

<sup>1</sup>DOI: 10.32864/polymmattech-2023-9-4-65-71

УДК 678.86:685.363.23

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРЕССОВАНИЯ СПОРТИВНО-БЕГОВЫХ ПЛАСТИКОВЫХ ЛЫЖ

А. В. ПОЛХОВСКИЙ\*, С. А. ПРОХОРЧИК

Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Беларусь

*Цель работы — оптимизация параметров режима прессования при производстве спортивно-беговых пластиковых лыж.*

*Технологический процесс изготовления спортивно-беговых пластиковых лыж является многооперационным, где ключевой операцией выступает прессование. Прессуют лыжи на гидравлическом прессе в составных формах, регулируя нагрев и охлаждение. Поэтому важным является оптимизация основных параметров прессования, таких как время, температура и давление.*

*Прочность клеевого соединения образцов лыж, склеенных при различных значениях температуры и давления, испытывали согласно ГОСТ 33120. Для построения математической модели использовали В-план второго порядка, в качестве переменных факторов выбрали время 10–40 мин и температуру 100–120 °С, давление принимали равным 1 МПа. Прочность клеевого соединения принимали в качестве выходного параметра. Получена математическая модель влияния температуры и времени отверждения на прочность клеевого соединения. Применение статистической обработки позволило установить математические зависимости влияния температуры и времени отверждения оксидного препрега на прочность клеевого соединения спортивно-беговых пластиковых лыж. Установлено, что с увеличением температуры время полного отверждения связующего уменьшается.*

*Таким образом, оптимизирован режим прессования спортивно-беговых пластиковых лыж:*

- нагрев 10 мин при температуре 120 °С и давлении 1 МПа;*
- выдержка 10 мин при температуре 120 °С и давлении 1 МПа;*
- охлаждение 10 мин при давлении 1 МПа до температуры 20 °С.*

**Ключевые слова:** технологические параметры, температура, время, препрег, прессование, математическая модель, В-план.

## OPTIMIZATION OF THE TECHNOLOGICAL MODE FOR PRESSING SPORTS AND CROSS-COUNTRY PLASTIC SKI

A. V. POLKHOVSKY\*, S. A. PROKHORCHIK

Belarusian State Technological University, Sverdlov St., 13a, 220006, Minsk, Belarus

*The purpose of the work is to optimize the parameters of the pressing mode for sports cross-country plastic skis.*

*When developing the production process of sports and cross-country plastic skis, one of the main tasks was to optimize the technological mode of pressing. This kind of information is industry specific, so there were no open access data found. The production process of sports and cross-country plastic skis is multi-operational. The key operation is pressing which is carried out on a hydraulic press in composite moulds. The press matrices are heated and cooled with water. Therefore, it is highly relevant to define the main parameters such as time, temperature and pressure.*

\* Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: polhovskiy@belstu.by

*The adhesive strength of ski samples glued at different temperatures and pressures was tested in accordance with GOST 33120. The second-order B-plan was used to create a mathematical model. The time of 10–40 minutes and the temperature of 100–120 °C were chosen as variables. The pressure was 1 MPa. The strength of the adhesive joint was an output parameter. A mathematical model of the effect of temperature and curing time on the strength of the adhesive joint is obtained. The use of statistical processing made it possible to establish mathematical dependences of the temperature and curing time influence of the epoxy prepreg on the strength of the adhesive joint of sports and cross-country plastic skis. It was found that the time of complete curing of the binder decreases at increasing temperature.*

*Thus the pressing mode of sports and cross-country plastic skis has been optimized. The heating is 10 minutes at a temperature of 120 °C and a pressure of 1 MPa. The exposure time is 10 minutes at a temperature of 120 °C and a pressure of 1 MPa. The cooling is 10 minutes at a pressure of 1 MPa to a temperature of 20 °C.*

