

Усилия разрушения образцов при сдвиге

Вид покрытия	Материал оснастки	Усилие разрушения при сдвиге, Н				
		1 сьем	2 сьем	3 сьем	4 сьем	5 сьем
ВСК-5	Металл	430	460	692	657	840
	Композит	353	613	650	1207	1250
СК-223	Металл	993	767	890	847	957
	Композит	783	673	–	876	1090
К-21	Металл	813	–	–	877	743
Release ALL-30	Металл	633	767	–	477	497
	Композит	867	927	1233	1037	890

Для сравнительного анализа изготовлены и испытаны образцы из стеклопластиковой панели, отформованной на выклеочной оснастке через разделитель из фторопластовой пленки. После испытания на сдвиг данные образцы показали среднее усилие разрушения 1390 Н.

Анализируя приведенные данные можно сделать вывод, что с увеличением количества съемов с обработанной антиадгезивами поверхности оснастки перенос антиадгезионных составов уменьшается для всех приведенных видов покрытий (так как усилие разрушения растет). Для формования панелей с гелкоутом (на основе ФПР-520) в качестве антиадгезионного покрытия оснастки лучше всего использовать фторопластовую водную суспензию Release ALL-30. Этот состав обеспечивает хорошую смачиваемость поверхности выклеочной оснастки гелкоутом равномерным по толщине слоем и тем самым позволяет получить хорошее качество его нанесения, а также гарантирует до 10 съемов отформованных панелей при незначительном переносе антиадгезива на их поверхность.

В.И. Постнов, К.Е. Никитин,  
О.Л. Бурхан, В.И. Петухов, В.Г. Орзаев

## ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ МЕТОДОМ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ПКМ В ПРОЦЕССЕ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В работе исследована возможность применения ультразвукового метода для контроля процессов формования полимерных композиционных материалов (ПКМ). Метод основан на измерении параметров ультразвуковых импульсов, прошедших через формируемый материал. Разработана и изготовлена лабораторная установка ИПФ-2003, позволяющая проводить исследование изменения вязкости связующего в ПКМ в процессе технологического формования изделий. Проведены исследования процессов формования угле- и стеклопластиков. Форма кривых затухания ультразвука позволяет фиксировать точки минимальной вязкости и гелеобразования полимерного связующего, а также степени его полимеризации. Применение установки показало ее высокую эффективность при отработке режимов формования ПКМ.

**Ключевые слова:** ультразвуковой метод.

Для обеспечения высокого качества деталей из полимерных композиционных материалов, на стадии их формования необходимо вести постоянный контроль за структурными превращениями материалов. Особенно это относится к вакуумному ав-

толкавному формованию ПКМ, качество структуры которого в значительной степени зависит от момента подачи избыточного давления в рабочую зону автоклава.

Так как в процессе отверждения ПКМ связующее переходит постепенно из жидкого в вязкотекучее состояние, затем в упругопластичное и стеклообразное состояния, структура ПКМ претерпевает значительные изменения. Поэтому для контроля процесса формования могут быть использованы методы, фиксирующие изменение физических характеристик материала. К наиболее известным методам относятся микроволновые, рентгеновские, оптические, электрические, акустические и ультразвуковые.

*Микроволновый* (от 0,5 ГГц до 1 ТГц) и *рентгенометрический* (свыше 1 ТГц) методы используются для оценки вязкости ПКМ в процессе нагрева прямым прохождением электромагнитной волны. Так как микроволновое излучение очень сильно взаимодействует с молекулами воды, то его можно применять для определения содержания влаги в ПКМ в процессе формования, что в свою очередь служит косвенным показателем степени отверждения связующего в ПКМ. При наличии свободных молекул воды, абсорбированной в ПКМ, облучение его микроволнами приводит к поглощению материалом энергии излучения и изменению как амплитуды, так и фазы проходящего и отраженного лучей.

