

## ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ПРЕВРАЩЕНИЯ, ОБУСЛОВЛЕННОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЕЙ, И ЭПФ

Ю.Н. Вьюненко\*, Л.Ф. Вьюненко\*\*

\*Россия, Санкт-Петербург, НТФ «Вольта»

\*\*Россия, Санкт-Петербург, государственный университет путей сообщения

Обсуждаются результаты вычислительного эксперимента по изучению влияния сдвига температур превращения на деформационные процессы ЭПФ. В основу расчетов положена математическая модель механизма остаточных напряжений, позволяющая дать наглядное объяснение процессу формовосстановления при нагреве образца из материала с памятью.

В построении теории механизма остаточных напряжений [1-2] важное значение имеет зависимость интервала температур превращения ( $A_H, A_K$ ) от степени пластической деформации материала. Как показано в работах [1-4], формализация механизма остаточных напряжений приводит к математическим моделям деформационных процессов ЭПФ следующей структуры:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{c\rho} \operatorname{div}(\lambda(x, y, z, t) \operatorname{grad} T) + \Phi(x, y, z, t) , \quad (1)$$

$$\int_S \sigma ds = 0 \quad (\text{или} \quad \int_S \rho_\sigma ds = 0) , \quad (2)$$

$$c = c(T, A_H, A_K) , \quad (3)$$

$$E = E(T(x, y, z, t)) , \quad (4)$$

$$A_H = A_H(\varepsilon_p), \quad A_K = A_K(\varepsilon_p) . \quad (5)$$

Здесь  $T = T(x, y, z, t)$  – значение температуры в точке с декартовыми координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $\rho$  – плотность;  $c$  – коэффициент удельной теплоемкости;  $\Phi(x, y, z, t)$  – тепловыделение в объеме материала;  $\sigma$  – напряжения;  $\rho_\sigma$  – соответствующее плечо;  $S$  – площадь сечения конструкции;  $E$  – модуль упругости материала;  $\varepsilon_p$  – степень пластической деформации. Соотношения (1)-(5), дополненные необходимыми начальными и граничными условиями, образуют замкнутую систему уравнений, позволяющую моделировать деформационный процесс, определяемый эволюцией температурных полей и напряжений.

Результаты многочисленных исследований влияния пластической деформации на интервал температур превращения ( $A_H, A_K$ ) противоречивы. По данным [5] в одних случаях повышение пластической деформации материала приводит к проявлению ЭПФ при более высоких, чем для недеформированного материала, температурах, в других

случаях деформации ЭПФ начинаются при пониженных значениях  $A_H$ . Есть также данные о том, что пластическая деформация не меняет температур начала и конца превращения [6]. В работах [1-4] математическая модель (1)-(5) использовалась для расчета изменения радиуса кривизны при нагреве проволочного образца из модельного материала, обладающего ЭПФ. Модельный материал имел физико-механические характеристики TiNi равноатомного состава. В частности, предполагалось, что в результате пластической деформации интервал температур превращения сдвигается в сторону низких температур. Соотношение (5), описывающее связь температур превращения  $A_H$  и  $A_K$  с пластической деформацией, использовалось в виде

$$A_H(\epsilon_p) = A_{H0} - k\epsilon_p, \quad A_{жс}(\epsilon_p) = A_{жс0} - k\epsilon_p, \quad (6)$$

где  $A_{H0}$ ,  $A_{K0}$  – значения температур начала и конца превращения для недеформированного материала;  $k$  – константа, характеризующая смещение этих температур, обусловленное пластической деформацией.

Цель исследования, предпринятого в настоящей работе, выяснить, является ли соотношение (6) ограничением механизма остаточных напряжений. Другими словами, можно ли на основе модели (1)-(5) описать деформационные процессы в случае сдвига интервала температур превращения  $(A_H, A_K)$  в сторону высоких температур.