**Keywords:** technological parameters, temperature, time, prepreg, pressing, mathematical model, B-plan.

## Введение

Примерно с середины двадцатого века технология изготовления, а также конструкция лыж существенно эволюционировали. Произошел переход от лыжи из цельной древесины к многослойной конструкции. Современные спортивно-беговые пластиковые лыжи изготавливают по САР-технологии. Профилированная монолитная конструкция лыжи, при которой верхняя поверхность накрывает сердечник и соединяется сразу с кантом, имеет неразборную конструкцию, образованную функциональными слоями из различных материалов. Оболочку (верхний декоративный слой) изготавливают из тонкого листа полимерного материала, например, из широко распространенного применение АБС-пластика, на который наносят рисунки и надписи. Сердечник (средний клин) представляет собой внутреннюю часть лыжи, расположенную между нижним скользящим и верхним декоративным слоями. На данный момент применяют четыре основных разновидности сердечника: полностью из древесины, из древесины с воздушными каналами, из вспененных материалов и из материалов на основе сотового наполнителя. Скользящий слой представляет собой тонкую полосу (около 1–2 мм толщиной) полимерного материала, главным образом различных модификаций ПЭ высокой плотности. Для придания лыже жесткости используют армирующий слой, который представляет собой материал из стекло-, угле-, базальтоткани, пропитанной термореактивным связующим. Связь между всеми функциональными слоями и монолитность конструкции обеспечивают посредством термореактивного связующего на основе эпоксидных смол, слой которого располагается вокруг среднего клина, примыкает к верхнему декоративному слою со стороны боковых и верхней граней, а также к скользящему слою — со стороны нижней грани [1–3].

Современная лыжа представляет собой «сэндвич» из тонких слоев разнородных материалов. При изгибе жесткие армирующие слои воспринимают растягивающие и сжимающие нагрузки, обеспечивая лыже высокую жесткость и прочность [3].

Технологический процесс изготовления спортивно-беговых пластиковых лыж — многооперационный, включает в себя три основных этапа: изготовление среднего клина, прессование, завершающая обработка. Ключевой операцией является прессование, которое должно обеспечивать надежное соединения всех функциональных слоев между собой и, как следствие, получение конечного продукта надлежащего качества. При разработке технологического процесса изготовления спортивно-беговых пластиковых лыж одной из основных задач, поставленных производством, являлась оптимизация технологических параметров режима прессования лыж, которые включают время, температуру и давление.

**Цель работы** — оптимизация параметров режима прессования при производстве спортивно-беговых пластиковых лыж.

## Постановка задачи

При изготовлении спортивно-беговых пластиковых лыж для повышения технологичности, снижения материалоемкости, стоимости, повышения надежности и эксплуатационных характеристик применяют препрег, который служит альтернативой жидкому связующим и представляет собой материал, состоящий из двух компонентов: волокнистого материала (наполнителя) и связующего (матрицы). Связующее выполняет функции перераспределения нагрузки между армирующими слоями, фиксации формы и обеспечивает условие монолитности всей конструкции [4, 5].

Согласно данным [6], наиболее подходящим для применения в конструкции спортивно-беговых пластиковых лыж является связующее на основе эпоксидных смол, так как оно обладает необходимыми параметрами — температура отверждения составляет не выше 120 °C. Следует учитывать, что склеивание лыж проводят при повышенной температуре и давлении, но температура склеивания не должна превышать 120–130 °C, так как это может негативно сказаться на полимерных материалах и древесине, входящих в состав лыж. Помимо этого, клеи на основе эпоксидных смол, среди конструк-

ционных клеев, являются наиболее широко применяемыми. Эпоксидные клеи [7] обладают высокой адгезией к полярным поверхностям; высокими физико-механическими характеристиками в отвержденном состоянии; не выделяют летучих продуктов и незначительно усаживаются при отверждении; стойки к атмосферным воздействиям, маслам и растворителям. Обладая большим числом модификаций, эпоксидные клеи удовлетворяют широкому перечню требований. Их соединения характеризуются малой ползучестью. Следует отметить, что они относительно безопасны и не токсичны.

Лыжи при эксплуатации подвергаются воздействию значительных динамических нагрузок, в связи с чем матрицы армируют волокнами. Среди различных видов волокон подобные нагрузки способны выдержать стеклянные, углеродные и парарамидные волокна, как обладающие наибольшими прочностными показателями (прочность составляет от 500 МПа до 5000 МПа) [4]. В качестве объекта исследования выбрали препрег, содержащий стеклянные волокна, что обусловлено их невысокой стоимостью и высокими механическими характеристиками. Выделяют два вида нитей стеклянных волокон: *непрерывные* и *штапельные*. Для склеивающего слоя использовали препрег, содержащий штапельные волокна, стеклянные волокна в нем расположены хаотично, содержание связующего достигает 70%.

