

УДК 624.073-415/419

Хайруллин Ленар Равилевич

кандидат технических наук, доцент

E-mail: lenarhay@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Мингатин Адель Радикович

инженер

E-mail: mingatin93@mail.ru

ООО «СК АгроСтрой»

Адрес организации: 420054, Россия, г. Казань, ул. Поперечно-Авангардная, д. 25а

Причины возникновения дефектов в панелях типа сэндвич при их производстве на линиях с роликовым термопрессом

Аннотация

Постановка задачи. При изготовлении сэндвич-панелей с металлическими обшивками и средним слоем из отдельных листов заполнителя по поточной технологии, в готовых панелях возникает поперечный стык среднего слоя, расположенный произвольно по длине панели. Технология производства сэндвич-панелей на поточных линиях, имеющих термопресс, основанный на принципе прокатки заготовки сэндвича между верхними и нижними роликовыми установками, уже подразумевает наличие дефектов панелей в виде «непроклей» обшивки. Целью работы является выявление причин возникновения дефектов в сэндвич-панелях при их производстве на линиях с роликовым термопрессом.

Результаты. Основные результаты исследования заключаются в выявлении причин возникновения указанных дефектов, а именно наличия разности толщин заполнителя и появления дополнительной силы, действующей со стороны роликов на движущиеся обшивки в точках скачка толщин стыкуемых листов заполнителя, в результате изменения направления скорости движения роликов.

Выводы. Значимость полученных результатов исследования для строительной отрасли состоит в том, что на основе понимания механики возникновения дефектов результаты исследования могут быть использованы для усовершенствования оборудования для производства сэндвич-панелей и, в целом, для повышения качества производства ограждающих конструкций.

Ключевые слова: трехслойная панель, сэндвич-панель, стык заполнителя, технология производства панелей, роликовая установка, «непроклей».

Введение

Сэндвич-панели все чаще используются в качестве ограждающих конструкций зданий, таких как производственные здания, склады, холодильные камеры и торговые центры. Это связано с тем, что они легкие, теплоэффективные, эстетически привлекательные, и их легко транспортировать и устанавливать.

В зависимости от выбора технологии и оборудования, производство панелей с плитным утеплителем может выполняться в автоматическом или полуавтоматическом режиме. При этом состав технологических операций будет идентичный, но на номенклатуру и последовательность работ будет влиять вид теплоизолирующего слоя. Поскольку механические характеристики пенополистирола одинаковы по всем направлениям, то он укладывается плитами по всей ширине панели. По длине листы пенополистирольного заполнителя не могут превышать длину заготовки и зачастую она меньше, чем длина сэндвич-панели. Технология производства сэндвич-панелей из минеральной ваты предполагает устройство среднего слоя из отдельных ламелей, нарезанных из плит утеплителя, ограниченной ширины. Ориентация волокон в ламелях идет перпендикулярно плоскости панели, что повышает механическую прочность конструкции. У изготовленных автоматическим методом сэндвич-панелей себестоимость значительно ниже, а качество выше за счет отсутствия человеческого фактора.

Теоретические исследования причин возникновения дефектов сэндвич-панелей

При производстве трехслойных панелей с металлическими обшивками на непрерывных линиях, средний слой из пенополистирола изготавливают способом резки раскаленными нихромовыми или вольфрамовыми нитями на отдельные плиты. При нагреве проволока вытягивается, и на поверхности плит заполнителя получается начальная неровность, близкая к синусоиде, по длине плит заполнителя (рис. 1).

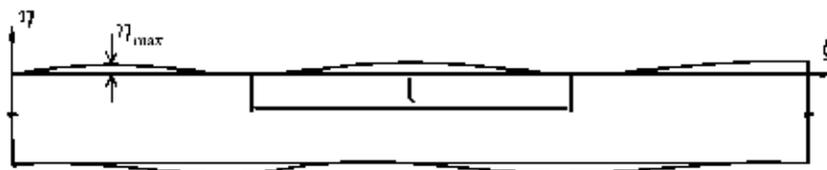


Рис. 1. Реальный профиль листа пенопласта (иллюстрация авторов)

Аналогичная картина может наблюдаться и при резке минераловатных плит на отдельные ламели, проводимой с помощью механической ленточной или дисковой пилы. Пильный диск или ленточная пила изнашиваются неравномерно, поэтому толщина ламелей может различаться в пределах нескольких миллиметров. При этом, согласно ГОСТ 32603-2012 «Панели металлические трехслойные с утеплителем из минеральной ваты. Технические условия», разность толщин ламелей минеральной ваты может достигать величины до 4 мм, а их неровность – 1 мм.