В численном эксперименте следили за изменением радиуса кривизны первоначально прямолинейного образца с радиусом сечения  $r_0 = 2$  мм при равномерном нагреве с поверхности со скоростью 0.1 К/с от температуры  $T_{start} = 328$  К до  $T_{stop} = 375$  К с последующей изотермической выдержкой. Все физико-механические характеристики материала (плотность, модуль Юнга, теплоемкость и т.д.) были взяты равными соответствующим константам нитинола равноатомного состава, в частности, температуры  $A_{H0}$  и  $A_{K0}$  полагались равными, соответственно, 333 К и 343 К. Деформационный предел упругости  $\epsilon_y$  был принят равным 0,01. Предполагалось, что неупругая деформация модельного материала подчиняется законам пластического течения.

Исходное распределение напряжений соответствовало ситуации, когда до начала нагрева образцу придана форма кольца на оправке радиуса  $R_0 = 150$  мм. Изменение радиуса кривизны определялось соотношением (2), имеющим в рассматриваемом случае вид

$$\int_0^{r_y} E(T) \frac{y^2}{R} \sqrt{r_0^2 - y^2} dy + \int_{r_y}^{r_0} E(T) \left( \frac{y}{R} - \frac{y}{R_0} + \epsilon_- \right) y \sqrt{r_0^2 - y^2} dy = 0, \quad (7)$$

при этом  $T$  подчиняется уравнению теплопроводности (1). Температурную зависимость модуля упругости описывали кусочно-линейной функцией

$$E(T) = \begin{cases} E_H, T < A_H, \\ E_H \frac{2T - A_H - A_{жс}}{A_H - A_{жс}}, A_H \leq T \leq \frac{A_H + A_{жс}}{2}, \\ E_e \frac{2T - A_H - A_{жс}}{A_{жс} - A_H}, \frac{A_H + A_{жс}}{2} \leq T \leq A_K, \\ E_e, T > A_{жс} \end{cases}, \quad (8)$$

где  $E_H$ ,  $E_e$  – значения модуля упругости материала в низко- и высокотемпературной фазах, соответственно.

Расчеты проводили для трех вариантов влияния степени пластической деформации на границы интервала температур превращения, соответствующих трем значениям константы  $k$  в соотношении (6):  $k = 10; 0; -10$  К.

Результаты численного эксперимента приведены на рис. 1 в виде зависимостей радиуса кривизны нагреваемого проволочного кольца от времени.

