

УДК 625.731

**Е. В. Ручкина, С. В. Шетько**

Белорусский государственный технологический университет

**КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ С БУМАЖНЫМ СОТОВЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ**

Статья посвящена исследованиям эксплуатационных показателей трехслойных сотовых панелей с бумажным сотовым наполнителем. Установлены и описаны два основных механизма разрушения панели: потеря устойчивости бумажного сотового наполнителя (внутреннего слоя панели) в краевых зонах образца от нормальных и сдвиговых деформаций и межслойный сдвиг между обшивкой и наполнителем. Установлено, что показатели деформативности бумажного сотового наполнителя, а именно критические деформации сжатия и сдвига наполнителя, являются определяющими критериями оценки работоспособности трехслойных панелей в целом, так как обуславливают характер их разрушения и могут быть использованы в конструкторских расчетах при проектировании мебели.

В статье предлагается в качестве критериев для оценки эффективности использования менее прочных трехслойных панелей применять относительные показатели прочности и жесткости панелей. Это позволит сопоставлять эксплуатационные показатели различных древесных материалов и производить их сравнительную оценку.

**Ключевые слова:** сотовая панель, изгиб, критерии оценки, прочность, жесткость, бумажный наполнитель.

**Ye. V. Ruchkina, S. V. Shet'ko**

Belarusian State Technological University

**CRITERIA FOR EVALUATING OPERATING INDICATORS OF THREE-LAYER PANELS WITH PAPER HONEYCOMB CORE**

The article is devoted to studies of the operational performance of three-layer panels with paper honeycomb core. Two main mechanisms of panel destruction were established: the loss of stability of the paper honeycomb core (the inner layer of the panel) in the marginal zones of the sample from normal and shear deformations and the interlayer shear between the skin and the core. It has been established that the deformability indicators of a paper honeycomb core, namely: critical compression and shear strains of a core, are the determining criteria for evaluating the performance of three-layer panels as a whole, since they determine the nature of their destruction, and can be used in design calculations when designing furniture.

The article proposes to use relative indicators of panel strength and stiffness as criteria for evaluating the effectiveness of using less durable three-layer panels. This will allow us to compare the performance of various wood materials and make a comparative assessment.

**Key words:** honeycomb panel, bend, criteria for evaluation, strength, stiffness, paper core.

**Введение.** В современном мире стоимость мебели определяют не только материалы, используемые для ее производства, но и дизайн, и соответствие модным тенденциям. Хитом мебельного рынка являются массивные изделия с использованием в конструкциях столов, стеллажей, тумб и шкафов утолщенных горизонтальных и вертикальных деталей. Применение традиционных древесных материалов для получения массивных деталей (толщиной более 30 мм) сделает мебель слишком тяжелой и громоздкой. Следовать моде в мебельной индустрии сегодня возможно при использовании облегченных мебельных плит, наружные слои которых представляют собой древесностружечную или древесноволокнистую плиту тол-

щиной от 3 до 8 мм, а внутренний слой – бумажный сотовый наполнитель.

Бумажный сотовый наполнитель известен отечественным производителям дверей с давних времен. Широкое применение наполнителя было связано со строительством «хрущевок». Большие объемы возведения жилья требовали новых технологий, удешевляющих и ускоряющих строительство.

В мебельной промышленности трехслойные панели с бумажным сотовым наполнителем пока не применяются, потому что сложилась многолетняя практика использования древесностружечных плит и древесноволокнистых плит средней плотности. Также на рынке мебели около 40% продукции приходится на импорт,

т. е. наблюдается перспектива развития импортозамещающих производств.

Отечественные производители не проявляют интереса к панелям с бумажным наполнителем по следующим причинам. Во-первых, полагают, что трехслойные панели обладают низкими показателями прочности. Считают, что если внутри сотовой плиты бумага, значит, она легко сминается. Во-вторых, придерживаются мнения о сложной организации производственного процесса изготовления сотовой панели и, как следствие, высокой себестоимости готового материала [1–3].

**Основная часть.** Для исследования была выбрана тонкая древесноволокнистая плита ХДФ толщиной 3 мм. Она использовалась в качестве внешних обшивок панели, для внутреннего слоя применяли бумажный сотовый наполнитель с размерами ячейки 15, 25, 35 мм производства ОАО «Светлогорский ЦКК». Склеивание сотовых панелей осуществляли по технологическому режиму «Склеивание облегченных щитов с бумажным сотовым наполнителем бескаркасной конструкции в однопролетных, многопролетных прессах поливинилацетатным или однокомпонентным полиуретановым клеем», разработанному ранее авторами статьи [4].