Таким образом, поверхность уже готовых плит заполнителя будет иметь неправильность, близкую к волне синусоиды, а уравнение продольного профиля листа заполнителя, соответственно, будет иметь следующий вид:

$$\eta = \eta_{\max} \cdot \sin^2 \frac{\pi \xi}{l}, \quad (1)$$

где l – длина волны.

На большинстве технологических линий изготовление сэндвич-панелей с металлическими обшивками на непрерывных линиях происходит по следующей схеме (рис. 2):

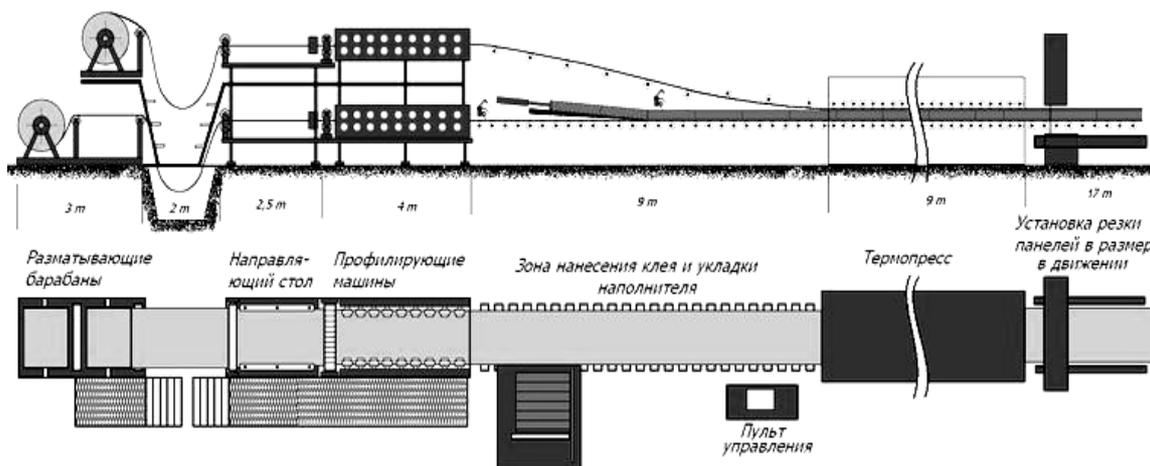


Рис. 2. Схема автоматической линии производства сэндвич-панелей
(источник: <http://www.budimpex.ru/avtomaticheskaya-liniya-sendvich-paneli.html>)

Для получения качественных панелей большое значение имеет способ склейки листов обшивки со средним слоем панели. При поточном методе производства панелей, есть два способа склейки:

- посредством гусеничного термопресса, перемещающегося вместе с панелью до полимеризации клея;

- при помощи термопресса, основанного на принципе прокатки заготовки сэндвича между верхними и нижними роликовыми установками. Основная функция роликового пресса – склеивание элементов панели без остановки движения на время, необходимое для склеивания элементов сэндвича (рис. 3). Скорость пресса синхронизирована со скоростью всей линии.

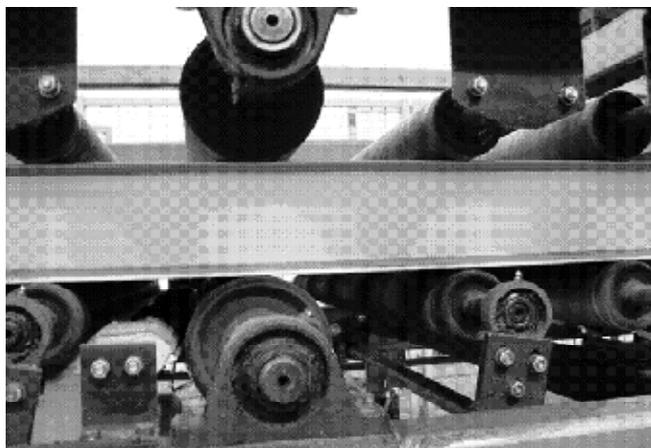


Рис. 3. Склеивание обшивок сэндвич-панелей при помощи роликового термопресса (источник: http://www.know-house.ru/avtor/metallprofil_05062012.html)

Под давлением пресса наружная часть сэндвич-панели и средний слой должны надежно склеиваться при температуре от +20 до +70. Однако стоит помнить, что склеиваемая конструкция должна находиться под прессом до того момента, пока цикл жизни клея не закончится. После нанесения клея склеивание должно произойти достаточно быстро. В зависимости от его модификации клеящие свойства сохраняются в промежутке от 3 до 180 минут. После склеивания панель выходит из-под пресса и охлаждается. Обычно конструкция набирает технологическую прочность от 10 минут до 16 часов.

