

## ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ И ЗНАКА НАГРУЖЕНИЯ НА ВЕЛИЧИНЫ ФАЗОВЫХ МОДУЛЕЙ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА

Андронов И.Н., Тарсин А.В., Кейн Е.И., Суровцев Е.Л., Чашин Н.В.

*Ухтинский государственный технический университет (г. Ухта)*

*E – mail: [ivan@uit.sever.ru](mailto:ivan@uit.sever.ru)*

Выполнено экспериментальное исследование влияния характера термоциклирования и знака нагружения на величины фазовых модулей  $E^\phi$  и  $G^\phi$  в никелиде титана.

Показано, что фазовые модули  $E^\phi = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ ,  $G^\phi = \Delta\tau/\Delta\gamma$  сложным образом зависят от характера термоциклирования и знака нагружения, причем их величины могут изменяться за один термоцикл в  $6 \div 7$  раз, что свидетельствует о том, что при решении задач необходимо учитывать сложный функционально-механический характер зависимости  $E^\phi$  и  $G^\phi$  от температуры и нагружения материала.

В ряде работ сообщалось, что в материалах с обратимыми мартенситными переходами, в которых деформирование происходит преимущественно за счет каналов мартенситной неупругости, некоторые аналоги упругих постоянных, например касательного модуля Юнга, сложным образом зависят от температуры [1-5]. Отмечено, что при нагревании материала через интервал обратного мартенситного перехода указанные характеристики могут сильно изменяться, уменьшаясь в 3-5 раз и демонстрируя при этом локальный минимум примерно в середине интервала прямого мартенситного перехода. Названные материалы не относятся к классу линейно-упругих, т.к. им свойственна как высокотемпературная так и низкотемпературная псевдоупругость [6] и у них может отсутствовать линейный участок деформирования. Поэтому для описания квазистатического изотермического деформирования материала введены термины осевой фазовой модуль  $E^\phi$  и фазовой модуль сдвига  $G^\phi$ , которые определяли согласно соотношений

$$E^\phi = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad G^\phi = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}, \quad (1)$$

где  $\Delta\sigma$  и  $\Delta\tau$  – изменения величин нормальных и касательных напряжений, связанные с изменением нагрузки;  $\Delta\varepsilon$  и  $\Delta\gamma$  – соответствующие деформационные отклики.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния термоциклирования и знака нагружения на величины фазовых модулей никелида титана. При определении  $E^\phi$  применяли экспериментальную установку, описанную в работе [7]. В качестве объекта исследований использовали проволоку длиной 1 м и диаметром 2 мм из сплава ТН-1, характеристические температуры которой, составляли:  $M_H = 337$  К,  $M_K = 310$  К,  $A_H = 348$  К,  $A_K = 393$  К. При комнатной температуре проволоку нагружали до напряжения  $\sigma = 50$  МПа после чего осуществляли изотермическую догрузку ( $\Delta\sigma = +10$  МПа) или разгрузку ( $\Delta\sigma = -10$  МПа), фиксируя при этом изме-

нение значения деформации  $\Delta \varepsilon$ . Процедуры догрузки (разгрузки) проводили далее при увеличении температуры и последующем охлаждении образца.

При определении фазового модуля сдвига в качестве объектов исследований применяли цилиндрические стержни из сплава ТН – 1 с длиной 33 мм, диаметром 4 мм и характеристическими температурами:  $M_H = 335$  К,  $M_K = 307$  К,  $A_H = 349$  К,  $A_K = 405$  К. Фазовый модуль  $G^\phi$  находили для фиксированного уровня действующих напряжений  $\tau = 6$  МПа при изотермической догрузке ( $\Delta \tau = +3$  МПа) и при разгрузке ( $\Delta \tau = -3$  МПа). Значения касательных напряжений  $\tau$  и сдвиговых деформаций  $\gamma$  находили по формулам сопротивления материалов в приближении идеально-упругого тела, относя напряжения и деформации к внешнему волокну образца. Относительная погрешность в определении  $E^\phi$  и  $G^\phi$  не превышала 5%. Опыты осуществляли на установке, описанной в [8].

