

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.934.2/8

DOI: 10.18324/2077-5415-2025-1-108-116

Тепловые и прочностные характеристики ферромагнитной клеевой композиции для склеивания древесины

В.И. Мелехов^{1a}, И.И. Соловьев^{1b}, В.В. Прохоров^{2e}, Е.В. Сазанова^{1c}, И.А. Дужевский^{2f},
Н.Г. Пономарева^{1d}¹Северный Арктический Федеральный Университет имени М.В. Ломоносова, ул. Набережная Северной Двины, 17 Россия, Архангельск, Россия²Северный Арктический Федеральный Университет имени М.В. Ломоносова», Институт судостроения и морской арктической техники, ул. Капитана Воронина, 6, Северодвинск, Россия^a v.melekhov@narfu.ru, ^b i.solovev@narfu.ru, ^c e.sazanova@narfu.ru, ^d n.ponomareva@narfu.ru, ^e v.prokhorov@narfu.ru, ^f i.duzhevskiy@narfu.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>,^c <https://orcid.org/0000-0001-5731-7517>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>,^e <https://orcid.org/0009-0002-0239-8254>, ^f <https://orcid.org/0009-0002-8296-3064>

Статья поступила 02.12.2024, принята 27.12.2024

Широкое применение изделий из клееной древесины обусловлено их высокой прочностью, отсутствием дефектов, стойкостью к температурным перепадам, увеличенной способностью к воздействиям нагрузок. В работе представлены результаты по склеиванию древесины различными клеевыми композициями на основе карбамидной и эпоксидной смолы с разными видами ферромагнитных наполнителей, тепловыми характеристиками и особенности формирования клеевого шва в индукционном электромагнитном поле. Приведено обоснование выбора способа горячего склеивания древесины. Установлено, что нагрев клеевого соединения может быть осуществлен бесконтактным индукционным способом при введении в наполнитель клеевой композиции ферромагнитных элементов, которые нагреваются в электромагнитном поле индуктора, формируя равномерное тепловое поле непосредственно в клеевом шве, одновременно запускается реакция полимеризации клеевой композиции. Особенностью такого способа нагрева является локальный прогрев только клеевых слоев без нагрева склеиваемой древесины. Цель исследования – определение тепловых характеристик ферромагнитных наполнителей клеевых композиций, формирование клеевого шва в электромагнитном индукционном поле. Создана методика индукционного нагрева клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем. Экспериментально подтверждена возможность инициации бесконтактного целенаправленного адресного нагрева ферромагнитных наполнителей клеевой композиции с формированием равномерного теплового поля клеевого соединения. Установлено, что для интенсификации нагрева и полимеризации клеевого шва могут быть эффективно применены измельченные ферромагнитные материалы: опилки Fe 95%, порошок ферромагнитный Fe 90 %, измельченные окатыши, необожженные Fe₂O₃, ферромагнитная сечка. Определены характеристики термодинамического равновесия при индукционном нагреве доступных для практического применения ферромагнитных наполнителей. Определена прочность клеевого соединения древесины на образцах шпона. Представлены графики зависимости прочности клеевого соединения древесины с различными ферромагнитными наполнителями клеевой композиции.

Ключевые слова: склеивание древесины, клеевая композиция, ферромагнитный наполнитель, древесина, шпон березовый, индукционный нагрев, испытания клеевого соединения на прочность.

Thermal and strength characteristics of ferromagnetic adhesive composites for glueing wood

V.I. Melekhov^{1a}, I.I. Soloviev^{1b}, V.V. Prokhorov^{2e}, E.V. Sazanova^{1c}, I.A. Duzhevskiy^{2f},
N.G. Ponomareva^{1d}¹FGAOU VO "Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov" (SAFU), Russia, 163002, Arkhangelsk, st. Embankment of the Northern Dvina, 17 ²FGAOU VO "Northern Arctic Federal University named after M.V. Lomonosov" (SAFU), Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology, Russia, 164500, Severodvinsk, Kapitan Voronin str., 6^a v.melekhov@narfu.ru, ^b i.solovev@narfu.ru, ^c e.sazanova@narfu.ru, ^d n.ponomareva@narfu.ru, ^e v.prokhorov@narfu.ru, ^f i.duzhevskiy@narfu.ru^a <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-2008-7073>,^c <https://orcid.org/0000-0001-5731-7517>, ^d <https://orcid.org/0000-0001-6210-5631>,^e <https://orcid.org/0009-0002-0239-8254>, ^f <https://orcid.org/0009-0002-8296-3064>