Рассмотрим движение обшивки сэндвич панели через роликовую установку термопресса. В процессе изготовления панели, за счет неровности среднего слоя со стороны роликов на обшивку будет действовать не только сжимающие усилия P , но и переменные силы P'' (рис. 4):

$$P'' = -m \frac{2\pi^2 v^2 \eta_{\max}}{l^2} \cos \frac{2\pi vt}{l}, \quad (2)$$

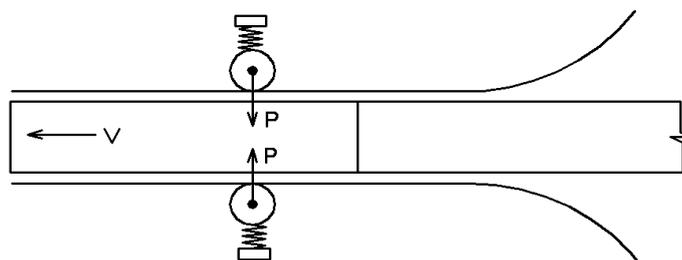


Рис. 4. Процесс движения панели через роликовую установку (иллюстрация авторов)

Так как скорость движения заготовки сэндвича v небольшая, то монотонно меняющаяся сила P'' значительного влияния на качество изготовления панелей не окажет, но уже изначально появляется начальная неровность. При этом начальные неровности могут быть синфазные, антифазные и смешанные.

Испытания сэндвич-панелей на поперечный изгиб показывают, что разрушение панелей, как правило, происходит за счет потери устойчивости сжатой обшивки [1, 7, 9]. Иногда это происходит при действии на панель нагрузок меньших, чем критические [2, 4]. Объяснение можно искать, по-видимому, в том, что, как было показано выше,

реальная поверхность панели имеет отклонения от плоскости, вследствие этого, при нагружении панели в обшивке, возникают напряжения, вызывающие потерю устойчивости сжатой обшивки из-за появления в обшивке эксцентриситета.

Итак, технологический процесс уже допускает неровности при изготовлении сэндвич-панелей. Кроме сказанного, необходимо учесть, что наполнитель поступает непрерывно, но отдельными листами. За счет неровности наполнителя в точке стыка предыдущего и последующего листов, периодически появляются скачки толщины наполнителя (рис. 5), что приводит к появлению дополнительной поперечной силы, которая в дальнейшем может вызвать появление «непроклея» обшивки. И все это обусловлено самой технологией склейки с помощью роликового пресса, когда участок панели выходит из-под очередного прижимного ролика, и, за счет сил упругости, зазор между листом и утеплителем увеличивается на некоторую величину, как бы разрывая клеевой слой. В результате череды таких сжатий-отслоений еще не застывший жидкий клей вспенивается, в итоге не обеспечивая хорошее проникновение клея в толщу утеплителя и его надежную адгезию с обшивкой. На некоторых производственных линиях плиты утеплителя из пенополистирола внутри панелей соединяются не плоской поверхностью предыдущего и последующего торцов плит, а места соединения утеплителя – торцы пенополистирола – фрезеруются с образованием пазогребневого стыка. Таким образом, стык утеплителя внутри панели представляет собой конструктивный узел, воспринимающий сдвиговое усилие и обеспечивающий более надежное механическое соединение [9]. Однако наличие дополнительных операций по фрезерованию и стыковке плит наполнителя, еще больше увеличивает вероятность возникновения неровности в месте стыковки плит наполнителя. Попробуем объяснить природу появления дополнительной силы в точках стыка листов наполнителя.

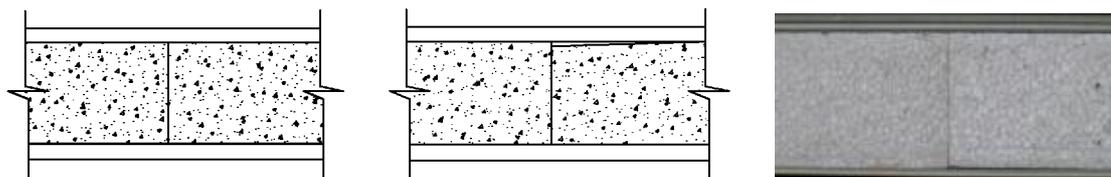


Рис. 5. Идеальный стык и реальные стыки листов наполнителя (иллюстрация авторов)

На рис. 5 показан реальный случай, когда толщины стыкуемых торцов не совпадают. В результате при прохождении через эти точки векторы скоростей осей роликов меняют свои направления.