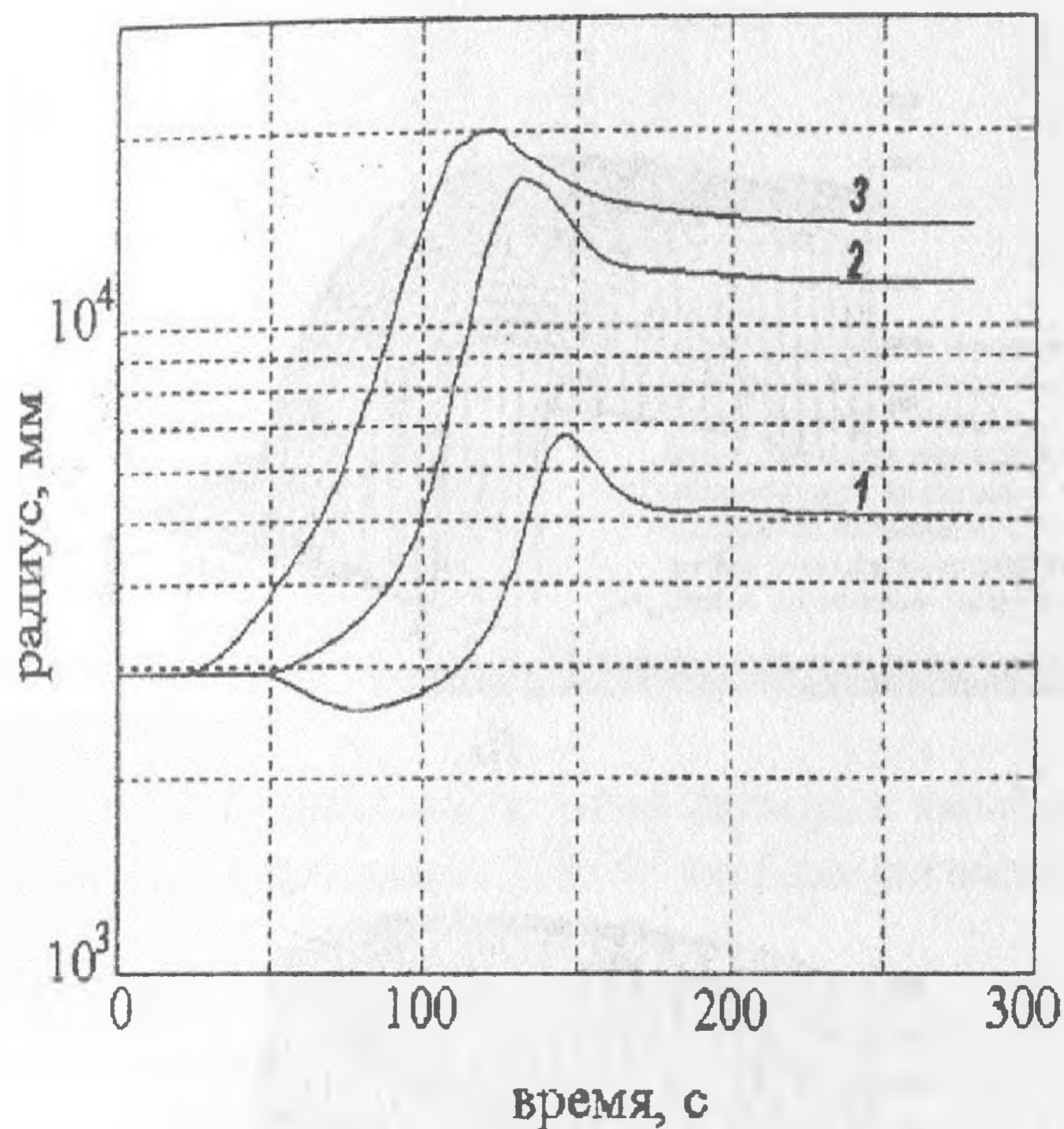


Рис. 1. Зависимость радиуса кривизны образца от времени при сдвиге интервала температур превращения в сторону высоких температур (1), при отсутствии сдвига (2) и при сдвиге в сторону низких температур (3).

Полученные результаты подтверждают возможность описания деформационных процессов ЭПФ в рамках механизма остаточных напряжений в том случае, когда пластическая деформация приводит к смещению температур превращения в сторону высоких температур. Рассчитанное в вычислительном эксперименте развитие деформационного процесса (рис. 1, кривая 1) находит подтверждение экспериментальными данными [5].

С позиций механизма остаточных напряжений полученному результату можно дать наглядное объяснение, если проследить за изменением распределения модулей упругости по сечению образца при нагреве, представленным на рис. 2 в виде поверхности, высоты которой соответствуют значениям модуля упругости в соответствующих точках сечения. Расчеты показали, что деформационные процессы начинаются в то время, когда температура на поверхности образца достигает  $A_{H0}$ . С этого момента (через 50 с от начала нагрева) в упругой зоне начинается превращение, значения упругих характеристик, согласно (8), в этой зоне начинают снижаться (рис. 2,а), что приводит, в соответствии с уравнением (7), к уменьшению радиуса кривизны образца. Продолжающийся нагрев доводит до температур превращения и зону пластической деформации, в которой, в свою очередь, начинается снижение значений упругих констант (рис. 2,б). С этого момента начинается увеличение радиуса кривизны. Его максимальное значение достигается при температуре на поверхности, приблизительно равной  $A_{K0}$  (через 150 с от начала нагрева), что соответствует распределению модулей упругости на рис. 2,в, после чего радиус кривизны начинает медленно уменьшаться. Снижение значений радиуса продолжается до тех пор, пока идет процесс "дораствания" до значения  $E_B$  модулей упругости в упругой зоне (рис. 2,г).

