

УДК 624.01/07

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ДРЕВЕСНО-СТЕКЛОВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Стородубцева Т.Н., Стородубцев С.А., Федянина Н.В.

ГОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия», Воронеж,
e-mail: rivenelasoul@mail.ru

В статье перечислены результаты исследований строительных композиционных материалов, состоящих из компонентов, отличающихся по своим генезису и свойствам, предлагаемых для объектов специального назначения на транспорте.

Ключевые слова: композиционные материалы, морозостойкость, модуль упругости, пластические деформации

THE QUESTION OF INCREASING THE STRENGTH OF COMPOSITE MATERIAL

Storodubtseva T.N., Storodubtsev S.A., Fedyanina N.V.

Voronezh State Academy of Forestry Engineering and Technologies, Voronezh,
e-mail: rivenelasoul@mail.ru

The article lists the results of studies of construction of composite materials consisting of components that differ in their genesis and properties proposed for sites of special purpose transport.

Keywords: composite materials, frost resistance, modulus of elasticity, plastic deformation

Учитывая острую необходимость повышения экономической эффективности широкого использования техногенных продуктов лесного комплекса, химической промышленности и местного сырья, основное внимание было уделено разработке стекло- и древесно-стекловолоконистых композиционных материалов (СВКМ, ДСВКМ), главные исходные компоненты которых отличались по своим генезису и свойствам.

В изделиях и конструкциях, при строительстве промышленных и транспортных объектов специального назначения достаточно широко применяются различные композиционные материалы (КМ), вид которых определяется реализуемыми технологическими процессами создаваемых производств и условиями их эксплуатации.

Стремление соединить в КМ давно известные вяжущие (цемент, известь, сера) и древесину в единый монолит не привело к созданию высокопрочных долговечных композитов. Общие причины несовместимости отвержденных минеральных вяжущих и древесины состоят в том, что эти материалы склонны насыщаться водой, которая может вызвать гниение древесины, инициировать выделение ею веществ (сахара), способных ингибировать процесс отверждения, например, цементного теста, а также разрушить любую матрицу под действием вызванного ею давления стесненного набухания.

Были приняты все меры для борьбы с этими явлениями, чтобы увеличить прочность КМ при изгибе, снизить ползучесть, увеличить долговечность, т.е. использовать их для лесовозного транспорта.

Результаты первых эксплуатационных испытаний показали, что в ряде случаев под

действием атмосферных осадков на поверхности шпал из ДСВКМ появлялись микротрещины, одной из причин возникновения которых могло быть давление стесненного набухания высушенного древесного заполнителя. Появлялись они и во время технологического прогрева отливок шпал, и под влиянием других физических факторов.

В связи с этим встала острая необходимость более тщательно рассмотреть все причины, вызывающие процесс трещинообразования, в первую очередь влияния воды, устранить их и тем самым обеспечить решение проблемы долговечности элементов конструкций верхнего строения железнодорожного пути из ДСВКМ в течение заданного срока (40 лет) эксплуатации для того, чтобы они могли конкурировать с деревянными и железобетонными шпалами и нашли свою достаточно емкую нишу на рынке сбыта.

Были рассмотрены основные структурообразующие компоненты ДСВКМ и установлены их достоинства и недостатки.

Теоретический анализ

Водопоглощение КМ на смолах (ФА, ФАМ), полученных на основе отходов древесины, осуществляется за счет диффузирования молекул воды в пространство между участками и звеньями сжатых макромолекул полимера, в результате чего возникает пластифицирующий эффект, снижающий их прочность более, чем на 50%, и, в особенности, жесткость – на 60%, происходит растворение компонентов связующего и уменьшение сил адгезии в контактной зоне полимер-наполнитель. Отвержденные мастики и растворы на этих смолах так же,

как и древесина, склонны к набуханию, при этом в КМ возникают влажностные напряжения, не одинаковые по величине и знаку. Таким образом, полимерная матрица ДСВКМ не гарантирует защиту заключенной в ней древесины и сама, следовательно, нуждается в защите от действия воды.

