

УДК 691.115

В. В. Ширяев, С. В. Шетько

Белорусский государственный технологический университет

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТВЕРДОСТИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ЛЬНЯНОГО МАСЛА И ДРЕВЕСНОЙ МУКИ**

Статья посвящена разработке перспективного направления использования одного из мягких древесных отходов – шлифовальной пыли – в качестве наполнителя композиционного материала, представляющего собой напольное покрытие.

В результате научно-исследовательской деятельности были определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на эксплуатационные характеристики разрабатываемого напольного покрытия: температура, давление и продолжительность прессования. Проведены экспериментальные исследования по выявлению наиболее оптимальных режимов для производства композиционного материала на основе льняного масла и древесной муки с учетом требований нормативной документации к твердости такого рода материалов. На основе экспериментальных данных определена регрессионная зависимость функции отклика от независимых переменных. Проведена проверка ее на адекватность с помощью критерия Фишера. Также получены поверхности отклика данной модели при фиксированной продолжительности прессования, анализ которых позволяет прогнозировать один из физико-механических показателей напольного покрытия (твердость). По данному анализу можно сделать рекомендации по оптимизации технологического процесса производства композиционного материала на основе древесной муки и льняного масла.

Проведенные исследования позволяют снизить некоторые трудо- и энергозатраты при производстве импортозамещающего напольного покрытия («натурального линолеума»).

Ключевые слова: напольное покрытие, твердость, температура, давление, шлифовальная пыль, математическое планирование.

V. V. Shiryayev, S. V. Shet'ko

Belarusian State Technological University

**PROGNOSTICATION HARDNESS COMPOSITE MATERIAL
BASED ON LINSEED OIL AND WOOD FLOUR**

The work is devoted to development of perspective directions of use of a soft wood waste – grinding dust – as a filler in the composite material, which is a floor covering.

As a result of the research work were the factors with the greatest impact on the performance of the developed floor: temperature, pressure and duration of pressing. Experimental studies to identify the most optimal conditions for the production of a composite material based on linseed oil and wood flour to meet the requirements of regulatory documents to the hardness of such materials. On the basis of experimental data determined regression dependence of the response function. Also received the response surface of the model, which allows the analysis to prognostication one of the physico-mechanical properties of the floor covering (hardness).

Studies can reduce some of the labor and energy costs in the production of floor coverings.

Keywords: flooring, hardness, temperature, pressure, sanding dust, mathematical planning.

Введение. Многие предприятия лесоперерабатывающего комплекса сталкиваются с проблемой использования и переработки древесных отходов, доля которых в зависимости от вида выпускаемой продукции может достигать 70% от всего объема перерабатываемого сырья.

Главные трудности в широком использовании вторичных отходов можно сформулировать следующим образом [1]:

1. Имеющееся оборудование, предназначенное для переработки первичного сырья, часто не подходит для переработки вторичных отходов вследствие быстрого износа рабочих органов, трудности или невозможности добиться качественного измельчения компонентов.

2. Разработка и доводка новых технологий и оборудования для переработки большинства вторичных отходов требуют существенных капитальных вложений.

3. В настоящее время практически не организован широкий сбор и сортировка различных видов вторичных отходов.

Все эти трудности являются организационными, и их можно преодолеть, объединив усилия различных предприятий и ведомств.

Основными задачами, которые необходимо решить для широкого использования вторичных отходов в различных производствах, являются:

1. Разработка и организация эффективной системы сбора и сортировки вторичных отходов.

2. Создание эффективных методов и технологий подготовки и первичной переработки вторичных отходов.

3. Подготовка эффективных технологических процессов производства различных материалов и изделий с заданными конечными свойствами, для которых в качестве сырья или отдельных компонентов используются подготовленные и подвергнутые первичной переработке вторичные отходы.

4. Разработка эффективных подходов по использованию различных материалов и изделий, изготовленных с применением вторичных отходов, и поиск наиболее приемлемых для них областей использования.

При обработке древесины наряду с кусковыми отходами, которые чаще всего используются в качестве сырья других производств, образуются также мягкие отходы, проблема применения которых остается открытой.

