

Численное моделирование нелинейной жёсткости соединения древесины со сталью

Д.С. Маметьев¹, С.Ф. Дьяков¹, Е.Б. Еренчинова²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

²Тюменский индустриальный университет

Аннотация: Статья посвящена проблеме численного моделирования нелинейной жёсткости соединений «сталь–древесина перекрёстноклеёная (ДПК)». Отмечается, что существующие инженерные подходы неточно описывают податливость узлов, критически важную для расчёта каркасов. Предложена методика, использующая модель когезионных зон в Ansys. Методика верифицирована натурными испытаниями на выдёргивание стальных анкеров из образцов ДПК. Проведена калибровка параметров модели (пиковое напряжение, энергия разрушения, начальная жёсткость). Численная модель с высокой точностью (расхождение 4–6 %) воспроизвела экспериментальную диаграмму «усилие–перемещение». Результаты подтверждают, что методика позволяет корректно учитывать нелинейную податливость соединений в расчётах конструкций из ДПК.

Ключевые слова: древесина перекрёстноклеёная, узловая жёсткость, узел соединения, нелинейность.

Введение

Древесина перекрестноклееная (ДПК) – изготовленная заводским способом деревянная массивная плита, состоящая не менее чем из трех ортогонально склеенных слоев из цельных или сращенных по длине на зубчатое соединение досок и предназначенная для использования в несущих и ограждающих строительных конструкциях. Такая конфигурация обеспечивает повышенную плоскостную жёсткость и размерную стабильность панелей, что делает ДПК пригодной для работы в качестве несущих диафрагм перекрытий и стеновых элементов в зданиях различной этажности. Зарубежная практика демонстрирует технологическую зрелость решения: в Европе реализованы высотные объекты на основе ДПК, включая норвежскую башню Mjøstårnet (порядка 85 м), в Северной Америке — общежитие Brock Commons Университета Британской Колумбии (около 53 м). В РФ развитие идёт более сдержанно: пока известны единичные примеры среднеэтажной застройки из ДПК, в том числе жилой комплекс в г. Сокол высотой 15 м. Эти данные

указывают, что конструктивная система на основе ДПК применима в широком диапазоне функциональных назначений и высот, а локальная практика находится на этапе масштабирования зарубежного опыта к отечественным нормам и условиям [1].

ДПК относительно новый для России материал, о чём говорит представленная на рис. 1 диаграмма, отражающая количество нормативных документов, в которых он упоминается. В данной выборке отражены государственные стандарты и своды правил. За последние 5 лет их количество с 4 выросло до 20, что говорит о росте интереса государства к данному материалу.

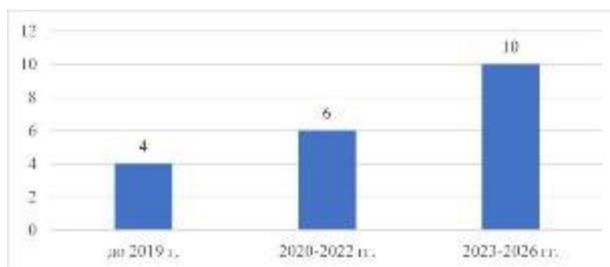


Рис. 1. – Количество нормативных документов РФ (государственные стандарты, своды правил), в которых упоминается ДПК

Исследования в области ДПК в основном сосредоточены на поведении и расчётных характеристиках самих панелей: уточняются геометрические и жёсткостные параметры сечений и подходы к их определению [2], рассматриваются вопросы деформативности и влияния ортотропии при работе панелей перекрытий [3], а также отрабатываются постановки и приёмы их численного моделирования [4]. При этом в смежных областях, например, в вопросах усиления цельнодеревянных балок стальной арматурой, накоплен значительный, но преимущественно экспериментальный, опыт [5].

