Изготовление и механические свойства образцов материала для производства композиционных шпал

В.И. Кондращенко (д.т.н., профессор, [1]Russian University of Transport, 127994 Moscow, Russia), C. Wang (аспирант, Russian University of Transport (MIIT), 127994, Moscow, Obraztsova str, 9, bldg. 9, Russia), Т.А. Мацеевич (д.ф.-м.н., доцент, [2]Moscow State University of Civil Engineering, 129337 Moscow, Russia), (А.А. Аскадский д.х.н., профессор, A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds, Russian Academy of Sciences, 119991 Moscow, Russia, профессор Moscow State University of Civil Engineering, 129337 Moscow)

Аннотация

Получены композиционные материалы для изготовления композиционных шпал, которые отличаются от применяемых железобетонных шпал. В качестве полимерного связующего использован поливинилхлорид, а в качестве наполнителя – смесь древесной муки хвойных пород и минерального наполнителя. Такие материалы обладают прочностью при консольном изгибе от 29,7 до 39,6, удельной ударной вязкостью от 3,1 до 4,6 кДж/м^2, прочностью при растяжении от 10,3 до 14,7 МПа, относительным удлинением при разрыве от 3,2 до 4,7 %, модулем упругости при растяжении от 1430 до 1910 МПа. В условиях двухопорного изгиба прочность составляет от 24,7 до 50,7 МПа, модуль упругости – от 4190 до 7570 МПа. Модуль упругости при сжатии составляет от 620 до 2470 МПа. Данные материалы обладают механическими свойствами, которые делают их пригодными для изготовления композиционных шпал, обладающих преимуществами перед существующими железобетонными шпалами.

Ключевые слова

Композиционные шпалы (railway sleepers), композиционные материалы (composite materials), древесные наполнители wood fillers, минеральный наполнитель, mineral filler, прочность на изгиб, flexural strength, прочность на растяжение tensile strength, прочность на сжатие compressive strength, удельная ударная вязкость specific impact strength

Введение

На сегодняшний день в индустрии железнодорожных шпал основное применение находят железобетонные шпалы, которые, обладая высокой жесткостью, приводят к преждевременному износу железнодорожного пути и подвижного состава. В то же время применение деревянных шпал постепенно сокращается из-за резкого уменьшения ресурсов в виде крупногабаритной качественной древесины, а также негативного воздействия антисептика древесины на окружающую среду и организмы [1]. При этом существуют проблемы с использованием бетонных или стальных конструкций на путях с деревянными шпалами (из-за разницы в жесткости конструкций) и на мостах с открытым настилом, где требуется достаточная эластичность при отсутствии балласта (из-за чрезмерной жесткости бетона и стали) [2]. Наряду с этим в мире накапливается огромное количество промышленных и бытовых отходов, особенно различных пластмасс. Переработка отходов пластмасс и использование вторичных материалов для получения новых продуктов, в частности, для производства композиционных шпал, является актуальной проблемой [3]. Разработка новых композитных шпал, обладающих

предпочтительными свойствами по сравнению с традиционными конструкциями подрельсовых оснований, является важной научно-инженерной задачей для железнодорожной отрасли. Композитная шпала, являясь несущим элементом железнодорожного пути, должна воспринимать поездную нагрузку на рельс, обеспечивая при этом долгосрочную геометрическую стабильность конструкции [4]. Поэтому изучение механических свойств материалов таких шпал особенно важно для выполнения их эксплуатационных функций.

Материалы и методы.

Материалы для шпал получали на базе производства древесно-полимерных композитов (ДПК) компании Savewood. Изготовление образцов материала шпал проводили на промышленных экструдерах компании Savewood. Температура экструзии в различных зонах экструдера варьировалась от 145 до 200^{0}С. Скорость экструзии 0,25-2 м/мин.

Были подготовлены 10 образцов рецептур, из которых для измерений использовали 6 образцов в соответствии с таблицей 1.

Табл. 1. Массовые доли компонентов в образцах.

Номер опыта	Расходы составляющих; относительные единицы по массе		
	Древесная мука	Карбонат кальция	ПВХ
4	1,167	1,167	1
6	-	0,538	1
7	0,436	0,436	1
$К_1$	1,553	0,780	1
$К_2$	0,305	-	1
$К_3$	-	0,873	1

Концентрация всех остальных компонентов – модификаторов, стабилизаторов, антипиренов и других добавок составляла значения, присущие классической рецептуре материалов из ДПК, производимых компанией Savewood, которые, в свою очередь, являются коммерческой тайной.

Результаты и обсуждения.

1. Удельная ударная вязкость.