Основные результаты экспериментов представлены на рис. 1÷4. Исследования показали, что модуль  $E^\phi$  существенно зависит от температуры испытания, характера изменения её и действующих напряжений (нагрузка, разгрузка). Из рис. 1 видно, что если  $E^\phi$  определяли при догрузке, то его величина монотонно возрастает с увеличением температуры в интервале обратного мартенситного перехода. При охлаждении в интервале прямого мартенситного перехода  $E^\phi$  минимально при  $T \approx 305 \div 308$  К. При этом его величина за такт охлаждения изменяется примерно в 7 раз ( $E^\phi_{\max} / E^\phi_{\min} \approx 7$ ). Иная картина имеет место, если определять  $E^\phi$  при разгрузке (рис. 1, б). В последнем случае  $E^\phi$  демонстрирует сложную зависимость при нагревании с минимумом при температуре 332 – 335 К с последующим возрастанием при нагревании примерно в 6 раз. Охлаждение через интервал прямого мартенситного перехода приводит к монотонному уменьшению модуля  $E^\phi$  в интервале температур от 340 до 305 К приблизительно в 2 раза.

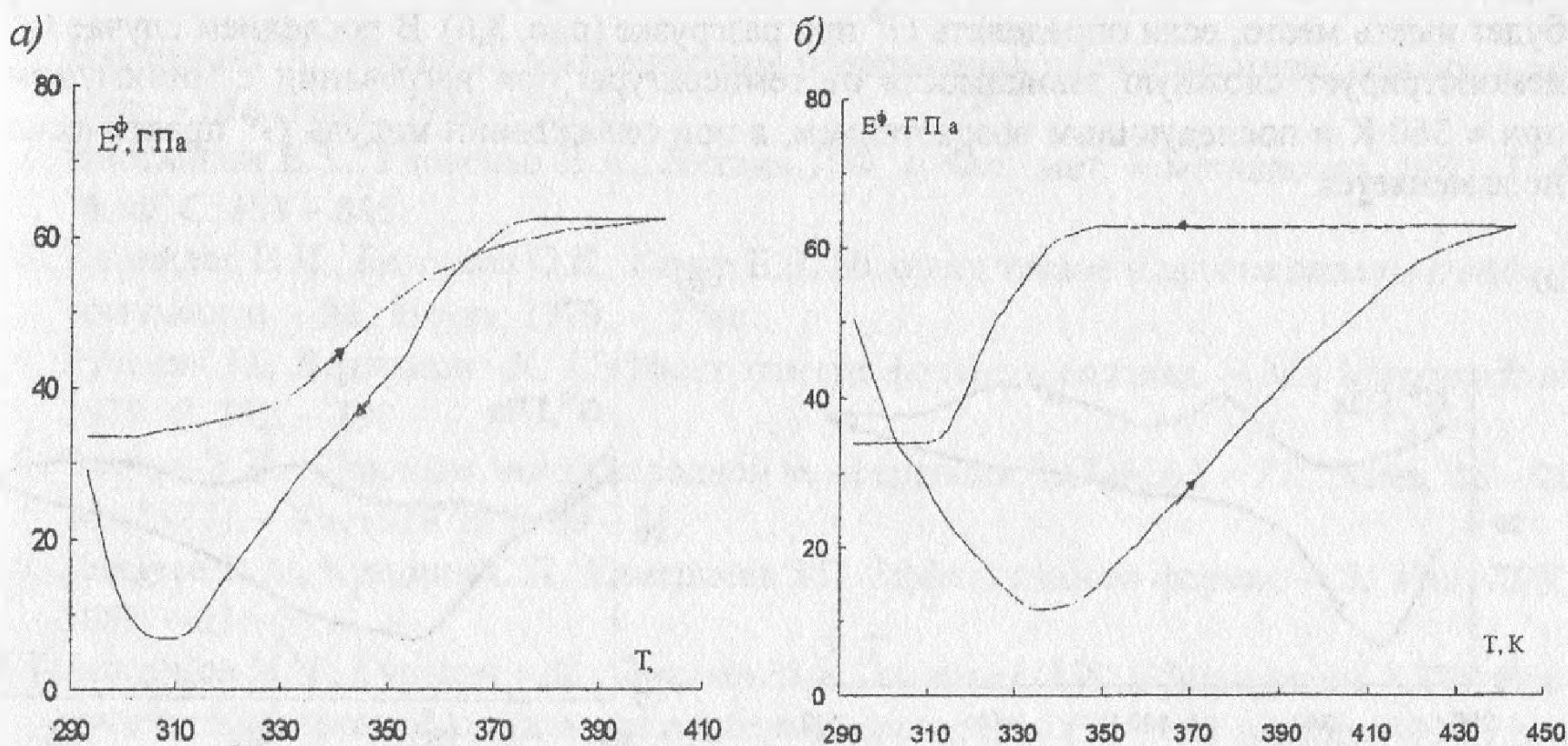


Рис. 1. Зависимость фазового модуля  $E^\phi$ , определяемого при догрузке (а) и разгрузке (б) при изменении температуры в полном интервале мартенситного перехода.

Сложный характер влияния температуры на величину  $E^\phi$  проявляется и при изменении температуры в неполных температурных интервалах превращения (рис. 2).

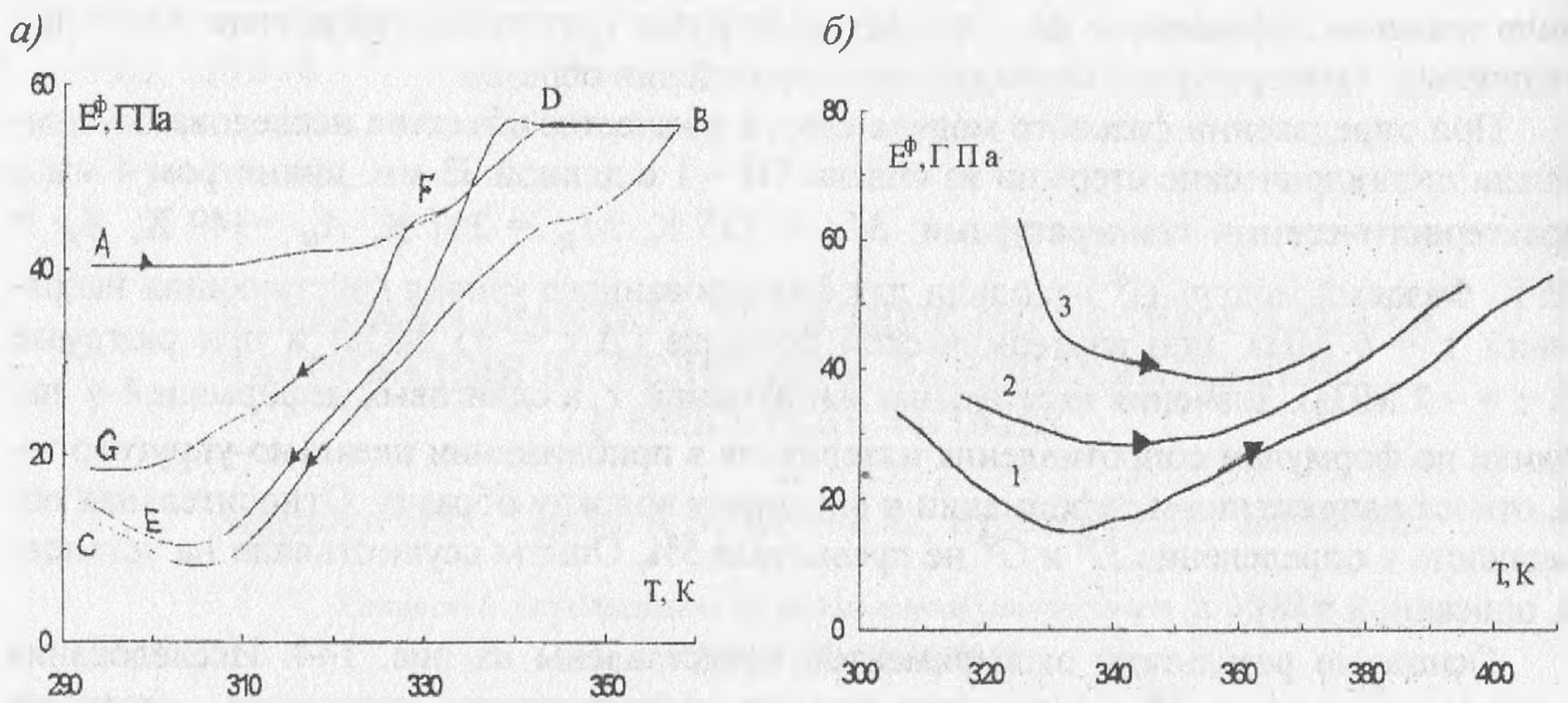


Рис. 2. Зависимости фазового модуля  $E^\phi$  при нагрузке в интервалах 293÷358 К (ABC); 293÷342 К (ADE); 293÷328 К (AFG) (а) и разгрузке в интервалах 306÷410 К (1); 316÷394 К (2) и 325÷373 К (3) (б)

