

ПРИМЕНЕНИЕ ЭПФ В ПРОИЗВОДСТВЕ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Вьюненко Ю.Н.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург
ООО «Оптимикст Лтд», Санкт-Петербург, Россия*

Для решения ряда задач по изготовлению спецодежды возникла необходимость в производстве слоистых материалов, в которых ткань, кожа или трикотаж чередуются со слоями вязкого пленочного материала. Традиционная технология заключалась в формировании указанных «сэндвичей» под воздействием температуры и механических усилий, сжимающих исходные материалы. Усилия создавались за счет грузов, установленных в печи на пакете подготовленных к технологическому процессу заготовок. Время получения слоистого материала уменьшалось по мере роста температуры и сжимающего усилия. Однако ограничение по температуре определяло процесс деструкции пленки, начинающийся при 393 К, а конструкция печи задавала предел по величине усилия, создаваемого стальными «блинами». Максимум возможной нагрузки составлял примерно 200 Н. При этом грузы занимали половину объема печи. Использование ЭПФ могло быть целесообразным только в случае получения более высокого уровня сжимающих усилий и более рационального использования объема печи для повышения производительности технологического процесса.

Опыт создания силовых устройств [1] показал возможность достижения усилий в 300 Н и более устройствами, использующими проволоку из сплава TiNi диаметром 5 мм. Однако трехмерная конструкция силового элемента была достаточно сложной в изготовлении, занимала довольно большой объем, и в ее эксплуатации возникали проблемы, связанные с искажением формы при термоциклировании. Поэтому для поставленной задачи конструкция силового элемента в [1] оказалась малоприменимой.

В рамках математической модели механизма остаточных напряжений [2] была проведена оценка масштабного фактора на степень восстановления формы в результате развития ЭПФ. Решали задачу о восстановлении формы изогнутой пластины. Полагали, что при деформировании реализуются условия идеального изгиба. Максимальная деформация, достигаемая на поверхности пластины, всегда принималась равной 0,02, при деформационном пределе упругости $\epsilon_y = 0,01$. Толщина пластины варьировалась от 1 до 24 мм.

Эволюция температурного поля в пластине при равномерном нагреве поверхности со скоростью 0,05 К/сек определяли уравнением теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \Delta u,$$

где u – температура, t – время, ρ – плотность материала, λ – коэффициент теплопроводности, c – теплоемкость. Теплоемкость материалов с ЭПФ зависит от температуры $c = c(u)$. Для проведения расчетов было принято считать c равным c_0 – постоянной величиной за пределами интервала температур превращения $[A_s, A_f]$, а при изменении u в пределах указанного диапазона была принята зависимость:

$$c(u) = c_0 + c_1 \frac{(u - A_f)(u - A_s)}{(A_f - A_s)^2},$$

где c_1 – константа.

Радиус кривизны пластины определяли из условия равновесия моментов остаточных напряжений:

$$\int_S \sigma(r) r dS = 0,$$

где $\sigma(r)$ – напряжения в слое на расстоянии r от нейтральной плоскости, S – поперечное сечение пластины. Считая, что развитие пластической деформации идет по закону пластического течения, было получено, что радиус кривизны пластины R_x вычисляется по формуле:

$$R_x = \frac{\int_0^{r_0} E(u) r^2 dr}{\int_{r_y}^{r_0} E(u) r \left(\frac{r}{R_0} - \varepsilon_y \right) dr},$$

где r_0 – полутолщина пластины, R_0 – радиус оправки деформирования, r_y – граница зоны чисто упругой деформации, $E(u)$ – модуль Юнга, зависящий от температуры.

Аппроксимируя температурную зависимость модуля Юнга следующими соотношениями:

$$E(u) = \begin{cases} E_M, & \text{при } u < A_s \\ E_M \frac{A_f + A_s - 2u}{A_f - A_s}, & \text{при } A_s \leq u \leq \frac{A_f + A_s}{2} \\ E_A \frac{2u - A_f - A_s}{A_f - A_s}, & \text{при } \frac{A_f + A_s}{2} \leq u \leq A_f \\ E_A, & \text{при } u > A_f \end{cases}$$

где E_M и E_A – модули Юнга мартенситного и аустенитного состояний материала, соответственно, получали систему уравнений, позволяющую, учитывая граничные и начальные условия, рассчитывать изменение радиуса кривизны R_x при нагреве с переходом интервала $[A_s, A_f]$. Для этих расчетов значения физических констант материала были выбраны близкими константам эквипроцентного сплава TiNi. Результаты расчетов приведены на рис. 1.