Для определения удельной ударной вязкости пластмасс при консольном закреплении образца (рис. 1) применяли стандартные образцы в виде пластинок, имеющих размеры $L \times b \times h$ = (15,0±1,0)×(10,0±0,5)×(1,5−4,5) мм.

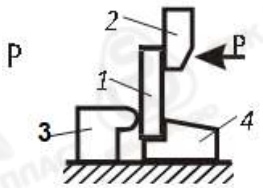

Рис.1. Схема испытаний на удельную ударную вязкость на приборе «Динстат». 1 – образец; 2 – боек маятника; 3 – нижняя зажимная опора; 4 – подвижная опора

Исследование удельной ударной вязкости проводились в соответствии с ГОСТ 4647-2015 Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи (с поправкой). Настоящий стандарт распространяется на пластмассы и устанавливает метод определения ударной вязкости по Шарпи на образцах с надрезом и без надреза.

Результаты испытаний по определению удельной ударной вязкости показаны в качестве примера в таблице 2 для образца $К_3$.

Табл. 2. Удельная ударная вязкость образцов $К_3$ при параллельных измерениях.

Толщина *h*, мм	Работа по разрушению образца *A*, кгс·см	Удельная ударная вязкость *a*, кДж/м^2	Средняя удельная ударная вязкость *a*, кДж/м^2
4	1,5	4,0	3,38
4	1,2	3,0	
3,5	1,2	3,4	
3,5	1,1	3,1	
3,5	1,2	3,4	
3,5	1,2	3,4	

Сравнительные значения удельной ударной вязкости всех образцов показаны в таблице 3.

Табл. 3. Значения средней удельной ударной вязкости всех образцов.

Образец	Средняя удельная ударная вязкость *a*, кДж/м^2
$К_3$	3,4
№4	3,3
№6	4,0
$К_1$	3,1
№7	4,6

Наибольшая удельная ударная вязкость характерна для образца № 7. Этот образец содержит равное количество древесного наполнителя и карбоната кальция $CaCO_3$ (по 0.436). Это наименьшее количество наполнителя по отношению к поливинилхлориду (ПВХ), и кроме этого наполнитель распределен наиболее равномерно в материале. Наименьшая удельная ударная вязкость характерна для образца $К_1$. Этот образец содержит наибольшее количество древесной муки и карбоната кальция. Такая же ситуация характерна для образца № 4; удельная ударная вязкость этого образца также небольшая и составляет 3,3 кДж/м^2.

2. Прочность при консольном изгибе.

Определение прочности при изгибе проводилось в соответствии с ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010) Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб (с Поправками). Для определения прочности полимерных материалов при консольном изгибе применяли

стандартные образцы с размерами $L \times b \times h$ = 15,0×10,0×(1,5−4,5) мм. Для испытаний использовали прибор «Динстат»; схема испытаний показана на рисунке 2.

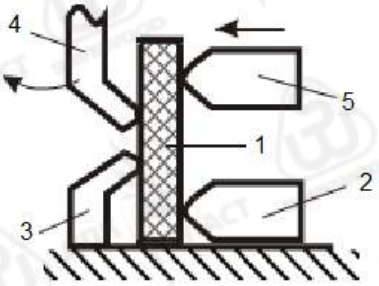

Рис. 2 Схема испытаний на консольный изгиб на

приборе «Динстат»: 1 – образец; 2 – призматический зажим маятника; 3 – неподвижная опора маятника; 4 – неподвижная опора рычага изгиба; 5 – призматический зажим рычага изгиба.

В качестве примера в таблице 4 показаны результаты параллельных измерений для образца № 7.

Табл. 4. Результаты параллельных измерений прочности при консольном изгибе образца № 7

Толщина h, мм	Изгибающий момент m, кгс·см	Прочность при изгибе $\sigma_и$, МПа	Среднее значение прочности при изгибе $\sigma_и$, МПа
3,59	7,1	32,8	36,9
3,67	8,9	41,1	
3,48	6,2	30,2	
3,63	10,1	46,6	
3,69	7,9	34,6	
3,65	7,8	36,0	

Значения средней величине прочности при консольном изгибе всех образцов сведены в табл. 5.

Табл. 5. Значения средней прочности при консольном изгибе различных образцов.

	Образец				
	$К_3$	№ 4	№ 6	$К_1$	№ 7
Средняя прочность при изгибе $\sigma_и$, МПа	29,7	39,6	39,0	30,0	36,9

Наибольшая прочность характерна для образцов № 4 и № 6. Образец № 4 содержит равные доли древесной муки и карбоната кальция, а образец № 6 – только небольшую долю карбоната кальция. В целом, прочность при изгибе достаточно высокая.

