



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-82-92>  
УДК 621.74; 621.792; 669.53.01.99; 621.88

Поступила 17.10.2025  
Received 17.10.2025

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРА И ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ СКЛЕЕННЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МОДЕЛЬНОМ КОМПЛЕКТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

М. Л. КАЛИНИЧЕНКО, Е. А. МАЛИНОВСКИЙ, М. Л. ПШЕНИЧНЫЙ, Е. Н. ШИШ,  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65.  
E-mail: m.kalinichenko@bntu.by.

*В статье рассматривается компьютерное моделирование с помощью различных программ с возможностью симуляции технологических процессов. Анализируются потенциальные нагрузки, испытываемые модельными комплектами на основе полнотелых и пустотелых склеенных и цельных элементов. Смоделирован процесс уплотнения формовочных смесей при машинной и ручной формовке с наглядной демонстрацией нагрузок, действующих на модельный комплект. Показаны преимущества и недостатки программ, используемых на территории ЕАС. Обоснованы возможности применения данных программ при оценке нагрузок на цельные и склеенные изделия.*

**Ключевые слова.** Программное обеспечение, моделирование различных технологических процессов, литейное производство, модельные комплекты, эпюра напряжений.

**Для цитирования.** Калиниченко, М. Л. Оценка характера и динамики разрушения склеенных соединений в модельном комплекте с применением инструментов численного моделирования / М. Л. Калиниченко, Е. А. Малиновский, М. Л. Пшеничный, Е. Н. Шिश // *Литье и металлургия*. 2025. № 4. С. 82–92. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-82-92>.

## ASSESSING THE NATURE AND DYNAMICS OF FAILURE OF GLUE-BOUND JOINTS IN A MODEL KIT USING NUMERICAL SIMULATION TOOLS

M. L. KALINICHENKO, E. A. MALINOVSKII, M. L. PSHANICHNY, E. N. SHISH, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: m.kalinichenko@bntu.by.

*This paper presents computer modeling using various programs, capable of simulating technological processes, and potential loads experienced by model kits based on solid and hollow glued and solid elements. The process of compaction of molding mixtures during machine and manual molding was simulated with a visual demonstration of the loads acting on the model kit. The advantages and disadvantages of the programs used in the Eurasian Economic Community are discussed. The feasibility of using these programs to assess loads on solid and glued components is substantiated.*

**Keywords.** Software, modeling of various technological processes, foundry production, model kits, stress diagram.

**For citation.** Kalinichenko M. L., Malinovskii E. A., Pshanichny M. L., Shish E. N. Assessing the nature and dynamics of failure of glue-bound joints in a model kit using numerical simulation tools. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 4, pp. 82–92. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-4-82-92>.

Стоимость готового изделия определяется расходами на заготовительное производство и финишную обработку. Поскольку финишная обработка, как правило, составляет до 60% стоимости готового изделия, важную роль играет класс точности получаемой заготовки. На ее качество и стоимость, в свою очередь, влияет качество модели. Одним из возможных факторов влияния на данный процесс является уменьшение их материалоемкости, например, за счет создания пустотелых конструкций. Однако критически важно оценить, как такая модификация повлияет на прочность. Поскольку главный вид нагрузки в процессе формования заготовки-формы – сжатие, необходимо детально изучить и сравнить поведение различных типов моделей как на пустотелой основе, так и комбинированных.

Для снижения убытков при производстве деталей ответственного назначения и повышения рентабельности производства наиболее целесообразным является процесс компьютерного моделирования технологического процесса. Как известно [1–4], моделировать можно как конкретный технологический процесс, так и изделия в целом.

В современных реалиях изготовление конкретного изделия в литейном производстве происходит в несколько этапов:

- 1) получение исходного шихтового материала;
- 2) изготовление сплава, подходящего для производства изделия с необходимыми свойствами;
- 3) планировка формы для изготовления изделия с учетом свойств сплава по п. 2;
- 4) выбор материала для создания модельного комплекта, из которого будет изготовлена форма;
- 5) симуляция сжимающих нагрузок, действующих на модельный комплект в процессе формовки;
- 6) процесс заливки/выбивки и получения качественного изделия.

