

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.039-419; 620.22-419

doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-14-26

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ СВЧ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ирина Владимировна Злобина¹, Николай Валерьевич Бекренев²✉

^{1,2} Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов, Россия

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

¹ irinka_7@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2331-7444>

² nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-1020>

Аннотация

Показаны перспективы применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях различных технических систем. На основе анализа недостатков ПКМ определена актуальность применения методов их физической упрочняющей модификации. Отмечена целесообразность упрочнения, как заключительной операции технологического цикла для исключения влияния последующих процессов обработки. Обоснована перспективность для этой цели воздействия на ПКМ в составе изделия СВЧ электромагнитного поля. Выполнен анализ конструктивных схем СВЧ технологических установок с камерами различных типов применительно к их использованию для упрочняющей обработки изделий больших размеров и сложной формы из ПКМ. Указано на отсутствие промышленных образцов СВЧ установок, пригодных для упрочнения широкой номенклатуры изделий, особенно больших размеров и сложной формы. Показана целесообразность разработки автоматизированных установок на основе камеры лучевого типа с неограниченным объемом (излучение в открытое пространство). Целью работы является обоснование и разработка требований к универсальной СВЧ технологической установке для упрочняющей обработки широкой по размерам и

форме номенклатуры изделий, имеющей камеру лучевого типа с неограниченным объемом и программируемые привода относительного перемещения рупорного излучателя и изделия.

С использованием результатов ранее выполненных исследований особенностей процесса упрочнения ПКМ в СВЧ электромагнитном поле впервые предложены принципы создания СВЧ технологических установок для упрочняющей обработки изделий различного назначения из ПКМ. Приведены результаты разработки макета-демонстратора мобильного робототехнического комплекса для СВЧ обработки крупногабаритных изделий сложной формы. Представлены основные положения технических предложений по созданию промышленного образца робота с СВЧ технологическим модулем, имеющего способность перемещения по оси X в пределах производственного помещения (в среднем 6 м) и диапазоном перемещений рупорного излучателя по осям Y и Z до 4 м. Техническая новизна образца защищена 2 патентами РФ на изобретение и полезную модель.

Ключевые слова: изделия, область применения, конструкции, СВЧ электромагнитное поле, схемы, оборудование, робототехнический комплекс.

Ссылка для цитирования:

Злобина И.В. Особенности разработки специального оборудования для СВЧ упрочняющей обработки изделий из отвержденных полимерных композиционных материалов / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 10. – С. 14-26. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-14-26.

Original article

Open Access Article

FEATURES OF DEVELOPING SPECIAL EQUIPMENT FOR SHF STRENGTHENING TREATMENT OF METAL PRODUCTS MADE OF HARDENED POLYMER COMPOSITES

Abstract

The prospects of using polymer composites (PC) in the designs of various technical systems are shown. Based on the analysis of PC disadvantages, the relevance of using methods of their physical strengthening modification is determined. The expediency of strengthening as the final operation of the technological cycle to eliminate the influence of subsequent treatment processes is noted. The prospects for the effect of a microwave electromagnetic field on the PC as a part of SHF product are justified for this purpose. The structural schemes of SHF technological installations with chambers of various types are analyzed in relation to their use for the simplified treatment of large-sized and complex-shaped products made of PC. It is indicated that there are no industrial samples of SHF installations suitable for strengthening a wide range of products, especially large sizes and complex shapes. The expediency of developing automated installations based on a beam-type camera with unlimited volume (radiation into an open space) is shown. The paper objective is to substantiate and develop requirements for a universal SHF technological installation for strengthening treatment of a wide range of products in size and

shape, including a beam-type chamber with unlimited volume and programmable drives for relative displacement of the horn radiator and the product.

Using the results of previous studies of the features of PC strengthening in a SHF electro-magnetic field, principles for creating SHF technological devices for strengthening treatment of various PC products are proposed for the first time. The results of developing a mock-up demonstrator of a mobile robotic complex for SHF treatment of large-sized products of complex shape are presented. The main provisions of engineering solutions for constructing an industrial model of a robot with SHF technological module, which has the ability to move along X-axis within the production room (on average 6m) and the range of movements of the horn emitter along Y and Z axes up to 4m. The technical novelty of the sample is confirmed by 2 patents of the Russian Federation for the invention and a utility model.

Keywords: products, field of application, structures, SHF electromagnetic field, circuits, equipment, robotics complex.

Reference for citing:

Zlobina IV, Bekrenev NV. Features of developing special equipment for SHF strengthening treatment of metal products made of hardened polymer composites. *Transport Engineering*. 2025;10:14-26. doi: 10.30987/2782-5957-2025-10-14-26.

Введение

В настоящее время расширяются как области применения, так и объемы производства полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях промышленности [1, 2]. Это определяется прежде всего высокой удельной прочностью ПКМ по сравнению с металлами и сплавами и возможностью формировать заданные по условиям эксплуатации свойства одновременно с формообразованием изделия [3-7]. Характерной особенностью производства изделий из ПКМ на современном этапе и в перспективе является смещение приоритетов от внешних обшивок и элементов внутренней отделки, включая панели управления, на силовые и ответственные функциональные конструкции: нервюры и стрингеры, лопасти воздушных винтов (от малогабаритных мультикоптеров до вертолетов и ветроэнергетических установок), трансмиссионные валы

приводов и диски колес автомобилей, балки мостовых конструкций и др. [8-17].