Согласно данным [8], отверждение связующего является определяющим этапом для получения композитов, армированных волокном. Отверждение контролируют тремя основными параметрами: температурой, временем отверждения и давлением. Под воздействием тепла и давления расплав принимает необходимую форму и отверждается. Для прессования применяют пресс-форму. Для ускорения отверждения термореактивных смол может применяться нагрев при относительно высоких температурах, которые, тем не менее, не должны нарушать структуру древесины и других компонентов изделия. Метод нагрева/охлаждения формообразующей оснастки циркулирующей горячей/холодной водой при повышенном давлении является наиболее простым для технической реализации способом, особенно когда требуется последующее охлаждение. Однако для этого метода характерно неравномерное распределение температуры по направлению перемещения нагревающей/охлаждающей жидкости. Это в большей мере проявляется при получении длинномерных изделий, к которым относятся лыжи.

В производственных условиях для достижения необходимой производительности, продолжительность цикла прессования не должна превышать 30 мин. Цикл прессования лыж состоит из трех этапов: нагрев, выдержка и охлаждение. Ранее проведенные исследования динамики нагрева и охлаждения прессовой оснастки показали, что продолжительность периодов как нагрева, так и охлаждения составляла не более 10 мин [9]. Из этого

следует, что для достижения необходимой прочности клеевого соединения требуется промежуток времени не более 10 мин. Схема прессования приведена на рис. 1.

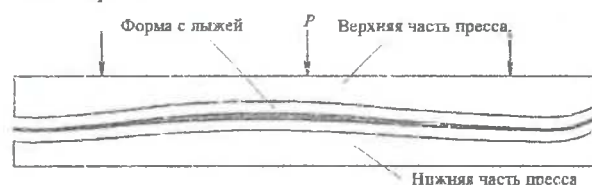


Рисунок 1 — Схема прессования лыж, где  $P$  — давление  
Fig. 1 — Ski pressing scheme.  $P$  is pressure

Исходя из вышеперечисленного сформулированы следующие основные задачи исследования:

- определить переменные и постоянные факторы, влияющие на прочность клеевого соединения;
- изготовить испытательные образцы;
- исследовать влияние переменных факторов на прочность клеевого соединения и предложить математическую модель влияния температуры и времени отверждения на прочность соединения;
- разработать режим прессования при изготовлении спортивно-беговых пластиковых лыж с использованием препрега на основе эпоксидного связующего.

#### Материалы и методы испытаний

Для оптимизации параметров технологического режима прессования спортивно-беговых пластиковых лыж, обеспечивающих необходимую продолжительность производственного цикла и сохранение надлежащего качества конечного изделия, определили переменные и постоянные факторы. Они приведены в табл. 1.

Таблица 1 — Постоянные и переменные факторы прессования  
Table 1 — Constant and variable pressing factors

Наименование факторов	Значения
Постоянные факторы	
Материал заготовки	Бук
Толщина заготовки, мм	5
Температура окружающей среды, °С	20
Давление прессования, МПа	1,0
Переменные факторы	
Время прессования, мин	10–40
Температура прессования, °С	100–120

Проведены поисковые исследования, на основании которых были выбраны время и температура для прессования. 10–40 мин и 100–120 °С соответственно. Давление прессования приняли равным 1 МПа.

Для проведения эксперимента подготовили девять партий по три образца, склеенных при различных значениях температуры и времени выдержки. В табл. 2 приведены режимы склеивания образцов.

Таблица 2 — Режимы склеивания образцов  
Table 2 — Pressing modes of samples

Номер образца	Температура, °С	Время, мин	Давление, МПа
1	100	10	1,0
2			
3			
4			
5	100	25	
6			
7			
8	100	40	
9			
10			
11	110	10	
12			
13	110	25	
14			
15			
16			
17	110	40	
18			
19	120	10	
20			
21			
22	120	25	
23			
24			
25			
26	120	40	
27			

Образцы (рис. 2) изготавливали следующим образом. Из заготовок древесины бука влажностью 12% выпиливали пластины толщиной 6 мм. Полученные пластины (1) строгали до толщины 5 мм. Волокна древесины в образцах располагались по направлению растяжения. Расположение годичных колец составляло 30–90° к плоскости склеивания. Для создания склеивающего слоя (2) вырезали листы препрега HexPly@ Epoxy Matrix M78.1 («Hexcel», Австрия) длиной 150 мм и шириной 20 мм.

