

## Бесконтактный нагрев ферромагнитных наполнителей клеевой композиции при склеивании древесины

В.И. Мелехов<sup>1a</sup>, И.И. Соловьев<sup>1b</sup>, Н.Г. Пономарева<sup>1c</sup>, В.В. Прохоров<sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, 17, Архангельск, Россия

<sup>2</sup> Институт судостроения и морской арктической техники Северного (Арктического) федерального университета  
им. М.В. Ломоносова, ул. Капитана Воронина, 6, Северодвинск, Россия

<sup>a</sup> v.melekhov@narfu.ru, <sup>b</sup> i.solovev@narfu.ru, <sup>c</sup> n.ponomareva@narfu.ru, <sup>d</sup> v.prokhorov@narfu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0002-0239-8254>

Статья поступила 10.10.2023, принята 16.10.2023

*Широкое применение изделий из клееной древесины обусловлено их высокой прочностью, отсутствием дефектов, стойкостью к температурным перепадам, увеличенной способностью к воздействию нагрузкам. В работе представлены результаты исследований бесконтактного нагрева ферромагнитных наполнителей клеевой композиции для склеивания древесины. Цель исследования заключается в определении граничных температурных характеристик ферромагнитных наполнителей для клеевой композиции при индукционном нагреве. Проведены опыты по нагреву пяти видов ферромагнитных наполнителей: порошка ферромагнитного Fe 90 %; ферромагнитных опилок из стали Fe 95 %; измельченных окатышей обожженных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и не обожженных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; ферромагнитной сечки из стальной проволоки. Установлено, что в качестве наполнителей клеевой композиции для интенсификации нагрева могут быть эффективно применены измельченные ферромагнитные материалы — ферромагнитные опилки Fe 95 %, наполнитель из измельченных окатышей не обожженных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ферромагнитная сечка. Представленные ферромагнитные наполнители сравнимы по размерным и качественным характеристикам с применяемыми на практике и могут быть включены в состав клеевой композиции. Определена зависимость температуры нагрева ферромагнитных наполнителей от мощности источника питания индуктора. Установлены характеристики термодинамического равновесия при индукционном нагреве общедоступных для практического применения ферромагнитных наполнителей.*

**Ключевые слова:** склеивание древесины; ферромагнитный наполнитель; клеевая композиция; индукционный нагрев.

## Non-contact heating of ferromagnetic fillers of the adhesive composition when gluing wood

V.I. Melekhov<sup>1a</sup>, I.I. Soloviev<sup>1b</sup>, N.G. Ponomareva<sup>1c</sup>, V.V. Prokhorov<sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnaya Dvina Emb., Archangelsk, Russia

<sup>2</sup> Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov; 6, Captain Voronin St., Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology, Severodvinsk, Russia

<sup>a</sup> v.melekhov@narfu.ru, <sup>b</sup> i.solovev@narfu.ru, <sup>c</sup> n.ponomareva@narfu.ru, <sup>d</sup> v.prokhorov@narfu.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>,

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0009-0002-0239-8254>

Received 10.10.2023, accepted 16.10.2023

*The widespread use of glued wood products is due to their high strength, absence of defects, resistance to temperature changes, increased ability to impact loads. The paper presents the results of studies of non-contact heating of ferromagnetic fillers of an adhesive composition for gluing wood. The aim of the study is to determine the boundary temperature characteristics of ferromagnetic fillers for an adhesive composition under induction heating. Experiments are carried out on heating five types of ferromagnetic fillers: ferromagnetic Fe 90% powder; ferromagnetic sawdust made of Fe 95% steel, crushed pellets fired with Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, not fired with Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ferromagnetic section made of steel wire. It is established that crushed ferromagnetic materials can be effectively used as fillers of the adhesive mixture for heating intensification: ferromagnetic sawdust Fe 95%, filler from crushed pellets not burnt Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ferromagnetic section. The presented ferromagnetic fillers are comparable in size and quality characteristics to those used in practice and can be included in the adhesive composition. The dependence of the heating temperature of ferromagnetic fillers on the power of the inductor power source is determined. The characteristics of thermodynamic equilibrium during induction heating of ferromagnetic fillers generally available for practical use are established.*

**Keywords:** gluing wood; ferromagnetic filler; adhesive composition; induction heating.

**Введение.** Склеивание древесины — технологический процесс получения неразъемного соединения деталей путем адгезионного взаимодействия клеевой композиции и соединяемых поверхностей.

