

3. Ревяко, М.М. Тепломассоперенос при ротационном формовании / М.М. Ревяко, Е.З. Хрол // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 2009. – Т. 14, №1. – С. 78–82.
4. Комаров, Г.В. Соединение деталей из полимерных материалов / Г.В. Комаров. – СПб.: Профессия, 2006. – 592 с.
5. Хрол, Е.З. Моделирование вращения формующего инструмента при ротационном формовании / Е.З. Хрол // *Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы Республиканской научно-технической конф. молодых ученых, Гомель, 5–7 октября 2010 г. / ИММС НАН Беларуси.* – Гомель, 2010. – С. 133–135.
6. Хрол, Е.З. Моделирование теплопереноса при ротационном формовании / Е.З. Хрол // *Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: материалы IV гомельской региональной конф. молодых ученых, Гомель, 23–24 сентября 2008 г. / ИММС НАН Беларуси.* – Гомель, 2008. – С. 183–184.

### **О ЗАДАЧЕ ИЗГИБА БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ С ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

**Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл.**

*Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Беларусь,  
sspryakhin@yandex.by, jr@tut.by*

В биметаллической пластине из стали и сплава с памятью формы (СПФ) сочетаются материалы с разными типами деформации. Для эффективности применения подобных структур необходимы моделирование их поведения в условиях изгиба, разгрузки и восстановления формы. В работе [1] излагались результаты моделирования плоского неупругого деформационного поведения биметаллической пластины, элементы которой состоят из СПФ и упругопластической стали. Моделировались стадии термомеханического нагружения: цикл механического нагружения, в котором в изотермических условиях осуществляется изгиб самоуравновешенной торцевой нагрузкой с последующим снятием нагрузки, и температурный цикл восстановления формы в процессах нагрев-охлаждение. Примечательными в данной работе являются попытка учета влияния нелинейности материалов: как СПФ, так и стали, и изящная схема пошагового интегрирования интегро-дифференциальных уравнений. Однако ценность и достоверность результатов и методики самой модели снижены тем, что в их основу заложены уравнения, подразумевающие линейность распределений напряжения по всей толщине каждого из элементов пластины: из СПФ и упругопластической стали. Это не является обоснованным, и противоречит результатам как для СПФ [2], так и для упругопластического материала [3].

Мы предлагаем подход, позволяющий выполнять численный расчет напряжений в биметаллической пластине для данной задачи, не задавая а priori тип их распределений. Поясним суть подхода на примере только стадии нагружения.

Схема нагружения объекта показана на рисунке 1. Подразумеваем в модельном объекте перед нагружением нулевыми начальные значения распределений деформаций, напряжения, внутренней переменной, характеризующей фазовое состояние материала СПФ, и пластических деформаций стали.

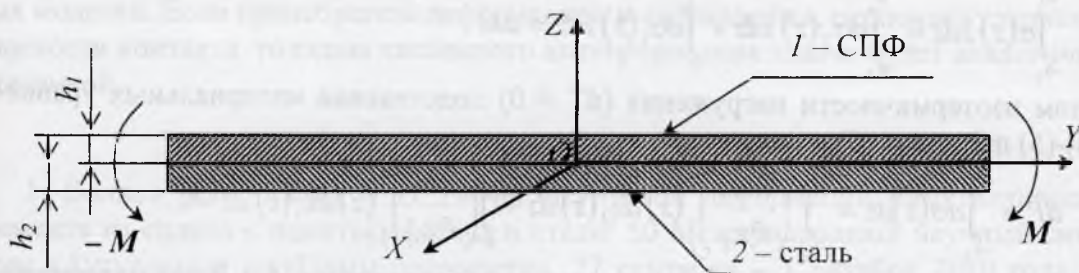


Рис 1. Изгиб биметаллической пластины самоуравновешенной нагрузкой.