Снижения себестоимости получаемых отливок можно достичь путем уменьшения затрат на изготовление модельного комплекта. Один из способов снижения стоимости модельного комплекта – уменьшение его материалоемкости за счет технологии склеивания (модельный комплект изготавливается из остатков частей пластика), а также с помощью облегчения конструкции [5]. Поэтому актуальным является сравнение механизма разрушения цельных и пустотелых модельных комплектов.

В процессе уплотнения формовочных смесей, особенно при машинной формовке, на модельный комплект воздействуют различные виды нагрузок, в особенности сжимающие напряжения, которые могут способствовать его быстрому износу, приводить к деформациям и, как следствие, выходу из строя. Исследовано [6], что скорость изменения сжимающих усилий влияет на поведение формовочной смеси и, следовательно, на модельный комплект. Существуют два способа уплотнения – статический и динамический. При статических нагрузках происходит медленное увеличение сжимающих нагрузок, а при динамических приложение нагрузки не превышает 0,1–0,2 с, сжимающие напряжения в смеси быстро растут и быстро уменьшаются. Известно, что при уплотнении форм методом машинного прессования давление прессования формовочной смеси составляет 0,2–0,4 МПа, а встряхивающих с подпрессовкой – 0,15 МПа. При ручной же формовке усилие прессования зависит от работы самого формовщика и не превышает 6 кг/м<sup>2</sup>, что составляет 0,059 кН/м<sup>2</sup> [6, 7].

В настоящее время изучение динамических нагрузок происходит в комбинации с проведением физических экспериментов и компьютерного моделирования. Компьютерные программы помогают выявить и устранить проблемы еще до производства первого образца, что особенно важно для штучных и мелко-серийных производств [1].

На этапе развития современных технологий существует ряд компьютерных программ, позволяющих смоделировать и описать процессы, происходящие на определенном участке производства. Например, при моделировании процессов заливки формы и качества готовой продукции используются такие программы (на территории Республики Беларусь), как LVMFlow и PROCast. Они дают возможность произвести симуляцию необходимого технологического процесса и еще на стадии проектирования устранить ошибки. Однако специализированные программы имеют ограниченный доступ и задействованы на решении определенных задач. Следовательно, для симуляции одного из вышеуказанных этапов целесообразно применять программы общего технического моделирования, которые имеют массовое использование.

В рамках данного исследования проведен анализ разрушающих нагрузок, воздействующих на склеенные компоненты модельного комплекта в условиях литейного производства, с помощью программ SolidWorks [8, 9] и Компас 3D [10]. Актуальность работы обусловлена тем, что в процессе машинной формовки уплотняемая смесь создает значительные механические напряжения, в первую очередь сжимающего характера. Эти нагрузки являются причиной ускоренного износа, деформации и последующего выхода оснастки из строя.

Для детального изучения данного явления выполнено компьютерное моделирование в среде SolidWorks. Это программное обеспечение позволило с высокой точностью проанализировать поведение как цельных, так и пустотелых конструкций модельных комплектов.

Цель работы – оценка характера и динамики разрушения склеенных соединений в цельной и пустотелой модели с применением инструментов численного моделирования SolidWorks.

Объектом настоящего исследования выступают два склеенных элемента, составляющих модель. Несмотря на идентичную высоту (50 мм) и общую геометрию в виде усеченного конуса, образцы имеют принципиальное конструктивное различие. Первый образец представляет собой цельную деталь, собранную из трех отдельных частей (рис. 1, а, в). Второй образец является пустотелым (рис. 1, б, г). Его конструкция характеризуется толщиной стенок 10 мм. Особенностью сборки данной модели является склеивание составных частей высотой 10 и 40 мм соответственно.

