УДК 624.011.14 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.71512

КЛЕЕФАНЕРНАЯ БАЛОЧНАЯ КОНСТРУКЦИИ С Х-ОБРАЗНОЙ ФАНЕРНОЙ СТЕНКОЙ И ПАЗЛОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ ФАНЕРЫ

Д-р техн. наук В.В. Фурсов, инж. А.Н. Бидаков

КЛЕЄФАНЕРНА БАЛОЧНА КОНСТРУКЦІЯ З Х-ПОДІБНОЮ ФАНЕРНОЮ СТІНКОЮ ТА ПАЗЛОВИМИ З'ЄДНАННЯМИ ФАНЕРИ

Д-р техн. наук В.В. Фурсов, інж. А.М. Бідаков

GLUED THIN-WEBBED BEAM CONSTRUCTION WITH X-FORM OF PLYWOOD WEB AND PUZZLE JOINTS OF PLYWOOD

Doct. of techn. Sciences V. Fursov, engineer A. Bidakov

Разработан новый вид клеефанерных балок с криволинейной формой фанерной стенки, увеличивающей ее жесткость и обеспечивающей эффективную работу, а также исключающий необходимость установки поперечных ребер жесткости, что делает балку более технологичной. Выполнены поисковые испытания нового типа соединения фанеры с различными геометрическими конфигурациями частей соединяемых элементов и называются «пазловые соединения».

Ключевые слова: *клеефанерная балка, фанерная стенка, эффективные решения, пазловые соединения фанеры.*

Розроблено новий вид клеєфанерних балок з криволінійною формою фанерної стінки, який має збільшену жорсткість й забезпечує її ефективну роботу, а також виключає необхідність влаштування поперечних ребер жорсткості, що робить балку більш технологічною. Виконані пошукові випробування нового типу з'єднань з різними геометричними конфігураціями частин з'єднувальних елементів і має назву «пазлові з' єднання».

Ключові слова: *клеєфанерна балка, фанерна стінка, эфективні рішення, пазлові з' єднання фанери.*

The new developed thin-webbed beam with curvilinear plywood web of beam has higher stiffness and provides effective work. This construction decision exclude necessity of installation in the transversal ribs what makes beam easier to produce. Glued thin-webbed beams with box cross sections and I cross sections are very economical through consumption of materials. However the necessity of ensuring of webs buckling requires installing additional cross ribs, which must be good adjusted to the beam's flange. The production step of adjusting cross ribs to the flange of beam is a very important and accounts for about 50% of all

working hours during production. Cross ribs absence or at least significant reduction of ribs quantity substantially induce manufacturability growth of production of glued thin-webbed beams.

The primary test was carried out for the new type of plywood connections with different geometry configurations of elements of the jointed parts and called "puzzle joints".

Key words: *thin-webbed beam, plywood web, effective decisions, puzzle joints of plywood.*

Вступление. Создание новых эффективных форм строительных конструкций становится приоритетным направлением для решения многих задач и проблем в существующих конструктивных решениях несущих элементов зданий и сооружений. Клеефанерная Х-образная балка является первым результатом на пути создания безреберных конструкций за счет кривизны фанерных элементов балочной конструкции.

Постановка проблемы. Среди множества типов существующих балок из древесины и древесных материалов, наиболее экономичными по расходу материала являются балочные клеефанерные конструкции с плоскими стенками. Недостаток таких балок заключается в необходимости обеспечения устойчивости стенок, что требует постановки дополнительных поперечных ребер, плотно приторцованных к поясам. Этот процесс составляет около 50% от всего объема трудозатрат по их изготовлению. Отсутствие поперечных ребер, или уменьшение их количества, может резко повысить технологичность изготовления клеефанерных балок. Разработанная на кафедре МДК ХНУСА и защищенная патентом балка с Х-образной фанерной стенкой существенно снижает недостатки клеефанерных балок, что было подтверждено их испытаниями.

