

УДК 630*812:666.974

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ
ИЗУЧЕНИЯ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТОВ ОТ СОДЕРЖАНИЯ
В НИХ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ

Т. Н. Стородубцева, Д. С. Кузнецов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
Лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

E-mail: tamara-tns@yandex.ru

Лесовозный транспорт является важной составной частью лесозаготовительного производства. Эффективность его работы определяется наличием и качественным состоянием лесовозных автомобильных и железных дорог.

Проблему дорожного строительства в лесу и особенно в районах России, где отсутствуют или имеются незначительные запасы прочных каменных материалов, можно решить за счет широкого использования композиционных материалов стекловолокнистых, древесностекловолокнистых и древесноцементобетонных, полученных на основе отходов лесного комплекса – техногенных продуктов лесного комплекса, химической промышленности и местного растительного сырья, исходные компоненты которых отличаются по своим генезису и свойствам, применив для этой цели современные гидрофобизирующие и (или) уплотняющие структуру бетона добавки, специальную защиту древесины, позволяющую исключить или минимизировать взаимное отрицательное влияние основных компонентов этих материалов [1-4].

Мировая практика показывает, что наиболее распространенным материалом, в частности для изделий транспортного строительства, является древесина. Так, шпалы на ее основе составляют до восьмидесяти процентов от их общего числа, являясь в то же время наименее долговечными [3-5].

Железобетон, применяемый для аналогичных целей, наиболее доступен для решения проблемы дефицита древесины, практически равен ей по начальной стоимости и более долговечен, но при этом, как правило, не учитываются экономические потери, которые складываются из физико-технических и механических недостатков этого материала – большой массы, хрупкости и жесткости, требующих применения демпфирующих прокладок, а также возможности расшатывания закладных болтов крепления рельсов к шпалам, приводящей к

авариям на транспорте [1, 4].

Основным фактором, ограничивающим широкое применение сборного железобетона при строительстве автомобильных дорог, является дефицитность качественного крупного заполнителя, стальной арматуры и, конечно, высокая стоимость этих материалов, в том числе цемента. Применение силикатного и мелкозернистого бетонов не решает полностью данную проблему, лишь немного снижая цену плит kolejных покрытий. На стоимость дорожного покрытия этого вида сильно влияет и сложная конструкция стыков, связанная с устройством болтовых, сварных или основанных на их сочетаниях соединений.

Создание эффективных композитов для специальных конструкций и изделий на основе отходов лесного комплекса, является важной хозяйственной задачей, так как снижает стоимость строительства, повышает надежность, улучшает экологию. При этом используются входящие в состав композитов материалы, дополняющие друг друга по различным комплексам свойств.

К этим конструкциям и изделиям относятся: конструкции верхних покрытий дорог метрополитенов, лесовозных и трамвайных путей, переездов, платформ, покрытия полов, фундаменты и т. д. [1, 4].

Важнейшим при решении данной задачи являлось обеспечение совместной работы компонентов различной природы, например, таких, как полимерные смолы, стекловолокно, древесина, цемент и др.

Современные технологии композитов требовали учета процессов и явлений, протекающих на границах раздела фаз, способствующих коренному изменению свойств межфазных поверхностей и, соответственно, структуры и свойств композита в целом.

Древесина, являющаяся материалом армирующих заполнителей древесного стекловолокнистого композиционного материала, как органическое высокопористое и гигроскопичное вещество всегда стремится к состоянию, при котором давление влаги, содержащейся в ее клетках, приходит в равновесие с давлением влаги (водяных паров) непосредственно из атмосферы, окружающей ее, поэтому древесина отдает влагу в окружающую среду или забирает ее из этой среды. Аналогичные процессы могут происходить между связующим – смолой ФАМ и ею как во время отверждения, так и после, благодаря наличию диффузионной проницаемости полимерной матрицы. Это может вызвать со временем появление давления стесненного набухания древесины, способного разрушить полимерную матрицу древесноекловолокнистого композиционного материала [4, 6].

На первом этапе исследований было подсчитано количество свободной воды в компонентах полимерного раствора на смоле ФАМ на 1 м^3 древесных стекловолоконистых композиционных материалов.

В мономере ФАМ, поступающем с завода – изготовителя, содержится 0,3-1,5 % воды. В одном кубическом метре древесного композита – 223 кг ФАМ, т. е. в худшем варианте (при 1,5 % воды в ФАМ) в пересчете на массу это составит приблизительно 4 кг.

В процессе поликонденсации монофурфурилиденацетона, содержание которого в ФАМ составляет 35-40 % от массы ФАМ (около 100 кг на 1 м^3), выделится 3 % воды или 3 кг.