Таким образом, встала глобальная задача: в материале шпал не должно возникать трещин при любых видах и сочетаниях перечисленных воздействий.

В ходе ее решения вначале были исследованы зависимости основных механических характеристик полимерной песчаной матрицы ФАМ от содержания в

ней модифицирующих наполнителей (графитовая мука, мука из пиритных огарков), замедлителя реакции кристаллизации бензолсульфокислоты и армирующих заполнителей ДСВКМ (стеклосетка и кусковые отходы переработки древесины – щепа). В подавляющем большинстве случаев эти зависимости (рис. 1) были представлены полиномами третьей степени, что подтверждалось минимальными значениями сумм квадратов отклонений и возможностью количественно и качественно оценить физический смысл процессов при формировании микро- и макроструктуры, включая армирование, КМ.

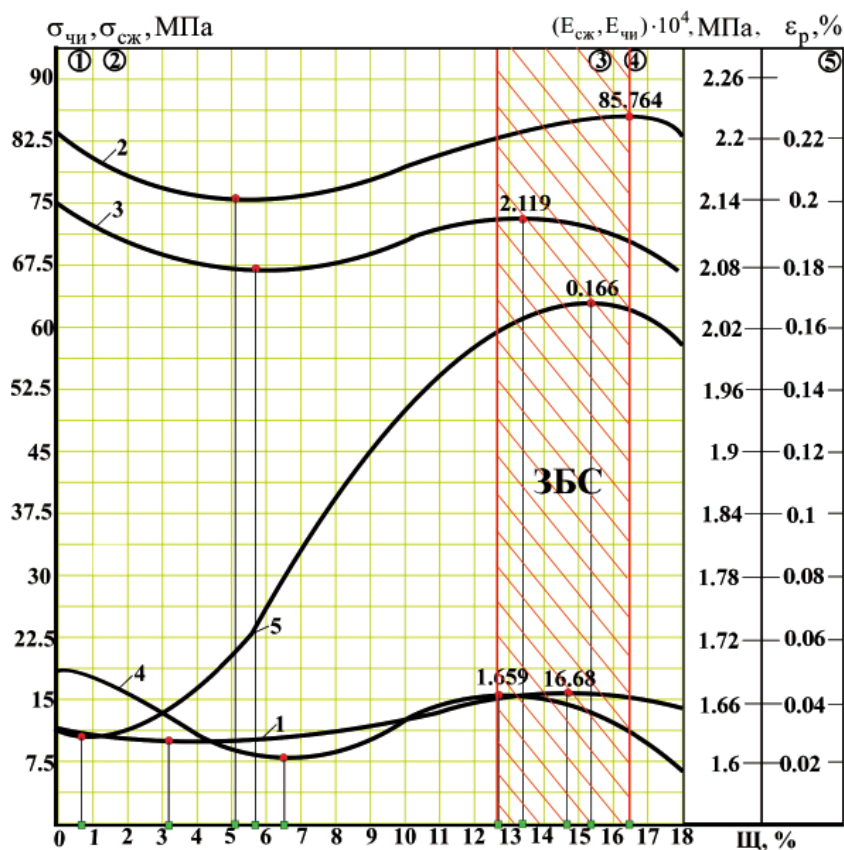


Рис. 1. Зависимости физико-механических свойств от количества основных структурообразующих компонентов (щепа) в составе полимерной матрицы ДСВКМ

На основании проведенных исследований впервые получен теоретический модифицированный состав ДСВКМ, ставший после некоторой корректировки производственным (табл. 1), и его механические характеристики (табл. 2). В ней достаточно явно просматривается роль синергетических эффектов взаимодействия различных структурообразующих компонентов этого материала, вводимых в состав порознь и одновременно, что позволило регулировать их количество в нем с позиций достижения необходимых характеристик конечного

композиата (ДСВКМ) и экономической целесообразности.

Совершенно очевидно, что такое состояние в шпале под действием эксплуатационных и других факторов будет уже не линейным, а объемным.