В тоже время ПКМ, в том числе - на эпоксидном связующем, имеют существенные недостатки, к важнейшим из которых относятся выраженная анизотропия свойств, малая, по сравнению с металлами, стойкость к ударным нагрузкам, низкая теплопроводность, повышенная ползучесть. Усадка, сопровождающая процесс отверждения, приводит к образованию микродефектов в объеме материала и формированию остаточных напряжений вследствие значительно отличающихся теплофизических характеристик компонентов, что приводит к снижению физико-механических свойств [3-7]. Другим фактором, вызывающим формирование внутренних напряжений, является финишная размерная механическая обработка.

Для снижения указанных недостатков ПКМ на различных стадиях технологического цикла применяются разнообразные методы химической и физической модификации компонентов, одним из которых является воздействие СВЧ электромагнитного поля [18]. Анализ известных технических решений модификации и влияния технологической наследственности на свойства изделий показывает, что важное значение приобретает модификация отвержденных ПКМ на эпоксидном связующем, прошедших полный технологический цикл, т.е. обработка конечного изделия. Это с одной стороны исключает необходимость изменять отлаженные технологии синтеза материалов из серийно производимых компонентов, а с другой – на полученный результат модификации не будут

Анализ известных технических решений

Результаты выполненного, начиная с 60-х годов XX века, значительного объема теоретических и экспериментальных исследований воздействия СВЧ электромагнитного поля на различные диэлектрические материалы доказали перспективность данного технологического метода для решения широкого круга производственных задач по формированию заданных эксплуатационных и потребительских свойств материалов. При этом основное практическое применение касается рациональных схем, обеспечивающих равномерный СВЧ диэлектрический нагрев материалов с целью достижения максимального положительного эффекта.

Выделяются следующие основные практические применения данного метода: пастеризация продуктов и стерилизация посуды и инструментов медицинского назначения, нагрев материалов для отверждения или спекания, сушка, вулканизация и полимеризация резины, дефростация, разрушение и утилизация, научные исследования. Процесс обработки реализуется как правило в СВЧ камерах со стоячей или с бегущей волной в установках периодического или методического действия [18]. Установки первого типа характеризуются тем, что объекты в зону обработки помещаются периодически: по мере

оказывать влияние последующие операции технологического цикла. Развитие исследований в данном направлении является актуальным для науки и практики. Однако, результаты в данном направлении авторов статьи и ряда других исследователей [19-21] были получены на лабораторном или экспериментальном оборудовании на образцах малых размеров, что не позволяет их масштабировать применительно к серийному производству объектов, применяющихся в производстве транспортных и энергетических систем, а также строительной индустрии и описанных в [8-17], что делает актуальным обоснование концепции и разработку технических требований к специальному СВЧ технологическому оборудованию.

готовности объекты удаляются из камеры и заменяются новыми. Такая схема наиболее приемлема для обработки компактных изделий. В установках методического действия объекты перемещаются через зону воздействия СВЧ электромагнитного поля непрерывно по типу поточной линии. Данная схема обычно применяется при обработке сыпучих материалов или жидкостей. Установки указанных типов характеризуются так называемой резонаторной камерой, размеры которой рассчитаны для обеспечения формирования заданного уровня плотности потока энергии (ППЭ) электромагнитного поля, имеют высокий КПД за счет концентрации мощности излучения в центральной области камеры и обеспечивают надежную защиту операторов. Однако, они сложнее в расчетах и не позволяют вести обработку крупногабаритных изделий, особенно с криволинейной поверхностью, или такая обработка затруднена. Для обработки изделий больших размеров считаются наиболее приемлемыми установки с камерами лучевого типа, которые могут быть ограниченного и неограниченного объема [18].

Как правило, СВЧ обработка крупногабаритных объектов в камерах с ограниченным объемом реализуется путем нескольких последовательно установленных

СВЧ излучателей, количество которых определяется поверхностью раскрыва рупора и размерами объекта воздействия. В качестве характерного примера можно привести способ термической обработки изделий из диэлектрических материалов с большими объемами и поверхностями, для осуществления которого используется СВЧ камера лучевого типа, в которой размещают несколько излучающих рупорных систем, расстояние между которыми выбирают таким, чтобы распределение суммарной поверхностной мощности было наиболее близко к равномерному при заданной геометрии антенны и расстояния от нее до поверхности обрабатываемого объекта. Недостатками способа являются следующие. В камерах лучевого типа излучающие рупорные антенны располагаются так, что выходной контур всех рупоров располагается в одной плоскости, что обеспечивает равномерное распределение мощности СВЧ излучения по плоской поверхности. Степень равномерности задается также расстоянием между рупорами. При этом в случае обработки объекта с криволинейной поверхностью расстояние до нее будет различным для разных излучающих рупоров, что приведет к изменению плотности потока энергии электромагнитного поля и, соответственно, суще-

ственному различию поглощенной материалом СВЧ мощности в разных участках поверхности. Кроме того, объективно излучатели могут быть расположены в максимально сближенном положении только при касании крайними поверхностями плоскости раскрыва.

Как показал анализ научнотехнической и рекламной информации известно несколько серийно выпускаемых моделей СВЧ технологического оборудования для термической обработки крупногабаритных изделий из диэлектрических материалов. Наиболее типичными являются следующие.

