однако, его можно достигнуть, если учесть зависимость и других коэффициентов в разложении свободной энергии от температуры, а также от внешнего напряжения [7].

## Теоретическая модель

При наличии одноосных растягивающих напряжений можно ограничиться упрощенной и в то же время универсальной моделью [4]. Степенное представление свободной энергии по ПП имеет вид

$$\Phi_s = \Phi_0 + \frac{1}{2}a\varepsilon^2 + \frac{1}{3}b\varepsilon^3 + \frac{1}{4}c\varepsilon^4 \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – одноосная деформация (ПП). Коэффициенты разложения  $a$ ,  $b$  и  $c$  задаем выражениями

$$\begin{aligned} a &= a_0(T - T_M) + a_2\sigma + a_3\sigma T \\ b &= b_0 + b_1T + b_2\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

Чтобы удовлетворить условию независимости ПП  $\varepsilon$  на рис. 1 от температуры ниже  $T_M$  необходимо, чтобы температурная зависимость коэффициентов  $a$  и  $b$  компенсировали друг друга. Для того, чтобы обеспечить сильную зависимость от напряжения недостаточно учитывать только линейную по ПП взаимодействие с внешним напряжением  $\sigma\varepsilon$ . Необходимо также учитывать и при более высоких степенях пп, что и отражено в (2). Теоретические гистерезисные кривые (рис. 2) повторяют все особенности экспериментальных кривых.

## График 1

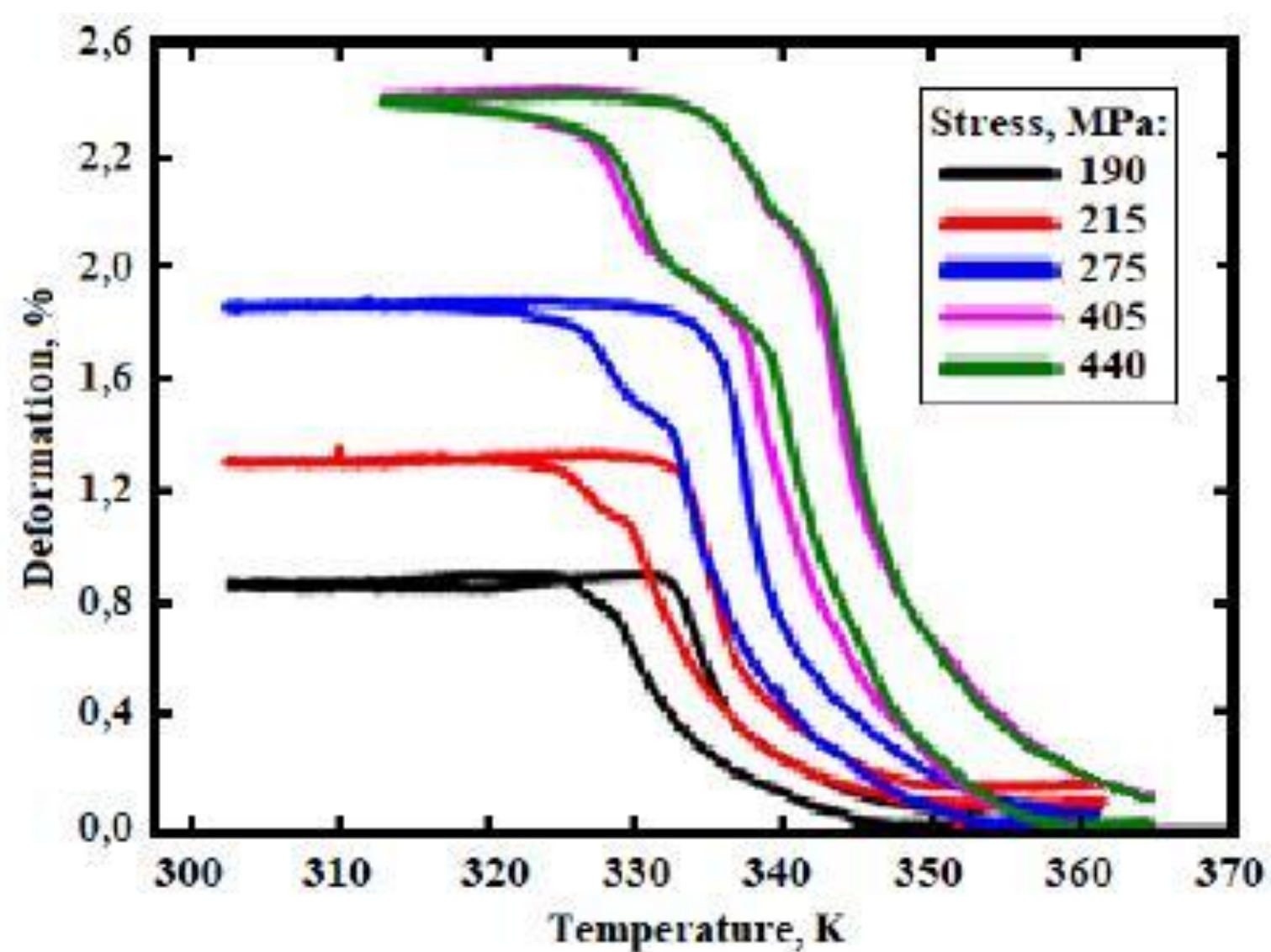


Рис. 1 Экспериментальные зависимости ПП (деформация) от температуры при заданных внешних растягивающих напряжениях (см. Вставку)