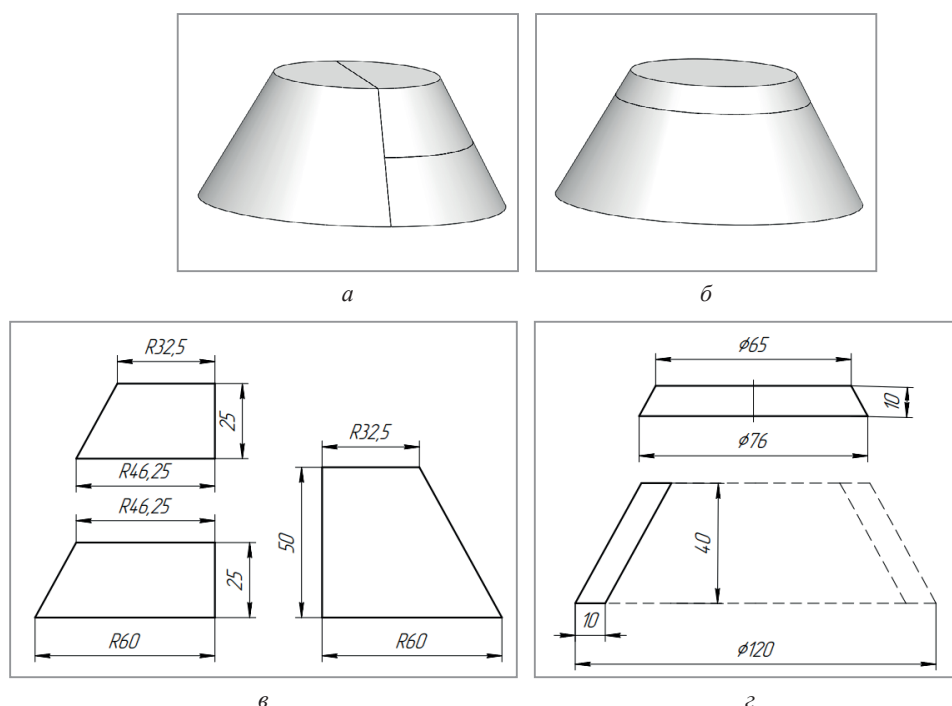


Рис. 1. Вид моделей с габаритными размерами склеенных частей:

*а* – общий вид цельной склеенной модели; *б* – общий вид пустотелой склеенной модели;  
*в* – габаритные размеры цельной склеенной модели; *г* – габаритные размеры пустотелой склеенной модели

Задача исследования – прогнозирование работы склеенной модели (цельной и пустотелой) из модельного пластика Prolab 65 (технические характеристики указаны в [5]). На первоначальном этапе выполняются базовые настройки проекта. Моделирование осуществляется как внешняя задача, что подразумевает анализ физических процессов в окружающем детали пространстве. На систему назначается гравитационная нагрузка, стандартно направленная вдоль оси  $Y$ . В качестве среды, заполняющей объем вокруг моделей, принимается воздух. Далее конфигурируется расчетный домен – виртуальный контур, ограничивающий зону проведения анализа. Этот объем охватывает как сами исследуемые объекты, так и часть прилегающего пространства, что является необходимым условием для обеспечения достоверности результатов.

Цель расчета – определение величины полного давления, вектор которого направлен по нормали к поверхности модели. Важным параметром является уровень детализации расчетной сетки. Его выбор напрямую влияет на точность и трудоемкость моделирования: повышение плотности сетки, увеличивающее количество узловых точек, ведет к росту точности, но одновременно и к увеличению вычислительных затрат.

Полученные в результате моделирования данные о распределении давления по поверхностям деталей сохраняются и передаются для последующего углубленного анализа в модуль SolidWorks Simulation.

На следующем этапе производится назначение материала для деталей. Хотя программа SolidWorks предоставляет доступ к обширным встроенным библиотекам, для данной задачи был создан пользовательский материал с вводом требуемых характеристик вручную. К числу задаваемых параметров относятся плотность используемого материала, модуль упругости и предел текучести, прочность на сжатие, растяжение, модуль сдвига и т. д.

Методика моделирования клеевых соединений представляет собой критически важную задачу для обеспечения точности прочностных расчетов составных модельных комплектов. Особую актуальность данная проблема приобретает в контексте проектирования модельных комплектов, подвергающейся значительным механическим нагрузкам в процессе эксплуатации. Традиционные подходы к моделированию соединений часто не учитывают специфику распределения напряжений в адгезионном слое, что приводит к существенным погрешностям при прогнозировании прочностных характеристик. Практическая реализация методики осуществлялась посредством параметрического создания трехмерного тела клеевого шва, геометрия которого точно соответствовала форме и площади контакта соединяемых деталей (рис. 2).