Наличие так называемого «излома» приводит к появлению дополнительной силы Q , которая будет действовать со стороны роликов на движущиеся обшивки в точках скачка толщин стыкуемых листов наполнителя. Приблизительно вычислим элементарный импульс этой силы, действующей со стороны обшивки на этом элементарном участке (рис. 6). По теореме об изменении количества движения имеем следующее.

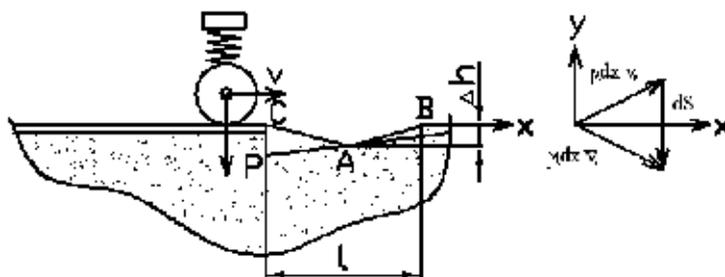


Рис. 6. Схема прохождения сил в месте стыка листов пенополистирола:
 l – длина вмятины; Δh – максимальная амплитуда вмятины (иллюстрация авторов)

$$\mu dx \bar{v}_2 - \mu dx \bar{v}_1 = d\bar{S}, \tag{3}$$

где μ – «погонная» масса роликовой установки;

v_1, v_2 – векторы скоростей и центра масс элементарного участка роликов до и после прохождения стыка листов заполнителя, причем $v_2=v_1=v$ – скорость движения;
 dS – элементарный импульс силы Q ;
 dx – длина элементарного участка роликовой установки;
 μdx – масса элементарного участка роликовой установки.

Время прохождения стыка заполнителя будем считать пренебрежительно малым. Так как $v_2=v_1=v$, и $\angle ACB=\angle ABC$, то вектор dS в треугольнике импульсов, построенном по теореме об изменении количества движения, оказывается вертикальным.

При этом $dS=-2\mu dxv \sin \alpha$.

Разделив обе части полученного равенства на dt и учитывая условия, что:

$$\frac{dS_y}{dt} = Q, \text{ а } \frac{dx}{dt} = v,$$

будем иметь:

$$Q=-2\mu v^2 \sin \alpha. \quad (4)$$

Эта сила возникает в результате изменения направления скорости движения роликов в точках стыка заполнителя и является родственной центробежной силе инерции.

Если учесть, что:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta h}{\sqrt{\Delta h^2 + \frac{l^2}{4}}} = \frac{2\Delta h}{\sqrt{4\Delta h^2 + l^2}}, \quad (5)$$

то дополнительную силу, действующую на обшивку при стыке заполнителя, приблизительно можно определить по формуле:

$$Q' = \frac{4\Delta h \mu v^2}{\sqrt{4\Delta h^2 + l^2}}. \quad (6)$$

Таким образом, при изготовлении панелей, со стороны роликов на панель будут действовать силы:

$$P = P_1 - \frac{2\pi^2 v^2 m \eta_{\max}}{l^2} \cos \frac{2\pi vt}{l} + \delta \left(t - \frac{L}{v} \right) \frac{4\Delta h \mu v^2}{\sqrt{4\Delta h^2 + l^2}}, \quad (7)$$

где P_1 – сжимающая сила.

На рис. 7 показан график изменения силы P .

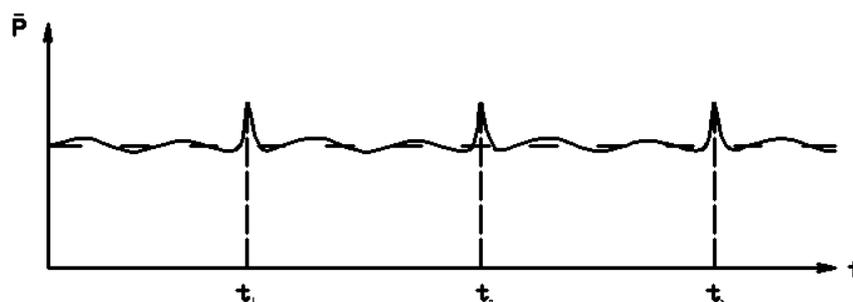


Рис. 7. График изменения P (иллюстрация авторов)

Таким образом, появление дополнительных сил, при $t_1=L/v$, и является причиной появления неровностей, где L – длина листа или ламели заполнителя.

