

УДК 694. 141. 4 : 694. 146

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЁТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ SHERPA В ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ПО МЕТОДИКЕ МКЭ

Сюй Юнь

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, e-mail: xyqh111@hotmail.com

Рассматриваются проблемы автоматизированного проектирования соединения SHERPA в деревянных конструкциях с учётом воздействия эксцентриситета по программе Solidworks Simulation 2014. Анализируются граничные условия, физико-механические и геометрические характеристики материалов, плотность и формы автоматического построения сетки, от которых зависит несущая способность соединения. В качестве примера после создания трехмерного моделирования двух металлических накладок выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния экспериментального соединения SHERPA с использованием упрощенной методики. Приводится решение задачи по определению эквивалентного напряжения, перемещения, главного напряжения и деформации соединения при воздействии на сжатие и изгиб. Показана удовлетворительная сходимость данных расчётных результатов на основе предложенных уравнений с полученными экспериментальными определениями напряженно-деформированного состояния. Подтверждена достоверность научно-исследовательской работы автора для конструкторского решения.

Ключевые слова: МКЭ, эксцентриситет, напряженно-деформированное состояние

MODELING AND CALCULATION OF THE LOAD BEARING CAPACITY OF THE CONNECTION SHERPA BY THE METHOD FEM

Xu Yun

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, e-mail: xyqh111@hotmail.com

This paper is devoted to the problems of automated design of connection SHERPA in bending in view of the eccentricity on the program Solidworks Simulation 2014. The boundary conditions, physical, mechanical and geometrical characteristics of materials, density and shape of the automatic meshing are analyzed, which have an effect on the bearing capacity of the connection. As an example, after the creation of three-dimensional modeling of two metal plates, the finite element analysis of the stress-strain state of the experimental connection SHERPA with using a simplified simulation is performed. The paper gives the solve of problem for determining the stress vonMises, displacement, the principal stress and strain of connection when subjected to compression and bending moment. Satisfactory convergence of calculated and experimental results to determining the stress-strain state is showed. The reliability of the author's research work to solution of design is confirmed.

Keywords: the finite element method, eccentricity, the stress-strain state

В диссертационной работе автора были проведены численные и экспериментальные исследования несущей способности соединения SHERPA [3] без укрепления и с МЗП (Металлические Зубчатые Пластины) при изгибе в деревянных конструкциях из комбинации стеновой панели-CLT с балкой-CLT и LVL. С целью проверки достоверности расчётных результатов используется метод конечных элементов (МКЭ). С применением программы *Solidworks Simulation 2014* [5] после выполнения трехмерного моделирования двух металлических накладок и численного расчёта будут вычислены эквивалентное напряжение, перемещение, главное напряжение и деформация.

Целью настоящей работы является определение напряженно-деформированного состояния на опытных металлических накладках по программе *Solidworks Simulation 2014*, проверка достоверности

экспериментального и численного исследования определения несущей способности соединения SHERPA при изгибе в деревянных конструкциях.

При проектировании соединения SHERPA особое внимание уделяется контактными зонам между выступами двух металлических накладок, на которых воспринимают значительные усилия, обуславливающие пластическое разрушение. По существу, для выяснения распределения локального напряжения несущей способности крепежа SHERPA, часть из которого отдельно крепится к торцовой поверхности стеновой панели-CLT и балки из CLT и LVL, была разделена на два типа по определению несущей способности крепежа SHERPA при изгибе:

- при приложении нагрузки вдоль направления вставки без учёта эксцентриситета, Н;
- при приложении нагрузки вдоль направления вставки с учётом эксцентриситета, Н;

Таблица 1

Физико-механические характеристики панели-CLT

Компания	Binderholz	KLH	LENO	MM	NODIC	Norica timber	СП 64.13330.2011
E_{90} , МПа	11000	12000	10590	11600	11700	11600	10000
E_0 , МПа	–	1200	7330	–	9000	–	–
G_{90} , МПа	690	690	410	650	731	690	500
G_0 , МПа	–	250	3670	250	563	–	–
ρ_k , кг/м ³	470	480	350	480	515	420	495
Порода древесины	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна

Исследование физико-механических характеристик для панели-CLT на основе результатов в соответствии с руководствами по различным компаниям представлено в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что модуль упругости для панели-CLT выше, чем LVL, в соответствии с СНиП 64. 13330.2011, и полученная плотность для панели-CLT соответствует с известным нормативным значением.