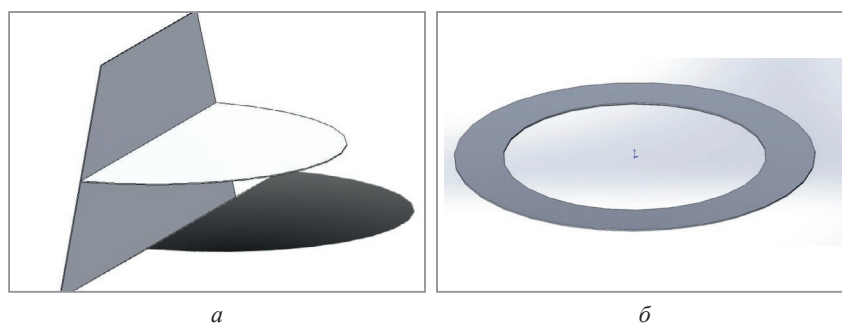


Рис. 2. Геометрическая модель клеевого шва: а – для цельной модели; б – для полой модели

Особое внимание уделялось соблюдению равномерной толщины адгезионного слоя и точному позиционированию шва относительно соединяемых поверхностей. Созданным виртуальным моделям присваивали механические характеристики клея «Науг» на эпоксидной основе (технические характеристики указаны в [5]), выбранного на основании детального сравнительного анализа промышленных образцов.

Интеграция моделей клеевых соединений в общую сборку выполнялась с применением специализированных условий контакта, обеспечивающих адекватное взаимодействие между адгезивом и соединяемыми поверхностями. Последующая верификация разработанной методики продемонстрировала высокую степень соответствия расчетных данных экспериментальным результатам.

Для корректного моделирования механического поведения составного модельного комплекта при воздействии внешних нагрузок необходимо обеспечить физически достоверное описание взаимодействия между сопрягаемыми деталями. В рамках данного исследования для всех соединений была выбрана функция Global Interaction (Bounded-Meshed independently) (рис. 3).

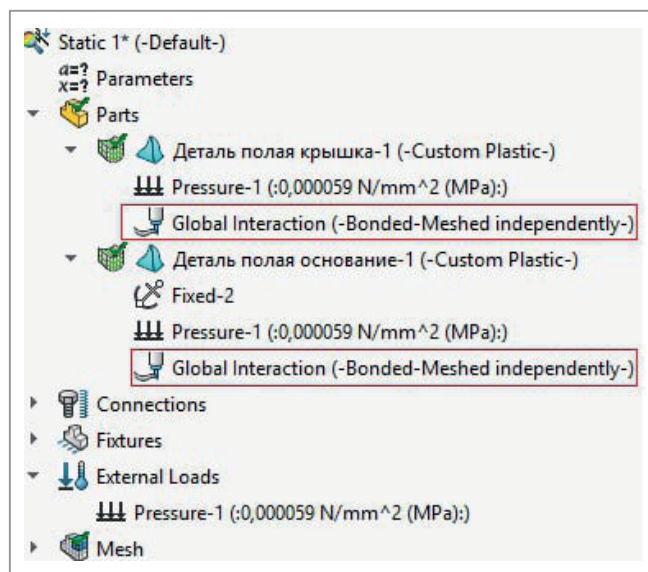


Рис. 3. Настройка глобального контактного взаимодействия типа "Bonded" в SolidWorks Simulation

Физическая сущность данного контактного условия заключается в создании неразрывной кинематической связи между сопрягаемыми поверхностями. Это означает, что первоначальный контакт между деталями сохраняется на протяжении всего процесса нагружения: поверхности не могут отделяться друг от друга или смещаться относительно друг друга. При этом система в целом сохраняет свободу деформирования и перемещения в пространстве как единое целое. Применение данного типа контактного взаимодействия особенно важно для модельных комплектов, где требуется обеспечить совместную работу всех элементов конструкции под нагрузкой. Установка данного условия гарантирует, что расчетная модель будет адекватно отражать реальное поведение склеенных деталей при воздействии эксплуатационных нагрузок, возникающих в процессе формовки.