Данные силы, вызывающие наличие упругого отпора, вызывают появление так называемого «непроклея» обшивки в месте стыка листов заполнителя, то есть появление участков обшивки, неподкрепленной упругим основанием. В результате возникновения такого дефекта критическая сила местной потери устойчивости сжатой обшивки уменьшается [10], что приводит к ее выпучиванию и к дальнейшему отрыву обшивки в процессе эксплуатации.

Сопряжение обшивки и заполнителя обоснованно считается слабым звеном при работе многослойных конструкций [11]. Это связано с тем, что такие отслоения имеют тенденцию расти и, в конечном итоге, обшивка полностью отслаивается. Наиболее

распространенной причиной этих дефектов является плохое или отсутствующее соединение из-за несовершенства технологии изготовления или несоответствия геометрии. Подобные дефекты могут также возникать во время эксплуатации из-за температурных напряжений, ударов или усталости конструкции. [9].

Для того чтобы структура сэндвич-панели смогла работать технически правильно механические свойства обшивок и среднего слоя должны соответствовать действующим в них усилиям. Изгибающие нагрузки вызывают деформацию всей панели. Обшивка, находящаяся со стороны нагрузки, действующей на панель, находится под действием сжимающих напряжений, а другая обшивка – растягивающих. Средний слой также оказывается нагружен. При этом напряжением, воспринимаемым заполнителем, является сдвиговое напряжение [3]. Таким образом, заполнитель должен хорошо работать на сдвиг. Однако наличие стыков плит заполнителя и соответственно скачков толщины заполнителя и вызываемого ими «непроклея», не позволяет в полной мере использовать свойства цельной плиты заполнителя для восприятия сдвигающих усилий в месте стыка. Чтобы получить полную выгоду от использования сэндвич-структуры и избежать указанных дефектов, можно использовать заполнитель без стыков [5] или компенсировать это повышенным расходом клея, в том числе для склеивания стыка [6, 8], но это существенно удорожает стоимость готового изделия.

Заключение

Технология производства сэндвич-панелей на поточных линиях, имеющих термопресс, основанный на принципе прокатки заготовки сэндвича между верхними и нижними роликовыми установками, уже подразумевает наличие дефектов панелей в виде «непроклея» обшивки. Данный дефект возникает из-за наличия разности толщин заполнителя и появления дополнительной силы, действующей со стороны роликов на движущиеся обшивки в точках скачка толщин стыкуемых листов заполнителя, в результате изменения направления скорости движения роликов в роликковой установке термопресса.

Список библиографических ссылок

1. Хайруллин Л. Р. Результаты исследования действительной работы трехслойных панелей : Материалы 53 республиканской научной конференции : сб. научных трудов аспирантов / КГАСУ. Казань, 2001. С. 60–63.
2. Ильдияров Е. В., Холопов И. С. Экспериментально-теоретическое исследование долговечности трехслойных панелей со средним слоем из базальтовой ваты // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 9. С. 31–36.
3. Холопов И. С., Петров С. М. Оптимальное проектирование трехслойных панелей с учетом сдвиговых деформаций среднего слоя // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 2. С. 36–40.
4. Петров С. М. Несущая способность и деформативность трехслойных панелей с обшивками из металлических и композиционных материалов и легкими заполнителями. Самара, 2013.
5. Солдатов А. А., Бедник В. С., Акобян Г. В., Текеев И. Х. Ограждающие конструкции – сэндвич панели // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/01/62284> (дата обращения: 12.10.2019).
6. Долженко В. Е. Влияние увеличенного расхода клея на несущую способность сэндвич-панелей // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 12. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/12/75439> (дата обращения: 12.10.2019).
7. Studzinski R., Pozorski Z., Garstecki A. Failure maps of sandwich panels with soft core : 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques / VGTU. Vilnius, 2010. P. 1060–1064.
8. Saarinen A. Shear strength examination of the mineral wool lamella cored sandwich panels and the comparison of their different end connections. Master of Science thesis. Tampere University of technology. 2015. 68 p.