3. Определение прочности при растяжении.

Использовали образцы в виде двухсторонних лопаток при общей длине 115 мм,

расстоянии между положениями кромок зажимов 115 мм, расстоянии между положением кромок 80±5 мм, длине рабочей части 33±1 мм; ширине рабочей части 6±0,4 мм, толщине 2±0,2 мм. Измерения проводили на универсальной испытательной машине LLOYD Instruments LR5K Plus. Скорость растяжения составляла 50 мм/мин. В таблице 6 в качестве примера представлены результаты параллельных измерений образца № 4.

Табл. 6. Результаты измерений прочности, модуля упругости и относительного удлинения при растяжении образца № 4.

Образец	Прочность при растяжении, $\sigma_р$, МПа	Относительное удлинение, $\varepsilon_р$, %	Модуль упругости при растяжении, Е, МПа
4	18,0	3,8	2254
	11,0	2,3	1600
	13,0	5,3	1530
	13,9	3,2	2260
	Средние величины		
	13,8	3,7	1910

Значения средних показателей свойств при растяжении сведены в таблице 7.

Табл. 7. Значения средних показателей свойств при растяжении.

	Образец				
	$К_3$	$К_1$	№ 7	№ 6	№ 4
Средняя прочность при растяжении, $\sigma_р$, МПа	10,3	14,7	12,7	14,0	13,8
Среднее относительное удлинение при разрыве, $\varepsilon_р$, %	4,4	3,8	4,7	3,2	3,7
Средний модуль упругости при растяжении, *E*, МПа	1500	1430	1620	1780	1910

4. Определение модуля упругости при двухопорном изгибе.

Для определения прочности пластмасс при двухопорном изгибе применяли образцы с размерами $L \times b \times h$ = ≥80×(10,00±0,50)×(4±0,20) мм. Измерения проводили на универсальной испытательной машине LLOYD Instruments LR5K Plus. Значения средних показателей свойств при изгибе приведены в таблице 8.

Табл. 8. Значения средних показателей механических свойств при двухопорном изгибе.

	Образец				
	$К_3$	$К_1$	№ 7	№ 6	№ 4
Средняя прочность при изгибе, $\sigma_{из}$, МПа	24,7	36,0	50,7	49,0	43,3

Среднее максимальное удлинение при изгибе, $\varepsilon_{из}$, %	0,014	0,011	0,015	0,014	0,014
Средний модуль упругости при изгибе, $E_{из}$, МПа	4190	7570	5380	6090	4820

5. Определение прочности и модуля упругости при сжатии.

Кривые сжатия с последующей оценкой модуля упругости и прочности проводили на приборе для микромеханических испытаний конструкции Дубова-Регеля, модифицированного в ИНЭОС РАН с целью компьютерного задания скорости деформации, построения кривых сжатия, расчета модуля упругости, задания температуры испытаний. В качестве примера в таблице 9 приведены средние значения модулей упругости при сжатии, основанные на параллельных измерениях для 6 образцов каждого материала.

Табл. 9. Значения средних показателей модуля упругости при сжатии.

	Образец				
	$К_3$	№ 4	№ 6	$К_1$	№ 7
Средний модуль упругости при сжатии, E МПа	620	2470	2380	1650	1810

В заключение приведем расчетные значения модулей упругости композиционных материалов. Зависимость модуля упругости смеси от концентрации компонентов для двухкомпонентной системы определяется по уравнению [ ]:

$$E(смеси) = \frac{\alpha_{m,1}\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1 + \alpha_{m,2}\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2}{\alpha_{m,1}\dfrac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1}{E_1} + \alpha_{m,2}\dfrac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2}{E_2}} \qquad (1)$$

где $\alpha_{m,1}$ и $\alpha_{m,2}$ – молярные доли компонентов 1 и 2 соответственно; $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1$ и $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2$ – ван-дер-ваальсовы объемы повторяющихся звеньев компонентов 1 и 2 соответственно; E_1 и E_2 – модули упругости компонентов 1 и 2 соответственно.

В качестве компонента 1 будем рассматривать смесь ПВХ с древесиной, а в качестве компонента 2 – минеральный наполнитель $CaCO_3$.