Целью исследований являлось определение возможности применения мягкого отхода деревообрабатывающей промышленности – шлифовальной пыли – в качестве сырья для производства композиционного материала (с использованием в качестве связующего льняного масла) с заданными физико-механическими свойствами.

Основная часть. В данной работе рассматривалась шлифовальная пыль как отход фанерного производства, поскольку доля ее образования в общем объеме перерабатываемого сырья значительна. При анализе статистических данных концерна «Беллесбумпром» стало известно, что годовое потребление фанерного производства в Республике Беларусь составляет порядка 700 тыс. м³ древесины. На основании нормативов образования отходов при производстве фанеры (2–9% от объема используемого сырья) можно сделать вывод, что после переработки круглых лесоматериалов образуется 14–63 тыс. м³ шлифовальной пыли, которая в дальнейшем утилизируется. Оптимизация процесса утилизации древесных отходов позволяет предприятиям повысить показатели прибыли и рентабельности.

Ранее были проведены исследования в области разработки реутилизационной технологии, позволяющей изготавливать композиционный строительно-отделочный материал на основе шлифовальной пыли и льняного масла.

Был определен состав композиции для изготовления строительно-отделочного материала, в который входят:

- 1) эпоксидированное льняное масло;
- 2) отвердитель;
- 3) сиккативы;
- 4) карбонат кальция;
- 5) шлифовальная пыль.

Также нами была разработана технология изготовления данного композиционного материала [2], в которой можно выделить два этапа:

- 1) получение «линолеумного цемента»;
- 2) получение композита – напольного покрытия.

На первом этапе в реактор загружаются в необходимом соотношении эпоксидированное льняное масло и отвердитель, а также сиккативы. Затем включается мешалка и проводится тщательное перемешивание данных компонентов. Далее полученная смесь нагревается до 50°C и осуществляется ее предварительное сшивание.

Второй этап заключается в получении непосредственно композиционного материала. Полученный «линолеумный цемент» охлаждается до комнатной температуры. После чего в него добавляются карбонат кальция и шлифовальная пыль как наполнители, и далее происходит тщательное перемешивание. Из полученной смеси формируются пластины и помещаются в горячий пресс. После прессования полученный композиционный материал обрезается по формату и отправляется на склад готовой продукции.

В соответствии с технологическими и эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к напольным покрытиям данной категории в нормативной документации, было принято решение исследовать такой показатель, как твердость.

Для исследования данной физико-механической характеристики применили математическое планирование в соответствии с рекомендованной методикой [3]. Эксперимент проводился в лабораторных условиях.

Непосредственно твердость измерялась в соответствии со стандартом DIN 53505 по методике Шора по шкале А на приборе Digi Test (рис. 1). Под твердостью, по Шору, понимается сопротивление материала вдавливанию наконечника определенной формы под действием силы давления пружины.



Рис. 1. Твердомер Digi Test

Задачей экспериментальных исследований является получение в явном виде математических зависимостей оценочных показателей от независимых входных переменных.

Варьируемыми факторами являлись:

- 1) температура прессования ($t = X_1$);
- 2) давление прессования ($p = X_2$);
- 3) продолжительность прессования ($T = X_3$).

Математическое планирование эксперимента применяется для повышения эффективности проведения исследований. Учитывая существующие рекомендации для получения регрессионных моделей, с помощью которых описывают характеристики процесса производства композитов, наиболее удобно использовать планы второго порядка типа B_k . В общем случае, когда число варьируемых факторов равно k , модель имеет вид

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где b_0 – свободный член; b_i – линейные коэффициенты регрессии, $i = 1, 2, \dots, k$; b_{ii} – квадратичные коэффициенты регрессии, $i = 1, 2, \dots, k$; b_{ij} – коэффициенты при парных взаимодействиях, $i \neq j$.