Склеивание изделий из древесины, шпона, древесно-композиционных материалов производят холодным и горячим способом. Холодный способ осуществляют при температуре 18–20 °С. Горячий является основным видом склеивания древесины. Реализация горячего способа склеивания связана с нагревом клеевого шва. В зависимости от вида склеиваемых материалов, применяемых клеев, способов нагрева склеиваемых заготовок из древесины горячий способ осуществляется при температурах до 200 °С [1–3].

Верхний предел температурного интервала ограничен возможным развитием при высоких температурах термической деструкции древесины.

Для интенсификации процесса полимеризации клея применяют нагрев: контактный, конвективный, инфракрасным излучением, токами промышленной и сверхвысокой частоты (СВЧ). Теплопередача в клеевую композицию производится через массив склеиваемой древесины, сопровождается потерей тепла в древесине, при этом прогрев и полимеризация клеевого шва в различных зонах сопрягаемых клеевых поверхностей древесины неодинаковы:

- при кондуктивном (контактном) нагреве происходит неравномерное нагревание заготовок по толщине и по площади контакта, различное время полимеризации клеевого слоя. Излишняя продолжительность нагрева отвержденного клеевого слоя повышает вероятность возникновения в нем термических напряжений, что приводит к снижению прочности соединения;

- конвективный способ теплообмена обеспечивает прогрев наружных зон склеиваемой древесины и аккумуляцию тепла заготовки. Поэтому прогрев и теплопередача в клеевом шве происходят с запаздыванием, и он окончательно полимеризуется после распрессовки, при дальнейшей выдержке конструкции при температуре окружающей среды;

- инфракрасное излучение используется при нагреве тонколистовых древесных материалов. Обеспечиваются прогрев пограничных слоев клеевого соединения и ускоренное отверждение клея в пограничной зоне. Достаточно 10–20 мин воздействия для придания склеиваемой конструкции транспортной прочности. Этот способ не может быть применен для полного отверждения клеевого слоя по всей площади крупномерных деталей;

- способ нагрева клеевого слоя аккумулятивным в древесине теплом применяют в основном при склеивании единичных деталей;

- нагрев древесины при склеивании и дальнейшей контактной передаче тепла токами промышленной частоты и сверхвысокой частоты (СВЧ) осуществляется в специальных, сложных по конструкции энергоемких установках. Применение способа ограничено требованиями техники безопасности при использовании высокого напряжения. При этом следует учитывать деструктивное воздействие на древесину кислоты и щелочи, входящих в клеевую композицию [4–10].

Рассмотренные способы склеивания древесины заключаются в том, что тепловое воздействие на клеевую композицию осуществляют через теплоотдачу неравномерно. В связи с этим представляет интерес непосредственно нагрев клеевого шва без промежуточного нагрева древесины.

Вопросы применения непосредственно контактного нагрева клеевой композиции через карбоновый резистор впервые рассмотрены в работах Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии (В.А. Куликов, Г.С. Варанкина, А.Н. Чубинский и др.).

Представляет интерес индукционный бесконтактный нагрев массива клеевого шва. Это возможно, если клеевая композиция обладает магнитными свойствами. Для этого в композицию вводят технологические фрагментированные ферромагнитные элементы (наполнитель), которые в создаваемом

индукционном поле нагреваются совместно с массой композиции и ускоряют ее полимеризацию (патент № RU2715840 С1 «Способ склеивания древесины»).

Введенный в состав клеевой композиции ферромагнитный наполнитель не должен снижать прочностных характеристик соединения. Особенностью данного способа нагрева является прогрев только объема клеевого шва без заметного нагрева древесины [11].

Процессы бесконтактного индукционного нагрева клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем изучены недостаточно и требуют проведения дополнительных целенаправленных исследований [16].

Следует, в первую очередь, определить безопасный температурный диапазон нагрева технологически приемлемых ферромагнитных наполнителей для клеевой композиции, теплофизические характеристики наполнителей с учетом динамики процесса полимеризации клеевой композиции.

*Цель работы* — определение граничных температурных характеристик ферромагнитных наполнителей для клеевой композиции при индукционном нагреве.