Исследование эксплуатационных характеристик трехслойных панелей осуществляли на изгиб по трехточечной схеме (рис. 1), так как изгиб является одной из основных форм нагружения горизонтальных деталей конструкционного назначения в мебели.

Результаты исследований представлены в таблице.

Установлены два основных механизма разрушения панели (рис. 2).



Рис. 1. Схема испытаний на изгиб

**Эксплуатационные показатели сотовых панелей**

Размер ячейки, мм	Высота заполнителя $h_c$ , мм	Нормальные напряжения в обшивках $\sigma$ , МПа	Относительная прочность $\sigma_n$ , МПа	Относительная жесткость панелей $D_x$ , Па·м <sup>4</sup>	Плотность сотовой панели $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	2	3	5	6	7
Обшивки из ХДФ, $\delta = 3$ мм, плотность 880 кг/м <sup>3</sup>					
15	15	7,5	23,4	730	253
	25	4,3	18,7	1745	194
	35	2,8	15,6	3200	161
25	15	6,3	20,3	705	245
	25	3,4	16,2	1705	171
	35	2,0	11,8	3120	135
35	15	5,8	19,3	690	234
	25	3,1	14,8	1675	167
	35	1,9	11,9	3070	130

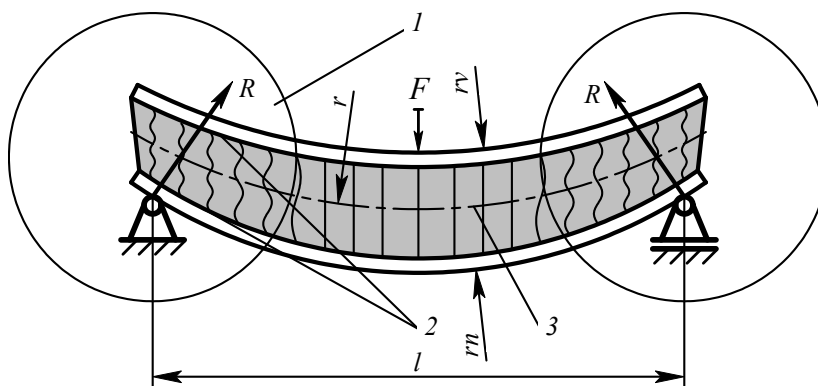


Рис. 2. Плоский изгиб образца по трехточечной схеме нагружения.

Схема деформирования:

- 1 – потеря устойчивости наполнителя при сжатии и сдвиге;
- 2 – сдвиг между наполнителем и обшивкой;
- 3 – упругая линия образца

А именно потеря устойчивости заполнителя в краевых зонах образца 1 от нормальных и сдвиговых деформаций и межслойный сдвиг между обшивкой и заполнителем 2. Межслойный сдвиг с расслоением наблюдается в случае недостатка клеевого материала на границе между обшивкой и заполнителем. Во всех случаях испытаний на изгиб с учетом оптимального расхода клея сдвига между компонентами не наблюдается, однако при уменьшении расхода на 30% и ниже разрушение за счет расслоения преобладает. Как установлено экспериментально, в случае изгиба по трехточечной схеме нагружения наибольшие деформации сжатия  $\delta$  наблюдаются в зоне опор, т. е. в точках приложения реакций связи  $R$ . В случае достижения деформациями сжатия критической величины [1] происходит потеря устойчивости заполнителя, а следовательно, и разрушение панели.

Критерием оценки устойчивости заполнителя на сжатие является уравнение

$$\varepsilon = \frac{\delta}{h_c} \leq [\varepsilon_{кр}], \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – деформация сжатия;  $\delta$  – изменение высоты сотового заполнителя при сжатии;  $h_c$  – толщина сотового заполнителя;  $\varepsilon_{кр}$  – допустимая величина деформации сжатия до потери устойчивости боковых стенок заполнителя.

Выявлено, что величина поперечных деформаций сжатия не зависит от относительных размеров трехслойных панелей, а является функцией жесткости обшивок и упругости бумажного заполнителя на сжатие. Таким образом, использование компонентов с большими показателями жесткости приводит к снижению поперечных деформаций сжатия (рис. 3). При этом в качестве критериев жесткости можно использовать доступные в нормативной литературе физико-механические характеристики компонентов, такие как модуль упругости при изгибе  $E_o$  для обшивок и удельный модуль уп-

ругости при сжатии  $E_\delta$  для заполнителя [5], рассчитываемый по формуле

$$E_\delta = k E_c, \quad (2)$$

где  $k$  – степень трансформации сотового заполнителя:  $k = \frac{A_c}{A_n}$ ;  $E_c$  – модуль упругости бумаги на растяжение;  $A_c$  – площадь сотового пакета в сжатом виде;  $A_n$  – площадь панели в плане.