СВЧ установка для обработки минерального сырья «Энергия» (рис. 1а) разработана ЗАО «НПП «Магратеп»», г. Фрязино Московской обл. [22]. Установка предназначена для СВЧ обработки тонкозернистых концентратов редкоземельных металлов с целью повышения уровня извлечения и оснащена резонаторной камерой бегущей волной.

Установка для сушки древесины «СВЧ-ЛЕС» (рис. 1б) разработана ЗАО «НПП «Магратеп»», г. Фрязино Московской обл. Установка камерного типа предназначена для высокопроизводительной сушки древесины [22, 23].



а)



б)



в)

Рис. 1 СВЧ технологические установки ЗАО НПП «Магратеп»
а - «Энергия», б - «СВЧ-лес», в - «Декстрин-2»

Fig.1. SHF technological installations of Magratep a - "Energy",
b - "SHF forest", c - "Dextrin-2"

СВЧ установка «Декстрин-2» (рис. 1в) разработана ЗАО «НПП «Магратеп»», г. Фрязино Московской обл. и предназначена для сушки и обеззараживания зернового материала и других сыпучих продуктов [22] Особенностью установки является вертикальная компоновка.

СВЧ установка MGHPG-0060-LX (рис. 2) для совместной вакуумно-микроволновой сушки крупногабаритных объемов древесины разработана фирмой AIM Wood UG (США). Установка имеет герметичную камеру с бегущей волной [24].



Рис. 2. СВЧ технологическая установка MGHPG-0060-LX
Fig.2. SHF process unit MGHPG-0060-LX

Оборудование, конструктивно аналогичное рассмотренному выше и предназначенное для термической обработки монолитных и сыпучих твердых материалов, в том числе – для вулканизации и утилизации резины, сушки различных продуктов и технологических материалов производится фирмами *Linn High Therm GmbH* (Германия) [25], *Clariant* (Германия), *Grandtek* (Китай), «Элмаш-микро» (Россия) «ЭТНА» (Россия). Две последние модели имеют камеру лучевого типа с ограниченным объемом, в которой расположены последовательно несколько рупорных излучателей, обеспечивающих облучение протяженных объектов, представляющих собой определенный объем дисперсного (гранулированного) материала.

Таким образом, анализ технических параметров опытных и промышленных установок для обработки различных материалов в твердом состоянии в СВЧ электромагнитном поле показал следующее. Отечественные и зарубежные установки как периодического, так и методического действия построены по принципу камеры лучевого типа с ограниченным объемом

или резонаторной камеры с бегущей волной и предназначены для термической обработки, в основном, сушки штабелей древесины или больших объемов дисперсных (сыпучих) продуктов, а также для вулканизации резины. Как правило они имеют управление от промышленных контроллеров. Основными производителями СВЧ технологических установок для обработки крупногабаритных изделий являются Россия, Германия и Китай, а также – США. Известные установки не могут быть использованы для решения задач обработки деталей авиационной или автомобильной техники, а также энергетических установок и строительных конструкций из ПКМ по причине наличия камеры, не позволяющей разместить в ней изделия различных размеров и сложной формы. Стационарный тип установки затрудняет ее эксплуатацию в цехах по производству изделий из ПКМ. Генерация стоячей волны СВЧ излучения в камере с определенной диаграммой направленности применима только для объектов простой формы типа пакетов бревен или деревянного бруса и не обеспечивает равномерного воздействия

на объекты, имеющие выраженную кривизну поверхности. Высокая мощность СВЧ излучателя (25...50 кВт) является избыточной и может привести к термической деструкции и разрушению ПКМ вследствие разложения матричного материала. Камеры резонаторного типа с бегущей и стоячей волной не позволяют сформировать электромагнитное поле с требуемой равномерностью распределения напряженности по камере необходимых размеров, к тому же произвольная форма объекта, изменяющаяся от изделия к изделию,

приводит к тому, что различные его области оказываются в зонах с различной плотностью потока энергии E - и H -волны. Изменить положение пучностей волн практически невозможно при использовании резонаторной схемы. Необходимый эффект по равномерности термического СВЧ воздействия на поверхности с большой площадью, может быть достигнут при перемещении рупорного излучателя относительно поверхности изделия с определенным шагом [26].

Особенности подхода к разработке СВЧ технологических установок для упрочняющей обработки изделий из диэлектрических и композиционных материалов

Авторами данной статьи совместно с ООО «Газпром Трансгаз Саратов» и ООО НПП «НИТРИД» разработан и введен в опытную эксплуатацию опытно-промышленный образец установки для повышения прочности и эластичности уплотнительных элементов магистральных газопроводов и газораспределительной и регулировочной аппаратуры диаметром от 20 до 1500 мм (рис. 3), сведения о которой опубликованы в [27].



Рис. 3. Общий вид автоматизированной СВЧ технологической установки с ЧПУ для модифицирования уплотнительных элементов из неметаллических материалов

Fig.3. General view of an automated SHF process unit with CNC for modifying sealing elements made of non-metallic materials

В тоже время реализованная в описанной установке схема обработки в камере лучевого типа с ограниченным объемом и перемещающимся излучателем не может считаться универсальной и оптимизированной к различным условиям производства, т.к. не позволяет обрабатывать крупногабаритные изделия со сложной формой поверхности типа элементов обшивки крыла и оперения летательных аппаратов, корпусов кораблей, лопастей ветроэнергетических установок и т.п. объектов. Установки с камерой в этом случае будут излишне крупногабаритными и их применение окажется нерациональным с точки зрения занимаемых площадей в случае необходимости обработки изделий меньших габаритных размеров. Таким образом установки могут быть в этом случае узко специализированными, предназначенными для обработки только малой номенклатуры изделий.