Анализ последних исследований и публикаций. Известно несколько конструктивных решений, в которых фанера используется в качестве стенки: в клеефанерных балках, рамах и арках. В них применяют двутавровые поперечные сечения с одной плоской или волнистой фанерными стенками, а также в виде коробки с двумя стенками.

Среди отечественных специалистов, значительные экспериментальные и аналитические исследования клеефанерных балок принадлежат таким исследователям как: Дмитриев П.А., Лобанов Ю.А., Осипов Ю.К., Большаков В.В., Макаров Г.П., Кириленко В. Ф. [2-4] и др. В настоящее время большое внимание к фанерным конструкциям уделяется в работах немецких ученых, в особенности школы профессора Blaß, H. J., таких как Frese, M., Glos [6-7], Flaig M. [8], и др. Группой Японских ученых под руководством Hiroshi Yoshihara [9-12] проведены испытания, в которых исследованы упругие характеристики фанеры, а также предложены новые более точные методы их определения. Например, разработаны технические рекомендации для определения свойств фанеры при сжатии образцов, так называемым методом IITRI (Illinois Institute of Technology Research Institute, USA), несмотря на уже существующие американские рекомендации по подобным испытания по ASTM D 3501-94 (ASTM 1994).

Разработка и конструирование Х-образной балки проходила с учетом данных авиастроителей первой половины XX века. К примеру, штурмовик Ил-2 представлял собой моноплан с нижним расположением крыла у которого обшивка хвостовой части фезюляжа и крыльев выполнялись из фанеры. Силовой каркас крыла (рис. 1), состоящий из лонжеронов, стрингеров и нервюр выполнялся из фанеры и дерева, или из дюралюминия.

Так как форма обшивки крыльев имеет изогнутую форму, то конструирование таких балок основывалось на данных исследователей ЦАГИ им. Жуковского, а именно: В.М. Стригунов, А.Ю. Ромашевский, Г.А. Олейников, Г.Г. Ростовцев, М.Л. Лурье и др. сделали весомый вклад в теоретические и экспериментальные исследования различных тонкостенных балок с параллельными поясами, а также подкрепленных и неподкрепленных обшивок работающих на сжатие. Такие наработки способствовали критической оценки и анализу проведенных исследований Х-образной клеефанерной балки.

Методика проведения экспериментов. В лаборатории строительных конструкций (ХНУСА) проводились испытания нового типа клеефанерных балок с изогнутыми фанерными стенками и дощатыми клееными поясами. Соединение фанерных стенок с поясами балок

выполнялись с помощью клеев через наклонные пропилы, сделанные в поясах балки. По краям балки устанавливаются опорные ребра, одна из граней которых повторяет кривизну фанерной стенки и плотно приторцовывается к ней. Пояса балочной конструкции были изготовлены из клееной древесины сосны, а стенки зи 3-х слойной березовой фанеры повышенной влагостойкости 1 сорта, марки ФСФ. Испытания моделей балок (рис. 2), проводились путем нагружения их домкратами грузоподъемностью 25 т через траверсу, распределяющую нагрузку на две точки, соответствующие третям пролета. Передача нагрузки на балку от траверсы осуществлялась через деревянные бруски и металлические пластины, лежащие сверху на этих брусках и контактирующих непосредственно с траверсой. Все испытуемые модели балок были раскреплены с двух сторон по верхним поясам. Балки первоначально трехкратно нагружались с шагом 0,5 т до 2 т, с последующей разгрузкой. После чего проводился основной эксперимент.

