

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ УПРУГИХ ВНУТРЕННИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ВОЛОКНИСТОМ КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ МЕТОДАМИ ЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ РАСТУЩИХ ТЕЛ

Паршин Д.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Ключевые слова: многослойная укладка, композит одноосной структуры, высокопрочные волокна, преднатяжение, технологические напряжения, неклассическая модель механики.

Аннотация. Рассмотрено формирование волокнистого композита путем укладки на цилиндрическую основу большого числа тонких монослоев с ориентацией волокон нормально к образующей при их способности сохранять упругость при создаваемых преднатяжениях. Разработана неклассическая математическая модель механики для анализа процесса развития технологических напряжений в таком материале. Получены замкнутые разрешающие соотношения. Приведены результаты числовых расчетов.

MODELING OF THE PROCESS OF DEVELOPMENT OF ELASTIC INTERNAL TECHNOLOGICAL STRESSES IN A FIBROUS COMPOSITE MATERIAL BY METHODS OF LINEAR MECHANICS OF GROWING SOLIDS

Parshin D.A.

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow

Keywords: multilayer laying, composite of uniaxial structure, high-strength fibers, pre-tension, technological stresses, non-classical model of mechanics.

Abstract. The formation of a fibrous composite by laying a large number of thin monolayers on a cylindrical base is considered. The orientation of the fibers is normal to the base generatrix. The fibers are able to maintain elasticity under the created prestress. A non-classical mathematical model of mechanics is developed to analyze the process of technological stress development in such a material. Closed resolution relations are obtained. The results of numerical calculations are presented.

Исследование опирается на концепции механики растущего деформируемого твердого тела, апеллирующие к его особой кинематике. Они позволяют также учесть геометрические и силовые особенности взаимодействия отдельных монослоев материала, последовательно добавляемых к телу, с той частью поверхности последнего, к которой они присоединяются в процессе его роста. Некоторые важные результаты, полученные соответствующей отечественной научной школой в этой области механики, можно найти в работах, указанных, например, в библиографии к статье [1].

Ставится задача смоделировать процесс развития упругих внутренних напряжений в композиционном материале одноосной структуры, которые вызваны непосредственно его формированием методом многослойной укладки армированных монослоев материала на цилиндрическую основу. Толщина отдельного монослоя считается малой по отношению к радиусу основы, а внешний радиус готового композитного слоя – малым по отношению к его длине

в осевом направлении. Волокна укладываются в поперечной плоскости, а их продольные распределения не являются согласованными для различных монослоев. При оговоренных условиях распределение волокон по площади любого продольного осевого сечения готового композита можно воспринимать в достаточной мере хаотичным, а их количество на единицу площади этого сечения – достаточно большим, чтобы было допустимо моделировать упругие свойства композита трансверсально изотропными определяющими соотношениями с выделенным окружным направлением. Рассмотрение процесса ведется в пределах малой квазистатической деформации. С целью упрощения модели податливость основы не принимается во внимание, несмотря на то, что имеется принципиальная возможность ее учета.

Преднапряжение волокон учитывается в настоящей работе следующим образом. Пусть $F(r)$ – сила, с которой натягивается каждое волокно, армирующее добавляемый к композиту монослой радиуса r , $v(r)$ – усредненное по продольному размеру этого монослоя количество армирующих волокон на единицу его длины в осевом направлении, $h(r)$ – толщина данного монослоя. Тогда принимается, что дополнительный материал, включаемый в растущий композит в тот момент процесса роста, когда величина его внешнего радиуса достигла значения r , испытывает в окружном направлении действие предварительного напряжения величиной $\sigma_0(r) = v(r)F(r)/h(r)$.

В работе ставится эволюционная краевая задача, описывающая процесс развития напряженно-деформированного состояния формируемого композиционного материала в рамках разработанной модели механики, и строится точное аналитическое решение этой задачи. Согласно этому решению, в том числе, определяются скорости изменения напряжений в растущем композите, которые затем следует проинтегрировать по временной переменной, задавая в качестве начального условия в момент присоединения каждого монослоя величину $\sigma_0(r)$ для окружного напряжения и нулевое значение – для остальных компонент тензора напряжений. Получаемые в итоге замкнутые разрешающие соотношения позволяют, в частности: прогнозировать эволюцию величины контактного давления между цилиндрической основой и сформированным на ней слоем композиционного материала, что важно при контроле устойчивости, а также при оценке прочности и износа используемого оборудования [2, 3]; теоретически анализировать распределения остаточных напряжений в полученном материале после его отсоединения от основы; ставить задачи оптимизации моделируемого процесса создания композиционного материала по характеристикам приобретаемого им в этом процессе напряженного состояния. С помощью полученных соотношений в работе выполнены модельные числовые расчеты, в которых использованы имеющиеся экспериментальные данные об упругих свойствах однонаправленных волокнистых стеклопластиков [4]. В качестве иллюстрации результатов моделирования, на рисунке 1 представлено развитие распределения окружных напряжений по толщине постепенно формируемого композитного слоя. Тонкими линиями показаны эпюры напряжений в слое в процессе его формирования, толстой линией – в слое, достигшем окончательных размеров. Величина напряжения на переменной

внешней границе соответствует задаваемому значению предварительного напряжения σ_0 присоединяемого монослоя.

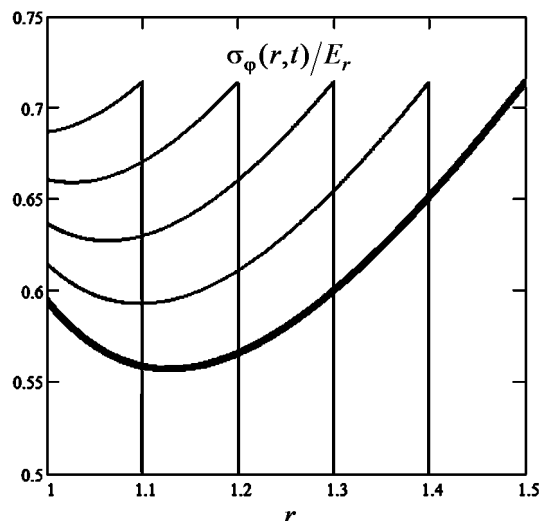


Рис. 1. Эволюция распределения окружных напряжений, отнесенных к трансверсальному модулю Юнга, по толщине формируемого слоя композиционного материала

Можем заметить, к примеру, что включение в состав формируемого слоя дополнительных монослоев приводит к монотонному уменьшению первоначальных напряжений в предыдущих монослоях, однако с течением времени вся развивающаяся эпюра напряжений перестает быть монотонной.

Финансирование. Работа выполнена по теме государственного задания (номер госрегистрации 124012500437-9).

Список литературы

1. Manzhirov A.V., Parshin D.A. Analytical solution of the mechanical problem on additive thickening of aging viscoelastic tapers under nonstationary longitudinal end forces // Engineering Letters. 2018, vol. 26, no. 2, pp. 267-275.
2. Kazakov K.E. Wear of elastic tube with nonuniform coating by rigid bush // E3S Web Conferences. 2020, vol. 162, p. 02002.
3. Kazakov K.E., Kurdina S.P. Interaction of viscoelastic tube with inner nonuniform coating of variable thickness and rigid cylindrical insert // Key Engineering Materials. 2021, vol. 894, pp. 67-71.
4. Ашкенази Е.К., Ганов Э.В. Анизотропия конструкционных материалов: Справочник / 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 247 с.

Сведения об авторе:

Паршин Дмитрий Александрович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела.