

УДК 621.791.1+517.958

Е.В. Карпович, С.А. Чернецкий, И.И. Карпович
**КОМПЛЕКСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ В ЗАДАЧАХ
ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧНОСТИ**

Аннотация. В работе предлагается способ обезразмеривания полной системы уравнений термоупругопластической задачи для многослойных тел. Система уравнений полностью сохраняет свой вид, но появляется один безразмерный комплексный коэффициент, диапазон изменения которого определен в зависимости от температуры для разнообразных металлических материалов. Это позволяет на основе расчетов выполненных в безразмерном виде выбрать наиболее оптимальный вариант геометрических параметров конструкции и комплекс материалов с требуемыми физико-механическими свойствами.

Современные механизмы и машины, применяемые в различных отраслях промышленности, содержат большое количество неподвижных неразъемных многослойных металлоконструкций. Большинство из них может быть отнесено к одной из трех групп: соединения с силовым замыканием, относительная неподвижность деталей в которых обеспечивается механическими силами, возникающими в результате пластических деформаций; соединения с геометрическим замыканием, осуществляемым благодаря форме сопрягаемых деталей, и соединения, в основе которых лежат молекулярные силы: сцепления или адгезия. Наиболее распространенными методами сборки являются создание гарантированного натяга, сварка, пайка, склеивание и клепка [1].

Способ получения соединений зависит от их назначения, условий работы, требуемых эксплуатационных характеристик, таких как прочность, в некоторых случаях плотность, герметичность.

Каждый из перечисленных методов предполагает силовое, температурное или совместное их воздействие на собираемые детали. Это приводит к возникновению различного рода деформаций еще на этапе изготовления. Их величина определяет характеристики будущего соединения. Особенно важно контролировать напряженно-деформированное соединение деталей в соединениях из разнородных материалов, которые применяются в ответственных конструкциях

© Карпович Е.В., Чернецкий С.А., Карпович И.И., 2010

энергетических аппаратов, криогенной, ракетной, авиационной и военной техники и работают при различных температурах и давлениях.

Требуемое качество продукции закладывается еще при проектировании, обеспечивается правильностью и точностью выполнения этапов технологического процесса сборки и в значительной степени зависит от методик расчета, анализа и прогнозирования на всех стадиях изготовления и эксплуатации изделия.

Наиболее удобно при этом использовать комплексные показатели [2], которые позволяют исследовать влияние группы параметров на результат. Единый коэффициент включает в себя широкий диапазон значений каждого параметра и, следовательно, рассматриваемых конструкций.

При расчете напряженно-деформированного состояния деталей приходится рассматривать величины различных порядков. Величины перемещений и деформаций малы по сравнению с единицей, в то время как значения напряжений на несколько порядков больше. Арифметические операции с величинами разных порядков из-за ограниченности разрядной сетки ЭВМ зачастую приводят к значительным погрешностям. Для минимизации влияния этих негативных факторов, в задачах определения напряженно-деформированного состояния многослойной конструкции, состоящей из n толстостенных цилиндров, обезразмеривание можно произвести следующим образом (в цилиндрической системе координат) [3]:

$$r' = \frac{r}{a}; \quad z' = \frac{z}{a}; \quad u'_i = \frac{u_i \cdot \mu^*}{a\sigma^*}; \quad \sigma'_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma^*}; \quad \varepsilon'_{ij} = \frac{\varepsilon_{ij} \cdot \mu^*}{\sigma^*}; \quad T' = \frac{T}{T^*}; \quad \alpha' = \frac{\alpha}{\alpha^*} \quad (1)$$

Здесь r, z – текущие координаты, u_i ; ε_{ij} ; σ_{ij} – компоненты вектора перемещений, тензоров деформаций и напряжений соответственно, T – температура тела, α – коэффициент линейного расширения. Штрихами обозначены безразмерные параметры, a – характерный размер тела (например, толщина стенки цилиндра), σ^* , μ^* , T^* , α^* – характерные величины напряжений, модуля сдвига, температуры и коэффициента температурного линейного расширения соответственно. Обычно это предел текучести материала, модуль

сдвига материала, коэффициент температурного линейного расширения одного из слоев и начальная температура тела.