Received 02.12.2024, accepted 27.12.2024

The widespread use of glued wood products is due to their high strength, absence of defects, resistance to temperature fluctuations, and increased ability to withstand loads. The paper presents the results of glueing wood with various adhesive compositions based on carbamide and epoxy resin with various types of ferromagnetic fillers, thermal characteristics and features of the formation of an adhesive seam in an induction electromagnetic field. The rationale for choosing the method of hot glueing wood is given. It is established that the heating of the adhesive joint can be carried out by a non-contact induction method when ferromagnetic elements are introduced into the filler of the adhesive composition, which are heated in the electromagnetic field of the inductor, forming a uniform thermal field directly in the adhesive seam, at the same time the polymerization reaction of the adhesive composition is triggered. A special feature of this heating method is the local heating of only the adhesive layers without heating the glued wood. The purpose of the study is to determine the thermal characteristics of ferromagnetic fillers of adhesive compositions, the formation of an adhesive seam in an electromagnetic induction field. A method of induction heating of an adhesive composition with a ferromagnetic filler has been created. The possibility of initiating contactless targeted heating of ferromagnetic fillers of an adhesive composition with the formation of a uniform thermal field of the adhesive compound has been experimentally confirmed. It has been established that crushed ferromagnetic materials can be effectively used to intensify heating and polymerization of the adhesive seam: sawdust Fe 95%, ferromagnetic powder Fe 90%, crushed pellets not burnt Fe_2O_3 , ferromagnetic section. The characteristics of thermodynamic equilibrium during induction heating of ferromagnetic fillers available for practical use are determined. The strength of the adhesive joint of wood on veneer samples was determined. Graphs of the dependence of the strength of the adhesive joint of wood with various ferromagnetic fillers of the adhesive composition are presented.

Keywords: glueing of wood; adhesive composition; ferromagnetic filler; wood, birch veneer; induction heating; strength tests of the adhesive joint.

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

Адгезионное соединение конструкций из массивной древесины, шпона, древесно-композиционных материалов производят холодным и горячим способами. Холодное склеивание осуществляют при температуре 18–20 °С. Горячий способ является основным видом склеивания древесины. Реализация горячего способа склеивания связана с нагревом клеевой композиции и интенсивным формированием клеевого шва. В зависимости от вида склеиваемых материалов, применяемых клеев, способов нагрева склеиваемых заготовок из древесины, горячий способ осуществляется при температуре полимеризации смолы 135–200 °С [1–3].

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

Для интенсификации процесса полимеризации клеевого соединения применяют следующие виды нагрева: кондуктивный (контактный), конвективный, инфракрасным излучением, токами промышленной и сверхвысокой частоты (СВЧ). Теплопередача в клеевую композицию происходит 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 сечению и по площади контакта, в результате нарушается режим полимеризации клеевого слоя. Излишняя продолжительность нагрева отверждаемого клеевого шва повышает вероятность образования в нем термических напряжений, что приводит к снижению прочности клеевого соединения.

Конвективный способ теплообмена обеспечивает прогрев наружных зон склеиваемой древесины и последующей аккумуляции тепла в массиве древесины. Прогрев и теплопередача в клеевой шов происходит неравномерно, и окончательная полимеризация клеевой композиции осуществляется при последующей

кондиционирующей выдержке при температуре окружающей среды.

Интенсификация нагрева тонколистовых древесных материалов (шпона) может быть осуществлена инфракрасным излучением от теплового источника. Обеспечивается прогрев пограничных слоев клеевого соединения и ускоренное отверждение клея в пограничной зоне. Достаточно 10–20 минут теплового воздействия для придания склеиваемой конструкции транспортной прочности. Для полной полимеризации клеевого шва по всей площади контактного соединения крупномерных деталей древесины этот способ не может быть применен.

Нагревание клеевого слоя аккумулированным в древесине теплом применяют в основном при склеивании единичных деталей.

Интенсификация нагрева одновременно древесины и клеевого соединения может быть осуществлена в электромагнитном поле токов промышленной и сверхвысокой частоты (СВЧ). При этом полезный подвод тепла непосредственно в клеевую зону ограничен нерациональными тепловыми потерями в массиве древесины. Нагрев древесины при склеивании и дальнейшей контактной передачи тепла 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 [4–8].

Рассмотренные способы горячего склеивания древесины основаны на том, что тепловое воздействие на клеевую композицию осуществляют теплопередачей через древесину с большими потерями, что является существенным проблемным недостатком.

Поэтому представляет научно-практический интерес применение бесконтактного целенаправленного подвода тепла непосредственно в зону клеевой композиции без потерь в окружающую среду. Это возможно осуществить индукционным бесконтактным адресным нагревом клеевой композиции в электромагнитном поле. Для осуществления этого способа была подготовлена композиция, в которую введены технологические фрагментиро-

ванные ферромагнитные элементы (наполнитель). Клеевая композиция нагревается совместно с наполнителем и формирует клеевой шов [9–11].