В итоге напрашивалась идея проведения анализа напряженного и деформированного состояния возникающего в объеме ДСВКМ (рис. 2). Для этого нам не хватало экспериментальных данных. Впервые исследовались упругие характеристики примененной древесины – модули упругости и коэффи-

циенты Пуассона с учетом анизотропии ее свойств. Находили их отношения – коэффициентов Пуассона к соответствующим модулям упругости. Это надо было сделать потому, что литературные данные по значе-

ниям этих характеристик и, следовательно, отношениям крайне разноречивы, поэтому они не были равны между собой, а только их равенство характеризует древесину как ортотропное тело.

Таблица 1

Модифицированный состав ДСВКМ, армированный кусковыми отходами переработки древесины и щебнем на одно изделие объемом 0,12 м³ на основе патента № 2215705

Компоненты ДСВКМ, К ₁	Состав		Масса – P _i компонента в изделии	Содержание компонентов P _i в 1 м³
	м.ч.	% по массе – M _i		
ФАМ	6,0	14,63	27,8	232
БСК	1,5	3,66	6,8	57
П (мк = 1,2)	17,5	42,69	81,1	676
Гр	0,8	1,95	3,6	30
ПО	1,2	2,92	5,8	48
СС	0,5	1,22	2,4	20
Щ + ОММ	4,0	9,76	18,5	164 (0,31 м³)
ЩБ	9,5	23,17	44,0	367
Итого:	41 м.ч.	100 %	P _и = 190 кг	P _i = 1594 кг ≈ 1600 кг

Таблица 2

Физико-механические характеристики составов ДСВКМ по патенту № 2215705

Показатели	Результаты экспериментов композиционного материала по составам			
	1	2	3	4
Предел прочности, МПа при: сжатии изгибе скалывании	36,0 25,0 8,7	40,025 30,0 9,0	38,0 29,0 8,9	38,0 28,0 8,8
Модуль упругости ×10⁴, МПа при: сжатии изгибе	1,30 1,38	1,30 1,44	1,40 1,39	1,40 1,45
Предел выносливости при сжатии, МПа	37,0	39,0	39,0	36,0
Коэффициент стойкости в воде	0,64	0,72	0,70	0,68
Морозостойкость, цикл.	370	420	440	425

Методика

За объект исследования был впервые выбран кубик из древесины сосны, грани которого совпадали с плоскостями ее упругой симметрии, покрытый условно изотропной оболочкой из СВКМ. Использовался обобщенный закон Гука для ортотропных тел. При подстановке полученных отношений характеристик упругости древесины и известных ее модулей сдвига получили рабочее уравнение этого закона.

Обобщенный закон Гука для главных направлений ортотропного тела принят в виде:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{ra}}{E_a} \sigma_a - \frac{\mu_{rt}}{E_t} \sigma_t; \quad \gamma_{ra} = \frac{1}{G_{ra}} \tau_{ra};$$

$$\varepsilon_a = \frac{1}{E_a} \sigma_a - \frac{\mu_{ar}}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{at}}{E_t} \sigma_t; \quad \gamma_{at} = \frac{1}{G_{at}} \tau_{at};$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E_t} \sigma_t - \frac{\mu_{tr}}{E_r} \sigma_r - \frac{\mu_{ta}}{E_a} \sigma_a; \quad \gamma_{tr} = \frac{1}{G_{tr}} \tau_{tr}.$$

К данным равенствам добавляются три соотношения:

$$\frac{\mu_{ra}}{E_a} = \frac{\mu_{ar}}{E_r}; \quad \frac{\mu_{tr}}{E_r} = \frac{\mu_{rt}}{E_t}; \quad \frac{\mu_{ta}}{E_t} = \frac{\mu_{at}}{E_a}.$$

Получена рабочая система уравнений

$$\begin{cases} 16,66\sigma_r - 0,50\sigma_a - 8,82\sigma_t = \varepsilon_r \cdot 10^4 \\ -0,50\sigma_r + 1,0\sigma_a - 0,59\sigma_t = \varepsilon_a \cdot 10^4 \\ -8,82\sigma_r - 0,59\sigma_a + 19,61\sigma_t = \varepsilon_t \cdot 10^4 \end{cases}$$

Нормальные и касательные напряжения возникают под действием температуры, усадки и воды (всестороннего увлажнения).