В одном кубическом метре древесного стекловолоконистого композиционного материала базового состава содержится 688 кг песка, графитовой и пиритовой муки, максимальная влажность которых составляет 1 %, что соответствует 7 кг воды.

Таким образом, к моменту перемешивания полимерного раствора с древесным наполнителем в 1 м^3 ее содержится около 14 кг воды, т. е. достаточно много, а она является ингибитором полимеризации олигомера ФАМ в присутствии бензолсульфокислоты (БСК) и, следовательно, будет понижать степень отверждения, а значит, и прочность композиционного материала [4].

Далее, в 1 м^3 древесного стекловолоконистого композиционного материала содержится 123 кг комнатно-сухой древесины в виде щепы (Щ) с влажностью 8 %, что соответствует 10 кг воды. В связи с этим было сделано предположение, что если древесный наполнитель впитывает до полного отверждения системы 14 кг воды из раствора ФАМ, то общее содержание ее в нем составит 24 кг, следовательно влажность наполнителя будет равна 20 %. Такой процесс вполне возможен, учитывая упомянутые в начале параграфа свойства древесины. Регулируемая влажность древесного наполнителя – фактор, повышающий степень отверждения полимерной матрицы.

Теоретически удаление свободной воды из мастики ФАМ должно повысить степень отверждения олигомера ФАМ. Это предположение потребовало экспериментальной проверки степени отверждения в зависимости от содержания древесной щепы в составе древесного композита. Степень отверждения определяли по количеству экстрагируемых ацетоном с применением аппарата Сокслета.

Образцы, предназначенные для испытания на изгиб ($80 \times 80 \times 700$), изготавливали по обычной для ПБ ФАМ методике с внесением различного по массе количества наполнителя из древесной щепы с влажностью 8 %, затем отвержда-

ли с использованием сухого прогрева в течение 12 ч при температуре 80 °С. Образцы испытывали по схеме нагружения «чистый изгиб» с определением пределов прочности и машинных модулей упругости [4].

Количество ацетонового экстракта A_3 , % определяли по методике равновесного набухания, несколько переработанной нами применительно к отвержденной мастике ФАМ. Для этого из пяти различных точек разрушенного образца выкалывали кусочки отвержденной мастики ФАМ на андезите массой приблизительно 1 г.

Точную массу (m_o) кусочков определяли на аналитических весах, обвязывали их ниткой, помечали номером и, разделяя их фильтровальной бумагой, помещали в аппарат Сокслета для экстрагирования ацетоном в течение 18 ч, причем образцы полностью покрывали растворителем, а эксикаторы – темной бумагой. Через 18 ч образцы извлекали, промокали фильтровальной бумагой насухо, а затем сушили в термостате при 60 °С в течение 24 ч, после 30 мин выдержки при комнатной температуре взвешивали, получая новую массу образца (m_a). Подсчет A_3 производили по формуле:

$$A_3 = \frac{m_o - m_a}{m_o} \cdot 100, \quad (1)$$

где A_3 – количество ацетонового экстракта, полученного экспериментально, %.

Теоретическую зависимость A_3^T от количества древесного заполнителя Щ в составе древесного стекловолоконистого композиционного материала представляли с помощью полинома третьей степени [7, 8].

Данный полином точнее, чем квадратная парабола, представляет экспериментальные данные, т. к. сумма квадратов отклонений между экспериментальными и теоретическими значениями уменьшается; свободный член полинома «а» получает физический смысл – значение характеристики при содержании компонента, равного нулю.

Кроме этого, обработка экспериментальных данных с помощью специальной компьютерной программы позволяет найти координаты экстремальных точек на кривой, характер которой соответствует физическому смыслу процесса структурообразования композиционного материала (табл. 1).

Коэффициент полинома: $A = 91,931$; $B = -0,096$; $C = 0,051$; $D = -0,002$.

Таким образом, зависимость будет иметь вид

$$A_3^T = 91,931 - 0,096 \text{Щ} + 0,051 \text{Щ}^2 - 0,002 \text{Щ}^3, \quad (2)$$

при Щ миним. = 1,2 %

A_3^T миним. = 91,88 %,

при Щ макс. = 15,8 %

A_3^T макс. = 95,26 %.

