

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАЛЬНЫХ ВКЛЕЕННЫХ ПЛАСТИНАХ

В современном строительстве для повышения жесткости и увеличения несущей способности соединений элементов деревянных конструкций нашли применение конструктивные решения на клеенных в древесину стальных стержнях из арматуры периодического профиля. Особо широкое распространение получили различные типы соединений с наклонно клееными связями. Несмотря на надёжность таких соединений, они имеют ряд серьезных недостатков с точки зрения металлоёмкости, технологичности их изготовления и простоты сборки. Для устранения этих недостатков предложен способ узловых сопряжений элементов деревянных конструкций на клеенных в массив древесины стальных пластинах. Проведенные пилотные испытания предложенного способа соединения подтвердили его жизнеспособность. Однако известные нормативные методики расчета соединений деревянных конструкций на клеенных элементах не дают ответа на вопрос об определении несущей способности узловых сопряжений на стальных пластинах. Отсутствуют и правила конструирования таких соединений, а также какие-либо экспериментальные данные по этому вопросу.

В результате теоретического расчета получено точное аналитическое решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) соединения клеенной пластины при ее выдергивании из массива древесины. Расчетная схема теоретического исследования НДС соединения пластин с древесиной приведена к плоской деформации: полуполоса, нагруженная на торце сосредоточенной силой. Описано точное, ранее отсутствующее, решение краевой проблемы теории упругости на основе разложений по функциям Фадля-Папковича. В программных комплексах APMCivilEngineering и ANSYS создана и рассчитана конечно-элементная модель экспериментального образца, учитывающая анизотропию древесины и наличие клеевой композиции между стальной пластиной и древесиной. Получены значения компонентов НДС соединения при нагрузке, соответствующей моменту разрушения экспериментального образца. Отмечена хорошая качественная и количественная сходимости результатов модельных экспериментов, выполненных в различных программных комплексах и подтвержденных натурными испытаниями. На основе факторного анализа, проведенного на матрице исследования в ПК ANSYS, определены качественные и количественные обусловленности компонентов напряженно-деформированного состояния соединения.

На основе проведенных экспериментально-теоретических исследований выявлены перспективы и возможности применения соединений указанного типа в узлах в широком диапазоне узловых сопряжений деревянных конструкций. Приведены конкретные конструктивные решения узлов на клеенных стальных пластинах и наиболее значимые результаты испытаний растянутого стыка и опорного узла фермы. Получена формула для инженерного расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах.

Ключевые слова: методика расчета, стальная пластина, клей, древесина, соединение, узел, аналитический расчет, численные исследования, конечно-элементная модель, напряженно-деформированное состояние, прочность, жесткость, экспериментальные исследования, расчет

Древесина была, есть и будет являться основным возобновляемым строительным материалом, конструкции из которого постоянно совершенствуются [1]. Новый виток развития деревянного домостроения в XXI веке характеризуется, в том числе, применением в узловых соединениях клеенных металлических элементов. Одним из наиболее эффективных видов жестких соединений элементов деревянных конструкций является устройство стыков с помощью наклонно клеенных в древесину стержней из арматуры периодического профиля и стальных пластин системы ЦНИИСК [2]. Соединения характеризуются высокой прочностью, жесткостью и защищенностью клеенных стержней от внешних воздействий среды, в том

числе, от огневого воздействия. Стык универсален и дает возможность использовать этот вид соединения при работе древесины на растяжение, сжатие, изгиб в различных сочетаниях нагрузжений, в том числе, в соединении с другими конструкционными материалами.

Нашли свое применение в сопряжениях балочных конструкций и жесткие узлы на клеенных металлических шайбах и накладках [3], [4].

Еще более широкие возможности для дальнейшего конструирования стыков с различным назначением открываются в случае применения клеенных в деревянные элементы стальных пластин, работающих на выдергивание. Это позволило бы применять в стыках унифицированные пластинчатые элементы, снизить рас-

ход металла за счет возможной оптимизации геометрической формы [5]. Однако, на настоящий момент какие-либо сведения о методиках расчёта соединений такого типа в нормативно-технической литературе отсутствуют.