Принимая во внимание, что $\alpha_{m,1} + \alpha_{m,2} = 1$, запишем

$$E = \frac{1+\alpha_{m,2}\left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2}{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1}-1\right]}{\frac{1}{E_1}+\alpha_{m,2}\left[\frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2}{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1 E_2}-\frac{1}{E_1}\right]} \tag{2}$$

Уравнение (2) позволяет рассчитать зависимость модуля упругости от молярной концентрации второго компонента. Расчеты ван-дер-ваальсова объема органических макромолекул проводили с помощью компьютерной программы «Каскад» (ИНЭОС РАН). Для минерального компонента $CaCO_3$ ван-дер-ваальсов объем определяли по формуле

$$\sum_i \Delta V_i = \frac{kM}{N_A \rho} \tag{3}$$

В результате ван-дер-ваальсов объем $CaCO_3$ равен 50 Å^3. Теперь перейем к расчетам модуля упругости. Для того чтобы рассчитать зависимость модуля упругости от весовой концентрации второго компонента, воспользуемся обычным соотношением

$$\alpha_m = \frac{1}{1+\frac{M_2}{M_1}\left(\frac{1}{\alpha_w}-1\right)} \tag{4}$$

где α_m и α_w – молярные и весовые доли соответственно, M_1 и M_2 – молекулярные массы компонентов 1 и 2 соответственно.

Подставляя соотношение (4) в уравнение (2), получаем

$$E = \frac{1+\frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2 \Big/ \left(\sum_i \Delta V_i\right)_1 - 1}{1+\frac{M_2}{M_1}\left(\frac{1}{\alpha_w}-1\right)}}{\frac{1}{E_1}+\frac{\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2 \Big/ \left(\sum_i \Delta V_i\right)_1 - 1/E_2}{1+\frac{M_2}{M_1}\left(\frac{1}{\alpha_w}-1\right)}} \tag{5}$$

Уравнение (5) позволяет получить зависимость модуля упругости от весовой доли $CaCO_3$. Для этого подставим в (5) следующие значения параметров: $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_1$ = 76.0 Å^3,

$\left(\sum_i \Delta V_i\right)_2$ = 50 Å^3, M_1 = 99.75, M_2 = 100, E_1 = 1930 МПа, E_2 = 6500 МПа. Зависимость E от α_w показана на рисунке 3.

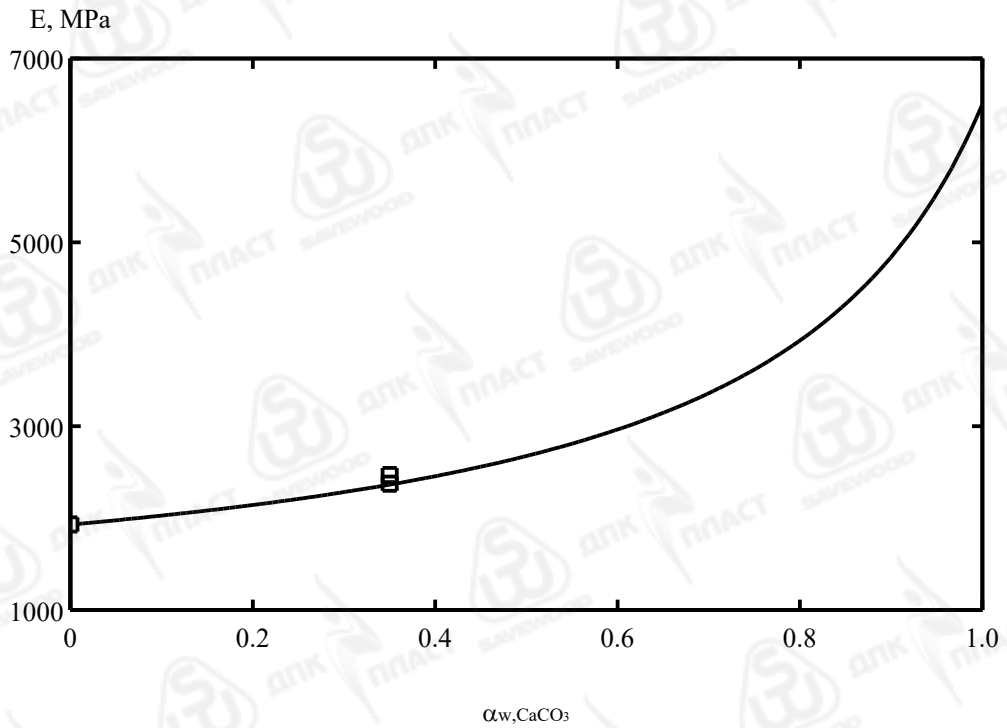

Рис. 3. Зависимость модуля упругости от весовой доли $CaCO_3$. Кривая –расчетная, точки – экспериментальные.