Напротив, исследования узловых соединений ДПК представлены фрагментарно и, как правило, в виде частных экспериментальных постановок, которые демонстрируют значимую вариативность несущей способности в зависимости от принятого решения. В работе [6] показано, что даже для

вопроса совместной работы деревянной плиты перекрытия с конструкцией пола ключевым оказывается частное конструктивное решение контакта: в зависимости от наличия/отсутствия сцепления «плита–цементно-песчаная стяжка» авторы прямо выделяют две разные расчётные схемы, а несущая способность по сдвигу фиксируется экспериментом и существенно зависит от способа усиления зоны контакта. В работе [7] поведение соединения целенаправленно формируется подбором геометрии и свойств элементов (диаметр/толщина трубы, параметры зоны соединения), выполняется чувствительный анализ влияния параметров и оптимизация под заданную несущую способность и требуемые показатели жёсткости/пластичности, причём модель калибруется по экспериментальным данным. Наиболее масштабной и близкой по тематике статьи является работа [8], где авторы выполняют серию испытаний нескольких типовых узлов на винтах (внахлёст, с прокладкой, с накладкой, встык, угловой) с вариацией числа слоёв ДПК и диаметра/типа винтов, определяют несущую способность, жёсткость и показатель пластичности для каждого решения и отдельно подчёркивают отсутствие в действующих нормах данных/методики, позволяющих унифицированно учитывать пластическую работу и характер разрушения соединений.

Ключевым фактором работоспособности многоэтажных каркасов из ДПК является конструктивное исполнение узловых соединений. Наиболее распространённым видом крепежа для ДПК являются стальные винты. Именно локальная механика «дерево–металл/дерево–дерево» определяет реальную жёсткость, несущую способность и податливость системы; одна и та же пара элементов при разных вариантах соединения может демонстрировать существенно различающийся характер работы. В действующей нормативной базе по ДПК в РФ отсутствует регламентированная методика расчёта несущей способности узлов с учётом специфики многослойного ортотропного

материала и нелинейной деградации сцепления на контактной поверхности. Действующие нормативные документы (в т.ч. зарубежные) фиксируют порядок определения несущей способности и жёсткости узлов испытаниями и тем самым формируют экспериментальную базу для валидации расчётов, однако сами численные процедуры учёта податливости пока отданы на усмотрение разработчика расчётной схемы [9, 10]. В результате инженерная практика опирается либо на заведомо жёсткие идеализации, либо на эмпирические коэффициенты, чувствительные к конкретному узлу и режиму нагружения.

Такая диспропорция обосновывает потребность в создании целенаправленной методики численного учёта податливости соединений ДПК, верифицируемой по натурным испытаниям и совместимой с современными САПР.

Материалы и методы

Для численного описания нелинейной работы соединения стали с древесиной используется модель Cohesive Zone Model (CZM) в среде Ansys Mechanical. Она позволяет математически описать и численно воспроизвести билинейное поведение податливого узла, избегая как жестких идеализаций, так и недостаточной универсальности эмпирических коэффициентов. В то время как традиционные методы предполагают мгновенное разрушение при достижении критических условий, CZM моделирует разрушение как прогрессивный процесс деградации сцепления, происходящий в ограниченной области, называемой когезионной зоной [11], расположенной перед фронтом разрушения, за счет создания особых конечных элементов (КЭ) на плоскостях соединяемых элементов.

Фундаментальным компонентом модели CZM является закон, определяющий взаимосвязь между вектором сцепления на межфазной поверхности и вектором относительного разделения. Этот закон, именуемый

Traction-Separation Law (далее – TSL), феноменологически описывает полный процесс разрушения адгезионной связи. Для описания этого процесса широко используется, в частности, билинейная форма (рис. 2).

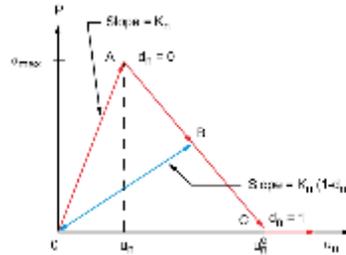


Рис. 2. – Билинейная зависимость величины контактного проскальзывания от контактного напряжения

Данная модель аппроксимирует поведение интерфейса двумя линейными участками:

1) Упругое поведение (участок OA). На начальном этапе деформирования, до инициации повреждения, связь между сцеплением и разделением является линейно-упругой и характеризуется начальной когезионной жесткостью ($K_{n(t)}$). По мере увеличения разделения, сцепление возрастает до достижения максимального или критического значения (σ_{max} или τ_{max}), в этот момент происходит инициация повреждения.