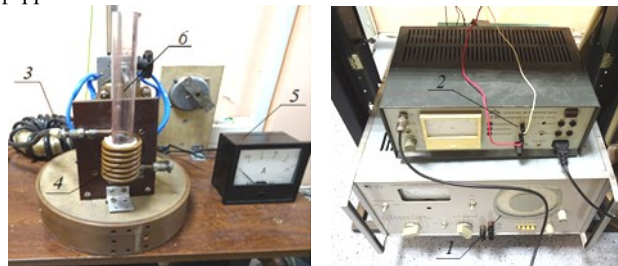
Для изучения процесса индукционного нагрева наполнителей были взяты 5 образцов измельченных фрагментированных ферромагнитных материалов разной дисперсности.

Исследованы ферромагнитные наполнители: порошок ферромагнитный Fe 90 %; ферромагнитные опилки из стали Fe 95 %; измельченные окатыши обожженные Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не обожженные Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, применяемые в металлургической промышленности; ферромагнитная сечка из стальной проволоки. Окатыши — гранулированный рудный концентрат, продукт обогащения, последующего окомковывания и обжига железосодержащих руд [32; 33].

**Материалы и методы исследования.** Исследования проведены на экспериментальной установке индукционного нагрева с нагревательным элементом в виде индуктора сложной формы с возможностью перемещения относительно поверхности [18–22]. Мощность источника питания индуктора P = 100 Вт, диапазон регулирования частот 3–10 кГц (рис. 1).

Ферромагнитный наполнитель нагревали в воздушной среде с фиксацией температурных и массовых характеристик.

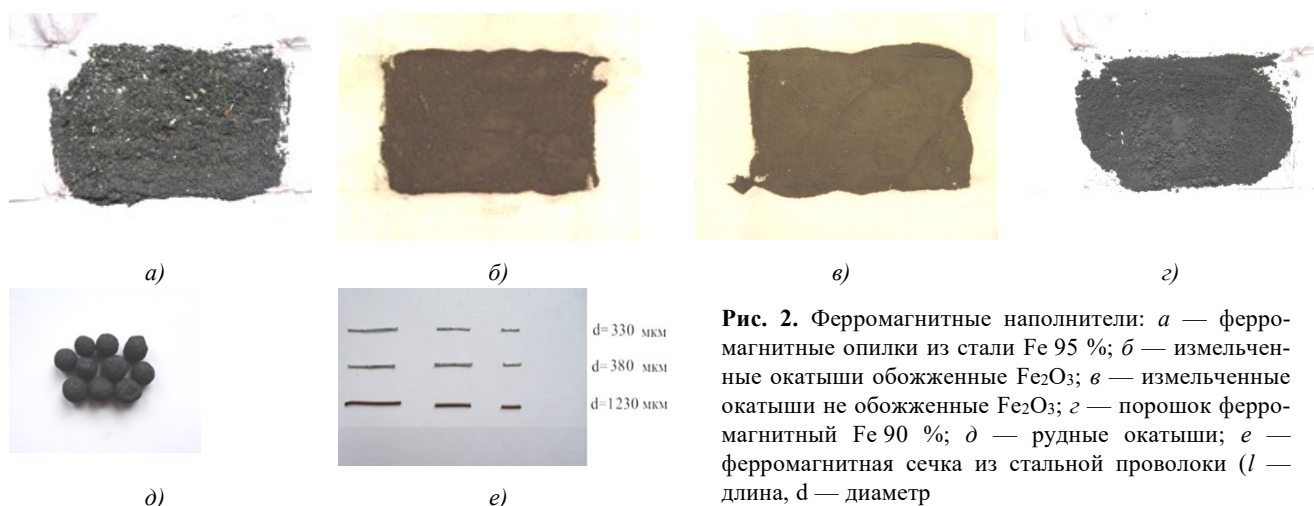
Аппаратурное сопровождение измерений позволяет регистрировать информацию в непрерывном режиме. Определены изменения величины температуры, тока. В процессе работы индуктор создает магнитное поле, которое обеспечивает нагрев ферромагнитного наполнителя.



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 — источник питания ГЗ-109 (Г); 2 — усилитель мощности LV-103 (У); 3 — нагрузочный трансформатор (НТ); 4 — индуктирующий провод (ЛИ); 5 — амперметр (А); 6 — контейнер с ферромагнитным наполнителем

Исследовали 5 видов ферромагнитных наполнителей (рис. 2).

Измельчали окатыши до однородного фракционного состава 250 мкм. Получили мелкодисперсный ферромагнитный наполнитель содержанием Fe 65–70 %.