Цель работы – определение тепловых характеристик ферромагнитных наполнителей клеевых композиций, формирование клеевого шва в электромагнитном индукционном поле.

Материалы и методы исследования. Создана методика индукционного нагрева клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем. Рассмотрены различные виды ферромагнитных наполнителей [12–15].

Определена температура термодинамического равновесия клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем с учетом результатов исследования температурных характеристик [16].

Для изучения индукционного нагрева клеевой композиции с ферромагнитным наполнителем наносили композицию на радиопрозрачную пластмассовую и стеклянную подложку толщиной 1 мм, помещали в индуктор и нагревали. Измеряли температуру нагрева ферромагнитного наполнителя в карбамидной и эпоксидной клеевой композиции (рис. 1).

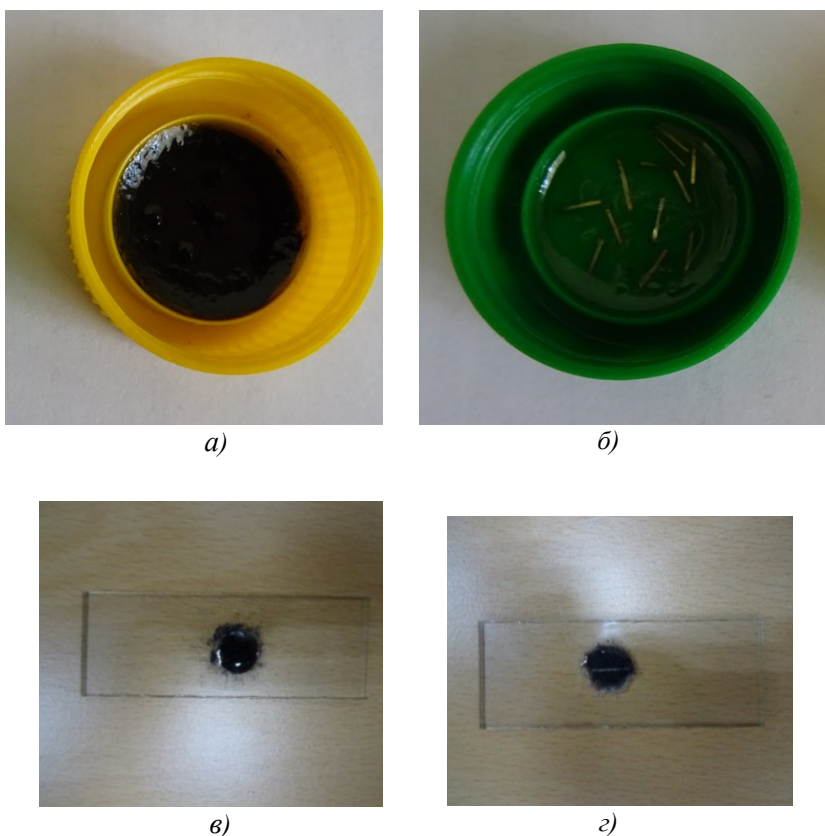


Рис. 1. Нагрев ферромагнитных наполнителей в карбамидной и эпоксидной клеевой композиции: *а* – ферромагнитный порошок Fe 90 %; *б* – ферромагнитная сечка; *в* – ферромагнитный порошок; Fe 90 %; *г* – ферромагнитная сечка

Использовали мультиметр цифровой PeakMeter 8229 с хромель-копелевой термопарой, которую помещали в клеевую композицию, проводили индукционный нагрев до температуры термодинамического равновесия. Термопара выполнена из немагнитного материала. Точность проведенных измерений $\pm 2,5$ °C (рис. 2).

Определили прочностные показатели клеевого шва, модифицированного клеями с ферромагнитным наполнителем в соответствии с методикой испытаний и приведенной методической сеткой опытов (табл. 1).

Постоянными факторами приняты: порода древесины – береза; толщина шпона – 1,5 мм; марка смолы – КФ-МТ-15, ЭДП; шероховатость поверхности шпона R_m – 120 мкм; расход клеевой композиции на основе карбамидной и эпоксидной смолы – 125 г/м².

Переменные факторы: количество введенного ферромагнитного наполнителя C_f , %; дисперсность частиц наполнителя S , мм; содержание Fe в наполнителе c , %; давление запрессовки при склеивании p , МПа; время выдержки под давлением τ , сек.