На основании изложенного рациональной для СВЧ обработки крупногабаритных объектов с криволинейной поверхностью следует признать камеру лучевого типа с неограниченным объемом, в которой рупорный излучатель совершает сложное управляемое сканирующее движение, эквидистантное обрабатываемой поверхности, или альтернативную схему с рефлекторной антенной и несколькими, работающими на нее рупорными излучателями, формирующими диаграмму направленности излучения, соответствующую контуру объекта в поперечном се-

чении. Первая схема отличается сложной кинематикой с программируемыми перемещениями рупора по трем осям координат с дополнительным качательным движением. Однако данная схема универсальна, т.к. современные системы ЧПУ позволяют реализовать любой алгоритм движения. Вторая схема имеет простую кинематику (прямолинейное движение параллельно продольной оси объекта). Однако излучающая система отличается сложностью конструкции. Также может вызвать затруднение формирование изменяющейся в соответствии с контуром объекта диаграммы направленности СВЧ волны.

Целью дальнейшей работы является обоснование и разработка требований к универсальной СВЧ технологической установке для упрочняющей обработки широкой по размерам и форме номенклатуры изделий, имеющей камеру лучевого типа с неограниченным объемом и программируемые привода относительного перемещения рупорного излучателя и изделия.

На основе анализа научно-технической информации и результатов выполненных исследований [19, 20] могут быть сформулированы принципы разработки СВЧ технологического оборудования для упрочняющей обработки крупногабаритных изделий произвольной формы:

- основной схемой является камера лучевого типа с неограниченным объемом с одним излучателем рупорного типа;

- излучатель должен иметь программируемые перемещения как минимум по 4-м координатам с целью отслеживания изменяющегося контура поверхности изделия;

- оборудование должно реализовывать две схемы обработки: с непрерывным перемещением рупора и дискретным перемещением рупора;

- оборудование должно иметь программируемую регулировку излучаемой мощности и излучатели, работающие на двух частотах с целью оптимального воздействия на объекты различной толщины и реализации оптимальной глубины проникновения;

- необходимо обеспечить активный контроль температуры поверхности изделия для недопущения его перегрева выше установленного значения, температура должна являться критерием длительности облучения каждого участка поверхности;

- установка предпочтительно должна быть мобильной (самодвижущейся) с целью реализации принципов «от участка к участку детали» и «от изделия к изделию» (для упрощения поставки на обработку крупногабаритных изделий, формируемых, например, на стапелях), а также обработки малогабаритных изделий в стационарном режиме;

- защита окружающей среды от прошедшего через изделия непоглощенного излучения и отраженного излучения не должна включать в себя отражающих элементов с целью предотвращения неконтролируемого облучения изделия, вызывающего неравномерность воздействия, предпочтительно – эффективно поглощающий энергию СВЧ электромагнитного поля материал;

- для повышения уровня безопасности установки с камерой лучевого типа с неограниченным объемом необходимо применять программирование с компьютера, ноутбука или любой поддерживающей необходимые параметры процесса промышленной системы цифрового программного управления.

На рис. 4 а представлен разработанный и изготовленный действующий макет-демонстратор мобильного автоматизированного комплекса для СВЧ модифицирования крупногабаритных изделий из ПКМ с криволинейной поверхностью. На рис. 4 б показано диалоговое окно системы управления комплексом, реализованной на основе ноутбука общего применения.

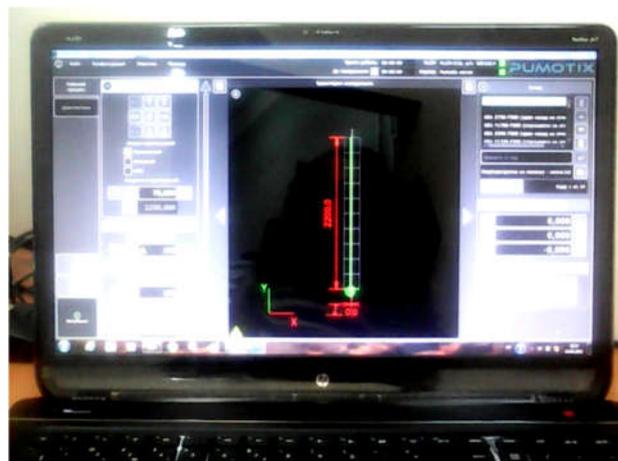
Макет-демонстратор представляет собой мобильный дистанционно программируемый робототехнический комплекс, имеющий модульное исполнение. Все модули смонтированы на тележке из прямоугольных труб сечением 40×30 с толщиной стенки 2...3 мм. Тележка имеет две пары рулевых опорных колес, поворачивающихся при помощи двух рулевых машинок (механизм управления направлением дви-

жения тележки) в противоположном направлении, что обеспечивает высокую мобильность и разворот на месте. На тележке смонтирован привод горизонтального перемещения в продольном направлении относительно обрабатываемого изделия (координата X). Привод включает шаговый двигатель с редуктором и ведущее обремененное колесо, расположенное в



а)

средней точке тележки. Благодаря такой конструкции обеспечивается разворот вокруг центральной оси при срабатывании рулевых машинок. СВЧ технологический модуль представляет собой серийную микроволновую установку «Жук-2-02» разработки и производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск, Калужской обл.).