На основании гипотезы плоских сечений выпишем линейный закон распределений продольной компоненты деформации по толщине пластины

$$\varepsilon_y(z) = A_y z + B_y, \quad -h_2 \leq z \leq h_2, \quad (1)$$

где параметры распределения  $A_y$  и  $B_y$  изменяются во времени при монотонном нарастании момента  $M = M_x$ .

Удаленные от торцов длиномерного объекта сечения рассматриваются как равноправные, в которых поперечные напряжения удовлетворяют условиям равновесия

$$P_y = \int_{-h_2}^{h_1} \sigma_y(z) dz = 0, \quad (2)$$

$$M_x = \int_{-h_2}^{h_1} \sigma_y(z) z dz \neq 0. \quad (3)$$

В задаче фигурируют только продольные компоненты напряжения, поэтому далее в нижних индексах указываем только индексы 1 и 2, отвечающие материалам верхнего и нижнего элементов пластины.

В разработанной нами модели поведения материала определено уравнение связи между дифференциалами напряжения, деформации и температуры вида:

$$d\sigma_1 = \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T d\varepsilon_1 + \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial T} \right)_\varepsilon dT, \quad (4)$$

где описан закон связи частных производных в (4) с текущим состоянием материала: напряжением, температурой, внутренней переменной. При однокоординатной нагрузке удобно использовать явные аналитические выражения одномерного процесса из [4]. Аналогичную связь определяем и для стали из экспериментальных характеристик упрочнения упругопластического элемента и данных термического расширения.

$$d\sigma_2 = \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T d\varepsilon_2 + \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial T} \right)_\varepsilon dT. \quad (5)$$

Расчет эволюции распределения деформации и напряжения базируется на пошаговой численной процедуре, в которой дифференциалу изменения нагрузки – момента  $dM$  в уравнениях (2)-(3) дифференциалы напряжений  $d\sigma_1$  и  $d\sigma_2$

$$dP = \int_{-h_2}^{h_1} d\sigma(z) dz = \int_{-h_2}^0 d\sigma_2(z) dz + \int_0^{h_1} d\sigma_1(z) dz = 0, \quad (6)$$



$$\int_{-h_2}^{h_1} \sigma(z) z dz = \int_{-h_2}^0 d\sigma_2(z) z dz + \int_0^{h_1} d\sigma_1(z) z dz = dM. \quad (7)$$

С учетом изотермичности нагружения ( $dT \equiv 0$ ) подстановка материальных уравнений (4)-(5) приводит (6) к виду

$$dP = \int_{-h_2}^{h_1} d\sigma(z) dz = \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T(z) d\varepsilon_2(z) dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T(z) d\varepsilon_1(z) dz = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (1) с общими параметрами распределения  $A$  и  $B$  для материалов 1 и 2 следуют дифференциальные соотношения

$$d\varepsilon_1(z) = dAz + dB, \quad d\varepsilon_2(z) = dAz + dB. \quad (9)$$

Подставив (9) в (8) и учитывая, что в текущем состоянии параметры  $A$  и  $B$  не являются функциями  $z$ , приводим уравнение (8) к виду

$$dA \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T(z) z dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T(z) z dz \right] + dB \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T(z) dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T(z) dz \right] = 0. \quad (10)$$

Аналогичным образом из уравнения (3) можно получить уравнение

$$dA \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T(z) z^2 dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T(z) z^2 dz \right] + dB \left[ \int_{-h_2}^0 \left( \frac{\partial \sigma_2}{\partial \varepsilon_2} \right)_T(z) z dz + \int_0^{h_1} \left( \frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \right)_T(z) z dz \right] = dM. \quad (11)$$

Систему двух уравнений (10) и (11) можно рассматривать как линейную, в которой неизвестными являются два дифференциала параметров  $A$  и  $B$ . Коэффициенты этой системы (выражения в квадратных скобках) являются известными величинами, поскольку численно рассчитываются для текущего состояния, исходя из моделей материалов.