После выполнения трехмерной модели соединения SHERPA для каждого элемента назначили физические и механические характеристики материалов в соответствии с *EN AW 6082* [1]:

- модуль упругости $E = 70000$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,33$;
- модуль жесткости $G = 26400$ МПа;
- плотность $\rho = 2,7$ г/см³ [3];
- для куба алюминий с толщиной от 5 до 25 мм:

напряжение текучести минимально до 260 МПа;

напряжение на растяжение минимально до 310 МПа.

Для того чтобы повысить точность модели, при расчёте несущей способности соединения при изгибе используется упрощенная методика: деревянными элементами из стеновой панели-CLT с балкой из CLT и LVL можно пренебречь; с учётом типа крепления шурупов в гнездах металлических накладок должно осуществляться зафиксированным креплением; на контрактном зоне между выступами двух металлических накладок при сжатии 319,48 МПа; в гнездах отверстий шурупов воспринимается изгибающий момент (при приложении эквивалентного действующего усилия 44800 Н) на верхних и нижних гнездах.

Построение сетки автоматически выполняется по компьютеру. Расположение мест приложения нагрузки и крепления для соединения SHERPA представлено на рис. 1, *a.1–a.2*.

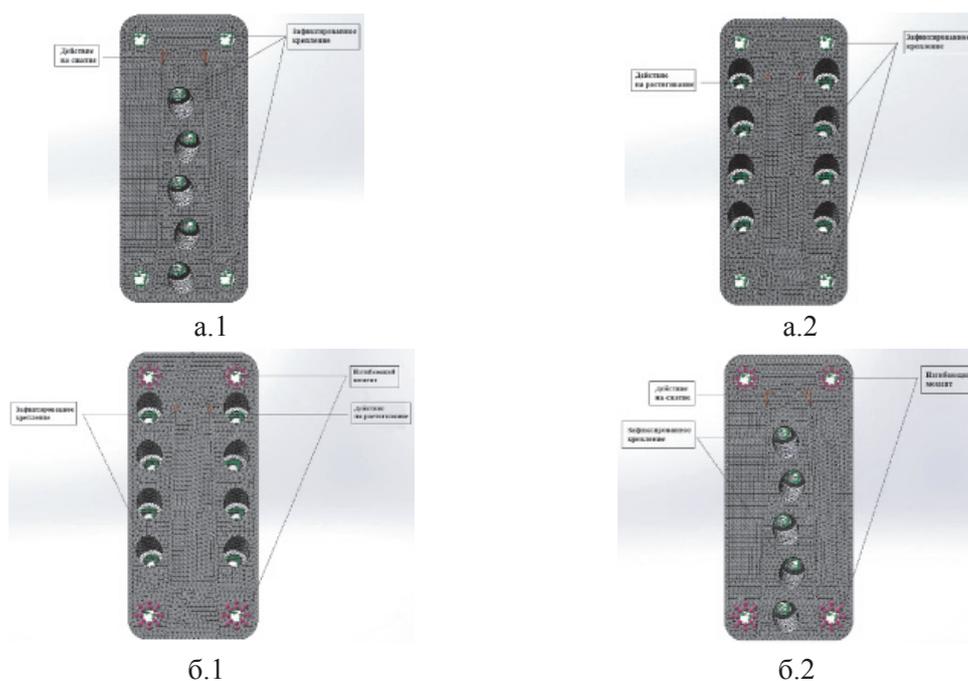


Рис. 1. Расположение мест приложения нагрузки и крепления для металлической накладки: *a.1–a.2* – без учёта эксцентриситета; *б.1–б.2* – с учётом эксцентриситета

Экспериментальные исследования по МКЭ с помощью программы *Solidworks Simulation 2014* были направлены на определение:

- напряжения *von Mises* (эквивалентное напряжение по фон Мизесу исходя из соответствующей гипотезы прочности или критерия пластичности) [2], МПа;
- максимальной деформации на металлической накладке по пределу текучести материала, мм;
- главного напряжения, МПа, и деформации, 10^{-6} мм/мм;
- максимального перемещения, мм.

По программе *SolidWorks Simulation 2014* выполняется расчёт несущей способности крепежа SHERPA под нагрузкой вдоль направления вставки без учёта эксцентриситета. Сравнения расчётных и экспериментальных результатов определения деформации и напряжения на металлической накладке, которая крепится к стеновой панели-CLT и балке из CLT и LVL при приложении различных нагрузок без и с учётом эксцентриситета, представлены в табл. 2 и 3.