б)

Рис. 4. а – Макет-демонстратор мобильного робототехнического СВЧ технологического комплекса модифицирования крупногабаритных изделий из ПКМ с криволинейной или наклонной поверхностью и б – диалоговое окно системы управления комплексом (показана визуализация перемещения излучателя по двум осям)

Fig. 4. a - Layout-demonstrator of a mobile robotic microwave technological complex for modifying large-sized PCM products with a curved or inclined surface, and b - dialog box of the complex control system (visualization of the emitter movement along two axes is shown)

Излучатель расположен в качающейся подвеске и соединен с источником питания экранированным кабелем. Во всех шаговых приводах применены пятифазные редукторные шаговые двигатели *Autonics* серии *AK-G* типоразмера 85 с максимальным моментом 20 Н.м и числом оборотов 0...280 об/мин. Двигатели управляются контроллерами типа *MD-5 – ND-14*. Модуль питания и управления состоит из драйверов шаговых электродвигателей, реле включения СВЧ источника, платы сопряжения. Для программирования цикла работы макета достаточно ноутбука среднего класса, программа управления установкой может быть реализована на базе стандартного программного обеспечения современных 5-и координатных ме-

таллорезущих станков. В данном случае 4 координаты непосредственно задействованы в обеспечении согласованных перемещений СВЧ излучателя, 5-я координата используется для включения и выключения СВЧ излучателя.

Опыт разработки, изготовления и отладки макета-демонстратора позволил обосновать технические предложения по промышленному СВЧ комплексу (Рис. 5), способному осуществлять обработку стационарных объектов размерами до 6000×4000 мм (типичные изделия - элементы обшивки летательных аппаратов из ПКМ).

Комплекс предназначен в основном для обработки крупногабаритных стационарных объектов или объектов, перемеще-

ние которых в технологическом цикле нецелесообразно. Отличительными особенностями комплекса являются следующие.

Комплекс представляет собой мобильный робот, содержащий платформу, установленную на транспортном средстве, манипулятор, выполненный в виде снабженных приводами и шарнирно соединенных между собой звеньев, на конечном из которых размещен рабочий орган, отличающийся тем, что манипулятор установлен на горизонтальной направляющей с шаговым двигателем перемещения, при этом горизонтальная направляющая закреплена на каретке, установленной на вертикальной колонне с возможностью перемещения при помощи зубчато-реечной мелко модульной передачи и шагового двигателя, колонна жестко закреплена на платформе в центре масс транспортного средства, привод движения которого выполнен в виде одного ведущего колеса, связанного через редуктор с шаговым двигателем, при этом робот снабжен четырьмя индивидуально управляемыми рулевыми машинками для изменения направления движения, обеспечивающими поворот колес, размещенных в углах транспортного средства так, что центр ведущего колеса находится на пересечении линий, соединяющих оси поворота указанных колес, при этом шаговые приводы перемещения робота и манипулятора выполнены с возможностью управления посредством контроллеров.

На рис. 5 обозначено: 1 – платформа, 2 – шаговый двигатель перемещения платформы, 3 – цилиндрический редуктор, 4 – индивидуально управляемые рулевые машинки, 5 – тяги, 6 – управляющие колеса малого диаметра, 7 – СВЧ излучатель, 8 – шарнирный манипулятор с мехатронными приводами, 9 – горизонтальная направляющая (ось Y), 10 – шаговый двигатель перемещения по оси Y , 11 – каретка, 12 – вертикальная колонна с зубчато-реечной передачей и шаговым двигателем перемещения по оси Z , 13 – шкаф управления, 14 – блок питания СВЧ излучателя.

Технические решения, реализованные в описанных СВЧ технологических комплексах защищены патентами РФ [28, 29].

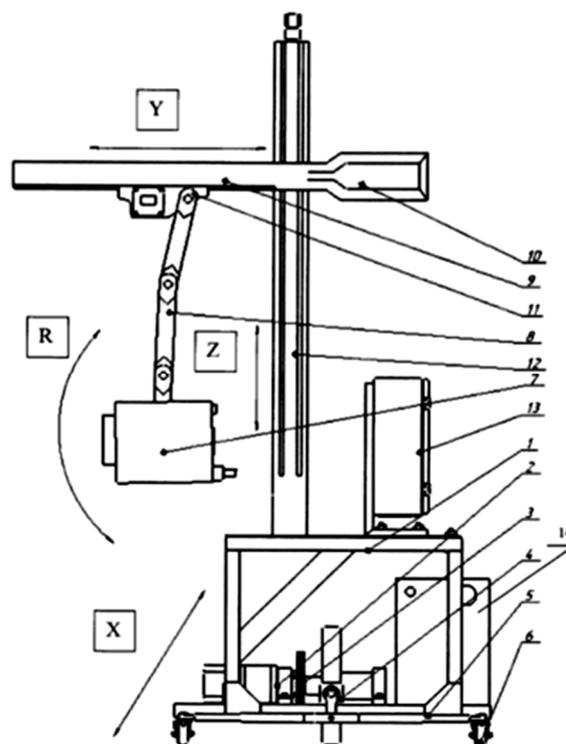


Рис. 5. Мобильный робот для СВЧ обработки крупногабаритных изделий из ПКМ сложной формы (пояснения в тексте)

