

**Влияние материала оснастки на конечную форму изделий из полимерного композита**

**Козлов Михаил Владимирович**

*Аспирант*

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
Механико-математический факультет, Кафедра механики композитов, Москва, Россия  
*E-mail: my\_skyline@mail.ru*

Проводится теоретическое сравнение известных механических моделей, служащих для описания процесса отверждения композита с термореактивным связующим. Демонстрируется аппроксимация экспериментальной зависимости модуля упругости связующего от температуры в различных моделях. Определяющие соотношения моделей ШИЛЕ и Сванберга реализованы в виде собственных вычислительных модулей для пакета конечно-элементного анализа. Выполнено моделирование отверждения участка композиционного лонжерона с учетом тела оснастки. Необходимые свойства композита получены с помощью метода осреднения. Особенностью проведенного моделирования является учет механического и теплового контакта между изделием и оснасткой с изменением состояния контакта в процессе решения. Предложена модель механического взаимодействия, рассматривающая переход от проскальзывания к прилипанию в момент гелирования связующего. Моделирование нахождения заготовки в печи осуществлено заданием условий конвекции на суммарной свободной поверхности оснастки и изделия. Для рассматриваемого цикла отверждения получена зависимость относительной ошибки решения от величины используемого шага по времени. На основании нее произведен выбор оптимального значения шага с целью минимизации вычислительных затрат и сохранения приемлемой точности решения. Необходимость данного исследования обусловлена большой длительностью моделируемого процесса. Приведены результаты численного моделирования отверждения участка композиционного лонжерона на оснастках из стали, инвара, алюминия и композита. Получены и проанализированы различные виды возникающих отклонений моделируемой конструкции от заданной формы. Показано, что данные отклонения обусловлены как усадкой связующего в процессе полимеризации, так и эффектом теплового расширения оснастки, который при этом существенно сказывается на качестве изготавливаемого композита. Для материалов оснастки с большими коэффициентами теплового расширения были получены более сильные искажения формы готовой конструкции по сравнению с материалами с малыми коэффициентами теплового расширения. Показано, что оснастки из инвара и композита показывают лучший результат с точки зрения качества производимого на них изделия.

**Источники и литература**

- 1) M. W. Nielsen et al. Experimental determination and numerical modelling of process induced strains and residual stresses in thick glass/epoxy laminate. ECCM15, Italy, 24-28 June 2012.
- 2) J.M. Svanberg, J.A. Holmberg. Prediction of shape, Part I: FE-implementation of a path dependent constitutive model // Composites: Part A. V. 35. 2004. P. 711–721.
- 3) P. Causse, E. Ruiz, F. Trochu. Spring-in behavior of curved composites manufactured by Flexible Injection // Composites: Part A. V. 43. 2012. P. 1901–1913.