Для традиционных древесных материалов в качестве физико-механических характеристик принято использовать предел прочности и модуль упругости при изгибе. В нашем случае с учетом сложной структуры трехслойной панели по высоте и низкой прочности заполнителя разрушение происходит не вследствие изгиба, поэтому возникает вопрос о сопоставлении эксплуатационных показателей различных древесных материалов [5, 6].

Существуют методики расчетного и экспериментального определения нормальных напряжений растяжения-сжатия в наружных обшивках, при условии неоднородных свойств по высоте панели (формула (3)). В качестве исходных данных используются геометрические размеры элементов в поперечном сечении и модуль упругости компонентов в направлении оси панели.

Для трехслойных панелей нормальные напряжения в слоях обшивки при максимальной изгибающей нагрузке можно использовать для сравнения с напряжениями изгиба в однородных древесных материалах [7].

Наибольшие нормальные напряжения в произвольном слое определяют по формуле

$$\sigma_i = \frac{M_x}{D_x} y_{i\max} E_{zi}, \quad (3)$$

где  $M_x$  – изгибающий момент в сечении;  $D_x$  – осевая жесткость панели при изгибе;  $y_{i\max}$  – наибольшая по модулю ордината точек слоя;  $E_{zi}$  – модуль Юнга в направлении оси балки  $z$ .

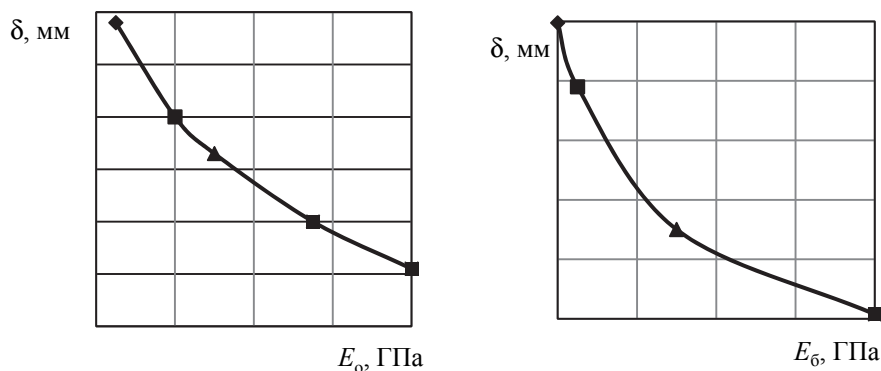


Рис. 3. Зависимость деформации сжатия от упругих характеристик обшивок панели и бумажного заполнителя

Для оценки эффективности использования менее прочных трехслойных панелей можно использовать относительные показатели прочности (формула (2)) панелей.

Относительная прочность панели на изгиб  $\sigma$ , Па:

$$\sigma = \frac{\rho_3}{\rho} \sigma_n, \quad (4)$$

где  $\rho_3$  – плотность обшивки облепченной панели, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность трехслойной панели, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_n$  – нормальные напряжения в обшивках панели, Па.

В большинстве литературных источников для описания эксплуатационных характеристик традиционных древесных материалов принято нормировать предельную величину прогиба, при этом размеры образцов, характер и величина нагрузки могут значительно отличаться, что затрудняет производить сравнительную оценку показателей. Однако через величину прогиба и геометрические параметры образцов характеристики материалов можно свести к общему показателю. Взаимосвязь между данными величинами можно определить с помощью уравнения нейтральной оси балки классической механики деформируемого твердого тела. Для большинства схем нагружения существуют конечные уравнения [4, 7, 8, 9]. Так, для панелей, работающих на изгиб от сосредоточенной силы, связь определяется выражением  $f$ :

$$f = \frac{Fl^3}{48D_x}; \quad (5)$$

для нагружения распределенной нагрузкой

$$f = \frac{5ql^4}{384D_x}, \quad (6)$$

где  $q$  – линейно-распределенная по длине панели нагрузка ( $q = pb$ ,  $p$  – давление на поверхность панели).

