

Ультразвуковая Пропитка Полимерных Композиционных Материалов

[Владимир Н. Хмелев](#), *Senior Member*, IEEE, [Сергей С. Хмелев](#),
[Сергей Н. Цыганок](#), Геннадий А. Титов.

Бийский технологический институт (филиал) «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»

Аннотация – Статья посвящена исследованию процесса пропитки полимерных композиционных материалов под воздействием высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний. В ней описываются преимущества ультразвуковой пропитки и возможности ее практической реализации. Было предложено и разработано ультразвуковое технологическое оборудование, применяемое в практике ультразвуковой пропитки.

Ключевые слова – Ультразвуковая пропитка, ПКМ, волокнистый наполнитель, полимерное связующее.

I. ВВЕДЕНИЕ

ПОЛИМЕРНЫЕ композиционные материалы (ПКМ) и изделия из них обладают рядом уникальных свойств. Это определяет их широкое применение в различных отраслях современного производственного комплекса: от ракетной техники и изделий космической отрасли, до изготовления изделий, используемых в быту.

Требование обеспечения заданной прочности материала при производстве полимерных композиционных изделий, может быть выполнено только при реализации качественной пропитки стеклопластика связующим веществом (смолой).

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Недостаточная пропитка полимерным связующим волокнистых наполнителей в процессе производства ведёт к снижению эксплуатационных характеристик и преждевременному разрушению изделий из ПКМ.

Кроме того, образование воздушных включений в процессе пропитки значительно ухудшает прочность изделий из ПКМ, особенно при межслойном сдвиге [1].

В связи с этим, для повышения качества и прочности изделий из ПКМ, необходимо повысить эффективность процесса пропитки, то есть обеспечить условия, облегчающие проникновение связующего в межволоконное пространство волокнистого наполнителя.

III. ТЕОРИЯ

ПКМ на основе волокнистых наполнителей (стекловолокна, органоволокна или углеволокна), эпоксидного связующего и изделия из них обладают рядом уникальных свойств. Одна из основных стадий технологического процесса изготовления изделий из ПКМ, определяющих качество конеч-

ного изделия, является пропитка волокнистого наполнителя полимерным связующим.

Существуют различные технологические приемы, облегчающие проникновение полимерного связующего в наполнитель. Это уменьшение скорости движения волокнистого наполнителя через ванну с полимерным связующим, вакуумирование связующего, отжим пропитанного наполнителя, а также физическое модифицирование полимерного связующего, и изменение его вязкости, способствующие значительному улучшению смачиваемости волокон наполнителя. Модифицирование связующего можно осуществить воздействием электрических и магнитных полей, вибрацией волокон наполнителя, воздействием интенсивных ультразвуковых колебаний на волокна наполнителя и полимерное связующее.

Уменьшение скорости либо увеличение времени протягивания волокнистого наполнителя через ванну с полимерным связующим значительно понижает производительность процесса, так как скорость протягивания значительно выше скорости капиллярной пропитки. Обеспечение вакуумирования процесса пропитки технологически сложно. Наиболее эффективным способом улучшения смачиваемости волокон наполнителя и облегчения проникновения полимерного связующего является физическое модифицирование полимерного связующего под воздействием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности [2,3].

Важнейшим преимуществом ультразвуковой модификации является возможность снижения вязкости полимерного связующего в десятки раз. Благодаря этому облегчается проникновение связующего в межволоконное пространство волокнистого наполнителя. В результате происходит изменение физических свойств изделий из ПКМ после их полимеризации, кроме того, под воздействием кавитационных потоков происходит лучшее проникновение, активация, сопровождающееся интенсивной дегазацией в области пропитки полимерным связующим. Ультразвуковая дегазация ведет к значительному уменьшению количества воздушных газовых включений в изделии из ПКМ, что ведёт к повышению его качества и прочности.

IV. ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРОПИТКИ ПКМ

Кроме проводимых исследований по интенсификации процесса пропитки известно, что применение механических

колебаний ультразвуковой частоты высокой интенсивности позволяет интенсифицировать и другие стадии технологического процесса производства изделий из полимерных композиционных материалов, например, калибровку внешнего диаметра стержня, активацию смолы, используемой для склеивания стеклопластиковых изделий.