В технической литературе имеются сведения об экспериментах на выдергивание гладких пластин из массива древесины, закончившихся неудачно с точки зрения прочности соединения из-за недостаточной адгезии по контакту «клей-металл». Однако сведения об экспериментах с применением пластин с развитой поверхностью, позволяющих, подобно стержням из арматуры периодического профиля, увеличить адгезию клея со стальным элементом соединения, в литературе отсутствуют. Авторами были проведены предварительные эксперименты на двусторонних образцах, показанных на рис. 1, свободные концы пластин которого закреплялись в захваты испытательной машины.

Пилотные испытания на выдергивание пластин из стали Ст3пс, вклеенных на эпоксидную композицию между брусками из сосны 2-го сорта показали жизнеспособность соединения. В частности, несущая способность клеевого соединения при нанесении на поверхности пластины 5 миллиметровой толщины пазов и надрезов глубиной 1 мм оказалась соизмерима с несущей способностью пластины. Результаты предварительных испытаний [6] позволили перейти к детальному изучению напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальных пластин с древесиной при их выдергивании-продавливании с целью разра-

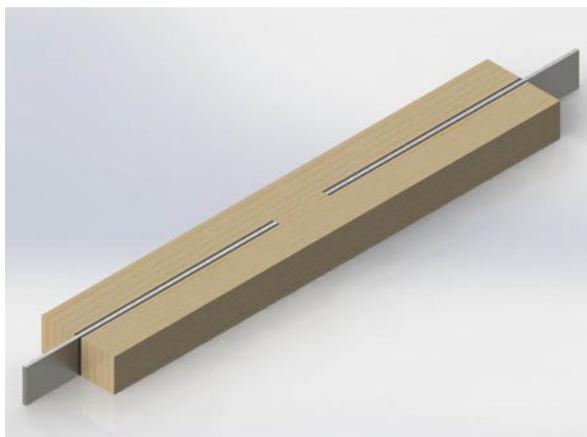


Рисунок 1. Общий вид образца для натурных испытаний

ботки инженерной методики расчета узлов деревянных конструкций на основании теоретических и экспериментальных исследований.

Теоретических подходов к решению задач на выдергивание стержней из массива достаточно много и все они основаны на различного рода допущениях. Точное аналитическое решение задачи по определению НДС соединения вклеенной пластины при ее выдергивании из массива древесины в трехмерной постановке на сегодняшний день отсутствует. Однако, если из реальной трехмерной конструкции (рис. 1 а) вырезать двумя параллельными горизонтальными плоскостями пласт соединения единичной толщины (рис. 1 б), полагая, что в нем реализуется плоская деформация, и рассмотреть более простую периодическую задачу (рис. 1 в), в которой интересующая нас область расположена между штрих-пунктирными линиями, то, в силу принципа Сен-Венана, решение такой задачи не приведет к существенной погрешности в области, прилегающей к ребру (стальной полосе), при условии достаточной ширины деревянного бруса. Кроме этого, вместо конечной пластины можно рассматривать полубесконечную, когда ее длина, по крайней мере, вдвое больше ширины, что соответствует реальной расчетной схеме.

Полученные расчетные схемы плоской деформации относятся к краевой задаче теории упругости для конечных канонических областей с угловыми точками границы и ребрами жесткости. Аналитические решения такого рода задач в виде разложений по функциям Фадля-Папковича [7] были получены совсем недавно [8], [9]. Применение этого обобщенного подхода для решения поставленной задачи по оценке НДС клеевого соединения стальной пластины с древесиной обусловлено, несмотря на сложность расчета, следующими соображениями. Во-первых, эти решения – точные, во-вторых, и это самое главное, рассмотренная модель допускает обобщения в рамках метода. В частности, при решении учтена трехмерность задачи, а полученные результаты позволили сформировать представление о напряженно-деформированном состоянии соединения при выдергивании стальной пластины из массива древесины.