Величина  $D_x$  называется жесткостью панелей при изгибе и учитывает упругие и геометрические параметры изделия. Для изотропных по объему материалов жесткость определяется произведением  $E_z I_x$ , однако для слоистых материалов процедура расчета данного показателя сложна и осуществляется следующим образом (формулы (7)–(12)).

Деформированное состояние элементов, работающих на изгиб, согласно классической теории механики деформированного твердого тела, описывается дифференциальным уравнением упругой линии изогнутой балки [10, 11]:

$$y'' = \frac{M_x}{E_z I_x}, \quad (7)$$

где  $y''$  – вторая производная от ординаты нейтральной оси (упругой линии) балки;  $M_x$  – изгибающий момент в сечении;  $E_z$  – модуль Юнга в направлении оси балки (при растяжении);  $I_x$  – момент инерции сечения.

Для балки, неоднородной по высоте сечения, жесткость при изгибе рассчитывают по формуле

$$D_x = \int_A E_z y^2 dA. \quad (8)$$

В случае различия упругих характеристик, а также геометрии слоев, в том числе и толщине, уравнение (8) имеет вид

$$D_x = \sum_{i=1}^n E_{zi} y^2 dA_i. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9) для расчета жесткости балки при изгибе ордината  $y$  отсчитывается от центральной оси сечения  $x$ , которая для трехслойных панелей с одинаковыми геометрическими параметрами обшивок находится в центре прямоугольного сечения. Для несимметричных структур положение оси  $x$  неизвестно, поэтому вводят произвольную ось  $x_0$ , параллельную оси  $x$  (рис. 4).

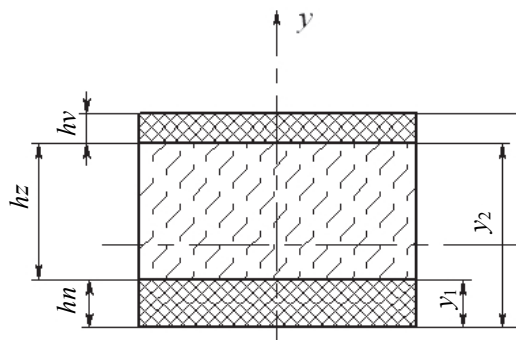


Рис. 4. Схема расположения элементов трехслойной панели

Положение нейтральной оси балки можно определить исходя из предположения, что при относительной деформации  $\epsilon = y/\rho$ , где  $\rho$  – радиус кривизны нейтральной оси, продольная сила равна нулю:

$$N = \int_A \sigma dA = \frac{1}{\rho} \int_A E_z (\bar{y} - y_0) dA = 0, \quad (10)$$

откуда следует формула для расчета положения нейтрального слоя:

$$y_0 = \frac{\int_A E_z \bar{y} dA}{\int_A E_z dA}. \quad (11)$$

Подставив уравнение (10) в (8), получим

$$D_x = \int_A E_z \bar{y}^2 dA - \frac{\left( \int_A E_z \bar{y} dA \right)^2}{\int_A E_z dA}, \quad (12)$$

Показатель жесткости панелей достаточно легко пересчитывается по габаритам панелей и упругим характеристикам материалов обшивки (при условии равной толщины) из-за их линейной взаимосвязи. В общем случае для пересчета можно использовать следующее отношение:

$$D_x = D_x^{(e)} \frac{b}{b^{(e)}} \frac{E}{E^{(e)}}, \quad (13)$$

где  $D_x^{(e)}$ ,  $b^{(e)}$ ,  $E^{(e)}$  – эталонные значения, полученные экспериментально для панелей с известными параметрами свойств и размеров (для панелей шириной  $b = 400$  мм с различной структурой параметры жесткости можно взять из вышеприведенной таблицы);  $D_x$ ,  $b$ ,  $E$  – показатели оцениваемой панели.

В случае, если требуется пересчет на длительную жесткость (определение прогиба через продолжительное время), в качестве  $E^{(e)}$  используют мгновенный модуль упругости материала обшивки, а в качестве  $E$  – длительный. За эталонные можно принять значения жесткости из таблицы, представленной выше.

Как видно из результатов эксперимента, относительная прочность трехслойных панелей с бумажным сотовым наполнителем с увеличением высоты наполнителя существенно уменьшается, однако при этом в большей степени происходит увеличение их жесткости (рис. 5).