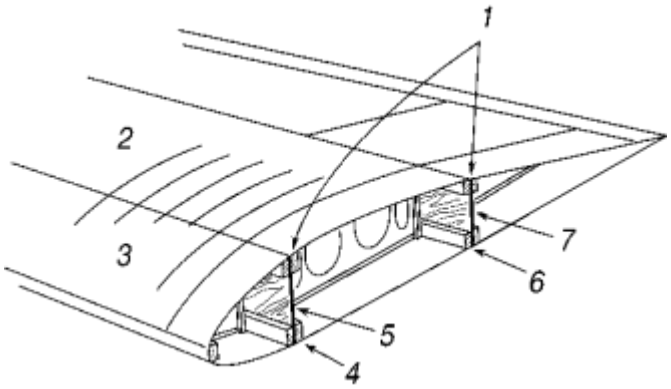

Рис. 1. Конструкция крыла с фанерной обшивкой:
1 – полки лонжеронов; 2 – фанерная обшивка среднего кессона;
3 – фанерная обшивка носового кессона; 4 – передний лонжерон;
5 – фанерная стенка переднего лонжерона; 6 – задний лонжерон;
7 – фанерная стенка заднего лонжерона

Рис. 2. Экспериментальный образец Х-образной балки

Каждая балка в процессе испытаний доводилась до разрушения. Величины угловых перемещений каждого торца балки фиксировались четырьмя индикаторами часового типа, а показания прогибов поясов балки снимались отдельно, двумя

прогибомерами с точностью деления 0,001 мм. Для измерения деформаций использовались датчики базой 20 мм и сопротивлением примерно 200 Ом. В качестве измерительной аппаратуры применялся автоматический 100-позиционный прецизионный переключатель АП-3 и автоматический измеритель деформаций АИД-4. Температура в помещении во время испытаний составляла примерно +25˚С и влажность древесины колебалась от 12 до 14%. В рамках испытаний внимание акцентировалось на расположение накладок стыкуемых листов, установленных под наклоном либо вертикально, причем последние оказались более предпочтительными и эффективными. Схема экспериментальной модели с местами установки датчиков активного сопротивления, а также схема нагружения приведены на рис. 3.

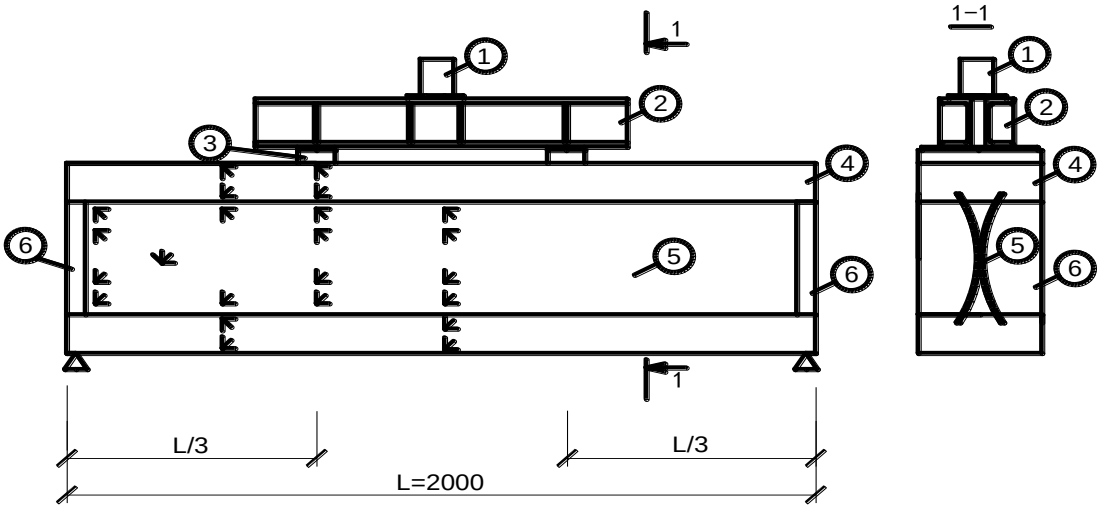

Рис. 3. Схема нагружения экспериментальной модели:
1 – домкрат; 2 – распределительная стальная траверса; 3 – деревянные бруски;
4 – пояс балки из клееной древесины; 5 – фанерные стенки балки;
6 – торцевые ребра жесткости из цельной древесины

В процессе испытаний в упругой стадии балки усовершенствовались некоторыми конструктивными дополнениями, и путем соединения фанерных стенок в районе нейтральной оси болтами с прокладками из фанеры такой же толщины, а также установкой в отдельных случаях односторонних ребер в местах приложения нагрузки и на опорах. Последняя балка, с радиусом кривизны стенки 800 мм, укреплялась деревянными вставками в верхние полости между фанерными стенками, а также заполнением этих полостей монтажной пеной.