В последние годы конструкции такого типа в основном рассчитываются методом конечных элементов [10]. Для изучения НДС клеевого

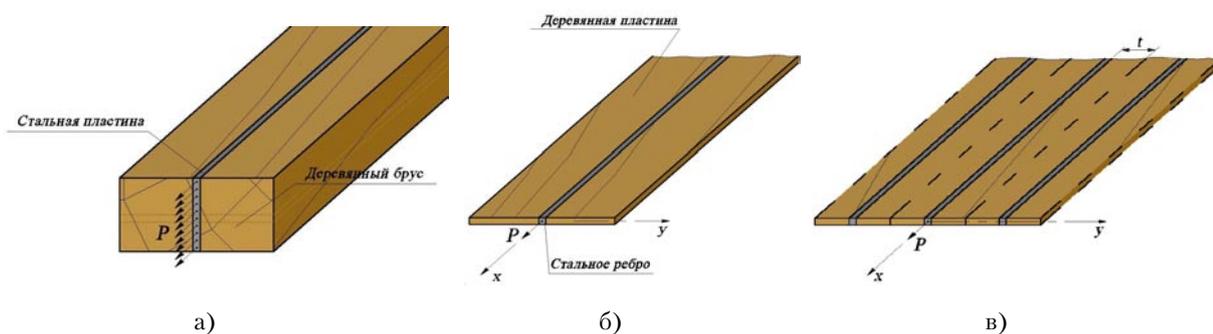
Руднев И.В., Жаданов В.И. Методика расчета соединений элементов деревянных конструкций

соединения стальных пластин с древесиной авторами созданы конечно-элементные модели экспериментального образца в программных комплексах APM Civil Engineering [11] и ANSYS [12]. Узлы конечно-элементной сетки в зоне контакта компонентов соединения приняты абсолютно жесткими, что соответствует работе соединения в упругой области. В расчет введены физико-механические характеристики материалов, примененных при проведении экспериментальных исследований. Результаты вычислений наиболее значимых для соедине-

ния параметров НДС приведены ниже в виде изокарт (рис. 3, 4).

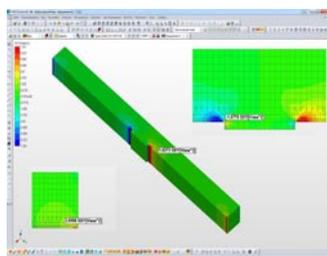
Значения основных компонентов НДС соединения, подсчитанные в ПК APM Civil Engineering и ANSYS, совпадают с точностью до 1 %, что свидетельствует, в том числе, о корректности построения конечно-элементных моделей. При этом результаты аналитического и численного методов расчета также хорошо коррелируются между собой.

Факторный анализ, проведенный на матрице исследования в ПК ANSYS, позволил

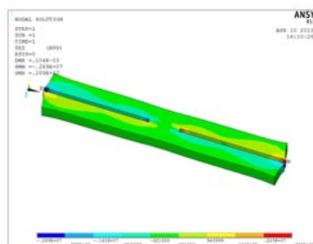


а) трехмерная задача; б) задача плоской деформации для конечных канонических областей; в) периодическая задача плоской деформации