На рис. 2 показаны расчётные виды пластического разрушения металлических накладок под нагрузкой вдоль направления вставки без учёта эксцентриситета с использованием программы *Solidworks Simulation 2014*, а экспериментальные представлены на рис. 3.

Из табл. 1 и 2 видно, что на контактных участках между выступами двух металлических накладок при сжатии и растяжении появилась отчётливая концентрация напряжения. При приложении нагрузки до 15000 Н максимальное напряжение 533,3 МПа выше в 105 раз, чем предел текучести материала 260 МПа. На рис. 2 и 3 видно, что без учёта эксцентриситета на контактной зоне возникает отчётливое перемещение и одновременно на гнездах отверстий шурупов относительно небольшая деформация. По сравнению двух результатов можно сделать вывод о том, что расчётные результаты по МКЭ могут относительно полностью отражать и объяснить причину пластического разрушения металлических накладок.

Таблица 2

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения деформации и напряжения на металлической накладке, которая крепится к стеновой панели-CLT без учёта эксцентриситета

Параметр	Единица	F	$F_{v010\ CLT}$	$F_{v030\ CLT}$	$F_{v020\ LVL}$	$F_{v060\ LVL0\ МЗП}$	$F_{v070\ CLT0\ МЗП}$
Экспериментальная несущая способность	Н	15000	27830	26910	22600	33520	29640
Максимальное напряжение (<i>von Mises</i>)	МПа	656,5	1218	1178	989,1	1467	1297
Максимальное перемещение	мм	0,07311	0,1356	0,1312	0,1102	0,1634	0,1445
Главное напряжение	МПа	426,5	791,2	765,1	642,5	953	842,7
Главная деформация	10^{-6} мм	5360	9945	9616	8076	11980	10590

Таблица 3

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения деформации и напряжения на металлической накладке, которая крепится к балке из CLT и LVL без учёта эксцентриситета

Параметр	Единица	F	$F_{v,1\ CLT}$	$F_{v,3\ CLT}$	$F_{v,2\ LVL}$	$F_{v,6\ LVL, МЗП}$	$F_{v,7\ CLT, МЗП}$
Экспериментальная несущая способность	Н	15000	27830	26910	22600	33520	29640
Максимальное напряжение (<i>von Mises</i>)	МПа	533,3	989,4	956,7	803,5	1195	1054
Максимальное перемещение	мм	0,04587	0,0851	0,08229	0,06911	0,1035	0,09064
Главное напряжение	МПа	414,6	769,3	743,8	624,7	926,4	819,3
Главная деформация	10^{-6} мм/мм	5898	10940	10580	8886	13180	11650