9. Carlsson L. A., Kardomateas G. A. Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites. Amsterdam : Springer Netherlands, 2011. 386 p.
10. Каюмов Р. А., Мухамедова И. З., Хамматова В. В. Методика определения коэффициента постели в задаче потери устойчивости среднего слоя трехслойного стержня при растяжении // Вестник технологического университета. 2016. № 23. С. 118–120.
11. Каюмов Р. А., Шакирзянов Р. А., Шакирзянов Ф. Р., Каримова Г. Г. Расчет трехслойной панели со складчатым наполнителем. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред : мат. XXIV международного симпозиума имени А. Г. Горшкова / ООО «ТПП». М., 2018. С. 124–126.

Khayrullin Lenar Ravilevich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: lenarhay@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Mingatin Adel Radikovich

engineer

E-mail: mingatin93@mail.ru

LLC «SK AgroStroy»

The organization address: 420054, Russia, Kazan, Poperechno-Avangardnaya st., 25a

**Causes of defects in sandwich-type panels
during their production on lines with roller thermal press**

Abstract

Problem statement. In the manufacture of sandwich panels with metal cladding and a middle layer of individual filler sheets using in-line technology, a transverse joint of the middle layer occurs arbitrarily in the finished panels, located arbitrarily along the length of the panel. The technology for the production of sandwich panels on production lines with a thermal press, based on the principle of rolling a sandwich billet between the upper and lower roller installations, already implies the presence of panel defects in the form of «non-adhesive» cladding. The aim of the work is to identify the causes of defects in the sandwich panels during their production on the lines with roller thermal press.

Results. The main results of the study are to identify the causes of the indicated defects, namely the presence of a difference in the thickness of the filler and the appearance of additional force acting on the side of the rollers on the moving skin at the jump points of the thicknesses of the joined sheets of the filler, as a result of a change in the direction of speed of the rollers.

Conclusions. The significance of the research results for the construction industry lies in the fact that, based on an understanding of the mechanics of the occurrence of defects, the research results can be used to improve the equipment for the production of sandwich panels and, in general, to improve the quality of production of building envelopes.

Keywords: three-layer panel, sandwich panel, filler joint, panel production technology, roller installation, «non-adhesive».

References

1. Khayrullin L. R. Results of the study of the actual operation of three-layer panels : mat. of the 53rd republican scientific conference : dig. of art. of post graduate students / KGASA. Kazan, 2001. P. 60–63.

2. Ildiyarov E.V., Kholopov I.S. Experimental and theoretical study of the durability of three-layer panels with a middle layer of basalt wool // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2015. № 9. P. 31–36.
3. Kholopov I. S., Petrov S. M. Optimal design of three-layer panels taking into account shear deformations of the middle layer. *Industrial and civil engineering*. 2013. № 2. P. 36–40.
4. Petrov S. M. Bearing capacity and deformability of three-layer panels with sheathing of metal and composite materials and lightweight aggregates. Samara, 2013.
5. Soldatov A. A., Bednik V. S., Hakobyan G. V., Tekeev I. Kh. Enclosing structures – sandwich panels // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii*. 2016. № 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/01/62284> (reference date: 12.10.2019).
6. Dolzhenko V. E. The effect of increased glue consumption on the carrying capacity of sandwich panels // *Sovremennyye nauchnyye issledovaniya i innovatsii*. 2016. № 12. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2016/12/75439> (reference date: 12.10.2019).
7. Studzinski R., Pozorski Z., Garstecki A. Failure maps of sandwich panels with soft core: 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques / VGTU. Vilnius, 2010. P. 1060–1064.
8. Saarinen A. Shear strength examination of the mineral wool lamella cored sandwich panels and the comparison of their different end connections. Master of Science thesis. Tampere University of technology. 2015. 68 p.
9. Carlsson L. A., Kardomateas G. A. Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites. Amsterdam: Springer Netherlands, 2011. 386 p.
10. Kayumov R. A., Mukhamedova I. Z., Khammatova V. V. Method for determining the coefficient of bed in the problem of loss of stability of the middle layer of a three-layer rod under tension // *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*. 2016. № 23. P. 118–120.
11. Kayumov R. A., Shakirzyanov R. A., Shakirzyanov F. R., Karimova G. G. Calculation of a three-layer panel with folded filler. Dynamic and technological problems of structural mechanics and continuous environment : mat. of the XXIV International Symposium named after A.G. Gorshkov / LLC TRP. M., 2018. P. 124–126.