Данные, представленные на рис. 3-4 показали, что и модуль  $G^\phi$  сложным образом зависит от температуры испытания, характера её изменения и последовательности изменения напряжений. Рис. 3,а показывает, что если  $G^\phi$  определяли при догрузке, то его величина с ростом температуры в интервале обратного мартенситного перехода практически не изменялась. Последующее охлаждение в интервале прямого мартенситного перехода приводит к зависимости модуля  $G^\phi$  от  $T$  с достижением минимума при 320 К. При этом его величина за такт охлаждения изменяется примерно в 7 раз. Иная картина будет иметь место, если определять  $G^\phi$  при разгрузке (рис. 3,б). В последнем случае  $G^\phi$  демонстрирует сложную зависимость от температуры при нагревании с минимумом при  $\approx 360$  К и последующим возрастанием, а при охлаждении модуль  $G^\phi$  практически не изменяется.

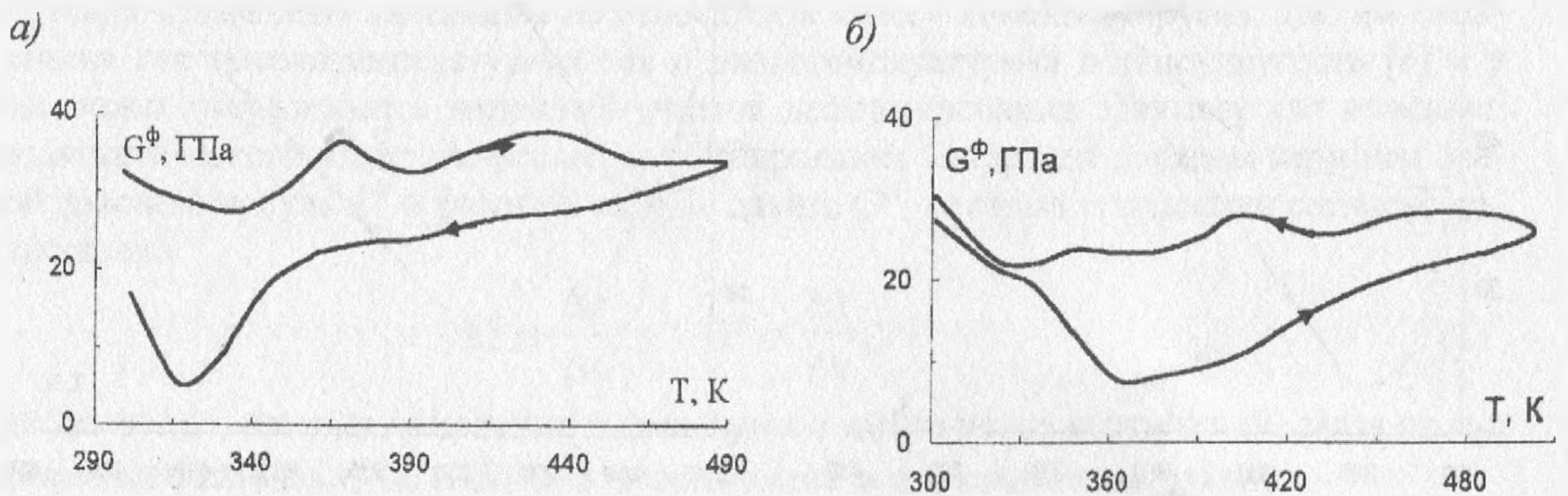


Рис. 3. Зависимость фазового модуля сдвига при догрузке (а) и разгрузке (б) от температуры при изменении температуры в полном интервале превращения.

Сложный характер влияния температуры на величину  $G^\phi$  проявляется и при изменении температуры в неполных температурных интервалах (рис.4).