Меньшая степень восстановления формы, чем в случаях  $k = 0$  К (кривая 2 на рис. 1) и  $k = 10$  К (кривая 3 на рис. 1) объясняется изменением очередности начала превраще-

ния в упругой и пластической зонах относительно аналогичного процесса в материале, для которого пластическая деформация приводит к противоположному сдвигу интервала температур превращения.

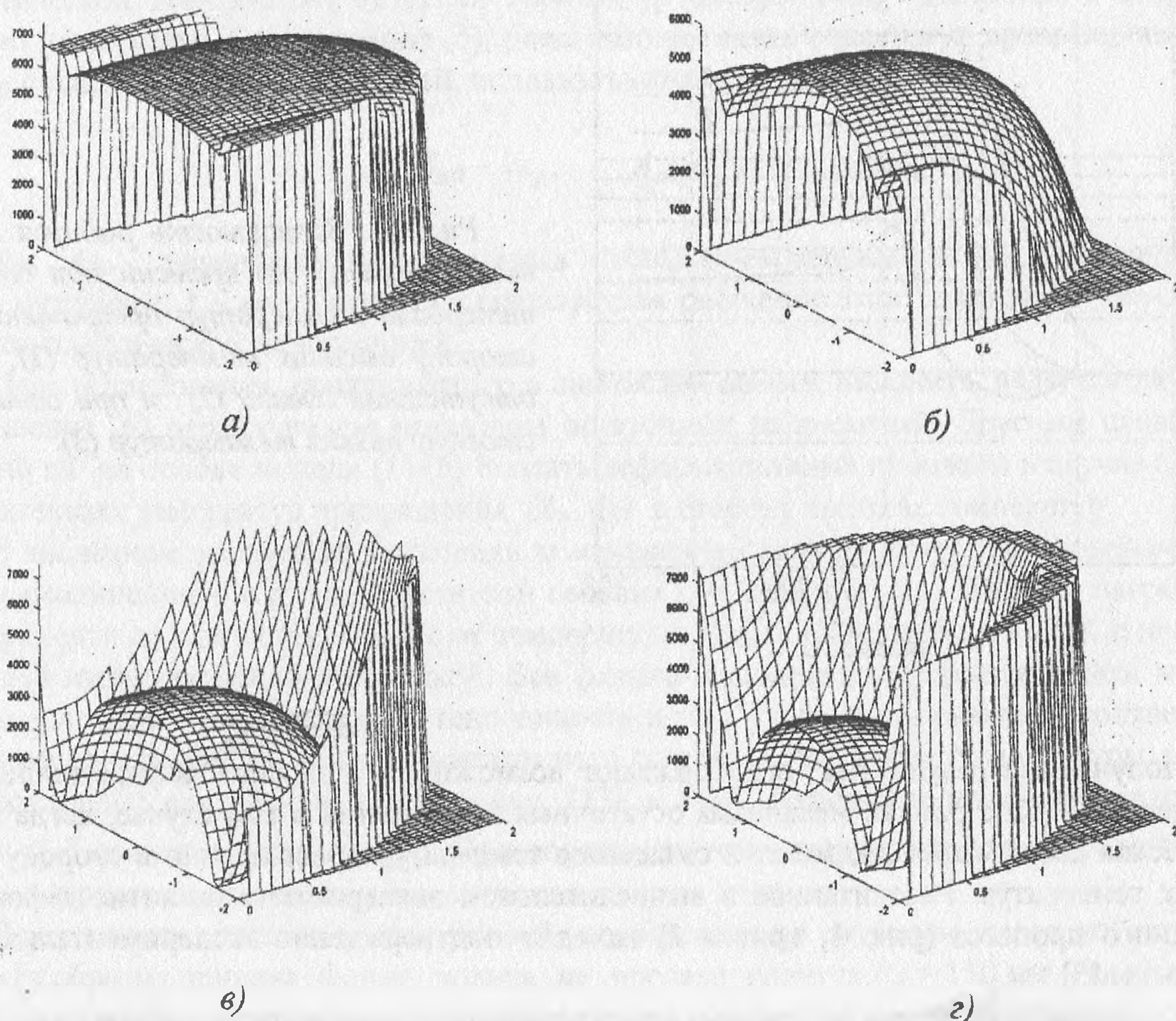
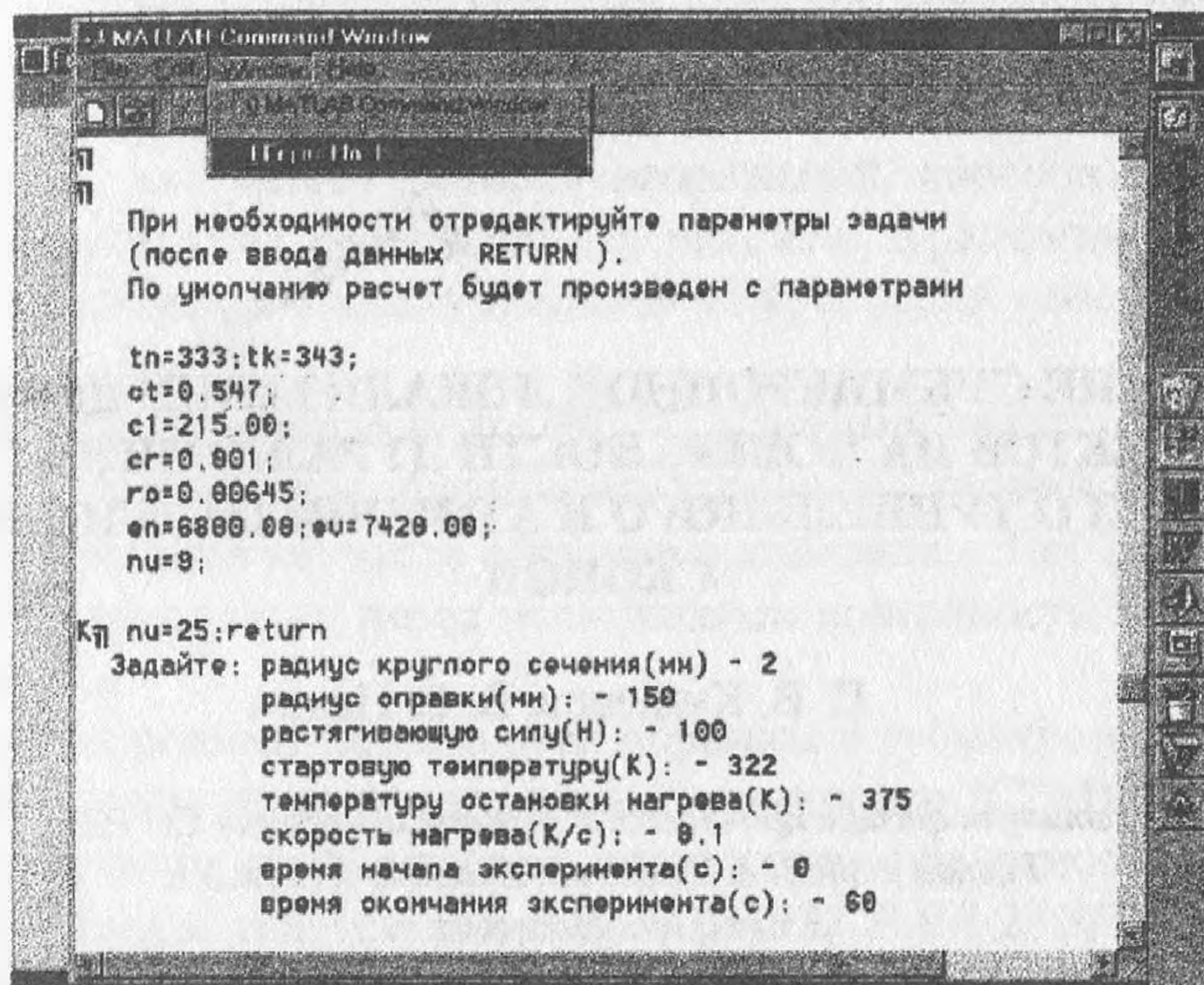