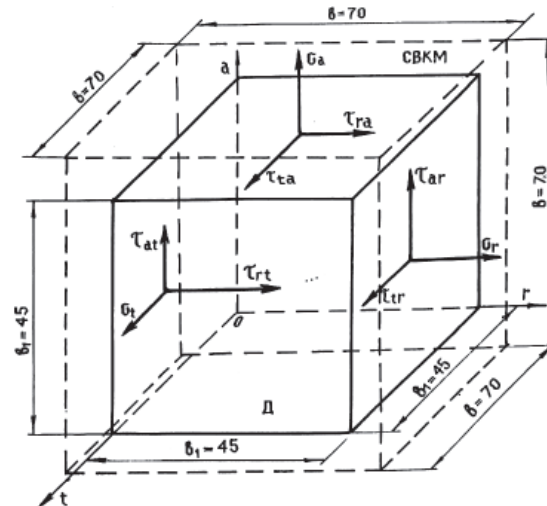


Рис. 2. Анализ объемного напряженного состояния в изделиях из ДСВКМ под действием физических факторов

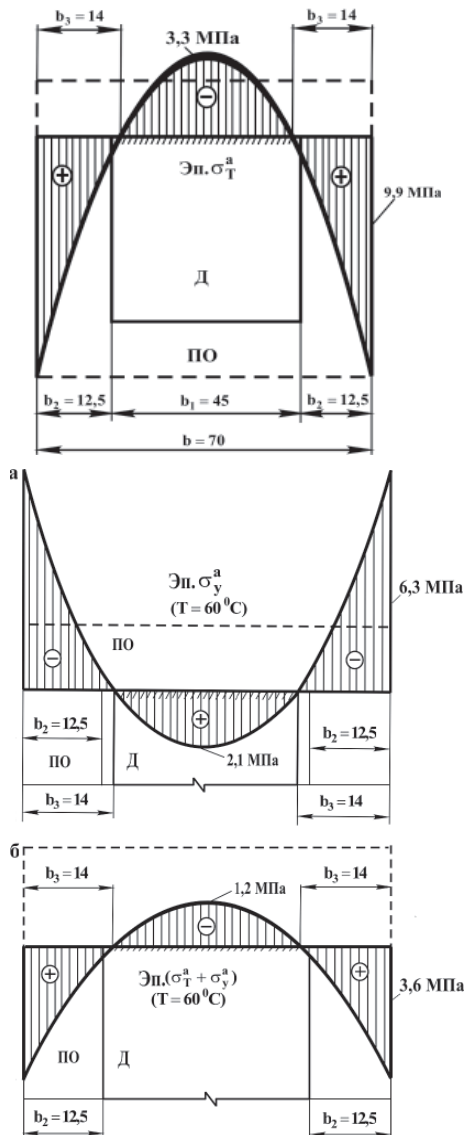


Рис. 3. Эпюры внутренних напряжений под действием температуры и усадки

Определяли положение главных площадок и главных деформаций – σ_1, σ_2 и σ_3 и ϵ_1, ϵ_2 и ϵ_3 (между осями $t-r$). Строились эпюры напряжений, возникающих под действием перечисленных факторов в опасных точках поперечного сечения кубика (у поверхности и в центре) (рис. 3).

Для их построения использовали принцип независимости действия сил и факт того, что эти эпюры ограничиваются квадратной параболой. В результате были получены значения нормальных и касательных напряжений, которые затем переносились на грани кубика по направлению осей a, r и t и его плоскости сначала без учета действия воды, а потом при одновременном ее действии.