Образцы получали склеиванием двух пластин. Размеры пластин: длина 150 мм, ширина 20 мм, толщина 5 мм. Между пластинами располагали лист препрега, который под действием температуры и давления за определенный промежуток времени образовывал клеевое соединение. Полученные образцы выдерживали в течение 24 ч при нормальных услови-

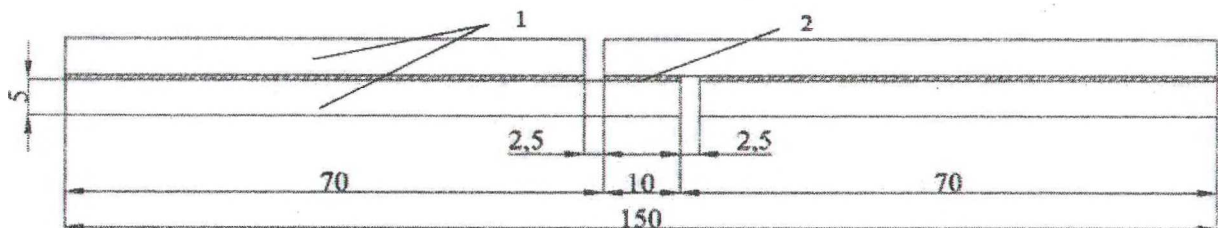


Рисунок 2 — Схема образца  
Fig. 2 — Sample scheme

ях. Затем на образцах делали поперечные пропилы шириной  $2,5 \pm 0,5$  мм на расстоянии 10 мм. На рис. 2 приведена схема образца.

Испытание клеевого соединения, образованного препрегом, на прочность провели согласно ГОСТ 33120 методом определения предела прочности клеевого соединения при растяжении вдоль волокон древесины (рис. 3) [10].

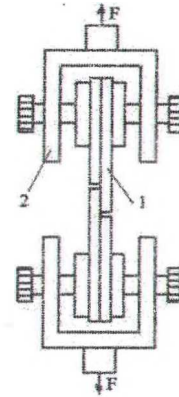


Рисунок 3 — Схема испытания  
Fig. 3 — Test scheme

Склеенные образцы 1, показанные на рис. 3, испытывали на разрывной машине «Criterion C43.504» («MTS», США) с использованием специального приспособления 2 (разрывного устройства). Концы образцов зажимали в разрывном устройстве. Затем образец растягивали нагрузке со скоростью 50 мм/мин до разрушения. Прочность клеевого соединения определяли по формуле:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где  $\sigma$ , МПа — прочность клеевого соединения;  $F$ , Н — разрушающая нагрузка;  $S$ , мм<sup>2</sup> — площадь скалывания.

Прочность клеевого соединения являлась выходным параметром при построении математической модели.

#### Математическое моделирование

Экспериментальные результаты при воздействии различных факторов технологического процесса на прочность клеевого соединения позволили получить в явном виде математические зависимости оценочных показателей от независимых

входных переменных. Использован В-план второго порядка [11–14]. Для оптимизации технологических процессов широко используют композиционные планы второго порядка, с достаточной точностью описывающие поведение объекта в окрестности экстремальной точки. Также данную методику широко используют для оценки технологических особенностей деревообработки. Факторы планов второго порядка варьируются на нескольких уровнях (минимум трех), что соответствует условиям проведенного эксперимента.

В качестве переменных факторов (табл. 3) выбрали время прессования ( $X_1$ ) и температуру прессования ( $X_2$ ), так как эти факторы оказывают наибольшее влияние на прочность клеевого соединения, образованного в результате прессования. В качестве выходного параметра приняли прочность клеевого соединения ( $Y$ ). В соответствии с методикой [10] каждый фактор варьировался на трех уровнях, то есть принимал в каждом опыте одно из трех значений:  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  или  $X_{\text{ср}} = (X_{\min} + X_{\max})/2$ . Таким образом, предельные значения факторов (табл. 3) согласно эксперименту, составили  $10 \leq X_1 \leq 40$  мин,  $100 \leq X_2 \leq 120$  °С.