Рис. 2. Мультиметр цифровой PeakMeter 8229

Таблица 1. Методическая сетка опытов

№	Наименование фактора	Обозначение	Единицы Измерения	Значения факторов
1	Вид ферромагнитного наполнителя	1,2,3,4,5	—	Ферромагнитные опилки из стали (Fe 95 %), измельченные окатыши обожженные, измельченные окатыши необожженные, порошок ферромагнитный (Fe 90 %), ферромагнитная сечка (Fe 95 %)
2	Масса ферромагнитного наполнителя	C_f	Гр	5–25
3	Размер фракций наполнителя	S	Мкм	250–1050
4	Содержание Fe в наполнителе	c	%	75–95
5	Порода древесины	B	—	береза
6	Влажность древесины	W	%	10
7	Давление запрессовки	p	Мпа	0,5–1,2
8	Время выдержки под давлением	τ	Мин	7–11
9	Шероховатость контактной поверхности древесины	R_m обр.	Мкм	120
Оценочные показатели				
1	Температура нагрева клеевой композиции	T	°C	25–70
2	Время отверждения клеевой композиции	t	Мин	40
3	Определение усилия сдвига в клеевом соединении	F	Н	400–1300

Примечание. Прочерк – безразмерный параметр, не имеющий единиц измерения.

При формировании клеевой композиции на основе карбамидной смолы КФ-МТ-15 вводили наполнители из каолина и ферромагнитного материала (табл. 2). Равномерное введение наполнителей в композицию проводили смешиванием компонентов в электромагнитном поле индуктора.

При формировании клеевой композиции на основе эпоксидной смолы ЭДП вводили ферромагнитный наполнитель совместно с отвердителем, равномерно перемешивали, помещали в электромагнитное поле индуктора и нагревали до температуры термодинамического равновесия (табл. 3) [17–21].

Таблица 2. Состав карбамидного клея

Компоненты	Содержание, %
карбамидная смола	80
наполнитель каолин	8
ферромагнитный наполнитель	10
отвердитель сульфат аммония	2

Таблица 3. Состав эпоксидного клея

Компоненты	Содержание, %
эпоксидная смола	80
ферромагнитный наполнитель	10
отвердитель полиэтиленполиамин	10

Было изготовлено приспособление для склеивания образцов шпона березы с предприятия АО «Архангельский фанерный завод». Приготовлены по ГОСТ 33120-2014, 70×20×1,5 мм, соединенные взаимно с перекры-

тием 10 мм. Влажность образцов 10–12 %. Величина неровностей склеиваемой поверхности не превышала 200 мкм.

Образцы с нанесенной композицией помещали в цилиндрический индуктор, подпрессовывали и фиксировали с помощью оригинального клинового устройства (рис. 3).

**Рис. 3.** Приспособление для склеивания образцов шпона в индукторе

Применяли композицию на основе карбамидной и эпоксидной смол. Вводили ферромагнитный наполнитель с размером фракции 250–1230 мкм. В процессе склеивания определяли влияние вида ферромагнитного наполнителя и времени полимеризации клеевой композиции [22–32]. Все результаты измерений заносили в табл. формата Excel.

Образцы склеенного шпона для прочностных испытаний приведены на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Образцы склеенного шпона: *а* – на основе карбамидной смолы; *б* – на основе эпоксидной смолы

Испытания на сдвиг проводили на склеенных образцах (рис. 5). Определяли прочностные характеристики клеевого соединения образцов шпона на универсальной испытательной машине МТ 130 по ГОСТ 21554.5. Испытания образцов склеенного шпона проводили на машине в диапазоне нагрузок 1-1100 кН с погрешностью измерений $\pm 1\%$.



Рис. 5. Образцы шпона для испытаний на сдвиг

Для закрепления образцов древесины использовали приспособление, состоящее из двух захватов, соединенных с нагружающим механизмом машины и пере-

дающих линейное усилие по оси образца (рис. 6). Толщину полок образцов увеличили для надежного закрепления в захватах испытательной машины.



Рис. 6. Измерительный узел машины МТ-130

Результаты исследования. Прочность клеевого соединения образцов шпона определяли (ГОСТ 14759). Образцы устанавливали в захваты и доводили до разрушения. Испытания проводили до разрушения адгезивного соединения. Образцы с разрушением в нерабочей части исключены. Характер разрушения клеевого соединения показан на рис. 7–8.



а)



б)

Рис. 7. Образцы из шпона после испытаний на сдвиг на основе смол: *а* – карбамидной; *б* – эпоксидной.

Для сравнения проводили склеивание контрольных образцов клеевых композиций без ферромагнитного наполнителя. При испытаниях образцов шпона, склеенных карбамидной и эпоксидной клеевыми композициями без ферромагнитного наполнителя и с наполнителем

из ферромагнитного порошка Fe 90 %, разрушение соединения образцов происходит по древесине (см. рис. 8).

Оценивали качество склеивания по разрушению соединения по клеевому шву или по древесине (90 %). Для контрольных образцов разрушение соединения произошло по древесине (95 %).