Обсуждение результатов. Полученные результаты испытаний балок и поведение криволинейных фанерных элементов стенки балки носили характер новизны и лишь частично оправдали ожидания и предположения о работе конструкции в целом. Перед началом испытаний были проведены предварительные расчеты моделей с помощью аналитической расчетной программы «ANSYS». Анализ этих расчетов позволил уточнить места расположения датчиков на испытуемых моделях и предложить второй вариант конструктивного решения опорных зон балки со сплошным опорным ребром, в которое входят фанерные стенки и фиксируются с помощью клеевого соединения, см. рис. 4.

Анизотропия прочности при сжатии [1] выражена для фанеры в меньшей степени, чем при растяжении, тем более для квазигомогенной трехслойной фанеры используемой при испытаниях. Для изотропных тел условие прочности обычно выражается уравнением, связывающим величины трех главных напряжений с одной характеристикой прочности материала. Для

анизотропных материалов такое уравнение не позволяет решать задачу, так как опасное состояние зависит не только от величины главных напряжений, но и от их ориентации по отношению к осям симметрии материала. Поэтому условие равноопасных напряженных состояний для ортотропных тел должно содержать не три, а шесть величин, например три главных напряжения и три направляющих косинуса, фиксирующих ориентацию этих напряжений в материале.

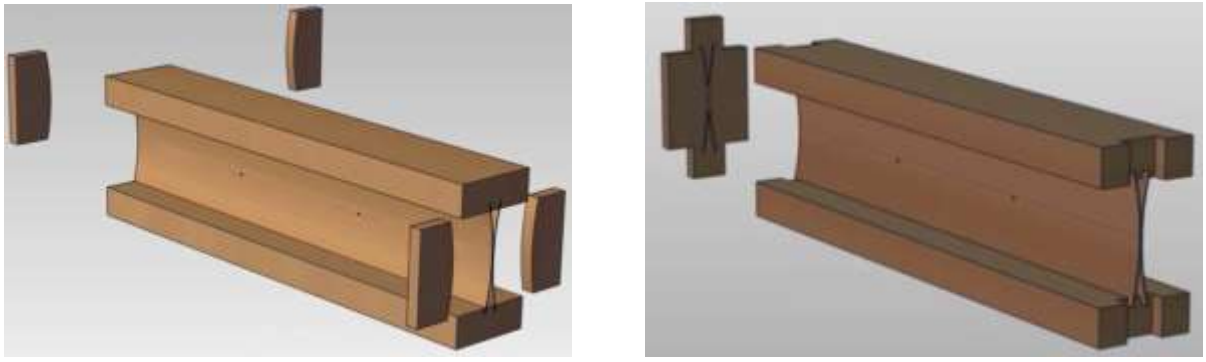

Рис. 4. Два варианта выполнения опорных зон клеефанерной Х-образной балки

Сравнение результатов эксперимента и расчета показали близкие данные (см. рис. 5 и рис. 7) с разницей от 10 до 22%. Такая разница результатов объясняется тем, что в расчетном программном комплексе ANSYS модель балки идеализируется, чего нельзя сказать о любых реальных деревянных конструкциях, вследствие их анизотропии и наличия рыхлых деформаций.

Максимальные напряжения и, соответственно, деформации наблюдались в местах стыка фанерной стенки и верхнего пояса в зонах опор. На рис. 5 показаны разрушения балок в опорных зонах, а на рис. 6 приведены результаты расчета и распределения напряжений в поперечном сечении моделей.

