

Рисунок 1 – Распределение напряжения по фон Мизесу

Проявление напряжений, величина которых остается в пределах прочности конструкции, свидетельствует об отсутствии сигналов о возможном разрушении элементов системы. В данном случае, принимая во внимание вышеизложенное, можно заключить, что в конструкции с указанными размерами элементов и физико-механическими свойствами материала напряжения остаются ниже допустимых значений, что подтверждается коэффициентом запаса прочности, равным 3,826 (при максимальном значении – 15).

Максимальные напряжения, определенные по Мизесу для шпал из остатков с размерами переводных брусьев, следующие:

- I типа с длиной шипа 100 мм – 4,8 МПа (с длиной 150 мм – 4,2 МПа, разница составляет 13 %);
- II типа с длиной шипа 150 мм – 5,4 МПа (при длине 100 мм – 3,8 МПа, разница – 30 %);
- III типа с длиной шипа 150 мм – 5,8 МПа (при длине 100 мм – 4,9 МПа, разница – 16 %).

Расчеты с использованием Autodesk Inventor подтверждают надежность конструкции составной деревянной шпалы, собранной из остатков древесины, полученных после производства переводных брусьев без изменения их поперечного сечения для всех типов, что говорит о целесообразности использования таких моделей в реальной практике.

Применение трехмерного моделирования вместе с экспериментальными данными в будущем позволит разработать методики для оценки состояния деревянных шпал и рекомендации по их применению в условиях эксплуатации.

Список литературы

- 1 СТП БЧ 56.388-2022. Положение о системе ведения путевого хозяйства : утв. приказом зам. Нач. Бел. ж. д. от 14.05.2022 № 370 НЗ. – Введ. 2022-06-22. – Минск : Бел. ж. д., 2022. – 35 с.
- 2 Невзорова, А. Б. О целесообразности и перспективах применения деревянных шпал в криволинейных участках пути / А. Б. Невзорова, В. В. Романенко // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. – 2021. – № 2 (246). – С. 242–249.
- 3 Невзорова, А. Б. Имитационное моделирование несущей способности составной деревянной шпалы с учетом осевой нагрузки / А. Б. Невзорова, В. В. Романенко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2024. – № 1 (96). – С. 72–81.

УДК 625.142.21

РАЗРАБОТКА ПУТЕВЫХ ПРОКЛАДОК ДЛЯ ВЫПРАВКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

К. С. ХОМИЧ

Белорусская железная дорога, г. Пинск

С. С. КОЖЕДУБ, В. И. ИНЮТИН

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Для выправки пути в местах пучения и в зоне рельсовых стыков используются путевые прокладки толщиной от 1 до 10 мм. Для изготовления этих прокладок рекомендуется использовать композиционный материал на основе отходов хлопчатобумажных тканей (ОХБТ). Исследование влияния содержания в связующем поливинилбутираля (ПВБ) (X_1 , C_1 , мас.ч.), магнийцинкового ок-

сихлорида (МЦО) (X_2 , C_2 , мас.ч.) и отходов хлопчатобумажных тканей (X_3 , C_3 , мас.ч.) на твердость (Y_1 , МПа), разрушающее напряжение при изгибе (Y_2 , МПа) удельную ударную вязкость (Y_3 , кДж/м²), прочность при сжатии (Y_4 , МПа), интенсивности линейного изнашивания (Y_5), коэффициент трения (Y_6) проводили методом центрального композиционного планирования второго порядка. Величина и интервалы варьирования независимых переменных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Величина и интервалы варьирования независимых переменных

Уровень варьирования	Независимая переменная, мас. ч.		
	C_1	C_2	C_3
Основной	6	10	110
Нижний	4	6	90
Верхний	8	14	130
Нижнее звездное плечо	2,64	3,27	76,36
Верхнее звездное плечо	9,36	16,73	143,64
Интервал варьирования	2	4	20