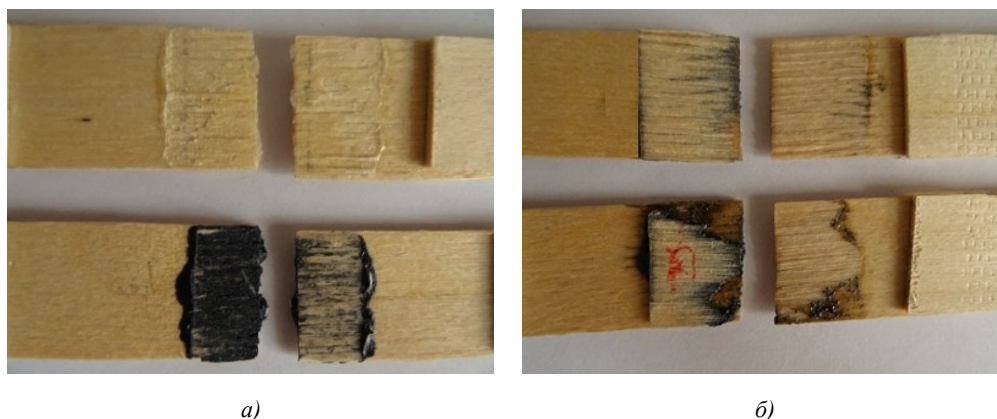


Рис. 8. Характер разрушения клеевого соединения при сдвиге по древесине на основе клеев: *а* – карбамидного; *б* – эпоксидного клея

Определили предел прочности клеевого шва образцов шпона на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей (табл. 4, 5, рис. 9, 10).

Таблица 4. Предел прочности клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе карбамидной клеевой композиции

№ п/п	Вид клея	Наполнитель	Размер фракций, мкм	Максимальная нагрузка F, Н	Касательное напряжение τ , МПа
1	карбамидный КФ-МТ-15	каолин	50	1028	5,1
2		ферромагнитные опилки из стали Fe 95 %	250	681	3,4
3		измельченные окатыши, обожженные Fe ₂ O ₃	250	530	2,6
4		измельченные окатыши, не обожженные Fe ₂ O ₃	250	589	2,9
5		порошок ферромагнитный Fe 90 %	250	868	4,3
6		Ферромагнитная сечка из стальной проволоки	330	566	2,8

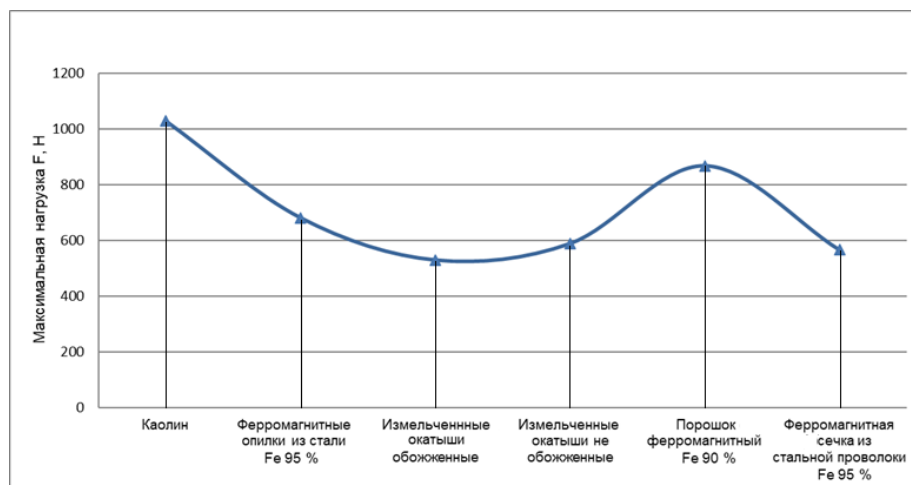
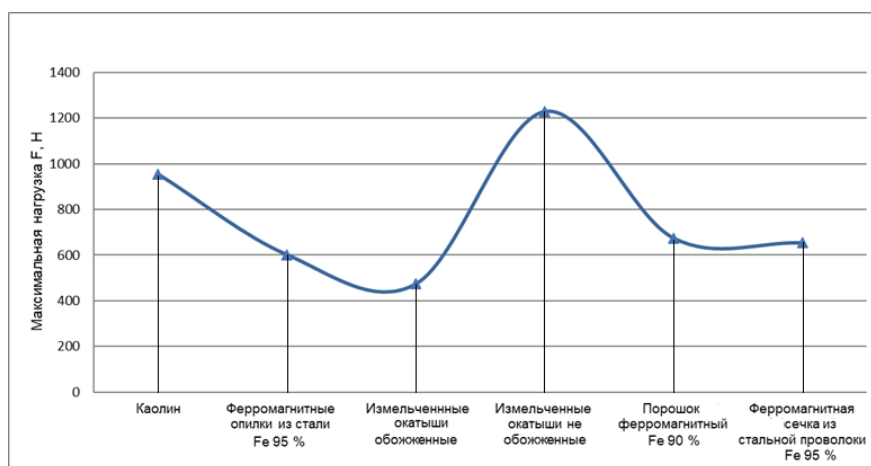