Нетрудно показать, что такое обезразмеривание полной системы уравнений термоупругопластической задачи для многослойных тел [3, 4] не видоизменяет эту систему. Относительно безразмерных переменных она полностью сохраняет свой вид за исключением одного температурного слагаемого в физических уравнениях связи между напряжениями и деформациями, где появляется дополнительный безразмерный комплексный коэффициент $\frac{\mu_*}{\sigma_*} \cdot \alpha_* T_*$. Физический смысл этого коэффициента – масштабный множитель, показывающий соотношение между температурной $\alpha_* T_*$ и «механической» $\frac{\mu_*}{\sigma_*}$ деформациями.

Поэтому представляет практический интерес исследование изменения этого множителя для реальных материалов при различной температуре. Пусть μ_* – модуль сдвига материала, σ_* – предел текучести материала. Построение зависимостей коэффициентов $K_1 = \alpha_* \cdot T_*$, $K_2 = \frac{\mu_*}{\sigma_*}$ и $K_3 = \frac{\mu_*}{\sigma_*} \cdot \alpha_* T_*$ от температуры выполнено, используя экспериментальные данные о теплофизических и физико-механических свойствах различных материалов [5 – 8].

Изменение коэффициента $K_1 = \alpha_* \cdot T_*$ от соотношения $\frac{T_*}{T_{пл}}$ ($T_{пл}$ – температура плавления материала) показано на рис. 1, где видно, что с повышением температуры T_* эта зависимость близка к линейной и по характеру аналогична изменению коэффициента температурного расширения материала от температуры [5, 8].

Диапазон изменения коэффициента K_1 для рассматриваемой группы металлических материалов с увеличением отношения $\frac{T_*}{T_{пл}}$ расширяется, но не превосходит величины 0,02 при $\frac{T_*}{T_{пл}} = 1$. Можно предположить, что такой диапазон и характер изменения $K_1 \left(\frac{T_*}{T_{пл}} \right)$ будет иметь место для большинства материалов.

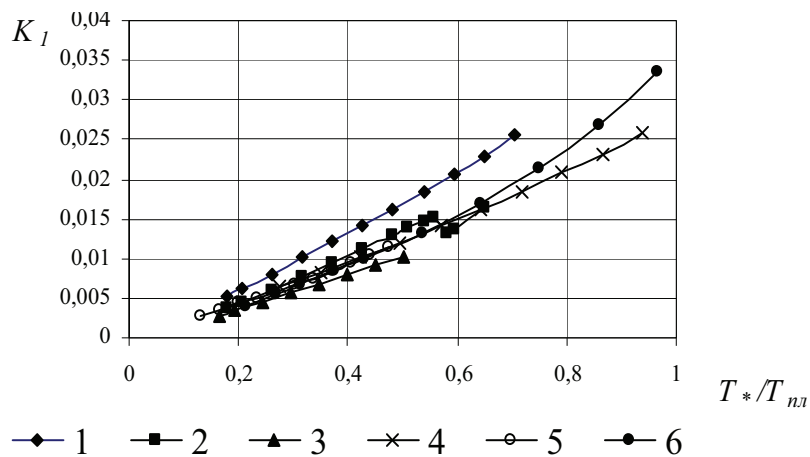


Рисунок 1 – Экспериментальная зависимость $K_1 \left(\frac{T_*}{T_{nl}} \right)$:

1 – Сталь 12Х18Н10Т; 2 – Сталь 45; 3 – ВТ6;
4 – латунь ЛК-80-3; 5 – Мо; 6 – Al

Изменение коэффициента $K_2 = \frac{\mu_*}{\sigma_*}$ для конкретного материала

с увеличением отношения $\frac{T_*}{T_{nl}}$ происходит по экспоненциальной зависимости (рис. 2), что согласуется с выводами в работе [8]. Диапазон изменения K_2 для различных материалов с увеличением температуры также расширяется (рис. 2).