При планировании эксперимента был использован В-план второго порядка. В соответствии с методикой каждый фактор варьировался на трех уровнях, т. е. принимал в каждом опыте одно из трех значений: наименьшее X_{\min} , наибольшее X_{\max} , либо среднее $X_{\text{ср}} = (X_{\min} + X_{\max}) / 2$. Таким образом, при диапазоне варьирования 155–195°C температура в эксперименте устанавливалась на уровнях 155, 175, 195°C. Диапазон изменения давления составил 1,8–2,2 МПа, уровни варьирования соответственно 1,8; 2,0 и 2,2 МПа. Диапазон изменения продолжительности прессования 40–70 мин, уровни варьирования соответственно 40, 55 и 70 мин.

План эксперимента в нормированных значениях переменных факторов представлен в табл. 1. Результаты эксперимента можно видеть в табл. 2.

Таблица 1

План проведения эксперимента

№	X_0	$X_1 (t, \text{°C})$	$X_2 (p, \text{МПа})$	$X_3 (T, \text{мин})$	$X_1 X_2$	$X_2 X_3$	$X_1 X_3$	X_1^2	X_2^2	X_3^2
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
3	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
6	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1
7	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
9	+1	+1	0	0	0	0	0	+1	0	0
10	+1	-1	0	0	0	0	0	+1	0	0
11	+1	0	+1	0	0	0	0	0	+1	0
12	+1	0	-1	0	0	0	0	0	+1	0
13	+1	0	0	+1	0	0	0	0	0	+1
14	+1	0	0	-1	0	0	0	0	0	+1

Таблица 2

Результаты эксперимента

№ опыта	$t, \text{°C}$	$p, \text{МПа}$	$T, \text{мин}$	$E_{\text{ср}}, \text{у. е.}$
1	195	2,2	70	79,000
2	155	2,2	70	76,000
3	195	1,8	70	75,000
4	155	1,8	70	70,667
5	195	2,2	40	72,667
6	155	2,2	40	69,667
7	195	1,8	40	68,667
8	155	1,8	40	64,000
9	195	2	55	73,333
10	155	2	55	71,667
11	175	2,2	55	76,667
12	175	2,2	55	72,667
13	175	2	70	77,667
14	175	2	40	70,000

В таблице приведены величины среднего значения серии опытов. В результате расчетов получено уравнение регрессии второго порядка в кодированных обозначениях, учитывающих влияние каждого фактора на величину твердости. Оценка значимости коэффициентов данной регрессии осуществлялась по t -критерию Стьюдента. После отсеивания малозначимых коэффициентов уравнение приобрело следующий вид:

$$E = 74,53235 + 1,67X_1 + 2,3X_2 + 3,33X_3 - 2,01X_1^2. \quad (2)$$

В дальнейшем была проведена проверка уравнения регрессии с использованием критерия Фишера, которая подтвердила адекватность данной модели.

В натуральном выражении модель влияния температуры, давления и продолжительности прессования на твердость композиционного материала имеет вид

$$E = -129,0764 + 1,84255t + 11,5p + 0,22T - 0,005025t^2. \quad (3)$$

Анализ полученных результатов показывает, что основное влияние на твердость «натурального линолеума» оказывают температура и давление прессования.

На нижеследующих поверхностях отклика, построенных на основе модели, можно видеть, как меняется твердость напольного покрытия при фиксированном значении продолжительности прессования (рис. 2–4).

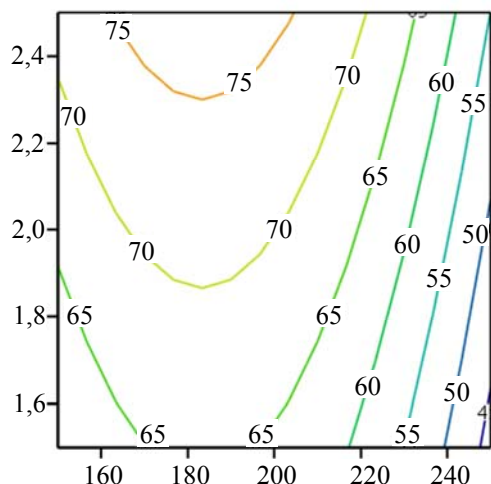


Рис. 2. Твердость натурального линолеума при продолжительности прессования $T = 40$ мин

Полученные поверхности отклика позволяют прогнозировать твердость композиционного материала. В соответствии с нормативной документацией твердость покрытий данной кате-

гории в зависимости от сферы применения должна быть 75–80 у. е. (по Шору, шкала А).