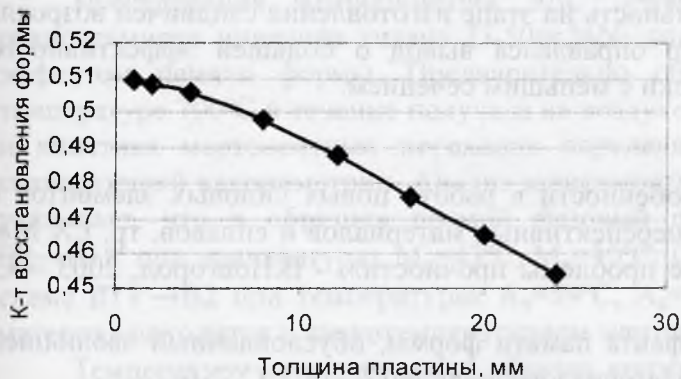


Рис. 1. Влияние масштабного фактора на степень восстановления формы.

Коэффициент восстановления формы с ростом толщины пластины снижается. Отсюда было сделано предположение, что силовые элементы, имеющие малое поперечное сечение, окажутся более эффективными. При этом они должны развивать достаточно большие усилия. Поэтому разработанные конструкции генераторов усилий имеют кольцевую или эллиптическую форму и содержат не-

сколько витков [3]. Диаметр и количество витков варьируются в зависимости от поставленной технической задачи.

Устройство для получения «сэндвичей» (рис.2) представляет из себя прямоугольную пластину-основание с четырьмя стойками, которые одновременно являются направляющими для перемещения второй подвижной пластины, располагающейся параллельно основанию. Между пластинами размещаются заготовки для получения слоистого материала. На специальных выступах указанных пластин размещаются два силовых элемента, предварительно продеформированных в мартенситном состоянии.

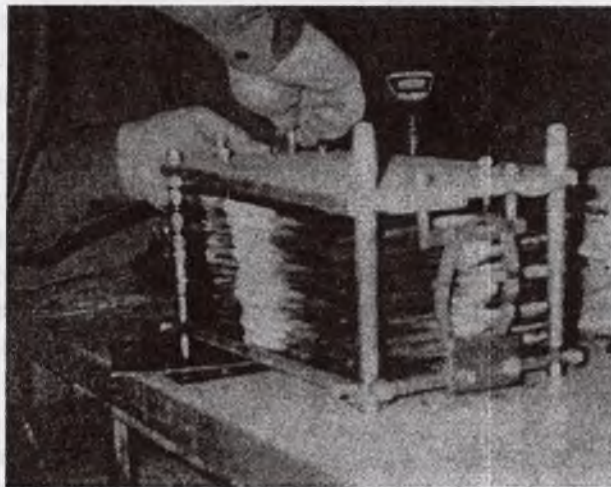


Рис. 2. Устройство «ШеР» для получения слоистых материалов

При помещении устройства (получившего наименование «ШеР») с заготовками для сэндвичей в печь нагрев силовых элементов, изготовленных из сплава TiNi, вызывает развитие эффекта памяти формы. Металлические «мышцы» стягивают параллельные пластины, сжимая заготовки. Усилия, развиваемые каждым из генераторов усилий, как показали дополнительные исследования, могут превышать 500 Н. Поэтому длительность технологического процесса удалось сократить в 1,5-2 раза. Одновременно тридцатиграммовые силовые элементы, изготовленные из проволоки диаметром 2 мм, позволили увеличить вдвое количество помещаемых в печь заготовок.

Таким образом, производительность на этапе изготовления сэндвичей возросла в 3-4 раза. Отметим также, что оправдался вывод о большей эффективности металлических «мышц» из проволоки с меньшим сечением.

Список литературы

1. Ю.Н.Вьюненко. Некоторые особенности в работе новых силовых элементов с ЭПФ. // Структура и свойства перспективных материалов и сплавов, тр. LX Международ. семинара «Актуальные проблемы прочности». - В.Новгород, 2003 – С. 48-49
2. Вьюненко Ю.Н. Механизм эффекта памяти формы, обусловленный эволюцией поля остаточных напряжений. *Материаловедение.* №12, 2003, С. 2-6.
3. Вьюненко Ю.Н. Математическое моделирование деформационных процессов и опыт технологического применения ЭПФ. // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*, 2010. – №3. – С. 28-31.