Для обеспечения корректности прочностного анализа в расчетной модели задаются граничные условия. С этой целью фиксируется нижняя плоскость детали, что исключает ее перемещение. На внешнюю поверхность модели последовательно прикладываются распределенные нагрузки интенсивностью 10,



20 и 30 кН/м<sup>2</sup>. Направление действия давления задается перпендикулярным к поверхности для моделирования равномерного силового воздействия по всей площади.

Следующим этапом является генерация конечно-элементной сетки. Ее параметры настраиваются с учетом геометрических особенностей детали и требуемой точности решения. Аналогично расчету в Flow Simulation уменьшение размера ячеек сетки особенно в зонах сложной формы позволяет повысить детализацию и достоверность результатов. После этого выполняется непосредственно прочностной расчет. Его итогом являются поля напряжений, деформаций и перемещений, возникающих в конструкции под действием приложенных нагрузок. Результаты расчетов переносятся в Word-документ. По итогам анализа составляется отчет, содержащий исчерпывающее описание модели. В отчет входят геометрические параметры, свойства материалов, приложенные нагрузки и граничные условия, а также все ключевые результаты. Для наглядной интерпретации данных отчет дополняется диаграммами, отображающими картину распределения напряжений и перемещений. Все полученные в результате расчета численные значения приведены в табл. 1. Визуализация результатов моделирования, а именно полей напряжений и перемещений для цельной и пустотелой конструкций, приведена на рис. 4, 5.

Таблица 1. Результаты расчетов моделирования нагрузки на пустотелую и цельную модели

Деталь	Давление на деталь, кН/м <sup>2</sup>	Напряжение, кН/м <sup>2</sup>		Перемещение, мм
		max	min	max
Пустотелая	10	116,4	1,764	0,001218
	20	232,7	3,527	0,002437
	30	349,1	5,291	0,003655
Цельная	10	116,4	6,701	0,0095
	20	20,490	0,0134	0,001902
	30	30,740	0,0201	0,002853

Важным аспектом является то, что представленная геометрия подвергнута значительному визуальному искажению. Программный комплекс SolidWorks в автоматическом режиме масштабирует величину деформаций для улучшения восприятия данных. Именно этим обусловлен кажущийся парадокс, когда визуальная деформация цельной детали выглядит существеннее, чем у пустотелой, в то время как численные результаты расчетов свидетельствуют об обратной тенденции. На всех представленных изображениях экстремальные значения напряжений (кН/м<sup>2</sup>) и перемещений (мм) маркированы цветом: максимальные величины обозначены красным, а минимальные – синим.