2) Развитие повреждения (участок AC). После достижения пикового сцепления, материал вступает в фазу смягчения или эволюции повреждения. На этом этапе происходит необратимая деградация несущей способности контактной поверхности. Сцепление линейно снижается по мере дальнейшего увеличения разделения. Разрушение считается завершенным, когда сцепление падает до нуля.

Ключевым параметром, характеризующим TSL, является критическая энергия разрушения G_{ct} . Она определяется как полная работа, необходимая для полного разделения единицы площади контактной поверхности, и в

графическом представлении TSL эквивалентна площади под всей кривой "сцепление-разделение" (треугольник OAC для билинейной модели).

В Ansys существуют два принципиально различных подхода к применению модели CZM, условно разделяемых на Interface Delamination (ID) и Contact Debonding (CD). Фундаментальное различие между этими инструментами заключается в их конечно-элементной реализации, способе определения начальной упругой контактной жесткости и поведении на стадии работы соединения [12].

Инструмент ID базируется на явном введении в расчетную модель специализированных интерфейсных КЭ. Эти элементы, как правило, имеют нулевую толщину и встраиваются в сетку между поверхностями потенциального разрушения, требуя для корректной работы абсолютного совпадения узлов на смежных границах, что делает данный инструмент почти неприменимым к сложным моделям, состоящим из большого количества объёмных КЭ.

Инструмент CD, напротив, реализует CZM в рамках контактной механики. Вместо специализированных интерфейсных элементов, данный подход использует стандартные КЭ (например, CONTA171 - CONTA177), для которых задается специальное склеенное (bonded) поведение с возможностью отслаивания. Это отслаивание (debonding) описывается отдельным набором когезионных параметров, которые определяют критерии инициации и развития повреждения. Начальная жесткость "склеенного" интерфейса (до инициации повреждения) определяется вычислительной жесткостью контакта, которая является параметром используемого контактного алгоритма (Pure Penalty или Augmented Lagrange). Когезионный закон TSL, по сути, активируется только для описания фазы деградации после достижения максимальных напряжений. Кроме того, CD использует стандартные контактные алгоритмы для обработки сжатия, что корректно предотвращает

взаимное проникновение поверхностей. После полного разрушения когезионной связи (полной деградации), поведение интерфейса автоматически переключается на стандартный контакт (например, с учетом трения, если оно определено).

В данной работе расчёты выполнены с помощью инструмента CD.

Для корректной работы модели необходимо предварительно определить контактную пару, используя тип контакта Bonded (склеенный) или No Separation (без отрыва), и применить в качестве формулировки Augmented Lagrange или Pure Penalty. Также необходимо указать начальную когезионную жёсткость контакта K_n , определяемую по результатам испытаний.

Инструмент CD позволяет описывать разрушение по трем основным видам, которые определяются направлением разделения поверхностей [13]:

1) Mode I (Отрыв). Разрушение происходит перпендикулярно плоскости контактной поверхности, когда доминирующим фактором является нормальное напряжение;

2) Mode II (Сдвиг). Разрушение происходит в плоскости контактной поверхности, когда доминирующим фактором является касательное напряжение;

3) Mixed-Mode (Смешанный режим). Этот режим описывает ситуацию, когда разрушение контактной поверхности происходит при одновременном действии как нормальных, так и касательных напряжений.

Для задания билинейной модели на основе критической энергии разрушения необходимо определить следующий набор материальных констант:

1) Максимальное эквивалентное нормальное/касательное контактное напряжение. Это пиковое значение сцепления, которое контактная поверхность выдерживает до начала деградации.

2) Критическая энергия разрушения для нормального/касательного скольжения. Энергия, необходимая для полного разрушения единицы площади контактной поверхности.

3) Начальная жесткость контактной поверхности.

Для получения корректных значений данных параметров были проведены испытания на выдергивание стального анкера из двух трёхслойных образцов ДПК (рис. 3, а) из сосны 2 сорта. В качестве анкеров использованы шурупы сантехнические по DIN 571 длиной 80 мм и диаметром 10 мм, которые были вмонтированы в предварительно просверленные отверстия в телах образцов ДПК. Приложение нагрузки производилось непрерывно со скоростью 8 мм/мин в соответствии с ГОСТ 33082-2024 с помощью измерителя адгезии ПСО-МГ4 (рис. 3, б), фиксирующего зависимость перемещений от прикладываемого выдергивающего усилия от момента начала приложения нагрузки до момента отказа соединения.