Так, при отработке технологии склеивания силового элемента активированной ультразвуком смолой было установлено значительное увеличение прочности соединения (до 70% от прочности основного материала).

Кроме того, в ходе проведения исследований в разные годы (2000 – 2005 гг.) было установлено, что применение механических колебаний ультразвуковой частоты низкой интенсивности позволяет организовать и осуществить оперативный контроль качества получаемой продукции из полимерных композиционных материалов. Экспериментально установлены параметры ультразвукового контроля.

В процессе изготовления изделия – гибкая связь СПА – для придания утолщения в стержень из полимерного композиционного материала на стадии его формирования монтируется закладной элемент цилиндрической формы с заостренными торцами. Первоначально закладной элемент изготавливается из аналогичного стержня, выполненного из композиционного материала требуемого диаметра. Из известных результатов прочностные испытания следует, что гибкая связь СПА, как правило, разрушается в месте утолщения. Очевидно, это связано с недостаточной пропиткой связующим волокон неполимеризованного материала, поступлением недостаточного количества связующего на поверхность закладного элемента, отсутствием активации смолы для повышения прочности клеевого соединения с закладным элементом.

В связи с этим возникает необходимость в практическом применении метода ультразвукового воздействия для повышения прочности изделия в местах утолщения за счет интенсификации процессов пропитки и активации смолы. Практическая реализация метода позволит провести исследования и установить оптимальные режимы (интенсивность) и условия (длительность) ультразвукового воздействия.

IV. УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Ранее (2000 – 2002 гг.) было предложено и практически реализовано устройство ультразвуковой пропитки стекловолокон в пропиточной ванне. Устройство (см. Рис.1) позволило организовать на производстве ООО «Бийский завод стеклопластиков» ультразвуковую пропитку изделий из полимерных композиционных материалов, представляющих собой цельные стеклопластиковые стержни, диаметром от 2 до 10 мм.



Рис. 1. Оборудование для качественной ультразвуковой пропитки

Проведенные лабораторные испытания и испытания изготовленных изделий из ПКМ показали, что применение предложенного устройства для повышения эффективности пропитки целесообразно. Повысилось содержание связующего в стержнях на 3–4% и составило 23,7–24,2%, повысилась прочность конечного продукта на 20% и химическая стойкость на 17%.

Поскольку ультразвуковые колебания оказывают интенсифицирующее действие на процесс пропитки и активации смолы, для решения поставленных задач было разработано и создано ультразвуковое технологическое оборудование.

Ультразвуковое оборудование (см. Рис.2) для наложения механических колебаний на фильеру для протягивания стержня – диаметр фильеры будет выбираться исходя из диаметра утолщения (5,6 мм, 7,7 мм, 10,5 мм).



Рис. 2. Внешний вид ультразвукового технологического оборудования

Это же ультразвуковое оборудование, только с демонтированной фильерой (см. Рис.3).



Рис. 3. Внешний вид ультразвукового технологического оборудования с демонтированной фильерой

Резьбовая шпилька позволит смонтировать ультразвуковую колебательную систему на любом конструктивном элементе (предварительно должна быть выполнена плоская площадка диаметром не менее 30 мм и резьбовым отверстием в центре М16х2 глубиной не менее 18 мм) технологической линии формирования изделий из полимерных композиционных материалов. Наложение механических колебаний целесообразно на области контакта металлических поверхностей с пропитанным стекловолокном в зоне формирования стержня и монтажа закладной

V. СТЕНД ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРОПИТКИ

Для устранения недостатков имеющихся устройств для ультразвуковой пропитки волоконного наполнителя предложено комбинированное ультразвуковое устройство для пропитки (см. Рис.4).