Рис. 9. Прочность клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе карбамидной клеевой композиции

Таблица 5. Предел прочности клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе эпоксидной клеевой композиции

№ п/п	Вид клея	Наполнитель	Размер фракций, мкм	Максимальная нагрузка F, Н	Касательное напряжение τ , МПа
1	эпоксидный ЭДП	каолин	50	955	4,7
2		ферромагнитные опилки из стали Fe 95 %	250	602	3,0
3		измельченные окатыши, обожженные Fe ₂ O ₃	250	474	2,3
4		измельченные окатыши, не обожженные Fe ₂ O ₃	250	1229	6,1
5		порошок ферромагнитный Fe 90 %	250	675	3,3
6		ферромагнитная сечка из стальной проволоки	330 мкм	654	3,2

**Рис. 10.** Прочность клеевого соединения образцов на сдвиг с различными видами ферромагнитных наполнителей на основе эпоксидной клеевой композиции

Как следует из рисунков, наибольший эффект получается при нагревании порошка ферромагнитного Fe 90 %.

Таким образом можно отметить, что ферромагнитный порошок сопоставим с каолином и может быть введен в клеевую композицию в качестве наполнителя.

Выводы. Индукционное тепловое бесконтактное воздействие на ферромагнитную клеевую композицию обеспечивает ускоренную полимеризацию клеевого

соединения без промежуточных потерь в древесине и формирование клеевого шва с нормированными прочностными характеристиками.

Для уточнения режимных параметров процесса индукционного нагрева клеевого соединения следует продолжить исследования с применением индуктора большой мощности.

Литература

- Бирюков В.Г. Технология клеевых материалов и древесных плит. Москва: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2005. 220 с.
- Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Технология процесса склеивания древесины: Уч. пособие. СПб.: Санкт-Петербург. гос. лесотех. ун-та, 2015. С. 53.
- Разиньков Е.М. Технология и оборудование клеевых материалов: Уч. пособие. Воронеж: Изд-во Воронеж гос. лесотехнич. ун-та, 2013. 291 с.
- Lozinski M.G. Industrial Applications of Induction Heating. New York, USA: Pergamon, 1969. P. 690.
- Мелехов В.И., Рудная Н.С. Влияние микрорельефа сопрягаемых поверхностей древесины на прочность склеивания // Лесной журнал. 2014. № 6. С. 89-100.
- Долгих И.Ю., Королев А.Н., Захаров В.М. Моделирование динамики температурных процессов при индукционном нагреве // Вестн. Иванов. гос. энергетич. ун-та. 2014. Вып. 5. С. 57-63.
- Ковальчук Л.М. Склеивание древесины в поле токов высокой частоты. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1960. 239 с.
- Мелехов В.И., Прохоров В.В. Интенсификация процесса склеивания древесины индукционным нагревом // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: сб. мат-лов Всеросс. науч.-практич. конф. Архангельск: Издат. дом Сев. (Арктического) федерал. ун-та, 2020. С. 91-95.
- Мелехов В.И., Соловьев И.И., Прохоров В.В., Тюрикова Т.В. Патент № RU2715840 C1 Способ склеивания древесины № 2019123090; заяв. 22.07.2019.
- Мелехов В.И., Соловьев И.И., Пономарева Н.Г., Прохоров В.В. Бесконтактный нагрев ферромагнитных наполнителей клеевой композиции при склеивании древесины // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4(60). С. 155-160.
- Прохоров В.В. Применение индукционного нагрева при склеивании изделий из древесины в судостроительной