Рисунок 2. Расчетные схемы задач на выдергивание вклеенного стержня из древесины

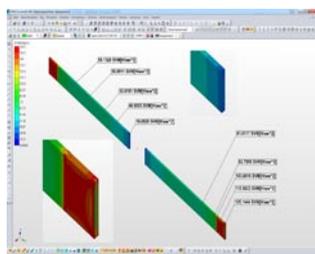


а) САПР АРМ СЕ

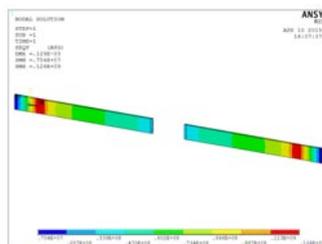


б) ПК ANSYS

Рисунок 3. Карты распределения касательных напряжений в бруске



а) САПР АРМ СЕ



б) ПК ANSYS

Рисунок 4. Карты распределения эквивалентных напряжений в пластине

определить качественные и количественные обусловленности компонентов напряженно-деформированного состояния соединения. Количественная обусловленность зависимых параметров определялась по вкладам аргументов. Наиболее значительные вклады 51-89 % на различные компоненты напряжений оказывает толщина пластины, увеличение которой приводит к их снижению. Влияние толщины клеевой композиции значительно меньше (вклады 9-16%). Однако, из результатов выполненного факторного анализа, модельного эксперимента и известных исследований, результаты которых легли в основу рекомендаций СП 64.13330.2011, следует, что влияние уменьшения толщины клея на прочность и деформативность соединения, начиная с 3 мм до 0,5 мм, стремится к нулю. Поэтому, изучение влияния толщины клея на компоненты НДС и разрушение соединения авторы позволили себе опустить, а для устранения возможности непрочности, толщину композиции для соединения стальных пластин с древесиной рекомендовано принимать в соответствии с указанным сводом правил.

Наиболее неопределенным, с точки зрения вкладов в значения контролируемых компонентов напряжений, является площадь клеенной части пластины, зависящая в свою очередь от ее ширины и длины клеенной части. Для выявления влияния зависимости компонентов НДС от площади клеенной части были проведены несколько серий экспериментов до разрушения соединения (более 300 зачетных опытов) с варьируемыми длиной и шириной клеиваемой части пластины. Результатом проведения экспериментов стали выявленные закономерности, справедливые при ширине пластин в пределах от 40 до 100 мм:

– несущая способность клеевого соединения древесины с пластинами на выдергивание соизмерима с несущей способностью других компонентов соединения при условии развития поверхности пластин для обеспечения необходимой адгезии по поверхности «сталь-клеевая композиция» и соблюдения технологических требований при изготовлении соединений;

– характер разрушения 85% образцов со сквозными пазами произошло от скалывания древесины, начинавшееся в начале и конце клеенной стержня;

– несущая способность у 15% образцов, разрушившихся отрывом клеевой композиции от поверхности пластин на 3-5% выше средне-статистической несущей способности образцов, разрушившихся от скалывания древесины;

– развитие поверхности пластин пазами с углом наклона к продольной оси пластины в 45-55° позволяет достичь максимальной несущей способности;

– увеличение длины клеенной части пластин от 2b до 4b приводит к увеличению несущей способности соединения на 80-85%, от 4b до 8b – в среднем на 25-30%, дальнейшее увеличение длины клеенной части не приводит к увеличению несущей способности соединения более чем на 10%;

– характер распределения и значения напряжений по длине элементов соединения, полученный в программных комплексах APM Civil Engineering и ANSYS, соответствует экспериментальным данным, полученным как в ходе эксперимента, так и в аналогичных исследованиях соединений на стальных клеенных стержнях круглого сечения [6 Пинайкин].