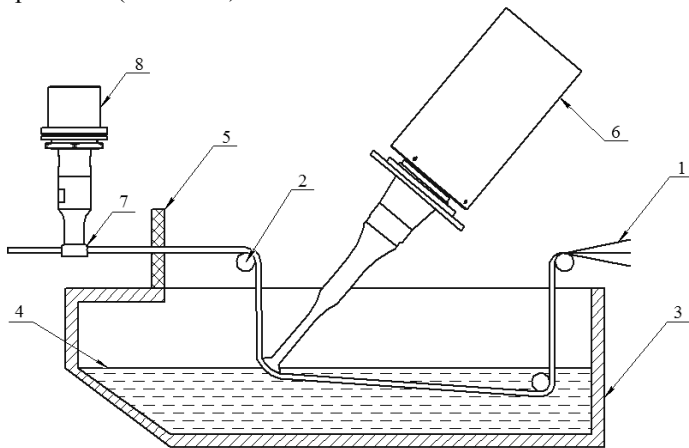


Рис. 4. Схема комбинированного ультразвукового оборудования для пропитки ПКМ

Предлагаемое устройство ультразвуковой пропитки наполнителя связующим работает следующим образом. Армирующий волокнистый наполнитель 1, состоящий из множества непрерывных волокон формируется в пучок и с помощью прижимных роликов 2 поступает и протягивается через ванну 3 со связующим 4 до выходного устройства 5, обеспечивающего удаление излишков связующего. В процессе пропитки армирующий волокнистый наполнитель 1 подвер-

гается воздействию ультразвуковых колебаний высокой интенсивности производимых ультразвуковым оборудованием 6. После выходного устройства 5 армирующий волокнистый наполнитель 1 проходит через фильеру 7 ультразвукового оборудования 8, для дополнительной ультразвуковой обработки, тем самым пропитывая волокнистый наполнитель в области монтажа закладной.

Основными преимуществами использования такого устройства для ультразвуковой обработки в процессе пропитки являются снижение времени пропитки и уменьшение включений воздуха в ПКМ и возможность полной автоматизации процесса [4]. В предложенном устройстве ультразвуковая колебательная система располагается под углом к волоконному наполнителю. При этом, часть рабочего инструмента располагается в связующем, а часть вне связующего, обеспечивая допропитку и удаление оставшегося воздуха.

Такое конструктивное исполнение обусловлено тем, что ультразвуковая обработка вышедшего из связующего наполнителя (на воздухе) повышает эффективность пропитки, способствует равномерному распределению связующего и удалению газовых пузырьков [5].

Часть рабочего инструмента, погруженная в связующее, обеспечит обработку и дегазацию полимерного связующего во всём объёме из-за отсутствия эластичного прижимного материала. Прижим осуществляется за счёт выбора формы излучающей поверхности рабочего инструмента. Нижнюю стенку ванны в месте размещения над ним рабочего инструмента колебательной системы выполняется под углом к поверхности связующего в ванне, перпендикулярным акустической оси колебательной системы. Расстояние от поверхности рабочего инструмента до дна выбрано равное половине длины волны ультразвуковых колебаний в связующем на рабочей частоте колебательной системы. Выполнение стенки ванны в зоне обработки параллельной рабочей поверхности и обеспечение резонансного усиления УЗ колебаний за счёт выбора расстояния между излучающей поверхностью и стенкой равной половине длины волны позволит обеспечить повышение амплитуды колебаний в зоне обработки и у стенки ванны.

Увеличение амплитуды колебаний у стенки ванны позволит повысить эффективность обработки связующего, насыщенного воздухом, возвращаемого после отжима в ванну. Выбранное размещение колебательной системы и рабочего инструмента исключит попадание выделяющихся в процессе обработки газов в обрабатываемый наполнитель. Пузырьки воздуха будут всплывать перед непогруженной в связующее частью рабочего инструмента.

Конструктивное исполнение предлагаемого устройства позволит исключить недостатки существующих на сегодняшний день ультразвуковых устройств пропитки волоконного наполнителя полимерным связующим.

Для обеспечения условия возникновения развитой кавитации в полимерном связующем интенсивность ультразвуковых колебаний должна составлять 2...3 Вт/см² [6]. Для обеспечения такой интенсивности будет разработана и изготовлена специальная конструкция ультразвуковой колебательной системы. В состав колебательной системы войдут три пакета пьезоэлектрических преобразователей с отражающи-

ми накладками и концентратор ультразвуковых колебаний, заканчивающийся рабочим инструментом ножевого типа.