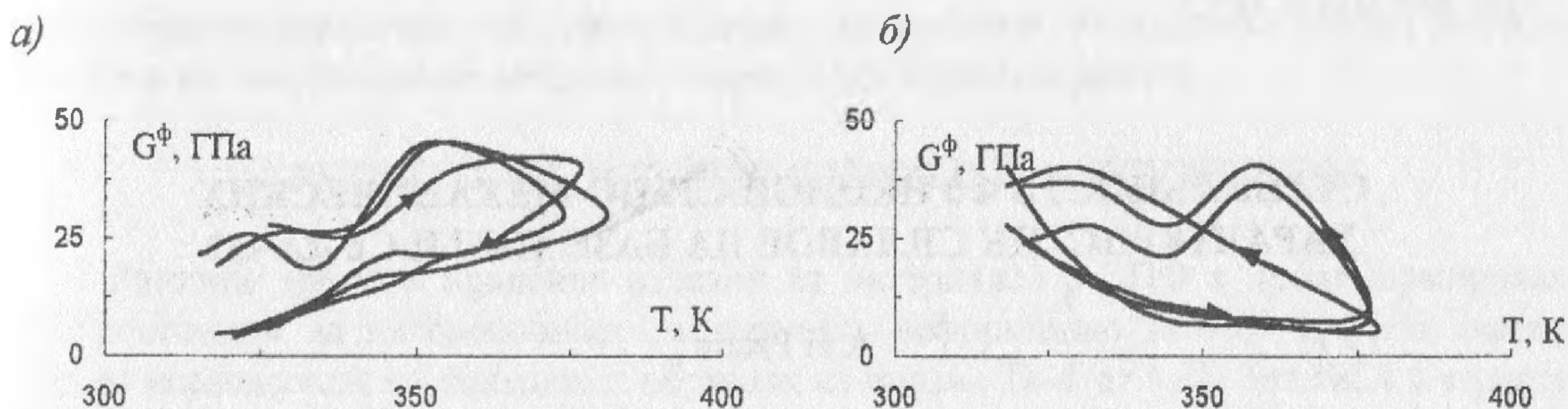


Рис. 4. Зависимость фазового модуля сдвига при догрузке (а) и разгрузке (б) от температуры в интервале 315÷380 К.

В данной экспериментальной работе не ставилась задача выяснения физико-механической природы явлений, приведенных выше. Полученные результаты свидетельствуют, что при решении задач, связанных с изотермическим деформированием материалов с мартенситным механизмом неупругости, при определении деформаций в мартенситном, аустенитном и двухфазном состояниях необходимо учитывать сложный вид зависимостей модулей  $E^{\phi}$  и  $G^{\phi}$  от характера изменения температуры и нагружения.

### Список литературы

1. Варлимонт Х., Дилей Л. Мартенситные превращения на основе меди, серебра и золота. – М.: Наука, 1980. – 205с.
2. Винтайкин Е.З., Удовенко В.А., Литвин Д.Ф. // Физ. мет. и металловед. 1980. Т. 4, № 49. С. 883 – 885.
3. Корнилов И.И., Белоусов О.К., Качур Е.В. Никелид титана и другие сплавы с эффектом памяти. – М.: Наука, 1979. – 178с.
4. Русович Н., Варлимонт Х. / Эффект памяти формы в сплавах. – М.: Metallurgy. 1979. С. 382 – 390.
5. Эстрин Э.И. / Доклады международной конференции "ICOMAT - 77" (Киев, 16 – 20 мая 1977). – Киев: 1978. С. 29 – 33.
6. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. – Л.: Изд. ЛГУ, 1987. – 216 с.
7. Андронов И.Н., Гуревич А.С., Лихачев В.А., Недбаев П.И. // Материалы XXIV Всесоюзного семинара "Актуальные проблемы прочности" (17 – 21 декабря 1990 г.). – Рубежное. Рубежанский филиал ДХТИ. С. 147 – 148.
8. Андронов И.Н., Какулия Ю.Б., Лихачев В.А. Термоциклическая деформация сплава Cu – 62.5%Mn в условиях сложного нагружения // Изв. Вузов. Цветная металлургия, 1989. № 1. С. 88 – 92.
9. Лихачев В.А., Малинин В.Г. Структурно - аналитическая теория прочности. – СПб.: Наука, 1993. – 471 с.