Fig. 5. Mobile robot for microwave processing of large-sized PCM products of complex shape (explanations in the text)

Требование безопасности в отношении электромагнитного излучения (ЭМИ) при эксплуатации Установки обеспечивается следующими конструкторскими мероприятиями:

1. Применением съемного легкого экрана из полипропиленовой пленки с внутренним поглощающим ЭМИ покрытием типа *LF-77*, *LF-79*, *MT-26*, *MT-28*, *MT-30* производства *Guming Microwave* (представитель в России – «ЭлекТрейд-М») или отечественные разработки НИИРПИ и компании «Кондор» (ВРБ-2, ВРБ-3-80); перед началом обработки экран, размещаемый на установке в сложенном состоянии, раскрывают и закрывают всю рабочую зону. Защитный экран может представлять собой также легкую монтируемую на каждом рабочем месте конструкцию в виде навеса на основе алюминиевого каркаса с натянутым пологом из полипропиленовой пленки, на внутреннюю поверхность которой нанесен слой материала, поглощающего СВЧ излучения. Экран

монтируется вокруг обрабатываемого изделия, после передвижения тележки установки в рабочую зону.

2. Исполнением установки в виде мобильного робототехнического комплекса, с применением удаленного управления

Заключение

Показано, что для практической реализации технологии упрочнения изделий из ПКМ в СВЧ электромагнитном поле существующие серийные СВЧ технологические установки с камерами резонаторного типа со стоячей или бегущей волной, а также с камерой лучевого типа с ограниченным объемом малоприспособны, поскольку не обеспечивают равномерного СВЧ воздействия на объекты с криволинейной поверхностью или с большими габаритными размерами. Целесообразно применение СВЧ установок с камерой лучевого типа с излучением в открытое пространство (с неограниченным объемом).

Предложены принципы создания СВЧ технологических установок для упрочняющей обработки изделий различного назначения из ПКМ.

Разработан, изготовлен и прошел промышленную апробацию опытно-промышленный образец установки повышения прочности и эластичности уплотни-

при помощи ноутбука, через систему *Wi-Fi*, осуществляющего управление циклами работы источника СВЧ электромагнитного поля и шаговыми приводами перемещений.

тельных элементов магистральных газопроводов, на котором отработаны основные технические решения по установкам с программируемым технологическим циклом и управляемыми относительными перемещениями излучающего рупора и изделия.

Разработан и изготовлен макет-демонстратор мобильного робототехнического комплекса для СВЧ обработки крупногабаритных изделий сложной формы, на основе которого разработаны технические предложения по промышленному образцу робота.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 23-79-00039 «Обоснование методологии комплексного модифицирования композиционных материалов для экстремальных условий эксплуатации на основе изучения фазово-структурных превращений под влиянием электрофизических воздействий различного частотного диапазона».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор). Труды ВИАМ. 2020. № 6-7. С. 29-37.
2. Мировой рынок производства композитов, группа компаний «Армпластк»: официальный сайт. 2015. <https://arm-plast.ru/ozavode/novosti/mirovoj-rynok-proizvodstva-kompozitov.html> (дата последнего обращения 01.08.2025).
3. Михайлин Ю.А., Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб. : Научные основы и технологии, 2010. 822 с.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники. Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520-530.
5. Osswald T, Baur E, Brinkmann S. et al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. Munich; Cincinnati: Hanser. 2006. P. 904.
6. Razali N, Sultan M T H, Mustapha F et al. Impact Damage on Composite Structures – A Review. The International Journal Of Engineering And Science (IJES). 2014;3(7):8-20.
7. Serge Abrate. Impact Ingeneering of Composite Structures. Springer-Wien-NewYork. 2011. P. 409.
8. А.А. Соловьева, К.С. Кулак, Е.Ю. Артамонова. Использование композиционных материалов при проектировании ветроэнергетических установок. Молодой ученый. 2016. № 22.3 (126.3). С. 50-54. - URL: <https://moluch.ru/archive/126/35133/>.
9. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития. Труды ВИАМ. 2023. №8 (126). С. 85-99.
10. Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) / С.И. Мишкин. Труды ВИАМ. 2022. №5 (111). С. 87-95.
11. Валуева М.И., Евдокимов А.А., Начаркина А.В. и др.. Полимерные композиционные материалы