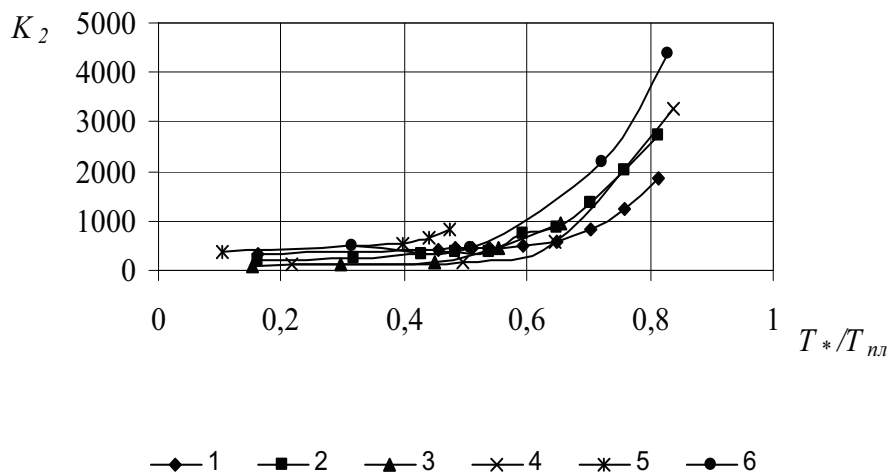


Рисунок 2 – Экспериментальная зависимость $K_2 \left(\frac{T_*}{T_{nl}} \right)$:

1 – Сталь 12Х18Н10Т; 2 – Сталь 45; 3 – ВТ6;
4 – латунь ЛК-80-3; 5 – Мо; 6 – Al

Диапазон изменения комплексного коэффициента K_3 с увеличением температуры расширяется до очень больших пределов (рис. 3). Но при температурах, близких к температуре плавления, для всех материалов наблюдается асимптотическое приближение кривых к прямой $\frac{T_*}{T_{пл}} = 0,9$. Это связано с тем, что при температурах близких к $T_{пл}$ предел текучести у всех материалов снижается практически до нуля [6 - 8].

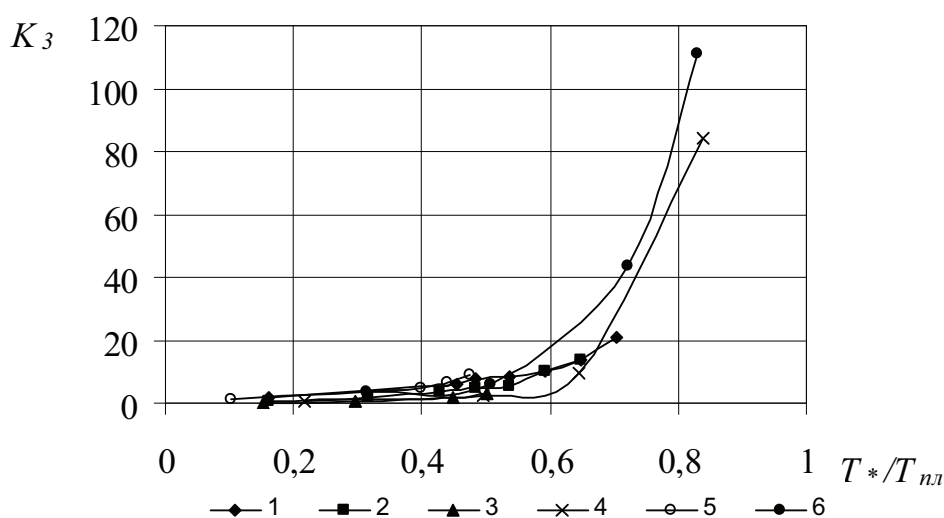


Рисунок 3 – Экспериментальная зависимость $K_3 \left(\frac{T_*}{T_{пл}} \right)$:

1 – Сталь 12Х18Н10Т; 2 – Сталь 45; 3 – ВТ6;
4 – латунь ЛК-80-3; 5 – Мо; 6 – Al

Математический анализ эмпирических зависимостей, полученных на основе экспериментальных данных, позволил определить максимальные и минимальные значения коэффициента K_3 в зависимости от отношения $\frac{T_*}{T_{пл}}$ (табл. 1).