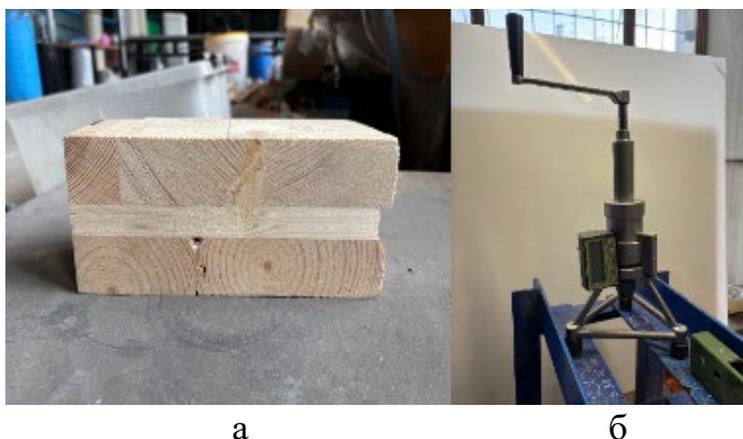


Рис. 3. – а – Образец ДПК, б – Измеритель адгезии ПСО-МГ4

Для моделирования нелинейных свойств древесины принята модель Bilinear Isotropic с пределом текучести 33 МПа, которая является наименее трудоёмкой с точки зрения её реализации и в то же время позволяет с высокой точностью моделировать напряжённо-деформированное состояние реальной древесины [14]. В таблице №1 представлены характеристики древесины, принятые по СП 64.13330.2017.

Таблица № 1

Характеристики древесины образцов

№ п/п	Характеристика	Единица измерения	Значение
1	Среднее значение модуля упругости вдоль волокон	МПа	10000
2	Среднее значение модуля упругости поперек волокон	МПа	400
3	Коэффициент Пуассона поперек волокон при напряжениях, направленных вдоль волокон	-	0,45
4	Коэффициент Пуассона вдоль волокон при напряжениях, направленных поперек волокон	-	0,018
5	Модуль сдвига относительно осей, направленных вдоль и поперек волокон	МПа	500
6	Плотность	кг/м ³	500
7	Предел текучести	МПа	33 [14]

Экспериментальная установка представлена на рис. 4.



Рис. 4. – Экспериментальная установка

При данном виде нагружения на контактной поверхности существенно преобладают касательные напряжения, так как нагрузка приложена вдоль оси болта, в модели CD применим Mode II.

Максимальное эквивалентное тангенциальное контактное напряжение τ_{max} , МПа, определяется на основании максимального выдергивающего усилия F_{max} , кН, полученного экспериментально, по формуле (1):

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (1)$$

где A – площадь контактной поверхности, определяемая как боковая площадь поверхности цилиндра по формуле (2):

$$A = \pi dH \quad (2)$$

где d – диаметр болта; H – высота, на которую тело болта погружено в образец ДПК (80 мм).

Критическая энергия разрушения G_{ct} определяется как площадь треугольника ОАС по формуле (3):

$$G_{ct} = \frac{1}{2} \tau_{max} u_t^c \quad (3)$$

где u_t^c – перемещение головки болта при завершении отслоения

В Ansys Mechanical создана модель, состоящая из трёхслойного образца ДПК и болта. В качестве граничного условия применено жесткое закрепление нижней грани образца. В качестве нагрузки линейно приложено перемещение головки болта.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов по определению разрушающей нагрузки при выдергивании стальных болтов из ДПК представлены на рис 5. На вертикальной оси представлены значения выдергивающего усилия, на горизонтальной – перемещение головки болта.

