УДК 678.66.086.2

Новый способ формования изделий из полимерных композиционных материалов на основе эпоксидного связующего

New method for molding products from epoxy binder based polymeric composite materials

О.Ю. ЕРЕНКОВ, С.П. ИСАЕВ, Д.О. ЯВОРСКИЙ, Д.Д. ЕРЕНКОВА

O.YU. ERENKOV, S.P. ISAEV, D.O. YAVORSKY, D.D. ERENKOVA

Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

Pacific State University, Khabarovsk, Russia

erenkov@list.ru

В статье представлен новый способ формования изделий из эпоксидной смолы. Технической задачей, на решение которой направлено разработанное авторами статьи изобретение, является снижение продолжительности цикла формования изделия. В данной работе поставленная задача решается за счет наноимпульсной обработки эпоксидной смолы в течение процесса её отверждения.

Ключевые слова: эпоксидная смола, армирующий материал, формование, модификация, наноимпульсная обработка

The article presents a new method for molding products from epoxy resin. The technical problem to be solved by the invention developed by the authors of the article is to reduce the duration of the product formation cycle. In this work, the problem is solved by nanopulse treatment of epoxy resin during the curing process.

Keywords: epoxy resin, reinforcing material, molding, modification, nanopulse processing

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-02-50-52

Введение

При ремонте и модернизации технологического оборудования одним из инновационных решений является замена деталей из металлических материалов на изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе эпоксидных смол «холодного» отверждения. Такое направление обусловлено тем, что ПКМ обладают высокой удельной прочностью, превосходящей традиционные конструкционные материалы, такие как стали, чугуны, латуни, бронзы и др. Применение ПКМ также обеспечивает снижение массоемкости механизмов и машин и снижение производственных затрат за счет экономии металлических материалов, уменьшения трудозатрат на производство изделий.

Важнейшими научно-практическими задачами при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов являются получение материалов с повышенными физико-механическими свойствами и сокращение продолжительности цикла формования изделия. Одним из путей решения задачи по достижению качественных показателей ПКМ является модификация полимерного связующего. На современном этапе развития науки о ПКМ существует большое многообразие методов модификации эпоксидного связующего [1–5]. В работе [6] научно обосновано применение предварительной электрофизической обработки полимерного связующего электромагнитными импульсами и волнами. Эффективность такого подхода экспериментально подтверждена результатами исследований механических свойств стеклопластика. Установлено, что применение предварительной электрофизической обработки эпоксидного связующего путем совместного воздействия наносекундными электромагнитными импульсами и электромагнитным переменным полем в течение 25 мин позволяет повысить прочностные свойства изделий из стеклопластика в 1,6–1,8 раза.

Анализ известных способов формования изделий из эпоксидной смолы на основе электроимпульсной обработки эпоксидного связующего [6], включающих стадии формования, отверждения и механической обработки заготовки, позволил выявить общие их недостатки, а именно: высокая трудоемкость процесса изготовления изделия, несовершенство технологической оснастки, высокие затраты времени на предварительную электрофизическую обработку связующего, повышенная длительность стадии формования, что является причиной снижения качества изделия.

Цель данной работы – разработка технического решения, обеспечивающего непрерывность процесса формования изделий из эпоксидной смолы с использованием наноимпульсной обработки связующего непосредственно во время формования.

Экспериментальные исследования

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния обработки наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) на вязкость эпоксидного связующего, применяемого в производстве армированных ПКМ. В данной работе в качестве объекта исследования выбрана наиболее перспективная в производстве армированных ПКМ термореактивная эпоксидная смола YD–114 (производитель KUKDO Chemical Co. Ltd., Южная Корея), представляющая собой жидкую эпоксидную смолу типа бисфенола А, разбавленную алифатическим глицидиловым эфиром (C_{12}–C_{14}). Для контроля вязкости обработанных НЭМИ термореактивных смол применяли вискозиметр Геплера с падающим шариком. Для наноимпульсной обработки эпоксидной смолы применяли экспериментальную установку, конструкция и технические характеристики которой подробно изложены в [6]. На первом этапе экспериментального исследования определяли вязкость смолы в исходном состоянии, без добавления отвердителя. Впоследствии определяли вязкость смолы после обработки НЭМИ в течение 5, 10, 15, 25 и 30 минут соответственно. При выполнении всех экспериментов температура смолы поддерживалась постоянной и составляла 20°С.

Графическая интерпретация зависимости динамической вязкости исследуемой термореактивной смолы от продолжительности обработки НЭМИ изображена на рис. 1. Анализ полученной зависимости позволяет констатировать факт снижения динамической вязкости эпоксидного связующего в зависимости от продолжительности обработки НЭМИ (рис. 1). При этом динамическая вязкость снижается на 2,5 Па·с в течение первых 10 минут обработки НЭМИ, что составляет около 20% от исходной динамической вязкости смолы. Дальнейшая обработка НЭМИ эпоксидной смолы в течение 15, 20, 25 и 30 минут не влияет на изменение её динамической вязкости.