**Рис. 2.** Ферромагнитные наполнители: *a* — ферромагнитные опилки из стали Fe 95 %; *б* — измельченные окатыши обожженные Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; *в* — измельченные окатыши не обожженные Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; *г* — порошок ферромагнитный Fe 90 %; *д* — рудные окатыши; *е* — ферромагнитная сечка из стальной проволоки (*l* — длина, *d* — диаметр)

Для определения температуры нагрева цельнотельного ферромагнитного материала подготовили сечку из стальной проволоки  $d = 300\div 1230$  мкм. Были проведены опыты по установлению интенсивности нагрева ферромагнитных наполнителей. Масса проб ферромагнитных наполнителей  $20\pm 0,1$  г. Методическая сетка опытов представлена в табл. 1.

**Таблица 1.** Методическая сетка опытов

Наименование фактора	Обозначение	Единица	Значения факторов
Вид ферромагнитного наполнителя	—	—	Ферромагнитные опилки из стали Fe 95 %, ферромагнитные наполнители из окатышей обожженных, не обожженных, порошок ферромагнитный Fe 90 %, ферромагнитная сечка из стальной проволоки
Размерный состав фракций	<i>d</i>	мкм	250 – 1 230
Содержание Fe	<i>c</i>	%	65–95
Оценочные показатели			
Температура термодинамического равновесия	<i>t</i>	°C	—
Продолжительность нагрева	$\tau$	с	—

**Таблица 2.** Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитных наполнителей

Ферромагнитный наполнитель	Масса	Размерный состав фракций	Температура термодинамического равновесия, °C	Мощность источника питания индуктора
Ферромагнитные опилки из стали Fe 95 %	20 г	250 мкм	43,5	100 Вт
Измельченные окатыши обожженные Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			37,4	
Измельченные окатыши не обожженные Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			41,6	
Порошок ферромагнитный Fe 90 %			39,2	
Ферромагнитная сечка из стальной проволоки			47,2	

Для каждого опыта брали по 6 проб. Проводили индукционный нагрев наполнителей из ферромагнитных опилок из стали Fe 95 % из окатышей обожженных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, не обожженных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, порошка ферромагнитного Fe 90 %, ферромагнитной сечки из стальной проволоки (табл. 1). Продолжительность индукционного нагрева 120 с. Величину тока фиксировали амперметром М903, температуру нагрева — термопарой марки ТХК(L). Результаты опытов приведены в табл. 2 и 3.

**Результаты исследования.** Использовали хромель-копелевую термопару, которая в процессе проведения измерений не нагревается под воздействием электромагнитного поля индуктора. Термопара инертна к полю, выполнена из немагнитного материала. Погрешность проведенных измерений  $\pm 2,5$  °C.

Определен рабочий диапазон энергетических характеристик экспериментальной установки [23–31].

При проведении опытов (рис. 1) в радиопрозрачный стеклянный контейнер *б* загружали пробу ферромагнитного наполнителя (20 г), помещали в управляемое магнитное поле индуктора *4*. Ферромагнитный наполнитель под воздействием вихревых токов нагревается в поле индуктора [12–17].

Регистрировали температуру термодинамического равновесия при нагреве ферромагнитных наполнителей. Следует отметить, что нагрев ферромагнитных опилок из стали Fe 95 % (фракционный состав № 1), измельченных окатышей не обожженных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (№ 3) и ферромагнитной сечки из стальной проволоки (№ 5) током 0,8 А происходит с наибольшей интенсивностью (рис. 3).

Экспериментально установлено, что с увеличением линейных размеров элементов сечки  $l = 7,5\div 14,5$  температура термодинамического равновесия увеличивается в 1,5 раза (рис. 4).

Определена зависимость температуры нагрева ферромагнитных наполнителей от мощности источника питания индуктора. Снятая зависимость линейная (табл. 4, 5).