Таблица 1 – Подсчет коэффициентов полинома третьей степени, выражающего зависимость ацетонового экстракта от количества щепы с влажностью 8 %

x (Щ, %)	y (A_3^3 , %)	y_1 (A_3^T , %)	$y_1 - y$	$(y_1 - y)^2$
0	92,0	91,9309	-0,0691	0,0048
5	92,3	92,5310	0,2310	0,0534
10	94,7	94,4667	-0,2333	0,0544
15	96,5	96,5047	0,0047	0,0000
20	97,3	97,4118	0,1118	0,0125
25	96,0	95,9548	-0,0452	0,0020
				$\Sigma = 0,1271$

На рисунке зависимость (2) представлена графически.

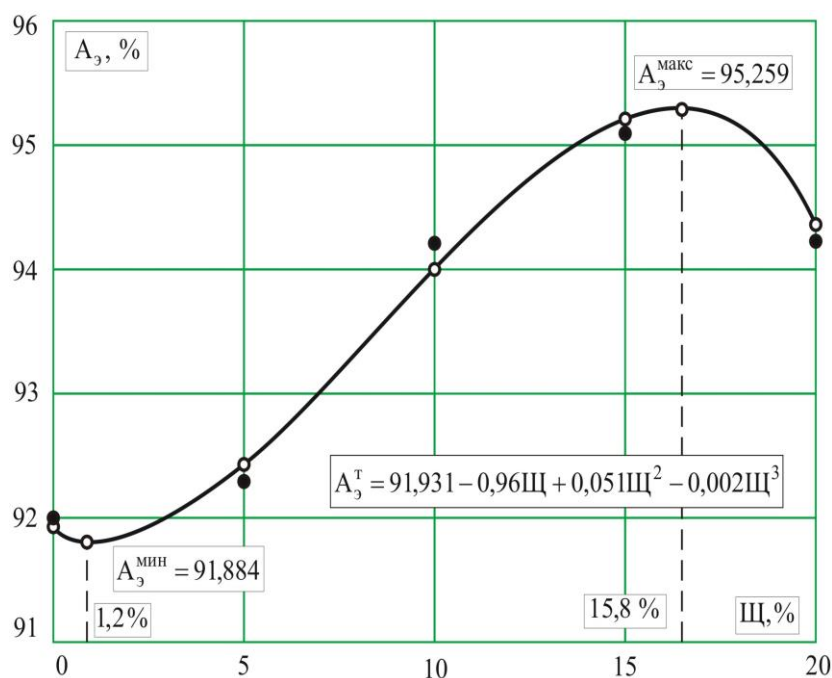


Рисунок 1 – Зависимость количества ацетонового экстракта (A_3), определяющего степень отверждения, от содержания щепы (Щ) с влажностью 8 % в составе древесного композита

Из рисунка видно, что при малом (менее 5 %) содержании щепы по массе в смеси древесного стекловолокнистого композиционного материала влияние ее на степень отверждения полимерной мастики чисто символическое, затем идет существенное ее повышение, достигается экстремальное значение, а затем снова происходит снижение.

Последнее объясняется тем, что щепы в составе слишком много и ее всасывающие возможности не реализуются.

В дальнейшем были выявлены зависимости пределов прочности и модулей упругости при растяжении, сжатии и чистом изгибе от содержания щепы в древесном композите, которые коррелируются с приведенной выше зависимостью (2), подтверждая правило створа И. А. Рыбьева [9], исследования на эту тему В. В. Патуроева [10], а также существование зоны благоприятных свойств, на которые впервые указал В. И. Харчевников [11], развивая работы упомянутых авторов.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты применены в дальнейшем при разработке заводской технологии производства строительных элементов, в том числе шпал из древесных стекловолокнистых композиционных материалов [4, 12, 13].

Выводы

С позиций основополагающих положений физико-химии поверхностей наполненных полимеров, интерпретации известных теорий их структурообразования рассмотрены условия для создания монолитной микро- и макроструктуры древесного стекловолокнистого композиционного материала и стекловолокнистого композиционного материала, применяемого во внешних слоях поперечного сечения, например, изделий для транспортного строительства, и являющегося его неотъемлемой частью.

В частности установлено, что для смол, имеющих большие усадки (8 % у ФАМ), в зоне контакта возможно появление значительных напряжений, влияние замазливателя, покрывающего стекловолокна, оказывается положительным, т. к. пластифицирующая прослойка приводит к их локализации. В частности она позволяет скомпенсировать резкий перепад в жесткости и тепловом расширении компонентов.

Изучение влияния адгезионной прочности на структурную целостность стекловолокнистого композиционного материала и древесного стекловолокнистого композиционного материала показало, что природа адгезии в зонах раздела стекловолокно и древесина – смола ФАМ определяется по крайней мере

тремя типами связей: механическими, физическими и химическими.