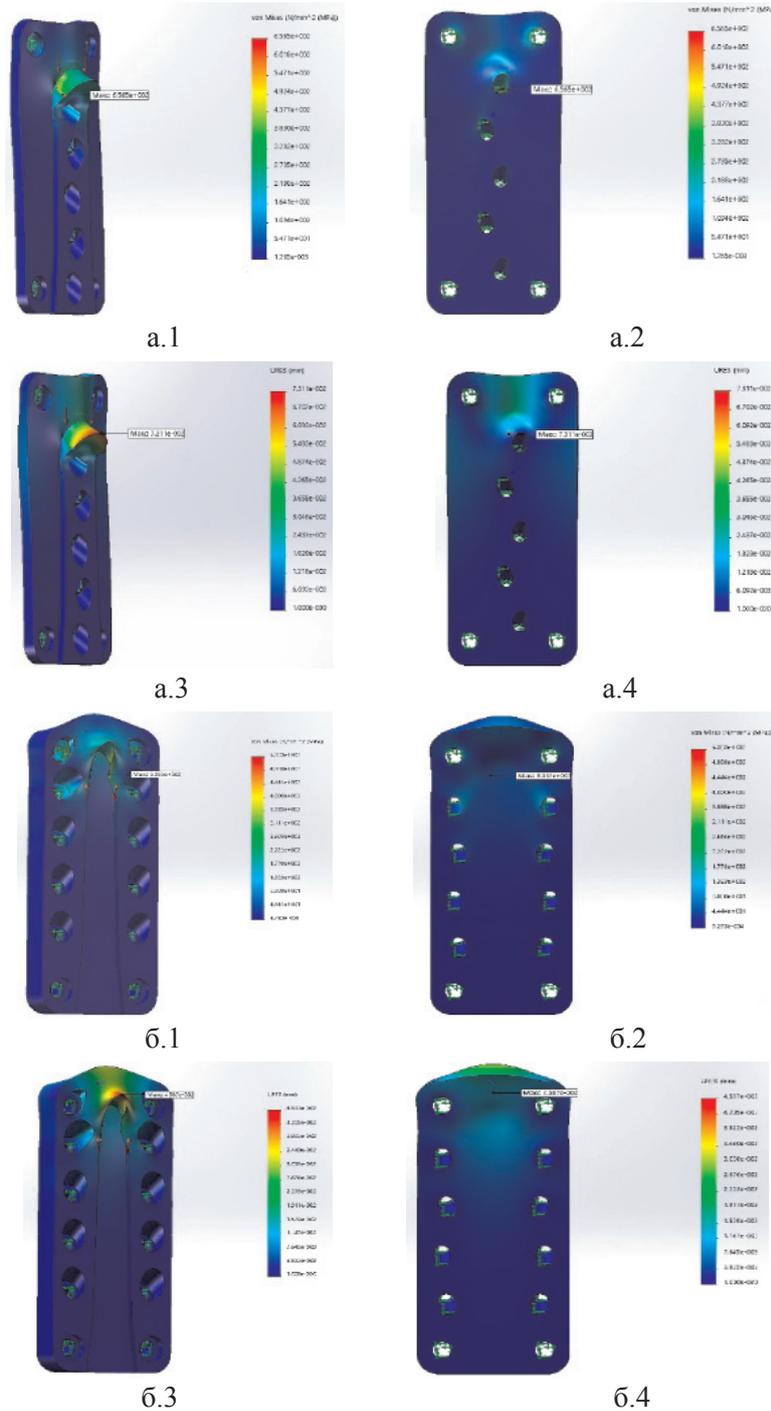


Рис. 2. Виды разрушения металлических накладок при изгибе без учёта эксцентриситета: а.1–а.2 – распределение эквивалентных напряжений на лицевой и оборотной сторонах металлических накладок в стеновой панели-CLT; а.3–а.4 – изменение перемещений то же в стеновой панели-CLT; б.1–б.2 – распределение эквивалентных напряжений то же в балке из CLT и LVL; б.3–б.4 – изменение перемещений то же в балке из CLT и LVL

Поскольку в узловом соединении может возникнуть изгибающий момент, обуславливающий пластичное разрушение металлических накладок, экспериментальные исследования проведены с учётом эксцентриситета на металлические накладки по МКЭ. На рис. 1, б.1–б.2 показано располо-

жение мест приложения нагрузки и крепления соединения SHERPA. Расчётные виды разрушения металлических накладок при изгибе с учётом эксцентриситета по программе *Solidworks Simulation 2014* представлены на рис. 4, а экспериментальные представлены на рис. 3, б.1–б.2.

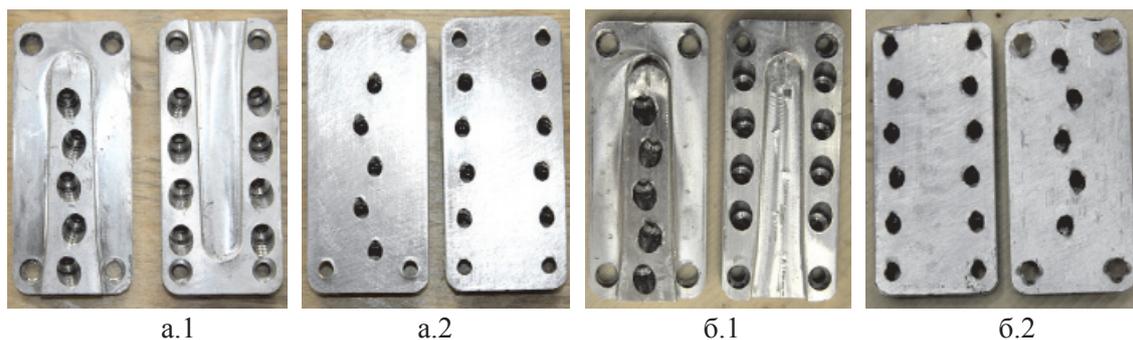


Рис. 3. Виды разрушения металлических накладок при изгибе:
а – без учёта эксцентриситета; б – с учётом эксцентриситета

На рис. 5 и 3, б.1–б.2 видно, что с учётом эксцентриситета на контрактной зоне между выступами двух металлических накладок и в гнездах отверстия шурупов при изгибе появилось отчётливое перемещение. По сравнению с рис. 2 и 3 видно, что эксцентриситет может приводить к большим пластическим разрушениям металлических накладок. Если при конструировании не рассчитывается влияние эксцентриситета на несущую способность соединения при изгибе, расчётные результаты будут превышать фактические. Поэтому при расчёте несущей способности соединения деревянных конструкций на металлических накладках SHERPA при изгибе должен учитываться коэффициент эксцентриситета.