После реализации плана эксперимента и обработки данных на ЭВМ получили следующие уравнения: влияния компонентов на твердость (1), разрушающего напряжения при изгибе (2), удельной ударной вязкости (3), прочности при сжатии (4), интенсивности линейного изнашивания (5) и коэффициент трения (6) композиционного материала:

$$Y_1 = 401,9 - 4,275X_1 - 1,307X_2 - 14,37X_3 - 0,333X_1X_2 - 1,417X_1X_3 - 3,75X_2X_3 - 1,034X_1^2 - 1,641X_2^2 - 4,216X_3^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 72,25 - 0,989X_1 - 4,14X_2 + 5,669X_3 + 0,063X_1X_2 - 0,746X_1X_3 - 2,012X_2X_3 + 0,651X_1^2 - 1,859X_2^2 - 2,206X_3^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 14,69 + 0,537X_1 - 0,705X_2 + 1,853X_3 - 0,053X_1X_2 + 0,167X_1X_3 - 0,033X_2X_3 + 0,082X_1^2 - 0,017X_2^2 - 0,482X_3^2; \quad (3)$$

$$Y_4 = 204,7 - 3,715X_1 - 8,106X_2 + 15,05X_3 + 1,125X_1X_2 - 1,05X_1X_3 - 2,35X_2X_3 - 0,023X_1^2 + 0,982X_2^2 - 8,215X_3^2; \quad (4)$$

$$Y_5 \cdot 10^9 = 6,884 + 1,036X_1 + 0,624X_2 - 0,508X_3 + 1,087X_1X_2 + 0,054X_1X_3 - 1,804X_2X_3 + 1,45X_1^2 + 0,384X_2^2 + 1,592X_3^2; \quad (5)$$

$$Y_6 = 0,212 + 0,0601X_1 - 0,0092X_2 + 0,009X_3 - 0,0047X_1X_2 - 0,0019X_1X_3 - 0,020X_2X_3 + 0,0275X_1^2 + 0,0021X_2^2 - 0,0303X_3^2. \quad (6)$$

Проверку адекватности полученных уравнений проводили по критерию Фишера ($F_T = 5,05$). Доверительные интервалы коэффициентов регрессии и экспериментальные значения критериев Фишера, составляют:

- для уравнения (1) – $F_3 = 0,61$; $\Delta b_i = 1,8157$; $\Delta b_{ii} = 1,7675$; $\Delta b_{ij} = 2,3723$;
- для уравнения (2) – $F_3 = 1,06$; $\Delta b_i = 0,4669$; $\Delta b_{ii} = 0,4545$; $\Delta b_{ij} = 0,6101$;
- для уравнения (3) – $F_3 = 0,69$; $\Delta b_i = 0,0211$; $\Delta b_{ii} = 0,0206$; $\Delta b_{ij} = 0,0276$;
- для уравнения (4) – $F_3 = 0,52$; $\Delta b_i = 1,2037$; $\Delta b_{ii} = 1,1717$; $\Delta b_{ij} = 1,1727$;
- для уравнения (5) – $F_3 = 10,95$; $\Delta b_i = 0,001$; $\Delta b_{ii} = 0,001$; $\Delta b_{ij} = 0,0014$;
- для уравнения (6) – $F_3 = 0,52$; $\Delta b_i = 1,2037$; $\Delta b_{ii} = 1,1717$; $\Delta b_{ij} = 1,1727$.

Из сравнения экспериментальных и табличного значения критерия Фишера видно, что уравнения (1)–(4), (6) представляют собой адекватную модель, а уравнение (5) – близкую к адекватной математической модели композиционного материала.

После перехода к натуральным переменным уравнения (1)–(6) принимают соответственно вид:

$$HB = 120,4207 + 5,2765C_1 + 7,1306C_2 + 3,7187C_3 - 0,0416C_1C_2 - 0,0354C_1C_3 - 0,0469C_2C_3 - 0,2585C_1^2 - 0,1026C_2^2 - 0,0105C_3^2; \quad (7)$$

$$\sigma_{изгб} = -58,7053 - 0,4746C_1 + 4,0081C_2 + 1,8702C_3 + 0,079C_1C_2 - 0,0187C_1C_3 - 0,0252C_2C_3 + 0,1628C_1^2 - 0,1162C_2^2 - 0,0055C_3^2; \quad (8)$$

$$\alpha = -3,9084 + 0,1277C_1 - 0,0661C_2 + 0,3369C_3 - 0,0073C_1C_2 + 0,0042C_1C_3 - 0,0004C_2C_3 - 0,0205C_1^2 - 0,0011C_2^2 - 0,0012C_3^2; \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{ож}} = 120,1493 - 6,2203C_1 + 4,0885C_2 + 5,407C_3 + 0,4006C_1C_2 + 0,0263C_1C_3 - 0,0294C_2C_3 + 0,0058C_1^2 - 0,1864C_2^2 - 0,0205C_3^2; \quad (10)$$