Таблица 1

Максимальные и минимальные значения коэффициента K_3

Значения коэффициента K_3	Величина отношения $\frac{T_*}{T_{пл}}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,82	0,91
максимальные	1	2	3,35	5	11	24	53	100	110	160,8
минимальные	0	0	1	1	2,23	5,6	18	54	65	153,4

На графике (рис. 4), построенном по данным таблицы 1, выделяется область изменения комплексного коэффициента K_3 , которая зависит от температуры и является наибольшей при $T = (0,50 \dots 0,82)T_{нл}$ (рис. 3).

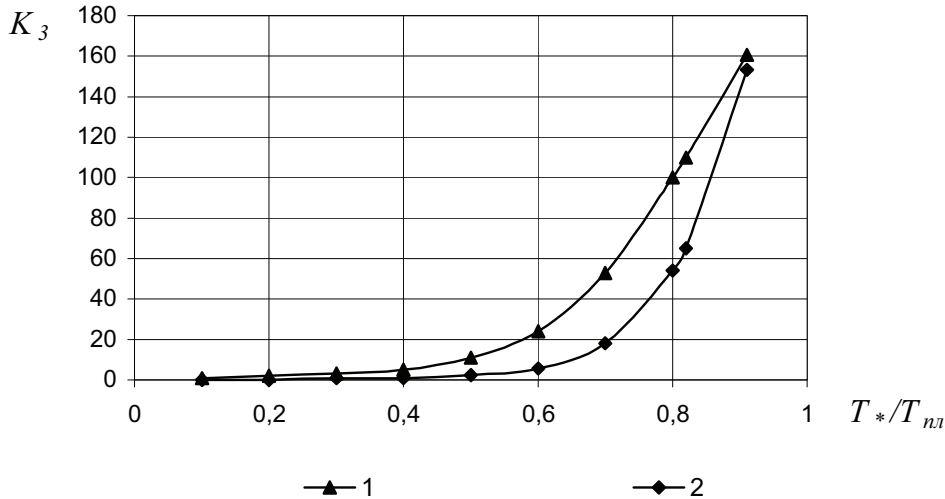


Рисунок 4 – Диапазон значений коэффициента K_3 в зависимости от отношения $\frac{T^*}{T_{нл}}$: 1 – максимальные значения коэффициента K_3 ; 2 – минимальные значения коэффициента K_3

Результаты, представленные в таблице 1 и на рисунке 4, позволяют определить диапазон значений комплексного параметра K_3 и выполнить решение безразмерной задачи при заданной начальной температуре тела $T = T^*$ с требуемым шагом. Любое значение из рассматриваемого диапазона включает два безразмерных и четыре конкретных размерных параметра, каждый из которых может определяться в зависимости от других.

Определив диапазоны изменения безразмерных коэффициентов для самых различных материалов и температур, можно осуществлять расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций в безразмерном виде. Их результаты, позволят выбрать наиболее оптимальный вариант конструкции для широкого диапазона геометрических и физико-механических свойств материалов. Такой подход позволит существенно сократить объем численных расчетов и увеличить их точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков М. П. Основы технологии сборки машин и механизмов – М.: Машиностроение, 1969. – 632 с.
2. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике – М.: Радио и связь, 1984. – 287 с.
3. Чернецкий С.А. Вариационная постановка термоупруго-пластических задач для слоистых тел при наличии трения // Сб. научных трудов Вопросы прочности и пластичности. 1989. – С. 43-49.
4. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Упавнення и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – К.: Наукова думка, 1981. – 496 с.
5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник / Под ред. Б. Е. Неймарк. – Л.: Энергия, 1967. – 240 с
6. Структура и свойства металлов и сплавов, справочник. / Л. В. Тихонов, В. А. Кононенко, Г. И. Прокопенко, В. А. Рафаловский. // Механические свойства металлов и сплавов. – К.: Наукова думка, 1986. – 558 с.
7. Бобылев А. В. Механические и технологические свойства металлов: Справ. изд. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1987 г. – 208 с.
8. Карпович Е. В. Определение закономерностей влияния высокой температуры на физико-механические свойства металлов и сплавов // Системні технології. Регіональний міжвузівський зб. наукових праць. – Випуск 3 (26). – Днепропетровск, 2003. – С. 127-134.

Получено 22.10.2010г.