Относительный предел прочности при изгибе панели с наполнителем высотой 15 мм (размер ячейки 15 мм) составил 23,4 МПа, при высоте 35 мм – 15,6 МПа. Такой же характер зависимости мы наблюдаем и в отношении бумажного сотового наполнителя с размерами ячеек 25 и

35 мм. Также существенно влияет на прочность сотовых панелей размер ячейки наполнителя. При увеличении размера ячейки прочность материала уменьшается в 0,7–0,8 раза.

С другой стороны, введение сотового наполнителя способствует значительному увеличению жесткости панелей.

Так, например, при размере ячейки 15 мм сотового наполнителя высотой 15 мм относительная жесткость панелей составила 730 Па·м<sup>4</sup>, при высоте 25 мм и 35 мм – в 2,4 и 4,4 раза соответственно больше. При увеличении размера ячейки наполнителя жесткость трехслойных панелей уменьшается незначительно.

Из сравнения полученных значений относительной прочности сотовых панелей  $\sigma_p$  с прочностью древесных материалов обшивок [5] очевидно, что использование сотовых конструкций оправдано только как альтернатива древесностружечных и древесноволокнистых плит средней плотности.

Также стоит отметить, что жесткость трехслойных сотовых панелей значительно выше жесткости традиционных древесных материалов. Так, например, жесткость листа ДСтП толщиной 22 мм и шириной 400 мм и плотностью 675 кг/м<sup>3</sup> составляет около 2000 Па·м<sup>4</sup>. Такую же жесткость имеют трехслойные панели толщиной 32 мм при плотности в 2,5–3 раза ниже. Поэтому облегченные панели не будут подвержены деформации под тяжестью собственного веса в отличие от цельной плиты.

Использование сотовых конструкций с обшивками панели из тонких ХДФ толщиной 3 мм и с внутренним слоем – бумажным сотовым наполнителем с размером ячейки 15 мм оправдано в производстве утолщенных мебельных деталей из-за выигрыша в массе при сохранении прочности, и их использование для нагруженных изделий целесообразно.

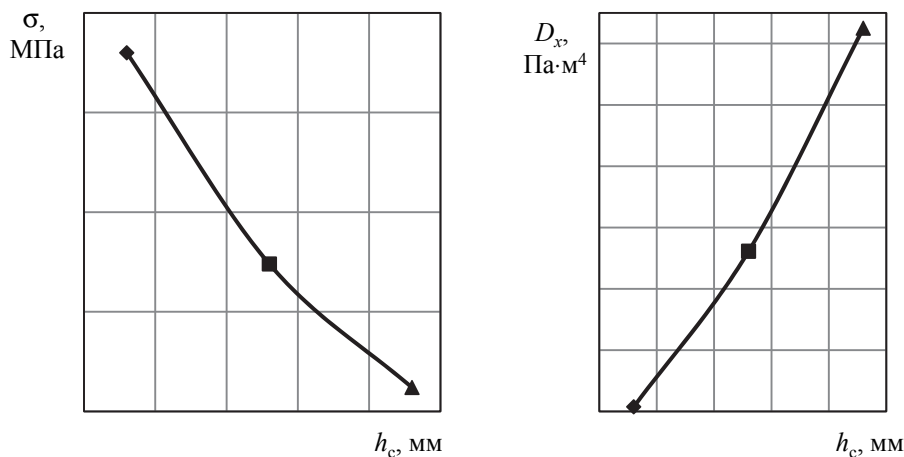


Рис. 5. Зависимость относительной прочности и жесткости щитов от высоты наполнителя (ХДФ толщиной 3 мм, размер ячейки наполнителя 15 мм)

**Вывод.** На основании вышеизложенного очевидно, что показатели деформативности сотового заполнителя, а именно критические деформации сжатия и сдвига, являются определяющими критериями оценки работоспособности трехслойных панелей в целом, так как обуславливают характер их разрушения.

В качестве критериев для оценки эффективности использования менее прочных трехслойных панелей возможно использовать относительные показатели прочности и жесткости панелей.

Это позволит сопоставлять эксплуатационные показатели различных древесных материалов и производить их сравнительную оценку.

В отличие от цельной древесной плиты облегченные панели обладают чрезвычайной легкостью, поэтому не будут подвержены деформации под тяжестью собственного веса. Малый вес мебельных панелей обеспечит снижение расходов древесных материалов, энергетических ресурсов, позволит производить достаточно легкие и прочные изделия.