- промышленности // Науч.-технич. ведомости Севмашвтуза. 2016. № 1. С. 28–31.
12. 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, Vol. 9. P. 7921–7935.
 13. Анищенко А.В., Сидоров Е.А., Федотов Н.М. Устройство для индукционного нагрева ферромагнитных имплантов // XII Междунар. науч.-практич. конф. 2016. С. 171–173.
 14. Frederikse H.P.R. Handbook of Chemistry and Physics; Properties of magnetic materials. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. P. 2804.
 15. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
 16. 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.
 17. 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.
 18. 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. Vol. 183. P. 689–697.
 19. Ceylan S., Coutable L., Wegner J., Kirschning, A. Inductive Heating with Magnetic Materials Inside Flow Reactors // Chem. Eur. Journ. 2011. Vol. 17. P. 1884-1893.
 20. Ceylan S., Friese C., Lammel C., Mazac K., Kirschning A. Inductive Heating for Organic Synthesis by Using Functionalized Magnetic Nanoparticles Inside Microreactors // Angewandte Chemie International Edition. 2008. Vol. 47. P. 8950–8953.
 21. Прохоров В.В. Экспериментальное исследование характеристик ферромагнитных наполнителей, вводимых в клеевую композицию // Ломоносовские науч. чтения студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. мат.-лов конф. Архангельск: Издат. дом Сев. (Арктического) федерал. ун-та, 2021. С. 460-463.
 22. Мурзин В.С., Кантеева Е.В., Пономаренко Л.В. Эффективность применения наполнителей при производстве фанеры на малотоксичных карбомидоформальдегидных смолах // Лесотехнический журнал. 2012. № 3. С. 20-24.
 23. Фильчаков А.В., Агавердыева А.Ф. Наполнители, применяемые в деревообработке // Тр. Братск. гос. технич. ун-та. Братск: Изд-во Братск. гос. технич. ун-та., 2002. С. 116-120.
 24. Слухоцкий А.Е. Индукторы. Л.: Машиностроение, 1989. 69 с.
 25. Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Павлов Н.А., Бамунэр А.В. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов. Л.: Энергоиздат, 1981. 328 с.
 26. Ruta S., Chantrell R., Hovorka O. Unified Model of Hyperthermia via Hysteresis Heating in Systems of Interacting Magnetic Nanoparticles // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. P. 9090.
 27. Moses A.J. Eddy Current Losses in Soft Magnetic Materials. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. Hoboken: Wiley, 2016. P. 1–22.
 28. Skumiel A., Kaczmarek-Klinowska M., Timko M., Molcan M., Rajnak M. Evaluation of Power Heat Losses in Multidomain Iron Particles Under the Influence of AC Magnetic Field in rf Range // Internat. Journ. Thermophys. 2013. Vol. 34. P. 655–666.
 29. Bordet, A., Lacroix L.-M., Fazzini P.-F., Carrey J., Soullantica K., Chaudret B. Magnetically Induced Continuous CO₂ Hydrogenation Using Composite Iron Carbide Nanoparticles of Exceptionally High Heating Power // Angewandte Chemie International Edition. 2016. Vol. 55. P. 15894–15898.
 30. Mortensen P.M., Ostberg M., Nielsen P.E. Induction Heating of Endothermic Reactions. WO2017/036794 A1, 2017. [Электронный ресурс]. <https://patents.google.com/patent/WO2017036794A1/nl> (дата обращения 17.10.2024).
 31. Vinum M., Mortensen P.M. Ferromagnetic Materials for Induction Heated Catalysis. WO 2017/186608 A1, 2017. [Электронный ресурс]. <https://patents.google.com/patent/WO2017186608A1/en?q=WO+2017%2f186608+A1> (дата обращения 22.10.2024).
 32. Rosensweig R.E. Heating Magnetic Fluid with Alternating Magnetic Field // Journ. Magn. Magn. Mater. 2002. Vol. 252. P. 370–374.

References

1. Biryukov V.G. Technology of glued materials and wood boards. Moscow: Publishing House of Moscow State Forestry University, 2005. 220 p.
2. Varankina G.S., Chubinsky A.N. Technology of wood gluing process: Study guide. St. Petersburg: St. Petersburg. State Forestry Engineering University, 2015. P. 53.
3. Razinkov E.M. Technology and equipment of glue materials: Study guide. Voronezh: Publishing house of Voronezh State Forestry Technical University, 2013. 291 p.
4. Lozinskii M.G. Industrial Applications of Induction Heating. New York, USA: Pergamon, 1969. P. 690.
5. Melekhov V.I., Rudnaya N.S. Influence of microrelief of mating surfaces of wood on the strength of gluing // Forestry Journ. 2014. № 6. P. 89-100.
6. Dolgikh I.Yu., Korolev A.N., Zakharov V.M. Modeling of the dynamics of the temperature processes at the induction heating (in Russian) // Bulletin of Ivanov State Power Engineering University. 2014. Iss. 5. P. 57-63.
7. Kovalchuk L.M. Gluing of wood in the field of high frequency currents. M.-L.: Goslesbumizdat, 1960. 239 c.
8. Melekhov V.I., Prokhorov V.V. Intensification of the wood gluing process by induction heating // Actual issues of innovation development of the Arctic region of the Russian Federation: a collection of proceedings of the All-Russian scientific-practical conf. Arkhangelsk: Publishing house of the North (Arctic) Federal University, 2020. P. 91-95.
9. Melekhov V.I., Soloviev I.I., Prokhorov V.V., Tyurikova T.V. Patent No. RU2715840 C1 Method of gluing wood No. 2019123090; application. 22.07.2019.
10. Melekhov V.I., Soloviev I.I., Ponomareva N.G., Prokhorov V.V. Non-contact heating of ferromagnetic fillers of the adhesive composition at wood gluing // Systems. Methods. Technologies. 2023. № 4(60). P. 155-160.
11. Prokhorov V.V. Application of induction heating at gluing of wood products in shipbuilding industry // Scientific and Technical Vedomosti Sev mashvutuz. 2016. № 1. P. 28-31.
12. 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, Vol. 9. P. 7921–7935.
13. Anishchenko A.V., Sidorov E.A., Fedotov N.M. Device for induction heating of ferromagnetic-nitic implants // XII Intern. scientific-practical conf. 2016. P. 171-173.
14. Frederikse H.P.R. Handbook of Chemistry and Physics; Properties of magnetic materials. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. P. 2804.
15. Sorokin V.G. Gradebook of steels and alloys. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 640 p.
16. Prokhorov V.V., Klushin N.M., Voronin A.M. Experimental stand intended for investigation of the gluing process of the