## График 2

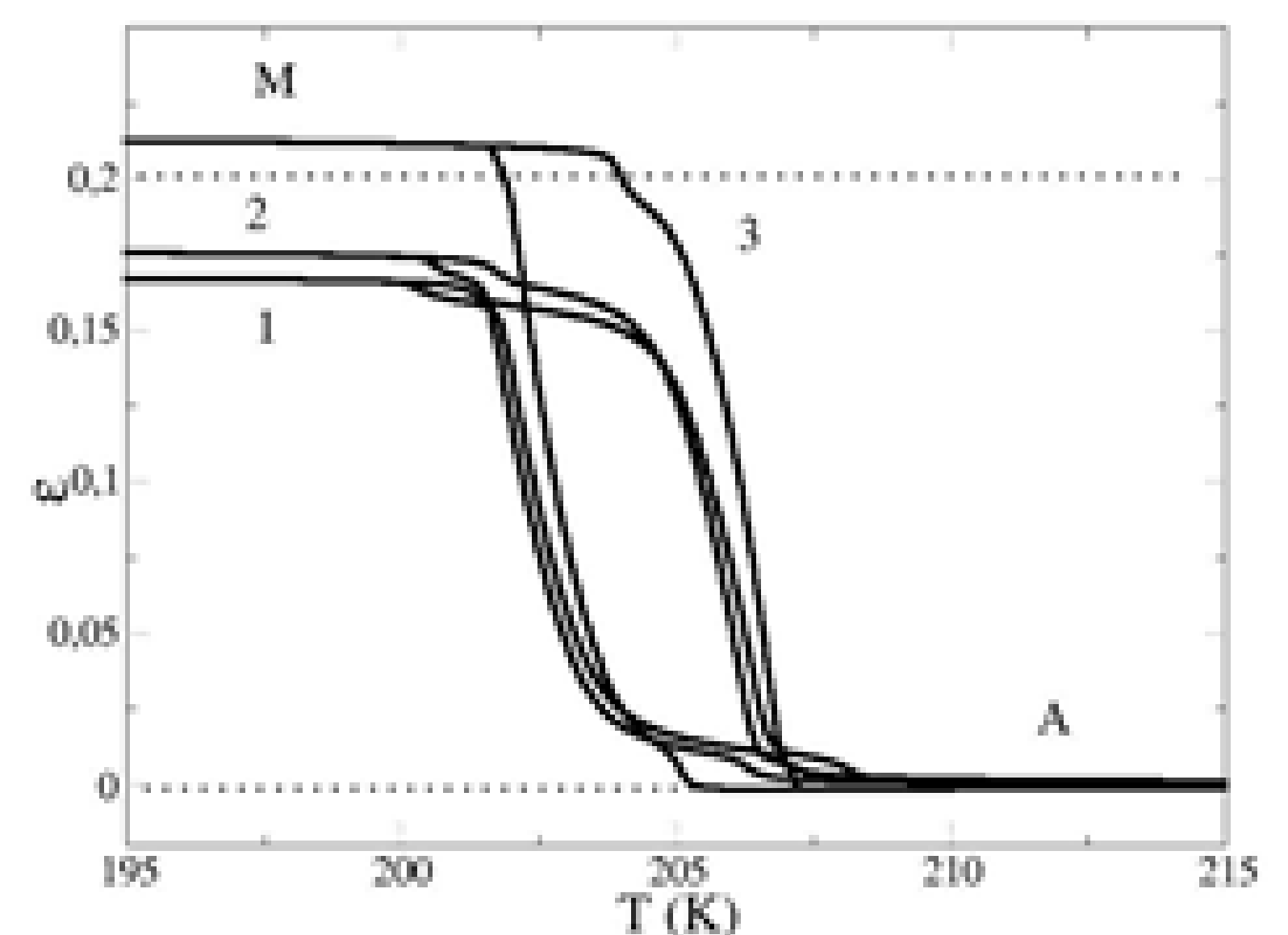


Рис. 2 Теоретические зависимости ПП (деформация) от температуры при возрастающих значениях растягивающих напряжений – 1, 2, 3

## Выводы

1. Посредством учета температурной зависимости и зависимости от внешних напряжений при более старших степенях ПП удалось адекватно описать наблюдаемые в эксперименте гистерезисные кривые на материалах, обладающих эффектом памяти формы.
2. Подбором компенсирующей зависимости коэффициентов при второй и третьей степенях ПП удалось добиться независимости ПП от температуры ниже  $T_M$ .
3. Учет нелинейных по ПП вкладов взаимодействия с внешним полем позволил описать сильную зависимость асимптотических участков кривых ниже  $T_M$  от напряжений.

## Литература

1. Belaev S.P., Resnina Y.Y., Koledov V.V. JAC, 2013, **586**, 1, 5222,
2. Buchel'nikov V.D., Bosko S.I. JMMM, 2003, **250-259**, 497,...
3. Гуфан А.Ю., Гуфан М.А., Гуфан Ю.М. <http://pti-nt.ru> 2017, 3, 46
4. Метлов Л.С. ФТВД, 2019, **29**, 1, 28.