*Электрические методы* применяются при оценке электрических свойств ПКМ. Они позволяют на протяжении всего технологического процесса формования изделия проводить непрерывный контроль изменения диэлектрической постоянной, тангенса угла диэлектрических потерь и проводимости. Однако данные методы неприменимы для ПКМ с проводящей матрицей.

Использование *ультразвуковых методов* заключается в прохождении механических колебаний ультразвуковой частоты (20 кГц – 20 МГц) через исследуемый материал ПКМ. По степени их затухания и скорости ультразвука можно давать оценку состояния исследуемого материала [1]. Ультразвуковые методы разделяются на *метод просвечивания*, когда ультразвук проходит сквозь материал, и *метод отражения*. Эти методы позволяют осуществлять доступ только с одной стороны формируемого материала, когда источник и приемник ультразвука совмещены в одном датчике. При изменении вязкости связующего по мере нагрева и последующей полимеризации происходит изменение затухания, скорости, фазы и формы ультразвуковых импульсов, которые также зависят от частоты ультразвука. Это дает возможность проводить спектральный анализ прошедшего или отраженного сигнала, существенно повышающий возможности контроля структурных изменений.

Ультразвуковые методы среди остальных методов контроля обладают наибольшей универсальностью. Они могут быть применены как для диэлектриков, так и для материалов с проводящей матрицей, где применение электрических методов невозможно или сильно затруднено. В отличие от остальных ультразвуковые методы экологически безопасны вследствие малой мощности ультразвука. Для формирования ультразвука и его приема могут быть использованы готовые технические решения. Кроме этого, при применении высокотемпературных пьезокерамических датчиков ультразвуковой метод может быть использован в производственных условиях, что позволяет следить за изменениями структуры материала на протяжении всего процесса формования. При этом датчики могут быть сравнительно легко встроены в технологические формы без нарушения структуры формируемой детали. По сравнению с другими известными методами ультразвуковые обладают наибольшей методологической простотой и универсальностью, позволяя непосредственно определять с помощью известных соотношений вязкоупругие характеристики материала по измеренным значениям скорости распространения и коэффициента затухания ультразвука.

Для исследования и отработки режимов формирования полимерных композиционных материалов была создана установка ИПФ-2003, представленная на рис. 1. Она состоит из трех каналов: температурно-регулируемого, толщиномера, ультразвукового измерительного.

Конструктивно установка выполнена в виде блока измерения и управления процессом нагрева и компьютера (см. рис. 1), блока формирования (см. рис. 1). В блоке формирования установлены титановые стержни, между торцами которых помещается формируемый образец ПКМ. Стержни и образец нагреваются двумя нагревательными элементами по программе от компьютера. На противоположных торцах стержней располагаются пьезодатчики, осуществляющие излучение и прием ультразвуковых сигналов. Над верхним стержнем располагается модуль измерения толщины образца. Измерение температуры производится датчиком, встроенным в верхний стержень у поверхности образца.



Рис. 1. Общий вид установки ИПФ-2003:  
1 – блок измерения и управления процессом нагрева и компьютер;  
2 – блок формирования

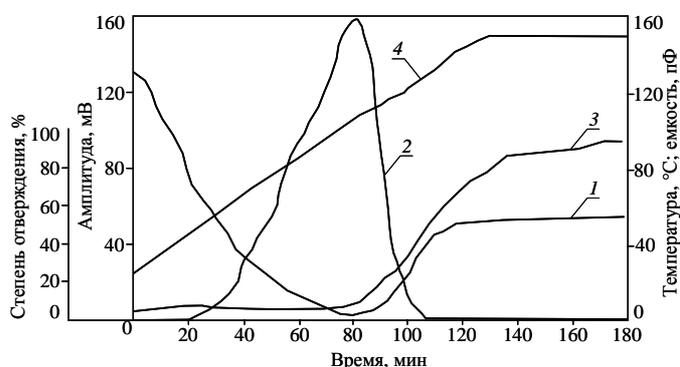


Рис. 2. Изменение амплитуды (1) прошедшего ультразвукового импульса, емкости (2) и степени отверждения (3) в зависимости от температуры (4) в процессе формирования стеклопластика на основе стеклоткани Т-15(П)-76 и связующего ФП-520

Программное обеспечение установки ИПФ предназначено для автоматизации процесса исследования кинетики отверждения ПКМ и представления результатов измерений в цифровом и графическом виде, а также для сохранения результатов после завершения процесса измерения.