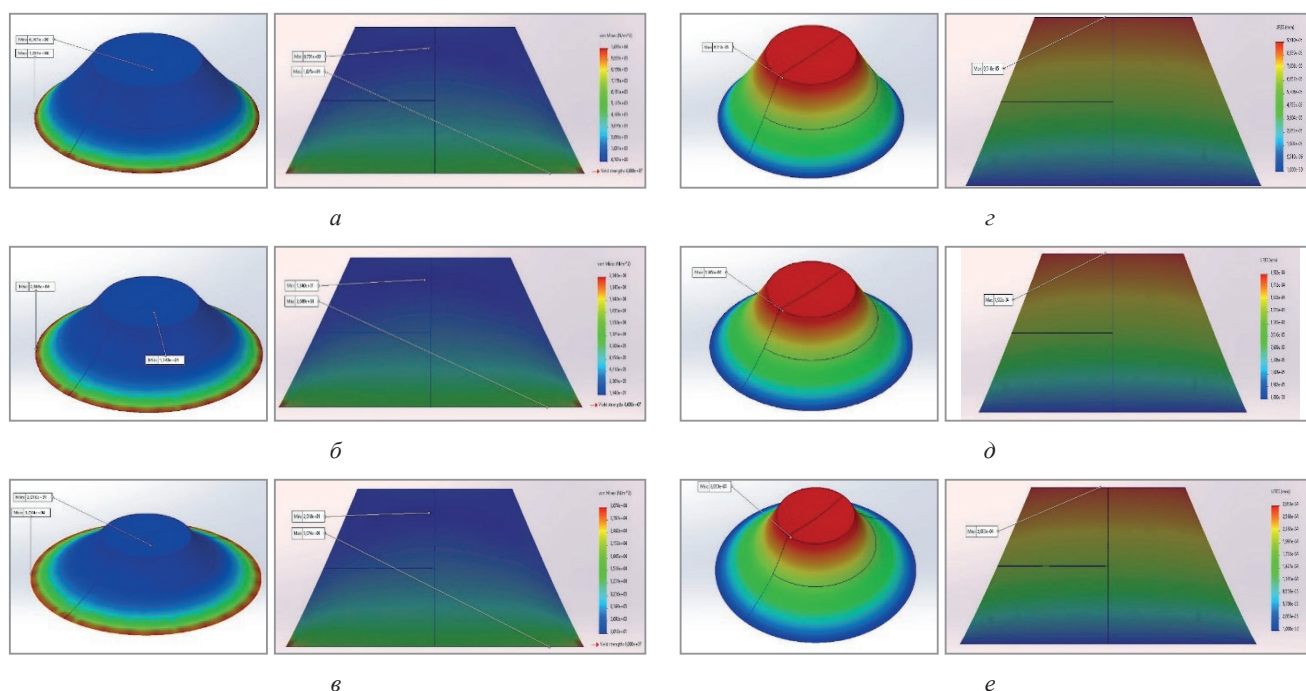


Рис. 4. Распределение напряжений и перемещений для пустотелой модели при давлении: а, з – 10 кН/м<sup>2</sup>; б, д – 20; в, е – 30 кН/м<sup>2</sup>; а, б, в – распределение напряжений; з, д, е – распределение перемещений