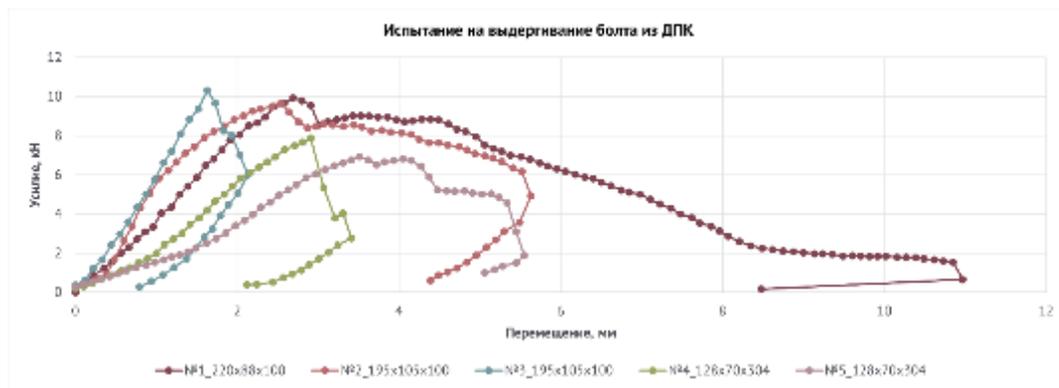


Рис. 5. – Зависимости перемещений головки болта от прикладываемого выдергивающего усилия

Представленные на рис. 5 кривые рассматривались не как основа для статистического вывода о несущей способности соединения, а как опорные диаграммы для идентификации параметров когезионного интерфейса и валидации численной постановки. Исследование носило калибровочный характер, поэтому объем испытаний сознательно ограничен пятью образцами. В этом смысле представленные графики следует трактовать как «эталон» для калибровки модели, а не как нормативные значения.

Для увязки эксперимента с модельными константами CD применена условная треугольная аппроксимация зависимости перемещения от усилия для испытания 2, согласованная с билинейной формой TSL (рис. 6).

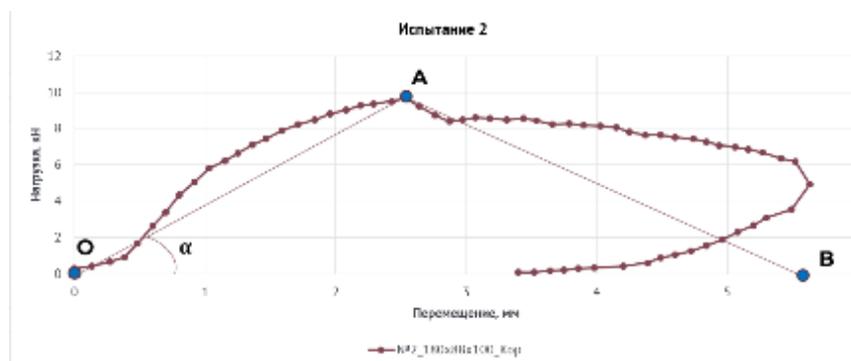


Рис. 6. – Аппроксимированная билинейная зависимость перемещений головки болта от прикладываемого выдергивающего усилия

Из представленной на рис. 6 билинейной зависимости получены параметры:

1) максимальное усилие F_{max} , кН определено как координата Y вершины А:

$$F_{max} = 9,66 \text{ кН}$$

Максимальное эквивалентное касательное контактное напряжение при этом усилии определено по формуле (1):

$$\tau_{max} = \frac{9,66}{25,132} = 0,384 \left(\frac{\text{кН}}{\text{см}^2} \right) = 3,844 \text{ (МПа)}$$

2) предельное разделение контактных поверхностей к моменту потери несущей способности, u_t^c , мм, определено как основание треугольника ОВ

$$u_t^c = 5,63 \text{ мм}$$

3) критическая энергия разрушения, G_{ct} , $\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$, определена по формуле (3) как площадь треугольника АОВ:

$$G_{ct} = \frac{1}{2} * 3,844 \text{ МПа} * 5,63 \text{ мм} = 10820 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right)$$

4) в первом приближении начальная жесткость контактной поверхности, K_t , $\frac{\text{Н}}{\text{мм}^3}$, определялась как тангенс угла α . Для его определения необходимо вычислить максимальное эквивалентное касательное контактное напряжение, τ_{max} , МПа, и величину разделения контактов при максимальном касательном напряжении, u_t , мм, она составляет:

$$u_t = 2,54 \text{ мм}$$

Начальная жесткость контактной поверхности в первом приближении составила:

$$K_t^1 = 1,51 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^3},$$

Важно отметить, что полученная величина – это глобальная податливость испытательной установки, которая включает в себя:

1) истинное относительное проскальзывание (разделение) между поверхностью стального анкера и древесиной. Именно эту локальную связь «сцепление–разделение» призван описывать инструмент CZM.