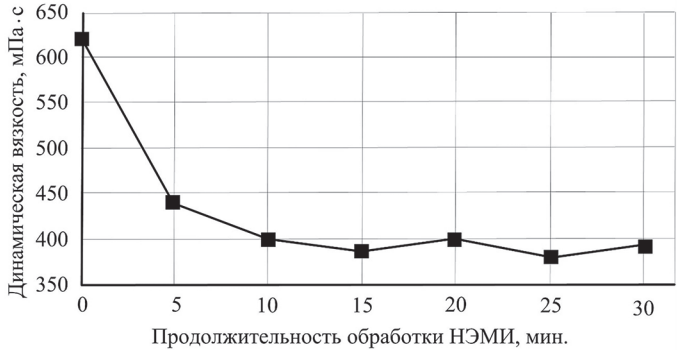

Рис. 1. Зависимость динамической вязкости эпоксидной смолы YD-114 от продолжительности обработки НЭМИ.

Изменение вязкости смол может быть объяснено конформационными изменениями молекул олигомеров под действием импульсного поля, в котором одновременно присутствуют магнитная и электрическая составляющие НЭМИ. Тогда разумно рассматривать поведение растворов термореактивных смол под действием НЭМИ как поведение вязких систем, обладающих как тиксотропией, так и реопексией. Тиксотропное поведение эпоксидной смолы явно проявляется в период продолжительности обработки НЭМИ в первые 10 минут. Дальнейшая обработка данной смолы НЭМИ приводит к ионизации активных групп молекул, что способствует образованию полярных связей между молекулами смолы и стабилизирует её вязкость, уменьшая тиксотропные свойства.

Продолжительность стадии пропитки армирующего материала эпоксидной смолой зависит в значительной степени от скорости пропитки материала, в соответствии с выражением [6]:

$$\frac{dh}{d\tau} = \frac{r \cdot \gamma_{жг} \cdot cos\theta}{4\eta h} \quad ,$$

где h – высота подъема жидкости; τ – время; $\gamma_{жг}$ – поверхностное натяжение жидкости; θ – краевой угол натекания, образуемый жидкостью со стенкой капилляра; r – радиус капилляра; η – вязкость жидкости.

Таким образом, при условии, что пропитываемый армирующий материал имеет некоторые постоянные значения $\gamma_{жг}$, θ, r и h, уменьшение значения вязкости эпоксидной смолы, вызванное наноимпульсной обработкой, приведет к снижению продолжительности цикла пропитки и повышению производительности технологического процесса формования изделия в целом.

Новый способ формования

Технической задачей, на решение которой направлено разработанное авторами статьи изобретение [7], является снижение продолжительности цикла формирования изделия. В данной работе поставленная задача решается за счет наноимпульсной обработки эпоксидной смолы в течение процесса её отверждения.

На рис. 2 приведена схема установки для осуществления нового способа формования изделий из эпоксидной смолы, техническая сущность которого заключается в реализации наноимпульсной обработки пакета заготовки формируемого изделия из армирующего материала, пропитанного эпоксидной смолой с отвердителем и разрезанного на мерные отрезки, во время отверждения эпоксидной смолы. На рис. 3 изображены схемы расположения электродов относительно плоскостей формуемого изделия.

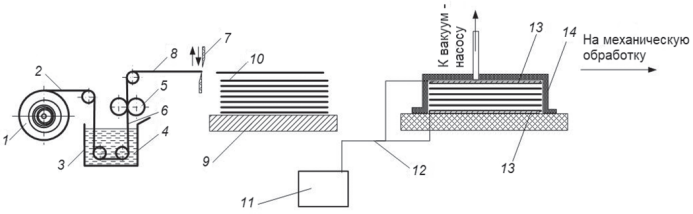

Рис. 2. Схема установки для осуществления нового способа формования изделий из эпоксидной смолы.

Установка включает раскатное устройство 1 армирующего материала 2, емкость 3 для эпоксидной смолы 4, валики 5 для отжима эпоксидной смолы с пропитанного армирующего материала 6, отрезное устройство 7 пропитанного и отжатого армирующего материала 8, стол 9 для формования пакета заготовки изделия 10, генератор наносекундных электромагнитных импульсов 11, провода электропитания 12 электродов излучения наносекундных электромагнитных импульсов 13, камеру 14 для электроимпульсной обработки сформованного пакета из армирующего материала, пропитанного эпоксидной смолой с отвердителем.