- и технологии в автомобилестроении (обзор). Труды ВИАМ. 2022. №1 (107). С. 53-65.
12. Тимошков П.Н., Гончаров В.А., Усачева М.Н. и др. Особенности технологии и полимерные композиционные материалы для изготовления крыльев перспективных самолетов (обзор). Труды ВИАМ. 2022. №1 (107). С. 66-75.
 13. Гончаров В.А., Тимошков П.Н., Усачева М.Н. Перспективы производства крупногабаритных авиационных деталей из полимерных композиционных материалов (обзор). Труды ВИАМ. 2021. №12 (106). С. 55-62.
 14. Тимошков П.Н., Хрульков А.В., Григорьева Л.Н. Трансмиссионные валы из углепластика. Материалы и технологии (обзор). Труды ВИАМ. 2020. №8 (90). С. 46-53.
 15. Мишкин С.И., Раскутин А.Е., Евдокимов А.А. и др. Технологии и основные этапы строительства первого в России арочного моста их композиционных материалов. Труды ВИАМ. 2017. №6 (54). С. 42-51.
 16. Власенко Ф.С., Раскутин А.Е. Применение полимерных композиционных материалов в строительных конструкциях. Труды ВИАМ. 2013. №8. С.10.
 17. Клименко О.Н., Валуева М.И., Рыбникова А.Н. Полимерные и полимерные композиционные материалы в спорте (обзор). Труды ВИАМ. 2020. №10 (92). С. 81-89.
 18. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии. Саратов : Научная книга, 2011. 560 с.
 19. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Егоров А.С., Кузнецов Д.И. Влияние сверхвысокочастотного электромагнитного поля на межслоевую прочность в отвержденных полимерных композиционных материалах. Журнал технической физики. 2023. Т. 93. №2. С. 237-340.
 20. Злобина И.В., Бекренев Н.В. О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ электромагнитного поля. Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2022. Т. 22. № 2. С. 158-169.
 21. Kwak M, Robinson P, Bismarck A, Microwave R. Curing of carbon-epoxy composites: Penetration depth and material characterization : Imperial College London Department of Aeronautics : A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy. 2016. P. 150 <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.007>.
 22. Магнетрон М-177 75кВт, научно-производственное предприятие «Магратеп»: официальный сайт. 2017. <https://magratep.ru/2017/09/29/>.
 23. СВЧ-сушка древесины с применением систем управления на базе ПЛИК Delta Electronics, компания «Elhand Transformatory»: официальный сайт 2025. <https://deltronics.ru/articles/svch-sushka-drevesinyi/>.
 24. <https://www.europages.co.uk/en/company/aim-wood-ug-20706834/products/mikrowellen-vakuumkammer-mghpg-0060-lx--35308516>.
 25. Ivan Imenokhoyev H, Windsheimer R, Waltz N. Kinsel Microwave Heating Technology: Potentials and Limits. LINN HIGH THERM GmbH. 2013;90(4). Available from: https://www.linn-high-temp.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/white_papers/Mikrowellenerw-aermungRus.pdf.
 26. Огурцов К.Н. Разработка методов расчета электротермических установок и математического моделирования процессов термообработки диэлектриков с большими объемами и поверхностями: специальность 05.09.10 «Электротехнология»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Огурцов Константин Николаевич; Саратовский государственных технический университет им. Гагарина Ю.А. Саратов, 2004. 18 с.
 27. Скупинский А.В., Садовсков И.Д., Паршиков О.А. и др.. СВЧ технологическая установка повышения прочности и эластичности уплотнительных элементов магистральных трубопроводов. Вопросы электротехнологии. 2023. № 3 (40). С. 15-27.
 28. Патент № 2742147 Российская Федерация, МПК H05B 6/64 (2006.01), B29C 35/08 (2006.01), B29C 71/04(2006.01). СВЧ-установка обработки изделий из диэлектрических материалов с большими объемами и поверхностями: № 2020125579: заявл. 24.07.2020 : опубл. 03.02.2021 / Злобина И.В., Бекренев Н.В. ; заявитель СГТУ имени Гагарина Ю.А.. – 17 с.
 29. Патент № 208976 Российская Федерация, МПК B25J 5/00 (2006.01). Мобильный робот для обработки поверхностей крупногабаритных стационарных объектов: № 2021110989: заявл. 16.04.2021 : опубл. 25.01.2022 / Перегородов А.А., Бекренев Н.В., Злобина И.В., Иванюков И.Н. ; заявитель СГТУ имени Гагарина Ю.А.. – 10 с.

REFERENCES

1. Doriomedov MS. The Russian and global market of polymer composites (review). Trudi VIAM. 2020;6-7:29-37.
2. Global composite production market [Internet]. Armplastk Group of companies; 2015 [cited 2025 Aug 01]. Available from: <https://arm-plast.ru/ot-zavode/novosti/mirovoj-ryinok-proizvodstva-kompozitov.html>.
3. Mikhailin YuA. Structural polymer composite materials. 2nd ed. St. Petersburg: Scientific Foundations and Technologies; 2010.