Во время испытаний фиксировались деформации стенок балки в виде локального выпучивания фанеры или соответственно вогнутости, которые с увеличением нагрузки меняли свою ориентацию, а также знак деформаций и даже взаимное смещение фанерных стенок по вертикали. Разрушение всех балок наступало в следствии достижения касательных напряжений критического значения и разрушения в области клеевого шва, соединяющего стенки с верхним поясом балки.

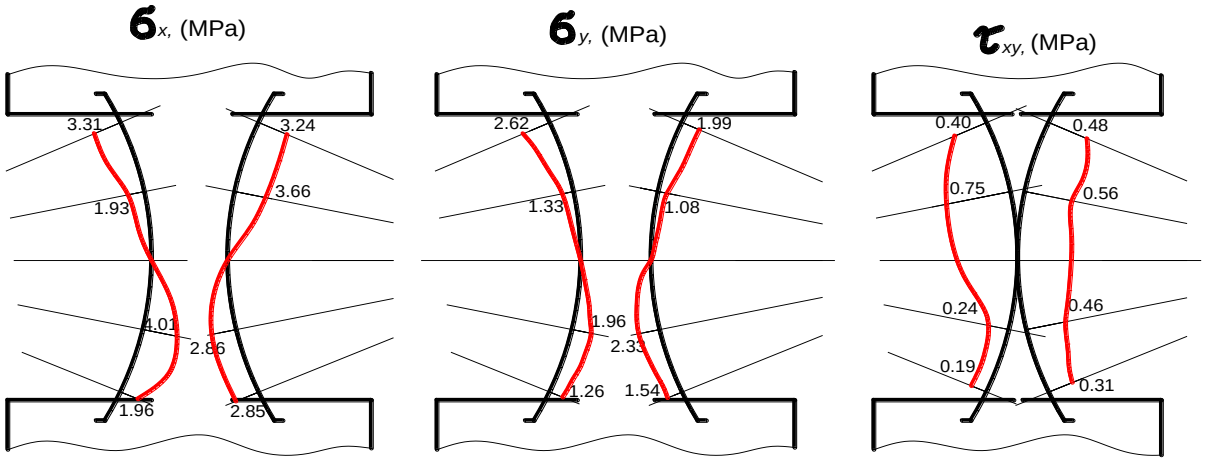

Рис. 5. Эпюры напряжений σ_x, σ_x, τ_{xy} для балки с радиусом кривизны стенки 800 мм на опоре при величине нагрузки 1,5 т