Таблица 3 — Переменные факторы  
Table 3 — Variable factors

Наименование факторы	Обозначение	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
			$X_{\min}$	$X_{\text{ср}}$	$X_{\max}$
Время прессования, мин	$X_1$	15	10	25	40
Температура прессования, °С	$X_2$	10	100	110	120

План проведения эксперимента представлен в табл. 4.

Таблица 4 — План проведения эксперимента  
Table 4 — Plan for the experiment

Номер опыта	Факторы в условных единицах					
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	0	+1	0	0	+1
6	+1	0	-1	0	0	+1
7	+1	+1	0	0	+1	0
8	+1	-1	0	0	+1	0
9	+1	0	0	0	0	0

Результаты проведения опытов представлены в табл. 5.

В результате расчета коэффициентов получено уравнение регрессии в кодированных обозначениях,

учитывающих влияние каждого фактора на прочность клеевого соединения:

$$y(x_1, x_2) = 7,86 + 1,17 \cdot x_1 + 1,88 \cdot x_2 + 2,31 \cdot x_1^2 - 0,08 x_2^2 - 1,70 \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Таблица 5 — Результаты испытаний  
Table 5 — Test results

Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$Y_{\text{ср}}$ , МПа
1	40	120	11,18
2	10	120	11,30
3	40	100	11,83
4	10	100	5,17
5	40	110	10,43
6	10	110	5,70
7	25	120	11,25
8	25	100	9,67
9	25	110	7,13

Проверка однородности дисперсии с использованием G-критерий Кохрена ( $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$ , т. е.  $0,2776 < 0,4775$ ), позволила сделать вывод об однородности дисперсий, влияние систематических погрешностей стабильно.

Проверка рассчитанных коэффициентов регрессии при помощи t-критерия Стьюдента, в сравнении с табличным значением, показала что условие  $t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$ , т. е.  $0,25 < 2,1$ , выполняется для одного из коэффициентов регрессии ( $b_{22} = 0,08$ ). Следовательно, данный коэффициент должен отсутствовать в уравнении регрессии.

После отсеивания незначимых коэффициентов, уравнение регрессии приобрело вид:

$$y = 7,86 + 1,17 \cdot x_1 + 1,88 \cdot x_2 + 2,31 \cdot x_1^2 - 1,70 \cdot x_1 \cdot x_2.$$

Проведенная проверка полученной модели по критерию Фишера условие  $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ , т. е.  $2,63 < 3,55$  выполняется). Таким образом достоверность полученных уравнений не отвергается, что позволило сделать вывод о ее адекватности, уравнение регрессии составлено верно.

По полученной модели с использование математического пакета «Статистика» построена поверхность отклика (рис. 4), которая отображает зависимость прочности соединения от температуры и времени прессования. При повышении температуры прессования время на полное отверждение связующего в препреге уменьшается.

Ранее проведенные исследования динамики нагрева и охлаждения длинномерных форм для прессования лыж показали, что для достижения необходимой температуры требуется не менее 10 мин. Охлаждению также требует не менее 10 мин.

В результате анализа поверхности отклика установлено, что при повышении температуры прессования время на полное отверждение связующего