Эта система является ключевой в схеме пошагового расчета модифицирования состояния, обусловленного приращением момента  $M$ . В начале шага – расчет по этой системе модифицированных  $A$  и  $B$ . Далее – расчет деформаций по (1), расчет напряжений по (5)-(6), расчет внутренней переменной и пластической деформации (согласно моделям материалов). Далее переходим к следующему шагу приращения  $M$ .

Аналогичный подход можно также использовать для анализа простого изгиба в рамках физически более реальной модели процесса для тонкой пластины, в которой учитывались бы деформационные процессы, возникающие и в плоскости перпендикулярной плоскости изгиба. Описание такой модели дополняется уравнением, предполагающим плоское деформирование в поперечном изгибу направлении,

$$\varepsilon_x(z) = A_x z + B_x, \quad -h_2 \leq z \leq h_2, \quad (12)$$

и уравнениями равновесия поперечного сечения

$$P_x = \int_{-h_2}^{h_1} \sigma_x(z) dz = 0, \quad M_y = \int_{-h_2}^{h_1} \sigma_x(z) z dz \equiv 0. \quad (13)$$

Уравнения связей между дифференциалами компонентов напряжения, деформации, а также температур, аналогов (4)-(5), необходимо строить, исходя из пространствен-

ных моделей. Если пренебрегать деформацией в направлении, перпендикулярном плоскости контакта, то схема численного интегрирования задачи будет аналогична описанной.

#### Литература

1. Волков А.Е., Евард М.Е. Расчет неупругой деформации биметаллического элемента из сплава с памятью формы и стали/ 50 Международный научный симпозиум «Актуальные проблемы прочности». 27 сентября – 1 октября 2010 года. Витебск, Беларусь: сборник материалов. Ч.1. /УО «ВГТУ» – Витебск, 2010 – 218 с. С. 69-72.
2. Вьюненко Ю.Н. Эффект памяти формы, инициируемый механизмом остаточных напряжений// Глава 14. с. 384-399 в книге «Перспективные технологии и методы контроля»// С.П. Беляев и др. – Витебск: изд-во УО «ВГТУ», 2009. – 521 с.
3. Ильющин А.А. Пластичность. Часть первая. Упругопластические деформации. – М., Л.: ОГИЗ Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1948. – 376 с.
4. Пряхин С.С., Рубаник В.В. мл. Математические соотношения в модели термомеханического поведения сплавов с памятью формы. / Глава 13. стр. 360-383. в книге «Перспективные технологии и методы контроля»// С.П. Беляев и др. – Витебск: изд-во УО «ВГТУ», 2009. – 521 с.

### ОСОБЕННОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ШТАМПОВОЙ ОСНАСТКИ ПУТЁМ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ ОСНОВЫ

Хвисевич В.М.<sup>1</sup>, Онысько С.Р.<sup>1</sup>, Чекан Н.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> БрГТУ, г. Брест, Беларусь, [vmhvisевич@bstu.by](mailto:vmhvisевич@bstu.by)

<sup>2</sup> ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, [pec@bas-net.by](mailto:pec@bas-net.by)

#### Введение

В последние годы основой развития машиностроительной отрасли является создание и получение конструкционных материалов, отвечающих большому количеству требований современной индустрии и новой техники. Одним из основных факторов эффективности производства является повышение работоспособности инструмента за счет увеличения его стойкости и надежности [1].

При обработке металлов давлением применяют соответствующие инструменты – штампы, пуансоны и т. д., деформирующие металл. Штамповые инструменты работают под воздействием сложного комплекса факторов – высокие температуры, большие контактные напряжения, активные физико-механические процессы, а это, в основном, и определяет интенсивный износ контактных (рабочих) поверхностей инструмента [2].

В последнее время большое внимание уделяется покрытиям на основе циркония (Zr), это связано с тем, данные покрытия обеспечивают лучшую износ- и коррозионностойкость по сравнению с базовыми титаносодержащими покрытиями. Также в мировой практике производства режущего инструмента разрабатываются составы износостойких покрытий на основе композиционно-многослойного принципа,