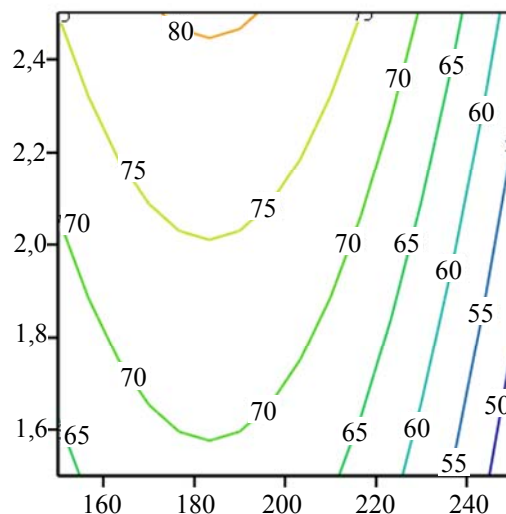


Рис. 3. Твердость натурального линолеума при продолжительности прессования $T = 55$ мин

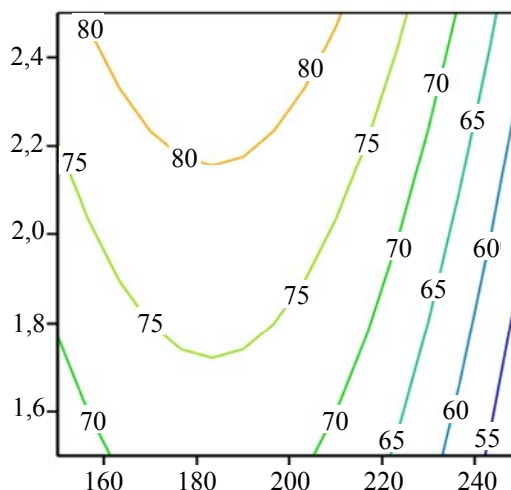


Рис. 4. Твердость натурального линолеума при продолжительности прессования $T = 70$ мин

Заключение. Полученная математическая модель позволяет оптимизировать режимы производственного процесса с целью снижения энерго- и трудозатрат. Для получения композиционного материала твердостью 75 у. е. можно рекомендовать следующие режимы: а) при продолжительности прессования 40 мин: температура 183°C, давление 2,35 МПа; б) при продолжительности прессования 55 мин: температура 184°C, давление 2,05 МПа; в) при продолжительности прессования 70 мин: температура 182°C, давление 1,75 МПа.

Однако для более полной оценки эксплуатационных характеристик необходимо провести исследование таких показателей, как водостойкость и истираемость.

Литература

1. Производство композиционных материалов с использованием вторичных отходов в качестве исходного сырья / А. А. Шевляков [и др.] // Вестник МГУЛ. 2011. № 5: Лесной вестник. С. 79–84.
2. Ширяев В. В., Шетько С. В. Реутилизационная технология производства натурального линолеума и ее экологический аспект // Труды БГТУ. 2014. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 111–114.
3. Пижурин А. А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2005. 305 с.

References

1. Shevlyakov A. A., Panferov V. I., Sevlyakov S. A., Markin A. P. Manufacturing of composite materials using secondary waste feedstock. *Vestnik MGUL* [Vestnik Moscow State Forestry University], 2011, no. 5, pp. 79–84 (In Russian).
2. Shiryaev V. V., Shet'ko S. V. Reutilising technology of composite material and its environmental aspect. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 111–114 (In Russian).
3. Pizhurin A. A. *Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke* [Basic research in the wood-working]. Moscow, GOU VPO MGUL Publ., 2005. 305 p.

Информация об авторах

Ширяев Виталий Васильевич – соискатель, младший научный сотрудник кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shiryaevvv@belstu.by

Шетько Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: shs@belstu.by

Information about the authors

Shiryaev Vitaliy Vasil'yevich – external doctorate student, Junior Researcher, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shiryaevvv@belstu.by

Shet'ko Sergey Vasil'yevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Head of the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shs@belstu.by

Поступила 15.02.2016