Для проверки работоспособности предложенных методик дополнительно были приложены одинаковые нагрузки

на металлические накладки. Сравнения расчётных и экспериментальных результатов определения главного напряжения и деформации с учётом эксцентриситета представлены в табл. 4 и 5 в соответствии с графиком на рис. 6.

Из табл. 4 и 5 видно, что при расчёте по МКЭ получена удовлетворительная сходимость результатов, минимальное расхождение опытных результатов и численных. После сравнительного анализа можно сделать вывод о том, что с использованием метода конечных элементов и программы *Solidworks Simulation 2014* можно выражать и определить напряженно-деформированное состояние металлических накладок. Следовательно, при конструировании могут осуществляться оценка несущей способности и совершенствование проектирования соединения SHERPA.

Таблица 4

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главного напряжения

Расположение	$\sigma_{\text{экс, б, CLT}}$	$\sigma_{\text{МКЭ, б, CLT}}$	$\sigma_{\text{экс, б, LVL}}$	$\sigma_{\text{МКЭ, б, LVL}}$	$\sigma_{\text{экс, с, CLT}}$	$\sigma_{\text{МКЭ, с, CLT}}$
Верхняя	-13,65	33,72	96,95	28,31	182,28	100,30
Центральная	52,85	0,67	32,55	0,52	-11,83	1,53
Нижняя	–	8,99	-18,13	7,55	-103,04	6,62

Таблица 5

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главной деформации

Расположение	$\epsilon_{\text{экс, б, CLT}}$	$\epsilon_{\text{МКЭ, б, CLT}}$	$\epsilon_{\text{экс, б, LVL}}$	$\epsilon_{\text{МКЭ, б, LVL}}$	$\epsilon_{\text{экс, с, CLT}}$	$\epsilon_{\text{МКЭ, с, CLT}}$
Верхняя	-195	538,95	1385	452,45	2604	1171,00
Центральная	755	13,93	465	11,6	-169	30,07
Нижняя	-92	438,90	-259	368,5	-1472	896,80