Рис. 6. Результаты испытания экспериментальной модели

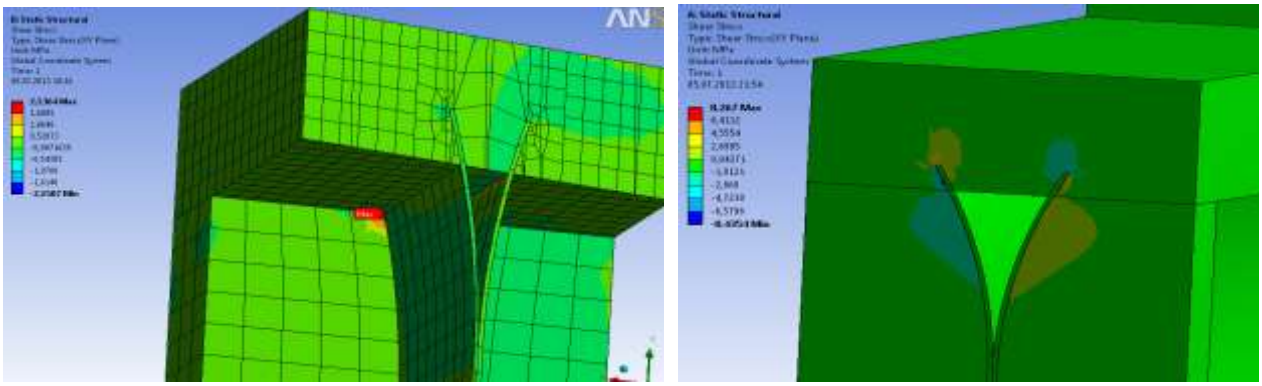

Рис. 7. Результаты распределения напряжений в расчетной модели

Разработка вариантов соединения фанерных стенок по длине балки. Традиционный виды соединения фанеры, существующие на страницах практических справочниках по проектированию деревянных конструкций, как например стык на «ус» и стык при помощи односторонней или двусторонней фанерных накладок приведены на (рис. 8). Недостатком стыкования фанеры на «ус» является то, что требуется точное выполнение наклонных торцов стыкуемых элементов и подпресовка с прижимом. Особо затруднительно выполнение такого типа соединения для фанерных листов малых толщин.

Стык фанеры двусторонними накладками создает концентратор напряжений и существенно увеличивает жесткость пластинчатого древесного элемента, что является негативным результатом для всего элемента конструкции в целом, а выполнение такого типа соединения было не возможным при создании балок с Х-образной фанерной стенкой.

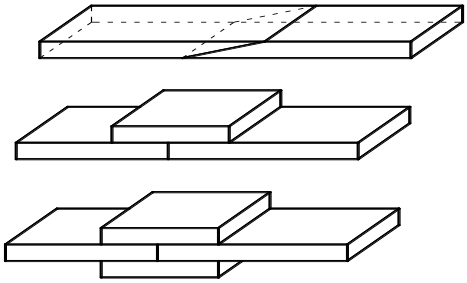

Рис. 8. Традиционные виды соединений фанерных элементов

В лаборатории строительных конструкций, Харьковского национального университета строительства и архитектуры, в ноябре 2013 года были подготовлены и выполнены пробные испытания пазловых соединений фанеры различных геометрических конфигураций, а также различных типоразмеров испытуемых образцов. Часть образцов была соединена с применением

стеклоткани, устанавливаемой с обеих сторон, в местах пазловых резов фанеры (см. рис. 9). Такая технология выполнения стыков значительно увеличила несущую способность фанерных стенок. При испытании образцов на растяжение с наклеенными элементами из стеклоткани показатели прочности пластин в несколько раз превышающую прочность таких же образцов, не усиленных стеклотканью. Полимерные накладки устанавливались на эпоксидной смоле ЭД-20 без повышения температуры во время склеивания и без осуществления прижима, что является необходимыми условиями для достижения максимального результата при выполнении клеевых соединений. Для проведения испытаний было изготовлено два геометрических типа образцов: полосы 100*300, 100*400мм и прямоугольники размерами 300*400мм и 400*500мм.

Рис. 9. Испытательные образцы фанерных полос с одним и двумя пазлами

Фанерные полосы испытывались на растяжение и центральное сжатие, а прямоугольные пластины на центральное и внецентренное сжатие (рис. 10). В эксперименте на центральное сжатие использовались цилиндрические шарниры, плотно фиксировавшие края фанерных элементов. Характер разрушения изгибаемых прямоугольных фанерных пластин указал на необходимость усовершенствования пазловых соединений для применения в криволинейных элементах строительных конструкций. Возможность применения такого типа соединений в плоских элементах конструкций наглядно подтверждена экспериментальными исследованиями, особенно если данный стык выполнен с использованием накладок из стеклоткани.

Безусловно, идея пазловых соединений фанерных элементов требует выполнение дальнейших исследовательских испытаний и разработки оптимальных геометрических параметров частей стыка, с целью обеспечения высокой эффективности и прочности данного соединения. Разработка инженерной методики расчета возможна только после проведения большого количества испытаний образцов с различной геометрией пазла.