В частности, было установлено, что трещина в полимерной оболочке под действием воды по направлению совпадает с направлением главной площадки с наибольшим напряжением $\sigma_1 = 10,13$ МПа и практически с направлением главной относительной деформации $\epsilon_1 = 10 \cdot 10^{-3}$.

Анализ напряженного состояния под действием физических факторов

$$\sigma_{в.у}^{сж.а} = 0,33 \sigma_{по}^{р.а} = 0,33 \cdot 9,9 \approx 3,3 \text{ МПа};$$

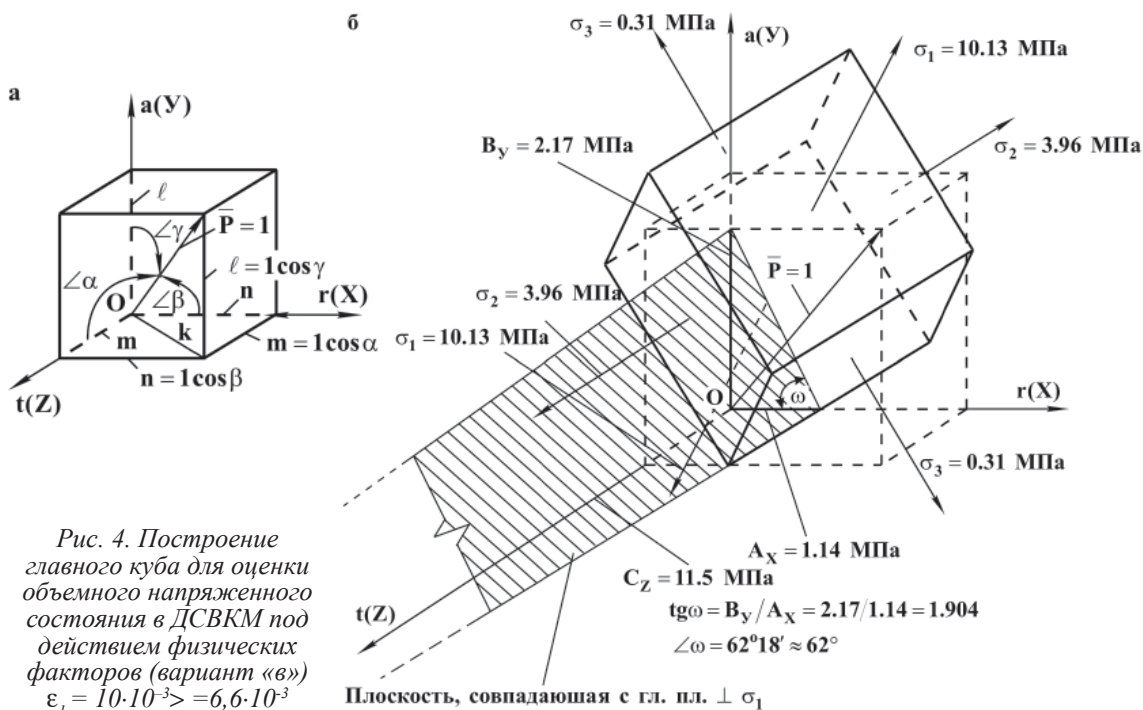
$$b_3 = \sigma_{д.у}^{сж.а} \cdot b / (\sigma_{по}^{р.а} + 2\sigma_{д.у}^{сж.а}) = 3,3 \cdot 70 / (9,9 + 2 \cdot 3,3) \approx 14 \text{ мм}$$

$$\sigma_{д.у}^{р.а} = 0,33 \sigma_{по}^{сж.а} = 0,33 \cdot 6,3 \approx 2,1 \text{ МПа}$$

$$b_{3д} = \sigma_{д.у}^{р.а} \cdot b / (\sigma_{по}^{сж.а} + 2 \cdot \sigma_{д.у}^{р.а}) = 2,1 \cdot 70 / (6,3 + 2 \cdot 2,1) \approx 14 \text{ мм}$$

В связи с создавшейся ситуацией следующим этапом исследований был выбор методов и средств защиты изделий из ДСВКМ от действия воды (рис. 4). Было принято решение применить гидрофобизирующие и модифицирующие составы для пропитки древесного армирующего заполнителя и поверхности шпал и использования различных растворов – каучук в керосине, низкомолекулярный полиэтилен, ДСТ – дивинилстирольный тормозластопласт; ЭГТК – эти-

Перед испытанием на ползучесть релаксационным методом, апробированным ранее, были определены величины нагрузок, соответствующих пределам пропорциональности и упругости.