$$I \cdot 10^9 = 52,8 - 5,3429C_1 + 1,3407C_2 - 0,6836C_3 + 0,1359C_1C_2 + 0,014C_1C_3 - 0,0226C_2C_3 + 0,3628C_1^2 + 0,024C_2^2 + 0,004C_3^2; \quad (11)$$

$$f = 0,8315 - 0,0413C_1 + 0,0268C_2 + 0,0133C_3 - 0,5675 \cdot 10^{-3}C_1C_2 - 0,0475 \cdot 10^{-3}C_1C_3 - 0,0265 \cdot 10^{-3}C_2C_3 + 0,6875 \cdot 10^{-2}C_1^2 + 0,0126 \cdot 10^{-2}C_2^2 + 0,676 \cdot 10^{-4}C_3^2. \quad (12)$$

Из графического анализа уравнения (7) следует, что при возрастании концентрации рубленых хлопчатобумажных тканей кривая разрушающего напряжения при сжатии проходит через максимум при содержании 130 мас. ч. наполнителя. Это можно объяснить критической концентрацией наполнителя в связующем (рисунок 1). Кривые разрушающего напряжения при изгибе, ударной вязкости и твердости монотонно возрастают и слабо изменяются в области высоких концентраций армирующего наполнителя.

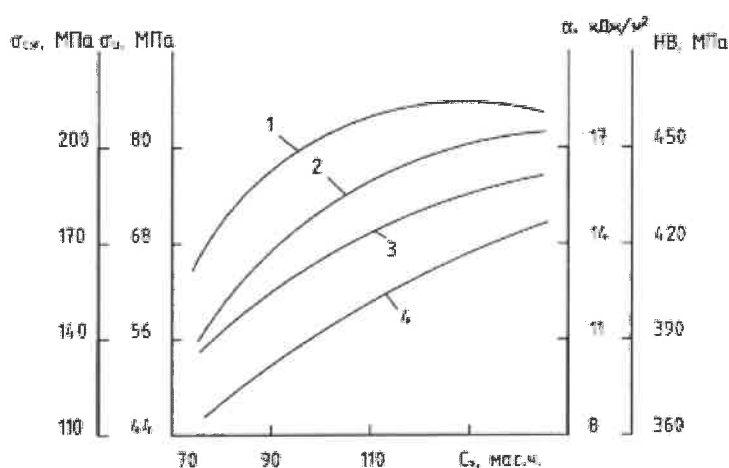


Рисунок 1 – Зависимость разрушающего напряжения при сжатии (1), разрушающего напряжения при изгибе (2), ударной вязкости (3) и твердости (4) термореактивного полимера, содержащего 4 мас.ч. ПВБ и 6 мас. ч. МЦО, от концентрации ОХБТ (C₃)

Проведенный анализ уравнения (9) показывает, что существенное влияние на повышение ударной вязкости композиционного материала оказывает изменение содержания поливинилбутирала и армирующего наполнителя в связующем. Это можно объяснить как повышением степени сшивки термореактивной смолы за счет взаимодействия водорода в пара- и орто-положении к фенольному гидроксилу и гидроксильной группой поливинилбутирала, так и увеличением вследствие этого адгезии связующего к волокнистому наполнителю. Концентрация магнийцинкового оксихлорида в значительной меньшей степени оказывает влияние на изменение прочностных свойств композиционного материала.

Анализ уравнений регрессии (11), (12) показывает, что снижение интенсивности линейного изнашивания и коэффициента трения в значительной мере зависит от взаимного влияния концентрации МЦО и ОХБТ в композите при образовании смазочных пленок из продуктов карбонизации волокон ОХБТ.

Разработанный армированный материал имеет следующие физико-механические и триботехнические показатели: разрушающее напряжение при изгибе – 82,66 МПа, твердость НВ – 405 МПа, удельную ударную вязкость – 15,94 кДж/м² интенсивность линейного изнашивания – $6 \cdot 10^{-9}$, коэффициент трения – 0,22, прочность при сжатии – 210 МПа.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что модификация термореактивной смолы поливинилбутиралем в сочетании с магнийцинковым оксихлоридом и измельченными отходами хлопчатобумажных тканей позволяет формировать композиты, предназначенные для изготовления путевых прокладок при выправке пути в стыковых зонах уравнительных пролётов бесстыкового пути.