Выводы. Проведенные испытания балок подтвердили эффективность новой формы поперечного сечения и указали на необходимость дополнительной проработки конструктивных мероприятий для снижения локальных перемещений фанерных стенок. Экспериментально исследованные клеефанерные балки с Х-образной стенкой являются новым разделом практически не изученной работы криволинейных форм фанеры, как ортотропного материала. Вместе с тем методы определения характеристик прочности «сильно» анизотропных материалов, каковыми являются древесина и фанера, все еще продолжают составлять предмет дискуссии и усовершенствования.

Рис. 10. Разрушение сжато-изгибаемых фанерных пластин

Выполнение поисковых исследований пазловых соединений фанерных элементов дают возможности применения нового типа соединения плоских элементов клеефанерных конструкций и перспективы для их использования в изогнутых фанерных элементах. Существенный эффект повышения прочности наблюдался при наклеивании стеклоткани в местах лазерных резов пазлового соединения и поэтому представляется обязательным технологическим этапом при выполнении таких соединений.

Список использованных источников

1. Ашкенази, Е.К. Анизотропия конструкционных материалов [Текст]: справочник / Е.К. Ашкенази, Э.В. Ганов. – М.: Машиностроение, 1980. – 247 с.
2. Кириленко, В.Ф. Напряженно-деформированное состояние клеефанерных балок с прерывистой фанерной стенкой [Текст] / В.Ф. Кириленко, М.В. Колыхан, Е.Ю. Якушкова, А.Н. Янчук // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов / НАПКС. — Симферополь: НАПКС, 2007. – Вып. 21. – С. 16-20.
3. Кириленко, В.Ф. Напряжения в приопорных зонах деревофанерных балок [Текст] / В.Ф. Кириленко, М.Ю. Кузенков // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць / Національний університет водного господарства та природокористування. – Рівне, 2009. – Вип. 19. – С. 159-164.
4. Кириленко, В.Ф. Напряжения в деревофанерной балке двутаврового сечения [Текст] / В.Ф. Кириленко, М.Ю. Кузенков // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов / НАПКС. — Симферополь: НАПКС, 2009. – Вып. 29. – С. 71-79.
5. Справочник авиаконструктора. Том 3. Прочность самолета [Текст] / Коллектив ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского. – М.: Из-во ЦАГИ, 1939. – 652 с.
6. Blaß, H. J.; Frese, M.; Glos, P.; Linsenmann, P.; Denzler, J., (2005): Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen.
7. Blaß, Hans Joachim; Flaig, Marcus; Stabförmige Bauteile aus Brettsperrholz, KIT Scientific Publishing 2012, VIII, 171 S.
8. Flaig M. Modellierung der Biegefestigkeit von hochkant auf Biegung beanspruchten Bauteilen aus Brettsperrholz.
9. Hiroshi Yoshihara. Poisson’s ratio of plywood measured by tension test. Holzforschung, 63 (5), 2009, 603-608 p.
10. Hiroshi Yoshihara. Edgewise shear modulus of plywood measured by square-plate twist and beam flexure methods. Construction and Building Materials, 23 (12), 2009, 3537-3545.

11. Hiroshi Yoshihara. Bending properties of medium-density fiberboard and plywood obtained by compression bending test. Forest Products Journal, 61 (1), 56-63.

12. Hiroshi Yoshihara. Influence of the specimen depth to length ratio and lamination construction on Young's modulus and in-plane shear modulus of plywood measured by flexural vibration. BioResources, 7(1), 1337-1351.

Фурсов Вадим Вікторович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри металевих і дерев'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (057) 700-01-15.
E-mail: vadfursov@mail.ru.
Бідаков Андрій Миколайович, аспірант, кафедра металевих і дерев'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва і архітектури. Тел.: (057) 700-01-15. E-mail: bidakov@mail.ru.

Fursov Vadim Viktorovich, d-r science, professor, head of department of metal and timber constructions, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine; Tel.: (057) 700-01-15. E-mail: vadfursov@mail.ru.
Bidakov Andrii Nikolayevich, postgraduate student, department of metal and timber constructions, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine; Tel.: (057) 700-01-15. E-mail: bidakov@mail.ru.