### Литература

1. Перов Ю. Ю., Мельников П. В. Все, что нужно знать мебельщику о сотах / Ю. Ю. Перов, П. В. Мельников // Мебельщик. 2004. № 3. С. 65–67.
2. Перов Ю. Ю. Неоспоримые достоинства сотового заполнителя // Дерево.RU. 2007. С. 86–90.
3. Никольская В. В. Рынок бумажного сотового заполнителя // ЛесПромИнформ. 2015. № 6. С. 108–112.
4. Наливко Е. В., Шетько С. В. Влияние основных технологических факторов на прочность склеивания сот наполнителя с обшивками облегченного щита // Труды БГТУ. 2009. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 210–213.
5. Наливко Е. В., Шетько С. В. Исследование прочностных и упругих характеристик компонентов трехслойных панелей с маложестким заполнителем // Труды БГТУ. 2010. № 2: Лесная и деревообаб. пром-сть. С. 196–200.
6. Наливко Е. В., Шетько С. В., Спиглазов А. В. Местный изгиб панелей с бумажным сотовым заполнителем // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века: труды V Международ. евраз. симп. Екатеринбург, 2010. С. 88–90.
7. Прочность, устойчивость, колебания. В 3 т. Т. 2 / под общ. ред. И. А. Биргера, Я. Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 463 с.
8. Кобелев В. Н., Тимофеев С. И. Расчёт трёхслойных конструкций. М.: Машиностроение, 1984. 303 с.
9. Рудицын М. Н., Артемов П. Я., Любошиц М. И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. Минск: Вышэйшая школа, 1970. 630 с.
10. Волынский В. Н. Технология древесных плит и композитных материалов: учеб.-справ. пособие. СПб.: Изд-во «Лань», 2010. 336 с.
11. Ставров В. П. Механика композиционных материалов. Минск: БГТУ, 1996. 164 с.

### References

1. Perov Yu. Yu. Mel'nikov P. V. Everything a furniture maker needs to know about honeycombs. *Mebel'shchik* [Furniture maker], 2004, no. 3, pp. 65–67 (In Russian).
2. Perov Yu. Yu. The undeniable advantages of honeycomb. *Derevo.RU* [Wood.RU], 2007, pp. 86–90 (In Russian).
3. Nikol'skaya V. V. Paper honeycomb market. *LesPromInform* [Lesprominform], 2015, no. 6, pp. 108–112 (In Russian).
4. Naliuko Ye. V., Shet'ko S. V. The influence of the main technological factors on the bonding strength of the filler honeycomb with the lining of the lightweight board. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2009, no. 2, Forest and Woodworking Industry, pp. 210–213 (In Russian).
5. Naliuko Ye. V., Shet'ko S. V. Investigation of the strength and elastic characteristics of the components of three-layer panels with low-rigid aggregate. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2010, no. 2: Forest and Woodworking Industry, pp. 196–200 (In Russian).
6. Naliuko Ye. V., Shet'ko S. V., Spiglazov A. V. Local bending of panels with paper honeycomb core. *Trudy V Mezhdunarodnogo yevraziyskogo simpoziuma "Derevoobrabotka: tekhnologii, oborudovaniye, menedzhment XXI veka"* [Proceedings of the V International Eurasian symposium. "Woodworking: technology, equipment, management of the XXI century"]. Yekaterinburg, 2010, pp. 88–90 (In Russian).
7. *Prochnost', ustoychivost', kolebaniya*. V 3 t. T. 2. [Strength, stability, oscillation: reference book. In 3 vol. Vol. 2]. Ed. by I. A. Burger, Ya. G. Panovko. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1968, 463 p.
8. Kobelev V. N., Timofeyev S. I. *Raschet trekhslonnykh konstruksiy* [Calculation of sandwich construction]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984, 303 p. (In Russian).

9. Ruditsyn M. N., Artemov P. Ya., Lyuboshits M. I. *Spravochnoye posobiye po soprotivleniyu materialov* [The reference book on resistance of materials]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1970, 630 p.
10. Volynskiy V. N. *Tekhnologiya drevesnykh plit i kompozitnykh materialov* [Technology of wood boards and composite materials]. St. Petersburg, Izdatel'stvo "Lan" Publ., 2010. 336 p.
11. Stavrov V. P. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials]. Minsk, BGTU Publ., 1996. 164 p.

#### **Информация об авторах**

**Ручкина Елена Васильевна** – ассистент кафедры технологии и дизайна изделий из древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Nalivko83@bk.ru

**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**

**Ruchkina Yelena Vasil'yevna** – assistant lecturer, the Department of Technology and Design of Wooden Articles. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Nalivko83@bk.ru

**Shet'ko Sergey Vasil'yevich** – PhD (Engineering), Associate 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 14.10.2019*