Рис. 2. Изменение распределения значений модуля упругости по сечению образца при нагреве (сдвиг интервала температур превращения в результате пластической деформации – в сторону высоких температур).

Результаты вычислительного эксперимента, несомненно, в значительной мере зависят от качества используемых численных процедур. Для проведения расчетов был использован комплекс программ "ЭПФ" на базе системы MATLAB, организованный по модульному принципу и позволяющий создавать различные сценарии вычислений с использованием высокоэффективных встроенных средств системы, включая средства визуализации результатов расчетов. Основным численным методом, используемым в комплексе "ЭПФ", – метод сеток, позволяющий заменить решение дифференциальной задачи (1)-(5) решением системы линейных алгебраических уравнений относительно значений искомых переменных в узлах сетки, покрывающей сечение образца.



```

MATLAB Command Window
-----
При необходимости отредактируйте параметры задачи
(после ввода данных RETURN ).
По умолчанию расчет будет произведен с параметрами

tn=333;tk=343;
ct=0.547;
c1=215.00;
cr=0.001;
ro=0.00645;
en=6800.00;eu=7420.00;
nu=9;

Кл nu=25;return
Задайте: радиус круглого сечения(мм) - 2
         радиус оправки(мм): - 150
         растягивающую силу(Н): - 100
         стартовую температуру(К): - 322
         температуру остановки нагрева(К): - 375
         скорость нагрева(К/с): - 0.1
         время начала эксперимента(с): - 0
         время окончания эксперимента(с): - 60
  
```

Рис. 3. Диалоговое окно сценария вычисления радиуса кривизны при использовании комплекса программ "ЭПФ" на базе системы MATLAB.

### Список литературы.

1. Вьюненко Ю.Н., Сырковская Л.Е. «Дефект» модуля упругости и ЭПФ // Функционально-механические свойства материалов и их компьютерное конструирование: Сб. докл./ XXIX Межресп. семинар «Актуальные проблемы прочности». Псков. 1993. С.538-539.
2. Вьюненко Л.Ф., Вьюненко Ю.Н., Ларионов М.А., Сырковская Л.Е. «Дефект» модуля упругости, сдвиги температур и ЭПФ // Материалы со сложными функционально-механическими свойствами. Компьютерное конструирование материалов: Сб. докл./ XXX Межресп. семинар «Актуальные проблемы прочности». Новгород. 1994. С.28.
3. Вьюненко Ю.Н., Вьюненко Л.Ф. К вопросу о моделировании ЭПФ в рамках механизма остаточных напряжений // Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: Сб. докл. / XXXV семинар «Актуальные проблемы прочности». Псков. 1999. Часть II. С. 361-365.
4. Вьюненко Ю.Н., Вьюненко Л.Ф. Эволюция температурных полей в материалах с ЭПФ // Вестник ТГУ. Сер. Естеств. и техн. науки. Тамбов, 1998. Т.3. Вып.3. С.277.
5. Материалы с эффектом памяти формы. Справ. Изд./ Под ред. Лихачева В.А.-Т.2 - СПб: Изд-во НИИХ СПбГУ. 1998. 374с.
6. Волков А.Е., Евард М.Е., Лагоудас Д., Миллер Д., Старосельцева Е.А. Влияние пластической деформации на эффект обратимой памяти формы // Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов: Сб. докл. / XXXV семинар «Актуальные проблемы прочности». Псков. 1999. Часть II. С. 326-329.