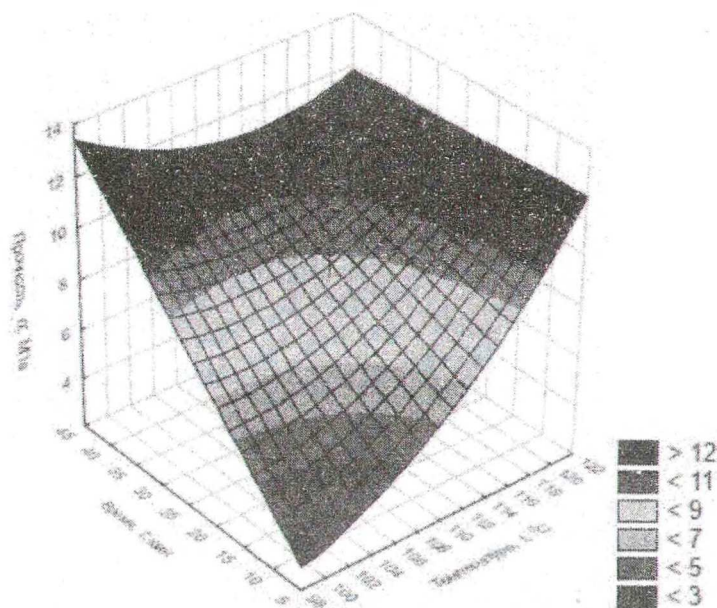


Рисунок 4 — Поверхность отклика  
Fig. 4 — Response surface

в препреге уменьшается, оптимальным режимом прессования является: температура плит пресса 120 °С, продолжительность 10 мин.

Таким образом, на основании вышеперечисленных факторов и исследований можно предложить следующий режим прессования спортивно-беговых пластиковых лыж:

- нагрев до температуры 120 °С при давлении 1 МПа в течение 10 мин;
- выдержка (термостатирование) при температуре 120 °С и давлении 1 МПа в течение 10 мин;
- охлаждение до температуры 20 °С при давлении 1 МПа в течение 10 мин.

#### Выводы

Статистическая обработка результатов исследования позволила установить математические зависимости влияния температуры и времени отверждения на прочность клеевого соединения, образованного в результате отверждения препрега на основе эпоксидного связующего склеивающего слоя спортивно-беговых пластиковых лыж. На основании полученной математической модели оптимизирован режим прессования:

- нагрев до температуры 120 °С при давлении 1 МПа в течение 10 мин;
- выдержка (термостатирование) при температуре 120 °С и давлении 1 МПа в течение 10 мин;
- охлаждение до температуры 20 °С при давлении 1 МПа в течение 10 мин.

#### Обозначения

АБС — акрилонитрилбутадиенстирол; ПЭ — полиэтилен;  $b_{22}$  — коэффициент регрессии;  $F. H$  — разрушающая нагрузка;  $F_{расч}$  — критерий Фишера расчетный;  $F_{табл}$  — критерий Фишера табличный;  $S$ ,

$мм^2$  — площадь скалывания;  $G_{расч}$  — критерий Кохрена расчетный;  $G_{табл}$  — критерий Кохрена табличный;  $t_{расч}$  — критерий Стьюдента расчетный;  $t_{табл}$  — критерий Стьюдента табличный;  $\sigma$ , МПа — прочность клеевого соединения.

#### Литература

1. Полховский А. В., Прохорчик С. А., Шетько С. В. Современные конструкции и материалы для лыж // Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1 (216). С. 163–168.
2. Адериха В. Н., Песецкий С. С. Слой скольжения беговых пластиковых лыж: специфика условий трения, текущее состояние и перспективы исследований и разработок (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2019. Т. 5, № 3. С. 6–23.
3. Шилько С. В., Рябченко Т. В., Петроковец Е. М., Черноус Д. А., Целуева С. Н. Деформационный анализ и оценка качества спортивных лыж из слоистых полимерных композитов // Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник / редкол.: Ю. В. Васильевич (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2020. Вып. 35. С. 12–19.
4. Перепелкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. СПб.: Научные основы и технологии. 2009. 380 с.
5. ГОСТ 32794–2014. Композиты полимерные. Термины и определения. Введ. 2015-09-01. М.: Стандартинформ. 2015. 98 с.
6. Поцус А. В. Клеи, адгезия, технология склеивания. СПб.: Профессия. 2007. 376 с.
7. Комаров Г. В. Соединение деталей из полимерных материалов: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2006. 592 с.
8. Иржак В. И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей. М.: РАН, 2022. 288 с.
9. Полховский А. В., Наркевич А. Л., Шетько С. В., Прохорчик С. А. Изучение кинетики нагрева формы при склеивании длинномерных изделий // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск, 31 января–12 февраля 2022 г. Минск: БГТУ, 2022. С. 231–233.
10. ГОСТ 33120-2014. Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ. 2015. 17 с.
11. Блинова Е. И. Планирование и организация эксперимента. Минск: БГТУ, 2010. 129 с.

12. Андреев В. Н. Математическое планирование экспериментов. Л. : ЛТА, 1982. 40 с.
13. Беликов С. А., Карпушенко И. С. Планирование эксперимента и статистическая обработка результатов измерений : методические указания к лабораторным работам. Витебск : ВГТУ, 2011. 45 с.
14. Пижурин А. А., Розенблит М. С. Исследования процессов деревообработки. М. : Лесная промышленность, 1984. 232 с.