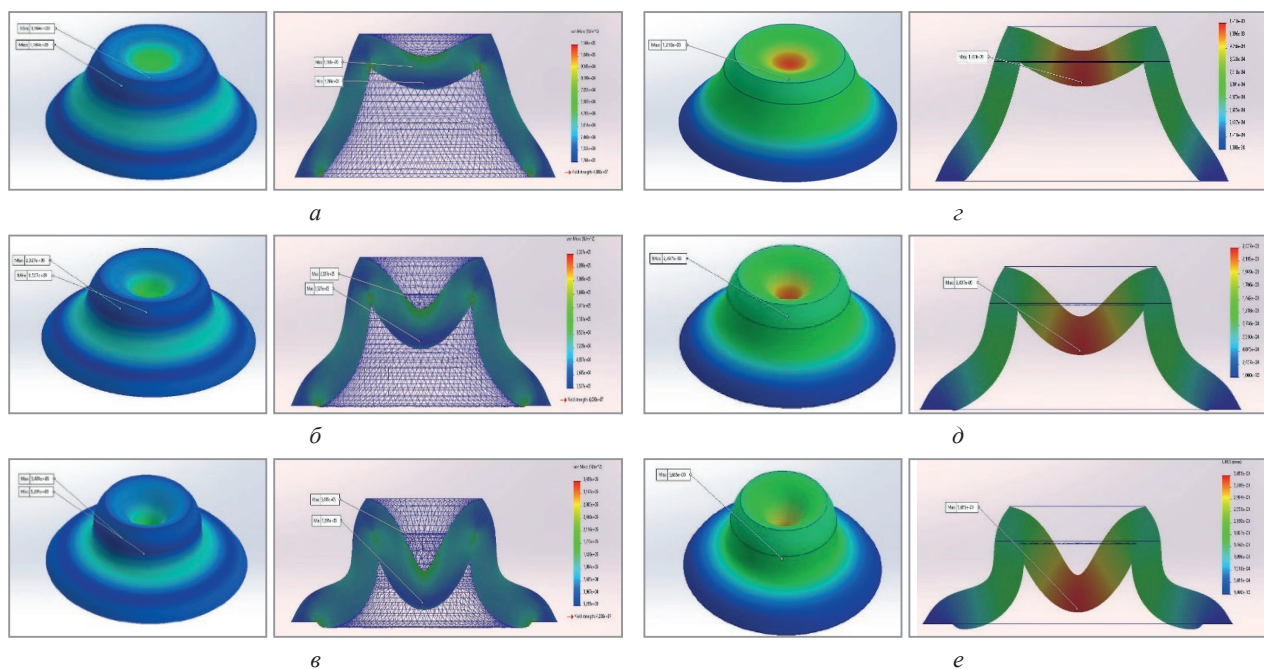


Рис. 5. Распределение напряжений и перемещений для цельной модели при давлении:  
 а, г – 10 кН/м<sup>2</sup>; б, д – 20; в, е – 30 кН/м<sup>2</sup>;  
 а, б, в – распределение напряжений; г, д, е – распределение перемещений

Анализ рисунков позволяет установить, что в пустотелой модели зона максимальных напряжений при всех уровнях нагрузки локализуется в ее верхней части. При этом при воздействии 20 и 30 кН/м<sup>2</sup> к этой зоне добавляется и средний участок конструкции. В отличие от нее цельная модель демонстрирует иную картину: пиковые напряжения при всех трех нагрузках сосредоточены на ее нижних гранях. Что касается минимальных напряжений, то здесь наблюдается обратная закономерность: для пустотелой модели они фиксируются в нижней части, а для цельной – в верхней.

Согласно полученным данным, характер распределения перемещений существенно различается. В пустотелой модели максимальное перемещение сконцентрировано исключительно в центральной точке верхней плоскости. В то же время у цельной модели деформация распределена по всей площади верхнего торца, проявляясь с разной интенсивностью. Область минимальных перемещений в обоих случаях совпадает и локализована вдоль нижней закрепленной грани.

Напряжения у пустотелой модели растут (116,4; 232,7; 349,1 кН/м<sup>2</sup>), увеличиваясь примерно на 116,3 кН/м<sup>2</sup> с каждым шагом нагрузки. Эта линейная зависимость указывает на равномерное упругое деформирование конструкции. Цельная модель демонстрирует значительно более низкий уровень напряжений (116,4; 20,490; 30,740 кН/м<sup>2</sup>). Особенно показателен резкий спад напряжения после первоначальной нагрузки. Такое поведение свидетельствует о принципиально ином распределении нагрузок: массивная конструкция эффективно перераспределяет напряжение по всему своему объему, не образуя локальных пиков, характерных для тонкостенной пустотелой структуры.

Можно заключить, что наличие пустот в конструкции кардинально меняет картину напряженного состояния, приводя к значительной концентрации напряжений и их интенсивному росту по мере увеличения внешней нагрузки.

Далее проведем серию расчетов для цельной модели, установив значения давления 100, 200 и 300 кН/м<sup>2</sup>. Это позволит исследовать поведение конструкции при различных нагрузках и проанализировать распределение напряжений и деформаций. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Анализ данных позволяет выявить четкие линейные зависимости между прилагаемой нагрузкой и откликом конструкции. С увеличением давления в 3 раза (со 100 до 300 кН/м<sup>2</sup>) максимальное напряжение и максимальное перемещение также возрастают пропорционально, приблизительно в 3 раза. При этом минимальное напряжение остается крайне низким на всех этапах нагружения, что подтверждает равномерный характер распределения нагрузки по объему цельной детали.

Визуальный анализ рис. 6 наглядно иллюстрирует выводы, сделанные на основе табличных данных. Распределение напряжений и перемещений по объему модели сохраняет одинаковую картину при всех

Таблица 2. Результаты расчетов моделирования нагрузки на цельную модель

Модель	Давление на деталь, кН/м <sup>2</sup>	Напряжение, кН/м <sup>2</sup>		Перемещение, мм
		max	min	max
Цельная	100	1025	0,067	0,000951
	200	204,9	0,134	0,001902
	300	307,4	0,201	0,002903