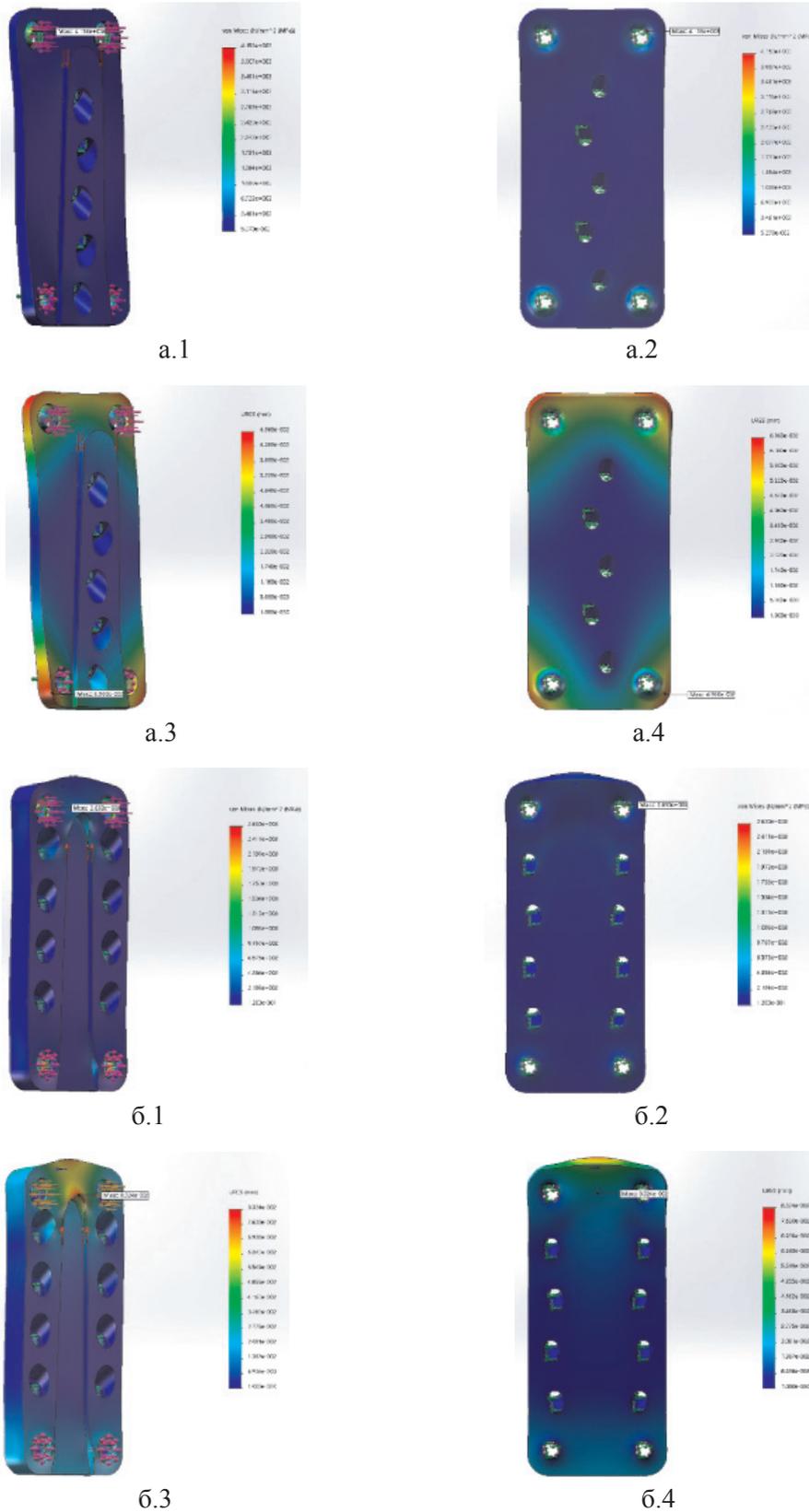


Рис. 4. Виды разрушения металлических накладок при изгибе с учётом эксцентриситета: а,1–2 – распределение эквивалентных напряжений на лицевой и оборотной сторонах металлических накладок в стеновой панели-CLT; а,3–4 – изменение перемещений то же в стеновой панели-CLT; б,1–2 – распределение эквивалентных напряжений то же в балке из CLT и LVL; б,3–4 – изменение перемещений то же в балке из CLT и LVL

Вывод

1. Рассматриваются проблемы автоматизированного проектирования соединения SHERPA при изгибе с учётом эксцентриситета по программе Solidworks Simulation 2014.

2. Определено эквивалентное напряжение, перемещение, главное напряжение и деформация соединения при воздействии на сжатие и изгиб.

3. Показана удовлетворительная сходимость данных расчётных результатов на основе предложенных уравнений с полученными экспериментальными для определения напряженно-деформированного состояния, подтверждена достоверность научно-исследовательской работы автора для конструкторского решения.

Список литературы

1. Официальный сайт компании Rautaruukki. Обзор физико-механических характеристик материала EN 6082 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ruukki.com>.

2. Обзор понятий эквивалентного напряжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Von_Mises_yield_criterion.

3. Обзор характеристик SHERPA и других типов соединения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://artiva.lv/photo/files/sherpa_why_use_sherpa.pdf.

4. BS EN 755-2:2008. Aluminium and aluminium alloys. Extruded rod/bar, tube and profiles. Mechanical properties.

5. SolidWorks 2014 Tutorial with Video Instruction, 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sdcpublications.com/pdfsamples/978-1-58503-855-8-1.pdf>.

References

1. Oficialnyj sajt kompanii Rautaruukki. Obzor o fiziko-mehaničeskix harakterov materiala EN 6082 [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.ruukki.com>.

2. Obzor o ponjatii jekvivalentnogo naprjazhenija [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://en.wikipedia.org/wiki/Von_Mises_yield_criterion.

3. Obzor o harakteristik SHERPA i drugih tipov soedinenija [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://artiva.lv/photo/files/sherpa_why_use_sherpa.pdf.

4. BS EN 755-2:2008. Aluminium and aluminium alloys. Extruded rod/bar, tube and profiles. Mechanical properties.

5. SolidWorks 2014 Tutorial with Video Instruction, 2014. [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.sdcpublications.com/pdfsamples/978-1-58503-855-8-1.pdf>.

Рецензенты:

Глухих В.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой технической механики, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург;

Черных А.Г., д.т.н., профессор, ректор СПГХПА, г. Санкт-Петербург.

Работа поступила в редакцию 10.03.2015.