- wood workpieces // Scientific almanac. 2018. № 11-2(49). P. 53-56.
17. Prokhorov V.V., Klushin N.M., Voronin A.M. Bonding mode and its influence on the quality of adhesive cocoupling // Scientific Almanac. 2019. № 3-3(53). P. 71-74.
18. 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. Vol. 183. P. 689-697.
19. Ceylan S., Coutable L., Wegner J., Kirschning, A. Inductive Heating with Magnetic Materials Inside Flow Reactors // Chem. Eur. Journ. 2011. Vol. 17. P. 1884-1893.
20. Ceylan S., Friese C., Lammel C., Mazac K., Kirschning A. Inductive Heating for Organic Synthesis by Using Functionalized Magnetic Nanoparticles Inside Microreactors // Angewandte Chemie International Edition. 2008. Vol. 47. P. 8950-8953.
21. Prokhorov V.V. Experimental study of the characteristics of ferromagnetic fillers introduced into the adhesive composition // Lomonosov Scientific Readings of students, graduate students and young scientists: a collection of proceedings of the conference. Arkhangelsk: Publishing house of the North (Arctic) Federal University, 2021. P. 460-463.
22. Murzin V.S., Kantieva E.V., Ponomarenko L.V. Effectiveness of the fillers application in the production of plywood on low-toxic carbomidophor-maldehyde resins // Forest Engineering Journal. 2012. № 3. P. 20-24.
23. Filchakov A.V., Agaverdyeva A.F. Fillers used in woodworking // Proceedings of Bratsk State Technical University. Bratsk: Bratsk State Technical University, 2002. P. 116-120.
24. Slukhotsky A.E. Inductors. L.: Mashinostroenie, 1989. 69 c.
25. Slukhotsky A.E., Nemkov V.S., Pavlov N.A., Bamuner A.V. Induction heating installations: textbook for universities. L.: Energoizdat, 1981. 328 p.
26. Ruta S., Chantrell R., Hovorka O. Unified Model of Hyperthermia via Hysteresis Heating in Systems of Interacting Magnetic Nanoparticles // Sci. Rep. 2015. Vol. 5. P. 9090.
27. Moses A.J. Eddy Current Losses in Soft Magnetic Materials. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. Hoboken: Wiley, 2016. P. 1-22.
28. Skumiel A., Kaczmarek-Klinowska M., Timko M., Molcan M., Rajnak M. Evaluation of Power Heat Losses in Multidomain Iron Particles Under the Influence of AC Magnetic Field in rf Range // Internat. Journ. Thermophys. 2013. Vol. 34. P. 655-666.
29. Bordet, A., Lacroix L.-M., Fazzini P.-F., Carrey J., Soullantica K., Chaudret B. Magnetically Induced Continuous CO₂ Hydrogenation Using Composite Iron Carbide Nanoparticles of Exceptionally High Heating Power // Angewandte Chemie International Edition. 2016. Vol. 55. P. 15894-15898.
30. Mortensen P.M., Ostberg M., Nielsen P.E. Induction Heating of Endothermic Reactions. WO2017/036794 A1, 2017. [Электронный ресурс]. <https://patents.google.com/patent/WO2017036794A1/nl> (date of address 17.10.2024).
31. Vinum M., Mortensen P.M. Ferromagnetic Materials for Induction Heated Catalysis. WO 2017/186608 A1, 2017. [Электронный ресурс]. <https://patents.google.com/patent/WO2017186608A1/en?q=WO+2017%2f186608+A1> (date of address 22.10.2024).
32. Rosensweig R.E. Heating Magnetic Fluid with Alternating Magnetic Field // Journ. Magn. Magn. Mater. 2002. Vol. 252. P. 370-374.