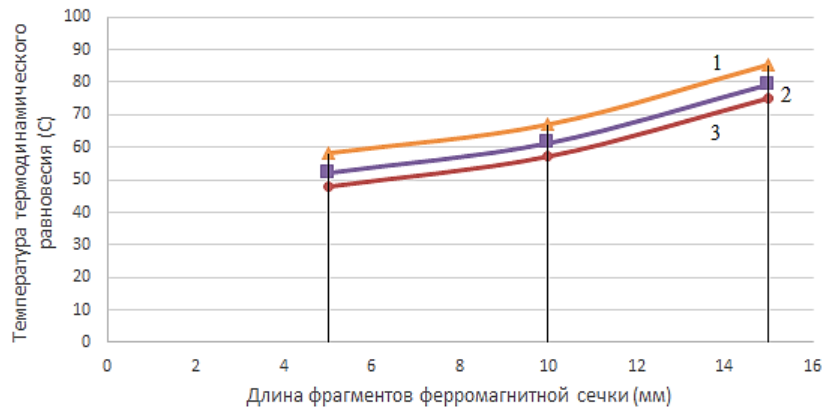


**Рис. 3.** Индукционный нагрев ферромагнитных наполнителей током частотой 7 кГц

Установлено, что в качестве наполнителей клеевой композиции для объемного равномерного нагрева клевого шва индукционным способом могут быть эффективно применены ферромагнитные мелкодисперсные материалы: ферромагнитные опилки Fe 95 %, наполнитель из измельченных окатышей не обожженных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ферромагнитная сечка. При этом интенсивность нагрева наполнителя из не обожженных измельченных окатышей на 22–25 % выше, чем обожженных. Рассмотренные ферромагнитные наполнители сопоставимы по размерным и качественным характеристикам с наполнителями, применяемыми при склеивании древесины, позволяют равномерно формировать контактное поле клевого шва.

**Таблица 3.** Температура термодинамического равновесия при индукционном нагреве ферромагнитной сечки

Фракции сечки, мм	Масса	Размерный состав фракций, мкм	Температура термодинамического равновесия, °С	Мощность источника питания индуктора
l = 5	20 г	330	48,1	100 Вт
l = 10			57,4	
l = 15			75,3	
l = 5		380	52,1	
l = 10			61,3	
l = 15			79,4	
l = 5		1 230	58,4	
l = 10			67,2	
l = 15			85,5	



**Рис. 4.** Индукционный нагрев ферромагнитной сечки из стальной проволоки током частотой 7,3 кГц: 1 — фракции 1 230 мкм; 2 — фракции 380 мкм; 3 — фракции 330 мкм

**Таблица 4.** Температура нагрева ферромагнитных наполнителей в зависимости от мощности источника питания индуктора

Мощность источника питания индуктора, Вт	Температура нагрева				
	Ферромагнитные опилки из стали Fe 95 %, °С	Окатыши обожженные Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , °С	Окатыши не обожженные Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , °С	Порошок ферромагнитный Fe 90 %, °С	Ферромагнитная сечка из стальной проволоки Fe 95 %, °С
25	31,2	26	28,3	26,5	39,8
60	43,5	37,4	41,6	39,2	47,2
100	57,5	53,2	56,5	53,2	62,1
120	64,5	60,4	64,1	60,4	73,4
150	75,1	71,1	75,4	71,1	81,6
170	82,1	78,2	82,9	78,2	88,3
200	92,6	88,9	94,2	88,9	96,2

**Таблица 5.** Температура нагрева ферромагнитной сечки в зависимости от мощности источника питания индуктора

Мощность источника питания индуктора, Вт	Температура нагрева, °С		
	$l = 5$ мм	$l = 10$ мм	$l = 15$ мм
25	37,2	48,5	64,7
60	48,1	57,4	75,3
100	60,3	67,5	87,4
120	66,5	72,6	93,4
150	75,7	80,2	102,5
170	81,9	85,3	108,6
200	91,2	93,1	117,7