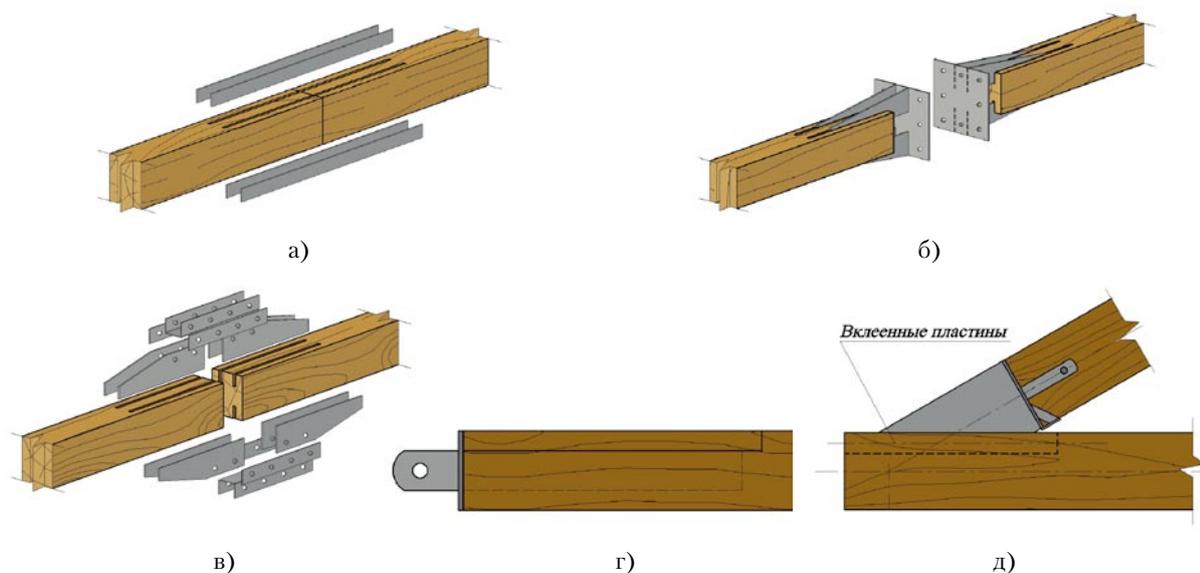
Расчеты, выполненные на параметрической модели соединения в ПК ANSYS, показали, что изменение геометрических и конструктивных параметров соединения, таких как длина клеенной части, толщина, ширина и варианты механической обработки пластин, толщина клеевой композиции, при постоянной толщине бруса и физико-механических характеристиках материалов позволяют снизить значения напряжений, вызывающих разрушение клеевого соединения пластины с древесиной и, как следствие, использовать предложенный тип соединения в узлах деревянных конструкций.

Диапазон применения соединений на клеенных стальных пластинах достаточно широк. Они могут быть применены в узловых соединениях ферм, арок, блок-ферм, пространственных модулей, шатровых конструкций и др., как при проектировании новых зданий и сооружений различного назначения, так и при усилении деревянных конструкций. На рис. 5 показаны варианты разъемных и неразъемных узловых соединений, с использованием клеенных в древесину пластин, работающих на выдергивание.

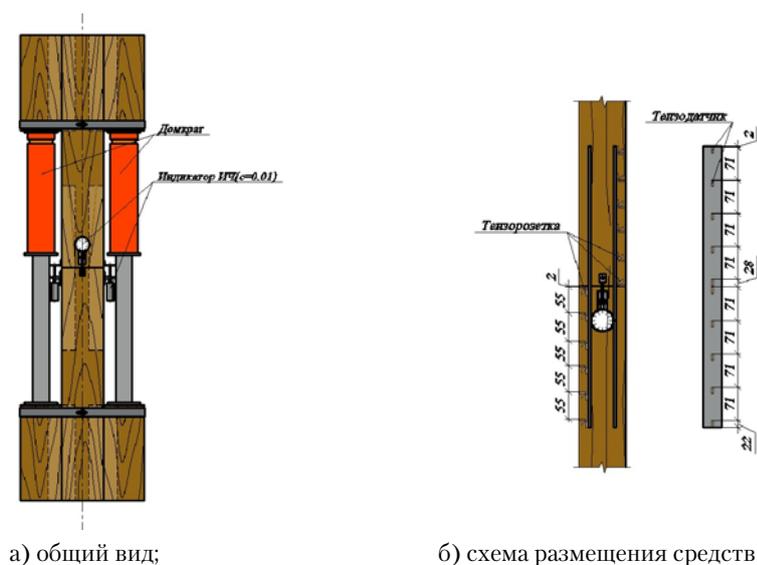
Целью экспериментальных исследований узловых соединений на стальных клеенных