## References

1. Polkhovskiy A. V., Prokhorchik S. A., Shet'ko S. V. Sovremennye konstruktii i materialy dlya lyzh [Modern designs and materials for skis]. *Trudy BGTU. Seriya 1. Lesnoe khozyaystvo. prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyemykh resursov* [Proceedings of BSTU. Issue 1. Forestry. Environmental management. Reprocessing of renewable resources], 2019, no. 1 (216), pp. 163–168.
2. Aderikha V. N., Pesetskiy S. S. Sloy skol'zheniya begovykh plastikovykh lyzh: spetsifika usloviy treniya, tekushchee sostoyaniye i perspektivy issledovaniy i razrabotok (obzor) [Sliding layer of cross-country plastic skis: specifics of friction conditions, current status and prospects for research and development (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2019, vol. 5, no. 3, pp. 6–23.
3. Shil'ko S. V., Ryabchenko T. V., Petrokovets E. M., Chernous D. A., Tselueva S. N. Deformatsionnyy analiz i otsenka kachestva sportivnykh lyzh iz sloistykh polimernykh kompozitov [Deformation analysis and quality assessment of sports skis made of layered polymer composites]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskyy sbornik* [Theoretical and Applied Mechanics: an international scientific and technical collection]. Minsk, 2020, is. 35, pp. 12–19.
4. Perepelkin K. E. *Armiruyushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity* [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites]. Saint-Petersburg : Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2009. 380 p.
5. GOST 32794–2014. Kompozity polimernye. Terminy i opredeleniya [State Standard 32794–2014. Polymer composites. Terms and Definitions]. Moscow : Standartinform Publ., 2015. 98 p.
6. Potsius A. V. *Klei, adgeziya, tekhnologiya sklevaniya* [Adhesives, adhesion, bonding technology]. Saint-Petersburg : Professiya Publ., 2007. 376 p.
7. Komarov G. V. *Soedinenie detaley iz polimernykh materialov* [Connection of parts made of polymeric materials]. Saint-Petersburg : Professiya Publ., 2006. 592 p.
8. Irzhak V. I. *Epoksidnye polimery i kompozity s epoksidnoy matritsey* [Epoxy Resins and Epoxy Matrix Composites]. Moscow : RAN Publ., 2022. 288 p.
9. Polkhovskiy A. V., Narkevich A. L., Shet'ko S. V., Prokhorchik S. A. Izuchenie kinetiki nagreva formy pri skleivani dlinnomernykh izdeliy [Studying the kinetics of mold heating when gluing long products]. *Materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov «Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizayn»* [Proceedings of the 86th Scientific and Technical Conference "Forest Engineering, Materials Science and Design"]. Minsk : BGTU Publ., 2022, pp. 231–233.
10. GOST 33120–2014. Konstruktsii derevyannye kleenye. Metody opredeleniya prochnosti kleevykh soedineniy [State Standard 33120–2014. Constructions wooden glued. Methods for determining the strength of adhesive joints]. Moscow : Standartinform Publ., 2015. 17 p.
11. Blinova E. I. *Planirovaniye i organizatsiya eksperimenta* [Planning and organization of the experiment]. Minsk : BGTU Publ., 2010. 129 p.
12. Andreev V. N. *Matematicheskoe planirovaniye eksperimentov* [Mathematical design of experiments]. Leningrad : LTA Publ., 1982. 40 p.
13. Belikov S. A., Karpushenko I. S. *Planirovaniye eksperimenta i statisticheskaya obrabotka rezul'tatov izmereniy : metodicheskie ukazaniya k laboratornym rabotam* [Experiment planning and statistical processing of measurement results. Guidelines for laboratory work]. Vitebsk : VGTU Publ., 2011. 45 p.
14. Pizhurin A. A., Rozenblit M. S. *Issledovaniya protsessov derevoobrabotki* [Research of woodworking processes]. Moscow : Lesnaya promyshlennost' Publ., 1984. 232 p.

Поступила в редакцию 04.06.2023

© А. В. Полховский, С. А. Прохорчик, 2023