*Литература*

1. Бирюков В.Г. Технология клееных материалов и древесных плит. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. 220 с.
2. Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Технология процесса склеивания древесины. СПб.: СПбГЛТУ, 2015. 53 с.
3. Разиньков Е.М. Технология и оборудование клееных материалов. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», 2013. 291 с.
4. Lozinskii M.G. Industrial Applications of Induction Heating; Pergamon: New York, NY, USA, 1969. 690 p.
5. Мелехов В.И., Рудная Н.С. Влияние микрорельефа сопрягаемых поверхностей древесины на прочность склеивания // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2014. № 6. С. 89-100.
6. Долгих И.Ю., Королёв А.Н., Захаров В.М. Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве // Вестн. ИГЭУ. 2014. Вып. 5. С. 57-63.
7. Ковальчук Л.М. Склеивание древесины в поле токов высокой частоты. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1960. 239 с.
8. Мелехов В.И., Прохоров В.В. Интенсификация процесса склеивания древесины индукционным нагревом // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: сб. материалов Всерос. науч.-практической конф. (Северодвинск, 18-30 нояб. 2019 г.). Архангельск: ИД САФУ, 2020. С. 91-95.
9. Мелехов В.И., Соловьев И.И., Прохоров В.В., Тюрикова Т.В. Способ склеивания древесины: пат. № RU2715840 C1 / № 2019123090; заяв. 22.07.2019; опубл. 03.03.2020.
10. Прохоров В.В. Применение индукционного нагрева при склеивании изделий из древесины в судостроительной промышленности // Науч.-технические ведомости Севмашвуза. 2016. № 1. С. 28-31.
11. Прохоров В.В., Ключин Н.М., Воронин А.М. Экспериментальный стенд, предназначенный для исследования процесса склеивания древесных заготовок // Науч. альманах. 2018. № 11-2 (49). С. 53-56.
12. Прохоров В.В., Ключин Н.М., Воронин А.М. Режим склеивания и его влияние на качество клеевого соединения // Науч. альманах. 2019. № 3-3 (53). С. 71-74.
13. Bursavich J., Abu-Laban M., Muley P.D., Boldor D., Hayes J.D. Thermal Performance and Surface Analysis of Steel-Supported Platinum Nanoparticles Designed for Bio-Oil Catalytic Upconversion During Radio Frequency-Based Inductive Heating. Energy Convers. Manage. 2019. 183. P. 689-697.
14. Ceylan S., Coutable L., Wegner J., Kirschning A. Inductive Heating with Magnetic Materials Inside Flow Reactors. Chem. Eur. J. 2011. 17. P. 1884-1893.
15. Ceylan S., Friese C., Lammel C., Mazac K., Kirschning A. Inductive Heating for Organic Synthesis by Using Functionalized Magnetic Nanoparticles Inside Microreactors. Angew. Chem., Int. Ed. 2008. 47. P. 8950-8953.
16. Прохоров В.В. Экспериментальное исследование характеристик ферромагнитных наполнителей, вводимых в клеевую композицию // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. материалов конф. (1-30 апр. 2021 г.). Архангельск, 2021. С. 460-463.
17. Мурзин В.С., Кантиева Е.В., Пономаренко Л.В. Эффективность применения наполнителей при производстве фанеры на малотоксичных карбомидоформальдегидных смолах // Лесотехнический журнал. 2012. № 3. С. 20-24.

**Выводы.** Экспериментально подтверждена возможность применения ферромагнитных наполнителей в клеевой композиции, нагреваемых бесконтактно магнитным полем индуктора, для осуществления горячего способа склеивания древесины. Определена температура индукционного нагрева общедоступных для практического применения ферромагнитных наполнителей при термодинамическом равновесии. Совершенствование процесса склеивания древесины бесконтактным индукционным нагревом клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем актуально, представляет научно-практический интерес и является предметом дальнейших исследований.

18. Фильчаков А.В., Агавердыева А.Ф. Наполнители, применяемые в деревообработке // Труды Братского гос. технического ун-та. Братск: БрГТУ, 2002. С. 116-120.
19. Слухоцкий А.Е. Индукторы. 5-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1989. 69 с.
20. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В. Установки индукционного нагрева. Л.: Энергоиздат, 1981. 328 с.
21. Ruta S., Chantrell R., Hovorka O. Unified Model of Hyperthermia via Hysteresis Heating in Systems of Interacting Magnetic Nanoparticles. Sci. Rep. 2015. 5. P. 9090.
22. Moses A.J. Eddy Current Losses in Soft Magnetic Materials. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering; Wiley: 2016. P. 1-22.
23. Bordet A., Lacroix L.-M., Fazzini P.F., Carrey J., Soullantica K., Chaudret B. Magnetically Induced Continuous CO<sub>2</sub> Hydrogenation Using Composite Iron Carbide Nanoparticles of Exceptionally High Heating Power. Angew. Chem., Int. Ed. 2016. 55. P. 15894-15898.
24. Mortensen P.M., Ostberg M., Nielsen P.E. Induction Heating of Endothermic Reactions. WO2017/036794 A1, 2017.
25. Vinum M., Mortensen P.M. Ferromagnetic Materials for Induction Heated Catalysis. WO 2017/186608 A1, 2017.
26. Rosensweig R.E. Heating Magnetic Fluid with Alternating Magnetic Field. J. Magn. Magn. Mater. 2002. 252. P. 370-374.
27. Wang W., Tuci G., Viet C.D., Liu Y., Rossin A. Induction Heating: An Enabling Technology for the Heat Management in Catalytic Processes. ACS Catal. 2019. 9. P. 7921-7935.
28. Анищенко А.В., Сидоров Е.А., Федотов Н.М. Устройство для индукционного нагрева ферромагнитных имплантов // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов междунар. науч.-практической конф. 2016. № 1-1. С. 171-173.
29. Frederikse H.P.R. Handbook of Chemistry and Physics; Properties of magnetic materials; CRC Press: Boca Raton, FL, 2009.
30. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.