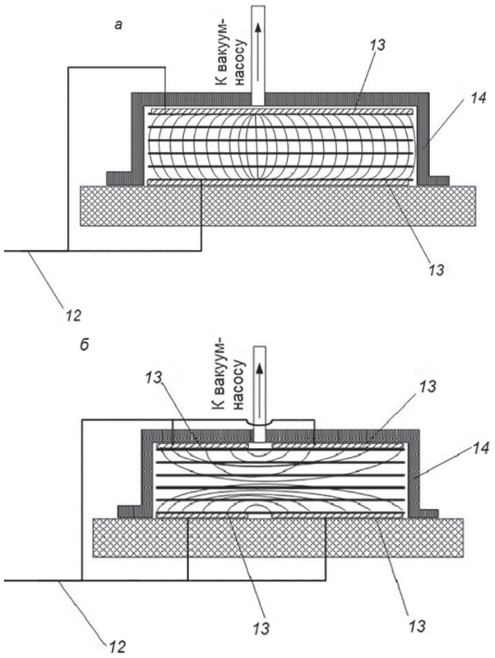

Рис. 3. Схема расположения электродов относительно плоскостей формуемого изделия: а – продольное расположение; б – поперечное расположение.

Способ реализуется следующим образом. Предварительно смешанную с отвердителем эпоксидную смолу 4 загружают в жидком состоянии в емкость 3, в которой пропитывают армирующий материал 2, подаваемый с раскатного устройства 1. Затем пропитанный армирующий материал 6 отжимают от излишков эпоксидной смолы валиками 5. Далее пропитанный и отжатый армирующий материал 8 разрезают на мерные отрезки при помощи отрезного устройства 7. На столе 9 формируют пакет 10 заготовки изделия из композита, который подают в камеру 14 для наноимпульсной обработки сформованного пакета из армирующего материала, пропитанного связующим во время отверждения. Для создания давления прессования на пакет 10 заготовки формуемого изделия создают вакуум в камере 14, а затем включают генератор 11 и через электропитательные провода 12 на электроды 13 подают наносекундные электромагнитные импульсы. После отверждения связующего полученный композитный материал отправляют на дальнейшую механическую обработку.

При наноимпульсной обработке пакета 10 заготовки формируемого изделия электроды 13 располагают либо поперечно (рис. 2а), либо продольно (рис. 2б) относительно плоскостей формуемого изделия в зависимости от конфигурации изделия.

Проведение обработки пакета 10 заготовки формируемого изделия наносекундными электромагнитными импульсами во время его отверждения позволяет отказаться от оснастки, необходимой для предварительной обработки эпоксидной смолы в жидкой фазе, что существенно упрощает технологию производства изделий из эпоксидной смолы и способствует снижению продолжительности цикла формования изделия.

Выводы

В отличие от аналогов, представленный в данной работе способ обеспечивает уменьшение продолжительности цикла формирования изделия за счет двух эффектов, которые дополняют друг друга: снижение динамической вязкости эпоксидной смолы, вызванное наноимпульсной обработкой; проведение наноимпульсной обработки пакета заготовки формируемого изделия из армирующего материала, пропитанного эпоксидной смолой с отвердителем и разрезанного на мерные куски, непосредственно во время отверждения эпоксидной смолы.

Данный способ рекомендуется как для производства новых изделий из ПКМ с целью замены на аналогичные из металлических материалов, так и для осуществления регулируемого процесса отверждения связующего в изделиях из композиционных материалов при их ремонте.

Финансирование работы

Исследования проводились в ЦКП «Прикладное материаловедение» ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет» при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации в рамках НИР № FEME-2023-0009.

Литература

1. Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Кутергина И.Ю. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе. С-Пб.: Профессия. 2020. 576 с. https://znanium.com/catalog/document?id=414503.
2. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и нанокомпозиты. Черноголовка: Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН, 2021. 319с.https://www.icp.ac.ru/media-store/FILES/History_of_institute/Irzhak2.pdf.
3. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Чуриков Д.О. Анализ влияния обработки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле на межслоевое взаимодействие отвержденных полимерных композиционных материалов с различными наполнителями // Письма в ЖТФ. 2022 Т. 48, №22. С. 36–38. https://elibrary.ru/item.asp?id=49608270.
4. Варанкина Г.С., Русаков Д.С., Партенадзе С.Г. Теоретическое обоснование использования природных минеральных модификаторов для синтетических смол // Клеи. Герметики. Технологии. 2023. №1. С. 16–22. https://elibrary.ru/item.asp?id=50140301.
5. Кербер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С. Полимерные композиционные материалы: свойства, структура, технологии /под. ред. А.А. Берлина. СПб: Профессия, 2018. 558 с. https://znanium.ru/catalog/document?id=131352.
6. Еренков О.Ю. Стеклопластик повышенной прочности. Курск: Университетская книга, 2021. 185 с. https://elibrary.ru/item.asp?id=46550917.
7. Патент №2811868 Российская федерация, (51) МПК B 29 C 41/04. Способ формования изделий из эпоксидной смолы / Еренков О.Ю., Исаев С.П., Дорофеев Е.П., Ри Э.Х., Яворский Д.О. Опубликовано 18.01.2024. https://new.fips.ru/registersdocview/fips_servlet?DB=RUPAT&DocNumber=2811868&TypeFile=html.