– при напряжениях $\sigma_{oi} \leq \sigma_{пл}$ имеют место **упругие** деформации, а ползучесть может характеризоваться как установившаяся, но с крайне малой скоростью деформирования;

– $\sigma_{\text{пл}} \leq \sigma_{\text{oi}} \leq \sigma_y$ к упругим добавляются **высокоэластические и вязкие** деформации, а ползучесть можно характеризовать как установившуюся со скоростью деформирования большей чем на 1-м участке, но все же достаточно малой. Прогибы ползучести достигают предельного значения, равного полному упругому прогибу;

– при $\sigma_{\text{oi}} \leq \sigma_y$ возникают **пластические** деформации, связанные с появлением микротрещин, т.е. предел упругости ДСВКМ не может характеризовать длительную прочность этого материала.

Было установлено (рис. 5), что ординаты точек перегиба на этих кривых практически совпадают с величиной полного упругого прогиба, что при фиксированном времени появления этих точек позволило предложить методику определения пределов длительного сопротивления – $\sigma_{\text{плс}}$ и длительного секущего модуля деформаций – $E^{\text{сек}}$ на заданный срок эксплуатации $15 \cdot 10^3$ сут или 40 лет, а также соответствующих коэффициентов – длительности – $K_{\text{дл}}$ и длительного деформационного – $n_{\text{дл}}$. При этом использовались высокоточные аппроксимирующие функции и ЭВМ.

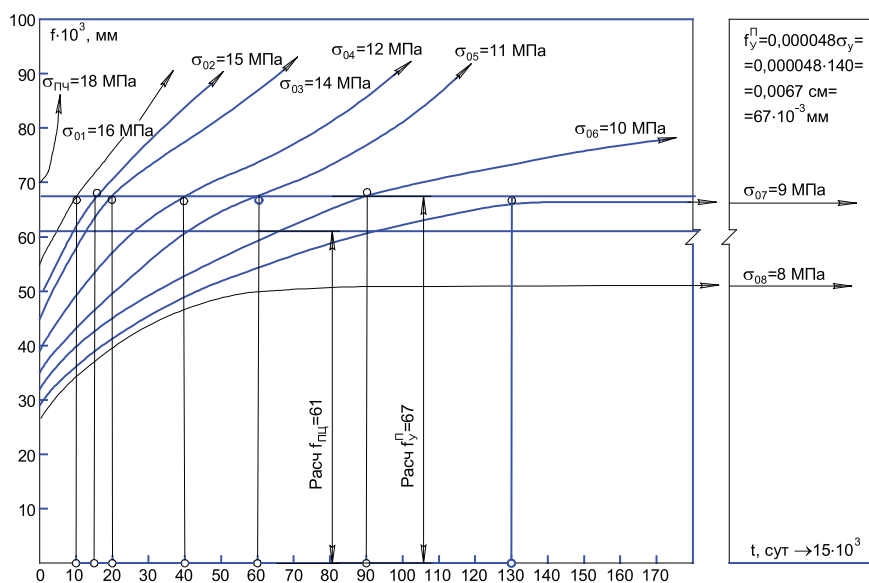


Рис. 5. Кривые ползучести образцов-балок из ДСВКМ, помещенных в воду

Установлено, что значение предела длительного сопротивления ($\sigma_{\text{плс}}$) совпадает с пределом пропорциональности ($\sigma_{\text{пл}}$). При действии воды он тоже одного порядка, поэтому можно считать это совпадение установившимся фактом.