Из рисунка 3 видно, что модуль упругости при сжатии увеличивается с ростом концентрации минерального наполнителя. В то же время можно сделать вывод, что экспериментальные значения модулей упругости совпадают с расчетными значениями.

Те же расчеты выполнены для композитов, содержащих смесь ПВХ и moso бамбуковой муки в качестве матричного полимера. Расчеты проводились по формулам (4), (5). Молекулярная масса смеси составляет M_1 = 210, ван-дер-ваальсов объем $\left(\sum_i \Delta V_i\right)_{p1}$ = 155 Å^3. Подстановка этих параметров в уравнение (5) приводит к зависимости модуля упругости от массовой доли $CaCO_3$, показанной на рис. 4.

.

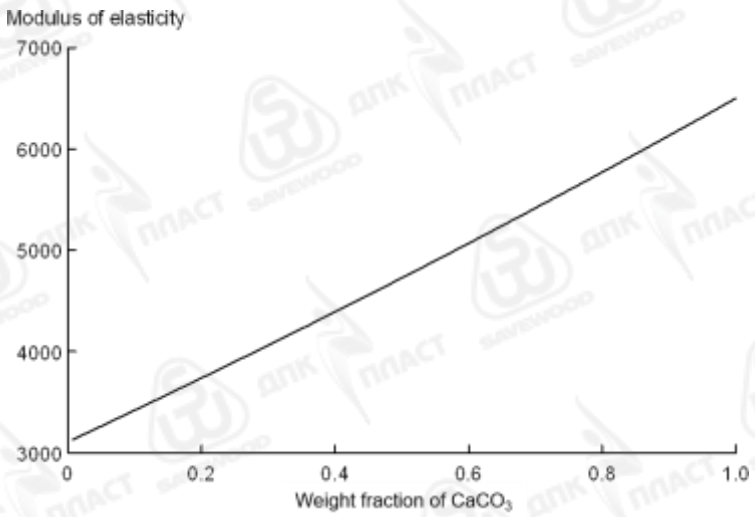

Рис. 4. Зависимость модуля упругости от весовой доли $CaCO_3$. Древесный наполнитель – moso бамбук.

Сравнение рисунков 3 и 4 показывает, что модуль упругости для любого содержания moso бамбуковой муки выше, чем модуль упругости композитов, содержащих древесную муку хвойных пород. Однако при анализе этих зависимостей для композитов, содержащих древесную муку хвойных пород, использовались экспериментальные значения модуля упругости E_{p1}, а для композитов, содержащих moso бамбуковую муку – только расчетное значение E_{p1} = 3110 МПа. В дальнейшем должны быть проведены эксперименты по измерению кривых напряженно-деформированного состояния при сжатии для таких композитов и сопоставлены результатов экспериментов и расчетов.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что механические свойства полученных материалов (прочность, модуль упругости, сопротивление ударному воздействию) вполне достаточны для их использования в производстве железнодорожных шпал. Состав материалов таков, что композитная шпала может являться несущим элементом железнодорожного пути. Она может воспринимать поездную нагрузку на рельс. Проведенный прогноз показал, что для древесного наполнителя может использоваться бамбуковая мука вместо древесной муки хвойных пород, что приведет к увеличению модуля упругости, а также к использованию древесных отходов из этого наполнителя, который находится в большом количестве в Китае и его следует более активно использовать для производства композиционных материалов в том числе и в железнодорожной отрасли в виде композиционных шпал.

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект "Теоретико-экспериментальное конструирование новых композитных материалов для обеспечения безопасности при эксплуатации зданий и сооружений в условиях техногенных и биогенных угроз" №FSWG-2020-0007 и тема госзадания ИНЭОС РАН № 0085-2019-0004).

Благодарности: The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90179.

Список литературы

[1] Szydlowski M. Odour nuisance of railway sleepers saturated with creosote oil [J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 54: 163-168.

[2] Walker S. Analysis of the behaviour of composite transom decks for railway bridges [D]. 2015.- 257p.

[3] Mwanza B G, Mbohwa C. Drivers to sustainable plastic solid waste recycling: a review[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 8: 649-656.

[4] Ferdous W, Manalo A, Khennane A, et al. Geopolymer concrete-filled pultruded composite beams–concrete mix design and application [J]. Cement and Concrete Composites, 2015, 58: 1-13.

[5] Аскадский А.А., Кондращенко В.И. Компьютерное материаловедение полмеров. Т.1. Атомно-молекулярный уровень. М.: Научный Мир, 1999, 543 стр.

[6] Askadskii A.A. Computational Materials Science of Polymers. Cambridge International Science Publishing Ltd, Cambridge, 2003, 695 pp.