пластинах при действии кратковременных нагрузок было определено их фактической прочности и жесткости. Для чистоты эксперимента на растяжение испытывался базовый неразъемный стык (рис. 5а), напряженно-деформированное состояние которого не зависло от соединительных элементов. Прикладываемая растягивающая нагрузка передавалась на стыкуемые брусья через четыре центрально-симметрично вклеенные пластины. Для определения касательных напряжений в брусе приклеивались тензорозетки

ки в пяти сечениях по длине вклеенной части между пластинами, а также между пластиной и кромкой бруса. В этих же сечениях образца продольно приклеивались к пластине, с развитыми пазами поверхностями, одиночные тензодатчики. Нагружение проводилось насосной станцией с двумя параллельно включенными домкратами. Деформации стыка измерялись индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм. Схемы испытательной установки и размещения тензодатчиков показаны на рис. 6.



а) неразъемный стык; б), в) разъемный стык; г) стык структурных покрытий; д) опорный узел фермы
 Рисунок 5. Варианты узловых соединений деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах



а) общий вид; б) схема размещения средств измерения

Рисунок 6. Установка для испытаний растянутого стыка

Результаты испытания неразъемного растянутого стыка с расстоянием между осями пластин, равному удвоенному ранее полученному расстоянию от оси пластины до кромки бруса, показали, что средние значения разрушающей нагрузки составило 91,1% от расчетной нагрузки, принятой как сумма разрушающих нагрузок от каждой из 4-х пластин.

В процессе испытаний выявлено, что с уменьшением расстояния между пластинами в два раза значение разрушающей нагрузки снизилось до 84,6% от расчетного. При этом превышение касательных напряжений у торцов стыка составило соответственно 2,1 % и 9,6 %.

В то же время с увеличением расстояния между пластинами и нагрузки увеличивается неравномерность деформаций торцов пластин доходящей до 20% в зависимости от типоразмера, что отмечалось у 70% изготовленных образцов. Следует отметить, что у части образцов расхождение в перемещениях торцов пластин было в пределах 2-4%. Разрушение соединений происходило хрупко, в результате скалывания древесины в зоне контакта с клеевой композицией без отрыва по контакту «клей-металл», что объясняется наличием полуглухого паза в бруссе, в отличии от части образцов, испытанных при исследовании клеевого соединения.

Испытания опорных стыков ферм проводилось по аналогичной методике с применением средств натурной тензометрии для определения компонентов НДС в древесине и пластинах [13], [14]. Результаты испытаний показали, что разрушение стыков происходило хрупко, от скола древесины в зоне контакта с клеевой композицией. Значения основных параметров напряженно-деформированного состояния, а также значения разрушающей нагрузки отличались от скорректированных по результатам испытаний растянутого стыка расчетных значений на 2-3%. Проведенные испытания узлов подтвердили их достаточную прочность и жесткость. Так же подтвердилась возможность распространения данных, полученных при испытании отдельных клеевых соединений стальной пластины с древесиной, на натурные конструкции. При этом, в расчетах узловых соединений, включающих несколько параллельно работающих пластин, необходимо учитывать выявленную неравномерность загрузжения пластин.

С учетом этого факта расчетную несущую способность T , МН соединения на стальных клеенных пластинах следует определять по формуле:

$$T \leq n R_{ск} 2bl kt kb kl kn, \quad (1)$$

где $R_{ск}$ – расчетное сопротивление древесины скалыванию, МПа, определяемое по поз. 5 г таблицы 3 СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции;

n – количество пластин в соединении;

b – ширина клеиваемой пластины, м, в диапазоне от 0,04 м до 0,1 м;

l – длина клеенной части пластины, м, которую следует принимать по расчету, но не менее b и не более $10b$;

kt – коэффициент снижения несущей способности клеевого соединения в зависимости от толщины пластины;

kb – коэффициент снижения несущей способности клеевого соединения в зависимости от ширины пластины;

kl – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по длине клеенной части пластины;

kn – коэффициент, учитывающий взаимное влияние пластин и возможную неравномерность распределения нагрузки между ними.