Результаты

Предложенный метод открывает большие перспективы потому, что если такое совпадение будет подтверждено для других материалов, то можно отказаться от трудоемких испытаний на ползучесть.

Все проведенные исследования позволили предложить производственные составы ДСВКМ и внести изменения в ТУ и регламенты производства шпал.

Следует указать, что применение новых технологических приемов, в частности использование защитных решеток, удерживающих наполнитель от всплытия и фиксирующих положение и толщину защитной оболочки из СВКМ, а также применение

нового узла крепления рельсов к шпалам (усилие выдергиванию шпильки с гайкой более 70 кН) и другие факторы, сделали возможным установку предложенных шпал на полигонные испытания на экспериментальном кольце ВНИИЖТ МПС и на предприятиях Липецкой области, а также подрельсовых подкладочных плит из СВКМ на Ст. Оскольском ОЭМК.

Можно обратить внимание на то, что наши разработки позволили улучшить значения характеристик ДСВКМ за счет уменьшения содержания смолы ФАМ – 21,2 кг против 33,5 кг, уменьшения содержания песка 75,9 кг против 48,4 кг, применения трех слоев стеклотекстиля, что увеличило трещиностойкость шпал.

Все это одновременно с применением гидрофобизирующих добавок – Гр и ПО, и растворов позволило получить удовлетворительные результаты, что зафиксировано соответствующими актами о полигонных испытаниях шпал.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Так, ожидаемый экономический эффект с учетом эксплуатационных расходов при запланированном выпуске 375 тыс. штук шпал в год составит 130 млн рублей (по сравнению с деревянными) и 16 млн рублей (по сравнению с железобетонными).

1. Конструирование, изготовление и внедрение элементов конструкций из композиционных материалов для лесовозных дорог и лесных машин / В.И. Харчевников, Т.Н. Стородубцева, В.Б. Огарков и др. // Отчет по науч.-исслед. работе, № госрегистр. 01.960.010578. – Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. акад., 1999. – 86 с.
2. Харчевников В.И. Защита днищ электролизеров и межванной оцинковки стекловолокнистым полимербетоном (СВПБ): Информ. листок // ЦНТИ. – Воронеж. – 1998. – № 61. – 21 с.
3. Древесностекловолокнистый композиционный материал (ДСВКМ) для узкоколейных и общего назначения железных дорог / Т.Н. Стородубцева, В.И. Харчевников, О.И. Чинарева, О.В. Вишнякова. – Воронеж: ВГЛТА, 1995. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ 10.08.95, № 2424–В95.
4. Композиционные шпалы на основе отходов древесины и стекловолокна для железных дорог / В.И. Харчевников, Т.Н. Стородубцева, В.Б. Огарков и др.: отчет о НИР № 101/93. – Воронеж, 1993. – № госрегистр. 01.9.40000192. – 43 с.
5. Использование полинома третьей степени при проектировании оптимального состава полимербетона ФАМ / Т.Н. Стородубцева, В.И. Харчевников, С.В. Назаров и др. – Воронеж, 1989. – 10 с. – Деп. в ВНИИС 4.02.89, № 9224; Оpubл. 1.04.89, БУДР Вып. 4.
6. Использование полиномов третьей степени для описания зависимостей физико-механических характеристик стекловолокнистых полимербетонов от длины волокон / Т.Н. Стородубцева, В.И. Харчевников, Л.Н. Стадник и др. – Воронеж, 1989. – 9 с. – Деп. в ВНИИС 4.02.89, № 9225; Оpubл. 1.04.89, БУДР Вып. 4.
7. Харчевников В.И. К вопросу развития теории искусственных строительных конгломератов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – Новосибирск, 1989. – № 1. – С. 48–51.
8. Баженов Ю.М. Компьютерное материаловедение строительных композитов с трещинами и порами / Ю.М. Баженов, В.А. Воробьев, А.В. Илюхин // Изв. вузов. Строит. – 2001. – № 11. – С. 37–43.