2) упругие деформации в телах, которые не относятся к контактной поверхности. Сюда входит упругое растяжение самого стального болта под действием выдёргивающей нагрузки и упругие деформации сжатия/сдвига в массиве ДПК вокруг анкера.

Данный расчет использует в качестве знаменателя полное перемещение головки болта. Таким образом, полученное значение $1,51 \frac{Н}{мм^3}$ является не локальной жёсткостью контактной поверхности, а некой эффективной или «приведённой» жёсткостью всей системы. Эта системная жёсткость по определению ниже, чем жёсткость любого из её отдельных компонентов, так как она аккумулирует в себе всю суммарную податливость. Численная модель в Ansys, напротив, разделяет эти эффекты. Модель состоит из объёмных КЭ, которые уже обладают собственной упругой жёсткостью. Инструмент СВ добавляет к ним отдельную податливость на контактной поверхности.

При задании в качестве начальной жесткости контактной поверхности значения $1,51 \frac{Н}{мм^3}$ получена зависимость перемещения головки болта от усилия, представленная на рис. 7 под легендой CZM K1.

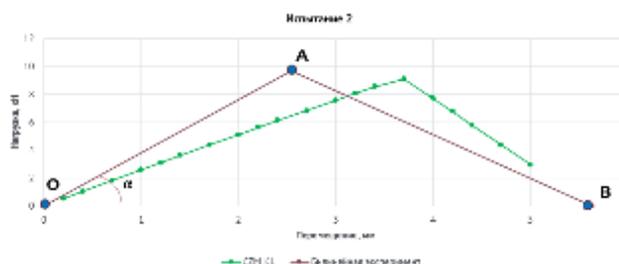


Рис. 7. – График зависимости перемещения головки болта от прикладываемого усилия до корректировки начальной жёсткости контактной поверхности в сравнении с экспериментальным графиком

В данном случае модель некорректно суммирует податливости: она учитывает податливость, уже включённую в это «приведённое» значение, и дополнительно прибавляет к ней упругую податливость самих КЭ материалов. В результате общая податливость модели оказывается завышенной, а жёсткость — заниженной, что и приводит к меньшей фактической жёсткости на диаграмме «усилие–перемещение».

Для корректной работы модели необходимо выполнить итерационную калибровку значения контактной жёсткости до тех пор, пока глобальный отклик численной модели не будет с достаточной точностью аппроксимировать экспериментальные данные. Для данного эксперимента значение жёсткости контактной поверхности $K_t^2, \frac{H}{\text{мм}^3}$, составило:

$$K_t^2 = 2,5 \frac{H}{\text{мм}^3}$$

При задании в качестве начальной жесткости контактной поверхности значения $2,5 \frac{H}{\text{мм}^3}$ получена зависимость перемещения головки болта от усилия, представленная на рис. 8 под легендой CZM K2.