Поскольку связующее представляет собой жидкость с большим коэффициентом вязкости, то для обеспечения кавитационного режима ультразвукового воздействия разработанное устройство обеспечит амплитуду колебаний на излучающей поверхности не менее 50 мкм.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение механических колебаний ультразвуковой частоты высокой интенсивности позволяет интенсифицировать технологический процесс пропитки изделий из ПКМ.

Для повышения качества и прочности изделий из ПКМ было создано устройство, способствующее значительному улучшению смачиваемости волокон наполнителя, облегчающее проникновение связующего в межволоконное пространство волокнистого наполнителя. Ультразвуковое технологическое устройство представляет комбинацию двух аппаратов для ультразвуковой пропитки серии «Надежда».

Такое конструктивное исполнение предлагаемого устройства обусловлено необходимостью интенсификации процесса пропитки на разных этапах. Начальный этап пропитки ПКМ осуществляется в пропиточной ванне, где происходит пропитка волокнистого наполнителя связующим с одновременным уменьшением количества газовых включений в ПКМ. Второй этап пропитки ПКМ осуществляется путем протягивания стержня ПКМ через фильеру ультразвуковой колебательной системы, тем самым удаляя излишки связующего и пропитывая ПКМ в области монтажа закладной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Цыплаков, О.Г.** Научные основы технологии композиционно-волоконных материалов [Текст] / О.Г. Цыплаков. – Пермь: 1974. – Ч.1. – 317 с.
- [2] **Хозин, В.Г.** Модифицирование эпоксидных композиций ультразвуком [Текст] / В.Г. Хозин, А.А. Каримов, А.М. Череватский, А.А. Полянский, А.В. Мурафа. – Механика композиционных материалов – 1984. – №4. – с. 702-706.
- [3] **Прохоренко, П.П.** Ультразвуковой капиллярный эффект [Текст] / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежунов, Г.Е. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1981. – Ч.1. – 135 с.
- [4] **Городнищенский, П.Л.** Ультразвуковая пропитка стеклоткани, конструкций из стеклопластиков [Текст] / П.Л. Городнищенский, В.А. Косенков, В.Ш. Статников, Е.С. Тросианецкий. – Материалы IX Всесоюзной акустической конференции – М.: 1978. – с.103-106.
- [5] **Колосов, А.Е.** Виброакустический эффект при ультразвуковой пропитке волокнистых композитов [Текст] / А.Е. Колосов, В.Г. Хозин, А.А. Каримов – Механика композиционных материалов – 1988. – №4. – с. 651-659.
- [6] **Хмелев, В.Н.** Создание ультразвуковой установки для пропитки изделий из композиционных полимерных материалов [Текст] / В.Н. Хмелев, В.А. Башара, А.А. Никитин, С.Н. Цыганок, Р.В.Барсуков. – Сборник тезисных докладов международной научно-практической конференции «Композиты – в народное хозяйство России» (Композит '99) – Барнаул: АлтГТУ, 1999. – с. 42-43.



Vladimir N. Khmelev (SM'04) — pro-rector at Biysk technological institute, professor, Full Doctor of Science (ultrasound). Honored inventor of Russia. Laureate of Russian Government premium for achievements in science and engineering. Area of scientific interests is application of ultrasound for an intensification of technological processes. IEEE member since 2000, IEEE Senior Member since 2004. His biography published in 7th issue of book —Who is who in scientific and engineering]]



Sergey S. Khmelev was born in Prokopyevsk, Russia, 1985. Now he is student of Biysk Technological Institute. His research interests is design and construction ultrasonic oscillation system.



Sergey N. Tsyganok was born in Biysk, Russia, 1975. Now he is Ph.D (Machinery), he received degree on information measuring engineering and technologies from Altay State Technical University, key specialist of electronics. Laureate of Russian Government premium for achievements in science and engineering. His main research interest are development of high -effective multifunctional oscillators for ultrasonic technological devices.
Gennadiy A. Titov (S'10) was born in Biysk, Russia in 1988. In this time he is student of Biysk Technological Institute. IEEE Student Member since 2010.