*References*

1. Biryukov V.G. Technology of glued materials and wood slabs. M.: GOU VPO MGUL, 2005. 220 p.
2. Varankina G.S., Chubinskij A.N. Technology of the wood gluing process. SPb.: SPbGLTU, 2015. 53 p.
3. Razin'kov E.M. Technology and equipment of glued materials. Voronezh: FGBOU VPO «VGLTA», 2013. 291 p.
4. Lozinskii M.G. Industrial Applications of Induction Heating; Pergamon: New York, NY, USA, 1969. 690 p.
5. Melekhov V.I., Rudnaya N.S. The influence of the microrelief of the mating surfaces of wood on the bonding strength // Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal). 2014. № 6. P. 89-100.
6. Dolgih I.YU., Korolyov A.N., Zaharov V.M. Modeling of dynamics of temperature processes under induction heating // Vestn. IGEU. 2014. Вып. 5. P. 57-63.
7. Koval'chuk L.M. Gluing wood in the field of high frequency currents. M.; L.: Goslesbumizdat, 1960. 239 p.
8. Melekhov V.I., Prohorov V.V. Intensification of the process of gluing wood by induction heating // Aktual'nye voprosy innovacionnogo razvitiya Arkticheskogo regiona RF: sb. materialov Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (Severodvinsk, 18-30 noyab. 2019 g.). Arhangel'sk: ID SAFU, 2020. P. 91-95.