Следует отметить, что экспериментально-теоретические исследования проведены с соблюдением требований и рекомендаций нормативно-технической литературы [15], [16].

Выводы:

1. Разработанная методика расчета напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальных пластин с древесиной при их работе на выдергивание подтверждена адекватными результатами, полученными в результате теоретических и экспериментальных исследований.

2. Предложенная методика в полной мере позволяет проектировать соединения элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах, работающих на растяжение-продавливание.

3. В результате обобщения данных теоретических и экспериментальных исследований многофакторной зависимости НДС клеевого соединения стальных пластин с древесиной

получена формула для инженерного расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах.

10.04.2015

Список литературы:

1. Ковальчук, Л.М. Деревянные конструкции – проблемы и решения / Л.М. Ковальчук // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2001. – № 10. – С. 13–14.
2. Турковский С.Б. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК) – Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. / Под общей редакцией С.Б. Турковского и И.П. Преображенской. – М.: РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ». 2013. – 308 с.
3. Патент 144669 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Жёсткий узел сопряжения элементов балочных конструкций на клеенных шайбах и стальных накладках / Вдовин, В.М., Ишмаева, Д.Д.; патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУАС – №2014103649/03; заявл. 03.02.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. №24. – 2с.
4. Вдовин, В.М. Клеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: моногр. / В.М. Вдовин, М.В. Аришкин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
5. Руднев И. В., Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / И. В. Руднев, В. И. Жаданов, С. В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск: – 2014. – №4. – С. 5-8 – ISSN 0536-1052
6. Руднев И.В., Жаданов В.И., Дмитриев П.А. К вопросу применения клеенных металлических пластин в соединениях деревянных конструкций // 22-23 мая 2014г. – Архангельск: Изд-во ООО «Типография «ТОЧКА», 2014. С 378-383.
7. Папкович П.Ф. Об одной форме решения плоской задачи теории упругости для прямоугольной полосы // Доклады АН СССР. 1940. Т. 27. № 4
8. Коваленко М.Д., Шибирин С.В. Полуполоса под действием сосредоточенной силы. Точное решение. Доклады РАН, Т.356, №6, С.763-765
9. Коваленко М. Д., Меньшова И. В. Аналитические решения двумерных краевых задач теории упругости в конечных областях с угловыми точками границы // Чебоксары : изд-во Чуваши. гос. пед. ун-та, 2014. 123 с
10. Руднев, И.В. Применение CAD/CAE систем в расчетах на прочность соединений элементов строительных конструкций [Электронный ресурс] / И.В. Руднев, Г.А. Столповский // «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры»: материалы всерос. науч.-метод. конф., 3-8 февраля 2014 г. / Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2014. – С. 441-446 – ISBN 978-5-4417-0309-3.
11. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
12. Замрий, А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде APM Structure 3D / А.А. Замрий. – М.: Издательство АПМ. 2004. – 208 с.
13. Жаданов В.И., Калинин С.В. Экспериментальные исследования дерево-металлических балок со стенкой из стального профилированного листа при поперечном изгибе. – Вестник ТГАСУ, 2012, №3. – с. 117-125.
14. Вдовин, В.М. Экспериментальные исследования жёстких узлов балочных структур из клеёных деревянных элементов / В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – с.130-137.
15. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная версия СНиП II-25-80. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». М.: 2011. – 87 с.
16. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.:Стройиздат, 1981. – 41 с.

Сведения об авторах:

Руднев Игорь Владимирович, инженер кафедры строительных конструкций
Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, ауд. 3126, тел.: 8(3532)912123, e-mail: ru403@mail.ru

Жаданов Виктор Иванович, аведующий кафедрой строительных конструкций
Оренбургского государственного университета

460018, г. Оренбург, пр. Победы 13, ауд. 3127, тел.: 8(3532)912123, e-mail: organ-2003@bk.ru