4. Kablov EN. Materials and chemical technologies for aviation equipment. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2012;82(6):520-530.
5. Osswald T, Baur E, Brinkmann S. International plastics handbook the resource for plastics engineers. Munich (Cincinnati): Hanser; 2006.
6. Razali N, Sultan M T H, Mustapha F. Impact damage on composite structures: review. The International Journal Of Engineering And Science (IJES). 2014;3(7):8-20.
7. Abrate S. Impact engineering of composite structures. Springer-Wien-NewYork; 2011.
8. Solovyeva AA, Kulak KS, Artamonova EYu. Use of composite materials in the design of wind power plants. Young Scientist [Internet]. 2016;22.3(126.3):50-54. Available from: <https://moluch.ru/archive/126/35133/>.
9. Putilina PM, Kutsevich KE, Isaev AYr. Polymer composite materials based on carbon and glass fibers for manufacturing parts of unmanned aerial vehicles and prospects for their development. Trudi VIAM. 2023;8(126):85-99.
10. Mishkin SI. Use of carbon fiber plastics in the construction of unmanned vehicles (review). Trudi VIAM. 2022;5(111):87-95.
11. Valueva MI, Evdokimov AA, Nacharkina AV. Polymer composite materials and technologies in the automotive industry (review). Trudi VIAM. 2022;1(107):53-65.
12. Timoshkov PN, Goncharov VA, Usacheva MN. et al. Technology features and polymer composite materials for the manufacture of wings of promising aircraft (review). Trudi VIAM. 2022;1(107):66-75.
13. Goncharov VA, Timoshkov PN, Usacheva MN. Prospects for the production of large-sized aircraft parts from polymer composite materials (review). Trudi VIAM. 2021;12(106):55-62.
14. Timoshkov PN, Khrulkov AV, Grigorieva LN. Transmission shafts made of carbon fiber. Materials and technologies (review). Trudi VIAM. 2020;8(90):46-53.
15. Mishkin SI, Raskutin AE, Evdokimov AA. Technologies and main stages of construction of Russia's first arch bridge made of composite materials. Trudi VIAM. 2017. No.6 (54). pp. 42-51.
16. Vlasenko FS, Raskutin AE. Application of polymer composite materials in building structures. Trudi VIAM. 2013;8:10.
17. Klimentko ON, Valueva MI, Rybnikova AN. Polymer and polymer composite materials in sports (review). Trudi VIAM. 2020;10(92):81-89.
18. Arkhangelsky YuS. Reference book on SHF electrothermics. Saratov: Nauchnaya Kniga; 2011.
19. Zlobina IV, Bekrenev NV, Egorov AS, Kuznetsov DI. Influence of microwave electromagnetic field on interlayer strength in cured polymer composite materials. Technical Physics. 2023;93(2):237-340.
20. Zlobina IV, Bekrenev NV. On the mechanism of increasing the mechanical characteristics of cured polymer composite materials under the action of a microwave electromagnetic field. Izvestiya of Saratov University. Physics. 2022;22(2):158-169.
21. Kwak M, Robinson P, Bismarck A, Microwave R. Curing of carbon–epoxy composites: Penetration depth and material characterization [dissertation on the internet]. [London (UK)]: Imperial College London Department of Aeronautics; 2016. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.007>.
22. Magnetron M-177 75kW [Internet]. Magratep Scientific and Production Enterprise; 2017. Available from: <https://magratep.ru/2017/09/29/>.
23. SHF drying of wood using control systems based on Delta Electronics PLC [Internet]. Elhand Transformatory Company; 2025. Available from: <https://deltronics.ru/articles/svch-sushka-drevesinyi/>.
24. <https://www.europages.co.uk/en/company/aim-wood-ug-20706834/products/mikrowellen-vakuumkammer-mghpg-0060-lx--35308516>.
25. Imenokhoyev IH, Windsheimer R, Waltz N. Kintsel microwave heating technology: potentials and limits. LINN HIGH THERM GmbH [Internet]. 2013;90(4). Available from: https://www.linn-high-temp.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/white_papers/Mikrowellenerw-aermungRus.pdf.
26. Ogurtsov K.N. Development of calculation methods for electrothermal installations and mathematical modeling of heat treatment processes of dielectrics with large volumes and surfaces [abstract of dissertation]. [Saratov (RF)]; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; 2004.
27. Skupinsky AV, Sadovskov ID, Parshikov OA, Аврамов MB, Zlobina IV, Bekrenev NV. Microwave technological unit for increasing toughness and elasticity of sealing structures in long-distance pipelines. Journal of Electrotechnics. 2023;3(40):15-27.
28. Zlobina IV, Bekrenev NV. RF Patent No. 2742147, МПК H05B 6/64 (2006.01), B29C 35/08 (2006.01), B29C 71/04(2006.01). SHF unit for products made of dielectric materials with large volumes and surfaces. 2021 Febr 03.
29. Peregorodov AA, Bekrenev NV, Zlobina IV, Ivanilov IN. RF Patent No. 208976, МПК B25J 5/00 (2006.01). Mobile robot for surface treatment of large stationary objects. 2022 Jan 25.

Информация об авторах:

Злобина Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва, ответственный секре-

тарь научно-технического журнала «Вестник СГТУ», международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 56446931800, Research- ID-Web of Science N-8763-2016, Author-ID-РИНЦ 686083, тел. 8-917-322-13-88.

Бекренев Николай Валерьевич – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и мехатроника» СГТУ имени Гагарина Ю.А., член-корреспондент РАН, эксперт РНФ, зам. главного редактора научно-технического

журнала ВАК «Вопросы электротехнологии», международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 6506930142, Research-ID-Web of Science AAB-8905-2021 Author-ID-РИНЦ 271817, тел. 8-927-122-37-58.

Zlobina Irina Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Mechatronics at Yuri Gagarin State Technical University, Saratov, Researcher at Kurchatov Institute Research Center, Moscow, Executive Secretary of the scientific and technical journal *Vestnik SSTU*, international identification Author's numbers: Scopus-Author ID 56446931800, Research-ID-Web of Science N-8763-2016, Author-ID-RSCI 686083, phone: 8-917-322-13-88.

Bekrenev Nikolay Valeryevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technical Mechanics and Mechatronics at Yuri Gagarin State Technical University, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, expert of the Russian Science Foundation, Assistant to the Chief Editor of *Journal of Electrotechnics*, international identification numbers of the author: Scopus-Author ID 6506930142, Research-ID-Web of Science AAV-8905-2021 Author-ID-RSCI 271817, phone: 8-927-122-37-58.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 26.08.2025; одобрена после рецензирования 04.09.2025; принята к публикации 28.08.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 26.08.2025; approved after review on 04.09.2025; accepted for publication on 26.09.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.