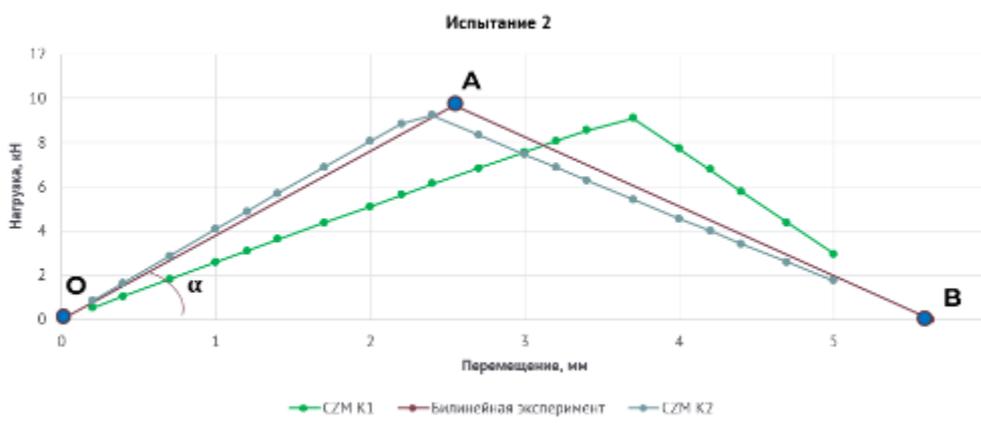


Рис. 8. – График зависимости перемещения головки болта от прикладываемого усилия после корректировки начальной жёсткости контактной поверхности в сравнении с экспериментальным графиком

Сводные результаты численного моделирования эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица № 2

Сравнительные результаты эксперимента и численного моделирования

Параметр	Эксперимент	Численное моделирование	Расхождение между параметрами, %
Максимальное выдерживающее усилие, кН	9,66	9,23	4,55
Перемещение головки болта при максимальном усилии, мм	2,54	2,4	5,67
Максимальное эквивалентное тангенциальное контактное напряжение, МПа	3,844	3,844	0

По данным табл. 2 численная модель, откалиброванная по параметрам CZM, воспроизводит ключевые характеристики выдёргивания с приемлемой точностью. Максимальное эквивалентное тангенциальное контактное напряжение совпадает с экспериментальной оценкой, что ожидаемо, поскольку этот параметр служил порогом инициирования повреждения в энергетической постановке CZM. Совокупно расхождения укладываются в типичный диапазон погрешностей измерений и численной аппроксимации, что подтверждает адекватность принятой модели для прогноза диаграммы «усилие–перемещение» и дальнейшего параметрического анализа/переноса калибровки на иные геометрии и режимы нагружения; вместе с тем расширение валидации на более репрезентативную выборку испытаний повысит статистическую достоверность выводов.

Заключение

В работе предложена и верифицирована прикладная методика учёта податливости соединений «сталь–ДПК» в расчётах каркасов, основанная на калибровке CZM по результатам выдёргивающих испытаний.

Получены следующие результаты:

– показано, что переход от «абсолютно жёстких» узлов к когезионному описанию с энергетическим законом разрушения позволяет воспроизвести форму диаграммы «усилие–перемещение» и ключевые маркеры отклика: пиковое сопротивление, перемещение при пике и постпиковую деградацию.

– численная модель после калибровки предсказывает максимальное усилие и перемещение при пике с расхождением порядка 4–6 %, что соответствует инженерной точности и подтверждает адекватность выбранной постановки.

– установлено, что начальная «штрафная» жёсткость интерфейса в Ansys не равна наклону экспериментальной диаграммы вследствие системной (глобальной) податливости узла и кинематического несоответствия между перемещением головки и средним интерфейсным скольжением; это требует целенаправленной настройки контактных жёсткостей до совпадения начального участка диаграммы.

– сформулирована рабочая процедура идентификации параметров CZM (пиковая тяга, энергия разрушения, начальные жёсткости) и переноса их в эквивалентные жёсткости соединений для последующего использования в глобальных расчётных схемах каркасов.

Практический эффект методики – снижение неопределённости в оценке жесткостных характеристик узлов и возможность провести корректный сравнительный анализ схем с учётом и без учёта податливости соединений. Ограничения исследования связаны с невысоким объёмом экспериментальных данных и одним видом нагружения (выдёргивание);

дальнейшая работа должна включать расширение серии испытаний, анализ влияния разброса свойств древесины и геометрии образцов, а также применение методики к другим типам соединений и узлов. В целом результаты подтверждают, что использование калиброванной CZM является эффективным инструментом для инженерного учёта нелинейной податливости соединений конструкций из ДПК.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «Промстройлес» за предоставленные образцы ДПК для испытаний и Научно-испытательной лаборатории «Политех-СКМ-Тест» за содействие в организации испытаний.

Литература

1. Гранёва А.В., Свириденко А.М. Перспективы и преимущества возведения многоэтажных деревянных зданий // Инженерный вестник Дона, 2024, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9120

2. Маметьев Д.С., Дьяков С.Ф. Геометрические и жесткостные характеристики сечений из перекрёстноклеёной древесины // Неделя науки Инженерно-строительного института – 2025. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. С. 448-450.

3. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона, 2022, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7690

4. Санжижапова Ц.Ц., Еренчинов С.А. Расчет CLT-панелей в программном комплексе ANSYS WORKBENCH // Universum: технические науки. 2024. №4-5. С. 36-40.

5. Есипов А.В., Лыкова Я.В., Еренчинов С.А. Экспериментальные исследования усиления цельнодеревянных балок стержневой арматурой в

растянутой зоне // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. №1. С. 83-89.

6. Мишуренко Н.А., Лезнева А.Д. Экспериментальное исследование работы соединения деревянной плиты перекрытия с конструкцией пола // Информационные и графические технологии в профессиональной и научной деятельности: сборник статей III Международной научно-практической конференции. Тюмень: ТИУ, 2019. С. 186-188.

7. Vita H.M., Tannert T. Numerical optimisation of novel connection for cross-laminated timber buildings // Engineering Structures. 2018. №175. С. 273-283.

8. Салимуллин А.Р., Смирнов П.Н. Разработка и исследование узловых соединений древесины перекрестноклееной на винтах, в том числе для многоэтажных зданий // Вестник НИЦ "Строительство". 2022. №1. С. 53-64.

9. CLT Handbook USA Edition, FPInnovations. 2019. Volume 1. 463 pp.

10. Borgström E., Fröbel J. The CLT Handbook. CLT Structures – facts and planning // Föreningen Sveriges Skogsindustrier, 2019. 186 pp.

11. Sebera V., Pečnik J.G., Azinovič B., Kramar M. Numerical modeling of wood-adhesive bond-line in mode II for spruce wood glued by various adhesives // Wood, Design & Technology. 2019. №1. Pp. 77-84.

12. Theory Reference. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc, 2024. 952 pp.

13. Санжижапова Ц.Ц., Еренчинов С.А. Применение CZM для оценки клеевых соединений // Научный лидер. 2025. №11. С. 7-10.

14. Еренчинов С.А., Ефимов А.А., Кудоманов М.В., Мартюшева А.И., Худышкина Н.Ю. Моделирование в среде ANSYS поведения древесины для оценки ее прочности в реальных конструкциях // Инженерный вестник Дона, 2025, №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10283

References

1. Granyova A.V., Sviridenko A.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2024. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2024/9120
-



2. Mametyev D.S., Dyakov S.F. Nedelya nauki Inzhenerno-stroitel'nogo instituta. Sankt-Peterburg. 2025, Pp. 448-450.
3. Rogozhina A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7690
4. Sanzhizhapova TS.TS., Yerenchinov S.A. Universum: tekhnicheskiye nauki. 2024. №4-5. Pp. 36-40.
5. Esipov A.V., Lykova YA.V., Erenchinov S.A. Akademicheskij vestnik UralNIIproyekt RAASN. 2017. №1. Pp. 83-89.
6. Mishurenko N.A., Lezneva A.D. Sbornik statey III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Tyumen. 2019. Pp. 186-188.
7. Bita H.M., Tannert T. Engineering Structures. 2018. №175. Pp. 273-283.
8. Salimullin A.R., Smirnov P.N. Vestnik NITS "Stroitel'stvo". 2022. №1. Pp. 53-64.
9. CLT Handbook USA Edition, FPInnovations. 2019. Volume 1. 463 pp.
10. Borgström E., Fröbel J. The CLT Handbook. Föreningen Sveriges Skogsindustrier, 2019. 186 p.
11. Sebera V., Pečnik J.G., Azinovič B., Kramar M. Wood, Design & Technology. 2019. №1. Pp. 77-84.
12. Theory Reference. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, Inc, 2024. 952 pp.
13. Sanzhizhapova TS.TS., Yerenchinov S.A. Nauchnyy lider. 2025. Pp. 7-10.
14. Erenchinov S.A., Yefimov A.A., Kudomanov M.V., Martyusheva A.I., Khudyshkina N.YU. Inzhenernyj vestnik Dona. 2025. №8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2025/10283

Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.

Дата поступления: 4.01.2026

Дата публикации: 3.03.2026