Исследованиями зависимости степени отверждения смолы ФАМ от содержания в композиционном материале древесной щепы комнатно-сухой влажности (8 %) установлено, что повышение степени отверждения может быть объяснено адсорбирующей способностью сухой древесины, в результате чего из полимерного раствора ФАМ удаляется свободная вода, способная ингибировать реакцию полимеризации олигомера [14, 15].

Рассмотрен важный вопрос о виде математической интерпретации результатов изучения зависимостей механических и других характеристик композиционных материалов от содержания в них различных структурообразующих компонентов. Предложено представлять эти зависимости с помощью графоаналитических моделей в виде полиномов третьей степени. Это позволяет количественно и качественно оценить физический смысл процессов, происходящих при формировании макроструктуры композиционного материала, включая армирование.

Библиографический список

1 Производство железнодорожных шпал из отходов лесной промышленности [Электронный ресурс] / Т. Н. Стородубцева, А. М. Томилин, Н. В. Федянина, В. И. Харчевников // Воронежский научно-технический вестник. – 2012. – № 2 (2). – С. 85-92.

2 Shinomura, T. Thermoplastic resin composition including wood fibrous materials : pat. US 3888810 C 08 K 7/00/T. Shinomura; assignee : Nippon Oil Co., Ltd. Tokyo, (JA). – № 05/377711 ; filling date 09.07.1973, publication date 10.06.1975. – 4 p.

3 Древесностекловолокнистые композиционные шпалы [Текст] / В. И. Кондращенко, В. И. Харчевников, Т. Н. Стородубцева, Б. А. Бондарев ; под ред. В. И. Харчевникова. – М. : Спутник+, 2009. – 311 с.

4 Стородубцева, Т. Н. Композиционный материал на основе древесины для железнодорожных шпал : Трещиностойкость под действием физических факторов : моногр. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2002. – 216 с.

5 Porebska, R. Polymer matrix influence on stability of wood polymer composites [Text] / R. Porebska, A. Rybak, B. Kozub, R. Sekula // Polymers for Advanced Technologies. – 2015. – no. 26. – pp. 1076-1082.

6 Стородубцева, Т. Н. Особенности математического моделирования древесного полимер-песчаного композита [Текст] / Т. Н. Стородубцева, А. А. Ак-

сомитный // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4, № 4 (16). – С. 131-139.

7 Стородубцева, Т. Н. Применение графоаналитических моделей при проектировании составов строительных древесностекловолоконистых композиционных материалов специального назначения [Текст] / Т. Н. Стородубцева // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2005. – Прил. № 2. – С. 97-101.

8 Использование полиномов третьей степени для описания зависимостей физико-механических характеристик СВПБ от длины волокон [Текст] / В. И. Харчевников, Т. Н. Стородубцева, Л. Н. Стадник, С. В. Назаров, В. В. Алыршиков. – М., 1989. – 9 с. – Деп. в ВНИИС 04.02.1989, № 9225 ; опубл. 01.04.1989, БУДР. – Вып. 4.

9 Рыбьев, И. А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ [Текст] / И. А. Рыбьев. – М. : Высшая школа, 1978. – 309 с.

10 Мастики, полимербетоны и полимерсиликаты [Текст] / Под ред. В. В. Патуроева и И. Е. Путляева. – М. : Стройиздат, 1975. – 224 с.

11 Харчевников, В. И. Стекловолоконистый полимербетон : моногр. / В.И. Харчевников. – Воронеж : Изд. ВГУ, 1976. – 116 с.

12 Стородубцева, Т. Н. Исследование влияния состава древесного полимерпесчаного композита на его механические свойства [Текст] / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2015. – Т. 19, № 6. – С. 132-139.

13 Стородубцева, Т. Н. Строительные композиционные материалы для строительства лесовозных автомобильных дорог [Текст] : доп. в качестве учеб. пособия для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки дипломир. специалиста 250400 (656300) Технология лесозаготовительных и деревоперераб. пр-в по специальности 250401 (260101) Лесоинженерное дело / Т. Н. Стородубцева ; Фед. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования "Воронеж. гос. лесотехн. акад." – Воронеж, 2008. – 112 с.

14 Стородубцева, Т. Н. Исследование упругих и прочностных характеристик древесины сосны [Электронный ресурс] / Т. Н. Стородубцева, Н. В. Федянина // Воронежский научно-технический вестник. – 2012. – № 2 (2). – С. 78-84.

15 Стородубцева, Т. Н. Защита древесины от влаги и гниения [Текст] / Т. Н. Стородубцева, А. А. Аксомитный, Т. Н. Донских // Воронежский научно-технический вестник. – 2014. – № 4 (10). – С. 68-72.