9. Melekhov V.I., Solov'ev I.I., Prohorov V.V., Tyurikova T.V. Method of gluing wood: pat. № RU2715840 C1 / № 2019123090; заяв. 22.07.2019; opubl. 03.03.2020.
10. Prohorov V.V. The use of induction heating when gluing wood products in the shipbuilding industry // Nauch.-tekhnicheskie vedomosti Sevmashtvuz. 2016. № 1. P. 28-31.
11. Prohorov V.V., Klyushin N.M., Voronin A.M. Experimental stand designed to study the process of gluing wood blanks // Nauch. al'manah. 2018. № 11-2 (49). P. 53-56.
12. Prohorov V.V., Klyushin N.M., Voronin A.M. Bonding mode and its effect on the quality of the adhesive joint // Nauch. al'manah. 2019. № 3-3 (53). P. 71-74.
13. Bursavich J., Abu-Laban M., Muley P.D., Boldor D., Hayes J.D. Thermal Performance and Surface Analysis of Steel-Supported Platinum Nanoparticles Designed for Bio-Oil Catalytic Upconversion During Radio Frequency-Based Inductive Heating. Energy Convers. Manage. 2019. 183. P. 689-697.
14. Ceylan S., Coutable L., Wegner J., Kirschning A. Inductive Heating with Magnetic Materials Inside Flow Reactors. Chem. Eur. J. 2011. 17. P. 1884-1893.
15. Ceylan S., Friese C., Lammel C., Mazac K., Kirschning A. Inductive Heating for Organic Synthesis by Using Functionalized Magnetic Nanoparticles Inside Microreactors. Angew. Chem., Int. Ed. 2008. 47. P. 8950-8953.
16. Prohorov V.V. Experimental investigation of the characteristics of ferromagnetic fillers introduced into the adhesive composition // Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh: sb. materialov konf. (1-30 apr. 2021 g.). Arhangel'sk, 2021. P. 460-463.
17. Murzin V.S., Kantieva E.V., Ponomarenko L.V. The effectiveness of the use of fillers in the production of plywood on low-toxic carbomidoformaldehyde resins // Forestry Engineering Journal. 2012. № 3. P. 20-24.
18. Fil'chakov A.V., Agaverdyeva A.F. Fillers used in woodworking // Trudy Bratskogo gos. tekhnicheskogo un-ta. Bratsk: BrGTU, 2002. P. 116-120.
19. Sluhockij A.E. Inductors. 5-e izd., pererab. i dop. L.: Mashinostroenie, 1989. 69 p.
20. Sluhockij A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A., Bamuner A.V. Induction heating installations: textbook. handbook for universities. L.: Energoizdat, 1981. 328 p.
21. Ruta S., Chantrell R., Hovorka O. Unified Model of Hyperthermia via Hysteresis Heating in Systems of Interacting Magnetic Nanoparticles. Sci. Rep. 2015. 5. P. 9090.
22. Moses A.J. Eddy Current Losses in Soft Magnetic Materials. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering; Wiley: 2016. P. 1-22.
23. Bordet A., Lacroix L.-M., Fazzini P.F., Carrey J., Soullantica K., Chaudret B. Magnetically Induced Continuous CO<sub>2</sub> Hydrogenation Using Composite Iron Carbide Nanoparticles of Exceptionally High Heating Power. Angew. Chem., Int. Ed. 2016. 55. P. 15894-15898.
24. Mortensen P.M., Ostberg M., Nielsen P.E. Induction Heating of Endothermic Reactions. WO2017/036794 A1, 2017.
25. Vinum M., Mortensen P.M. Ferromagnetic Materials for Induction Heated Catalysis. WO 2017/186608 A1, 2017.
26. Rosensweig R.E. Heating Magnetic Fluid with Alternating Magnetic Field. J. Magn. Magn. Mater. 2002. 252. P. 370-374.
27. Wang W., Tuci G., Viet C.D., Liu Y., Rossin A. Induction Heating: An Enabling Technology for the Heat Management in Catalytic Processes, ACS Catal. 2019. 9. P. 7921-7935.
28. Anishchenko A.V., Sidorov E.A., Fedotov N.M. Device for induction heating of ferromagnetic implants // Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya. Materialy dokladov mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. 2016. № 1-1. P. 171-173.
29. Frederikse H.P.R. Handbook of Chemistry and Physics; Properties of magnetic materials; CRC Press: Boca Raton, FL, 2009.
30. Sorokin V.G. Vintage of steels and alloys. M.: Mashinostroenie, 1989. 640 p.

УДК 678.13

DOI: 10.18324/2077-5415-2023-4-160-169

## Обзор свойств древесно-полимерных композитов на основе биоразлагаемых полимеров

К.Г. Анিকেева<sup>a</sup>, Р.Р. Сафин<sup>b</sup>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,  
ул. Карла Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан

<sup>a</sup> doomksen@mail.ru, <sup>b</sup> cfaby@mail.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Статья поступила 09.10.2023, принята 26.10.2023

*Для получения древесно-полимерных композитов (ДПК) применяются различные наполнители и термопластичные связующие, при этом преимущественно используются синтетические полимеры этилена и пропилена, что приводит к неполному биоразложению ДПК, полученных на их основе. В результате бионеразлагаемые материалы, из-за своей устойчивости к микробному разложению, накапливаются в окружающей среде, что приводит к нарастающей опасности загрязнения среды. В связи с этим в различных странах вводятся ограничения по применению таких композиционных материалов в упаковке и автомобилестроении, следовательно, необходимо изучение сведений о биоразлагаемых полимерах и возможности их внедрения в древесные композиты. В статье представлен обзор современных исследований о биоразлагаемых полимерах и древесно-полимерных композитах на их основе. Установлена зависимость свойств ДПК от выбора полимерной матрицы и методов ее обработки. Существует множество источников биоразлагаемых пластиков, от синтетических до натуральных полимеров. Природные полимеры доступны в больших количествах из возобновляемых источников, тогда как синтетические полимеры производятся из невозобновляемых нефтяных ресурсов. Биodeградация полимерных биоматериалов включает расщепление гидролитически или ферментативно чувствительных связей в полимере, что приводит к эрозии полимера. В последнее время синтезировано огромное количество биоразлагаемых полимеров и идентифицированы некоторые микроорганизмы и ферменты, способные их разлагать.*

**Ключевые слова:** биоразлагаемые полимеры; древесно-полимерные композиты; свойства древесно-полимерных композитов.