Программное обеспечение позволяет:

- задавать в графическом виде температурно-временную зависимость (программу), по которой будет производиться процесс формирования исследуемого образца, причем заданную программу можно корректировать во время проведения измерений без остановки процесса и сохранять на жестком диске в папке «Программы» для дальнейшего использования;

- автоматически управлять процессом отверждения исследуемого образца по заданной программе с выводом в графическом и цифровом виде текущих значений температуры, толщины образца, затухания и скорости ультразвукового сигнала с обеспечением возможности печати полученных графиков текущих значений на принтере, не прерывая процесса измерения;

– автоматически сохранять результаты измерений на жестком диске в графическом виде в метафайле формата EMF в папке «DATA».

Для оценки объективности различных методов проведен анализ контроля процесса формования образца препрега на основе стеклоткани Т-15(П)-76 со связующим ФП-520. Одновременно проводился контроль изменения степени отверждения связующего емкостным методом.

Данные испытаний представлены графически на рис. 2.

Для препрега на основе стеклоткани Т-15(П)-76 и связующего ФП-520 нагрев проводился до 150°C с выдержкой при этой температуре не менее 1 ч.

На приведенных графиках (см. рис. 2) имеется точка, где наблюдается наибольшее затухание ультразвукового сигнала. В этот момент емкость имеет максимальное значение, что определяется наибольшим количеством подвижных диполей и, соответственно, максимальным значением диэлектрической проницаемости. Как известно, данному состоянию отвечает наибольшая текучесть связующего. Это подтверждается значениями максимального затухания ультразвука в момент минимальной вязкости связующего. При дальнейшем нагреве начинается процесс гелеобразования. За точку начала гелеобразования условно принимается состояние материала со степенью отверждения 15–20% [2]. Согласно приведенным графикам, данному состоянию отвечает точка перегиба на кривой амплитуды ультразвука.

Для получения качественной структуры изготавливаемых деталей необходимо подавать давление в рабочую зону только после того, как амплитуда ультразвука, прошедшего через связующее, достигнет точки минимального значения. В противном случае большая часть связующего будет выдавлена, и полученная деталь будет обладать пониженными прочностными характеристиками. Ситуация здесь, однако, осложняется тем, что точка минимальной амплитуды сопровождается сравнительно быстрым последующим наступлением стадии гелеобразования, где формирование пространственной сшивки молекул приводит к резкому росту вязкости и потере связующим текучести. Поэтому для обеспечения качественной структуры формируемых деталей давление следует подавать в промежутке между моментами достижения минимальной амплитуды и началом гелеобразования, т. е. на начальной стадии гелеобразования. Однако положение этих критических точек нестабильно и может изменяться в зависимости как от состояния связующего в препреге в момент поставки, так и от условий его предшествующего хранения. Поэтому перед началом изготовления деталей для предварительного контроля свойств используемого препрега и последующей корректировки режимов формования необходимо проводить контроль его технологических свойств путем проведения формования образца на установке ИПФ-2003, фиксирующей точки минимальной амплитуды ультразвука и начала гелеобразования, а также стадию последующей полимеризации.

Проведенные исследования показывают высокую эффективность применения ультразвукового метода для контроля и управления процессом формования деталей из ПКМ при серийном производстве, особенно для силовых высокоэффективных конструкций самолета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Никитин К.Е. //Заводская лаборатория. 1993. №3. С. 33–34.
2. Chensha Li, Caishan Jiao, Ying Liu, Zhengping Wang, Hongjie Wang, Maosheng Cao /High Technology Letters, Resin Matrix //Fiber Reinforced Composite Material. 2004. V.10. №1. P. 85–91.