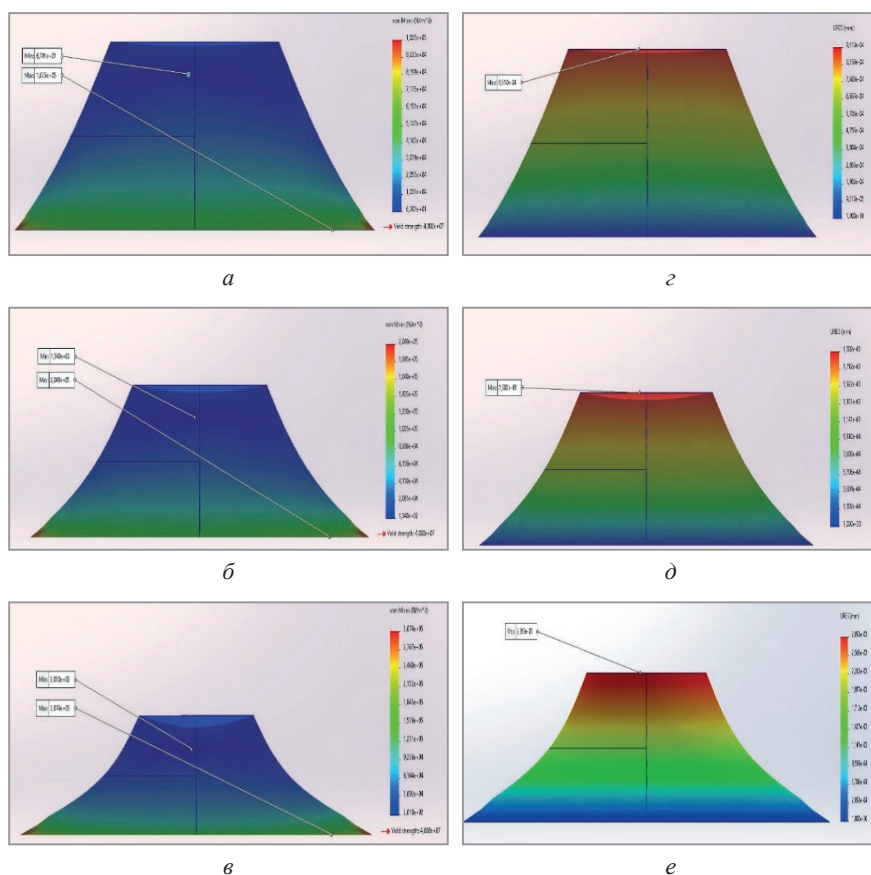


Рис. 6. Распределение напряжений и перемещений для цельной модели при давлении:  
 а, г – 100 кН/м<sup>2</sup>; б, д – 200; в, е – 300 кН/м<sup>2</sup>; а, б, в – распределение напряжений; г, д, е – распределение перемещений

значениях давления: зоны максимальных напряжений стабильно локализуются в одних и тех же конструктивных областях, не проявляя признаков пластической деформации или перераспределения. Это подтверждает надежность и предсказуемость поведения цельной модели под нагрузкой. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что конструкция сохраняет свою целостность и эксплуатационные характеристики в рассмотренном диапазоне нагрузок.

Исследование пустотелой модели в диапазоне нагрузок 100–300 кН/м<sup>2</sup> целенаправленно не проводили. Данное решение обусловлено тем, что характер распределения напряжений и деформаций в тонкостенной конструкции уже был установлен на предыдущих этапах моделирования. При дальнейшем увеличении нагрузки принципиальная картина не изменяется: не формируются новые зоны концентрации напряжений и не происходит смена формы деформации. Наблюдается лишь пропорциональное масштабирование уже известных величин – рост напряжений в стенках конструкции и увеличение величины перемещений.

**Анализ напряженно-деформированного состояния при ручной и машинной формовке.** Для всесторонней оценки долговечности и стабильности размеров модельного комплекта в условиях эксплуатации проведено сравнительное моделирование двух основных технологических процессов уплотнения формовочной смеси – ручной и машинной формовки. Целью данного этапа исследования является количественная и качественная оценка распределения механических напряжений и возникающих деформаций



в элементах оснастки при воздействии нагрузок, характерных для каждого из методов. Визуализация результатов в виде полей напряжений и перемещений, представленная на рис. 7, позволяет наглядно сопоставить степень и характер механического воздействия на модели, что является критически важным для прогнозирования его ресурса и оптимизации технологических параметров процесса формования.

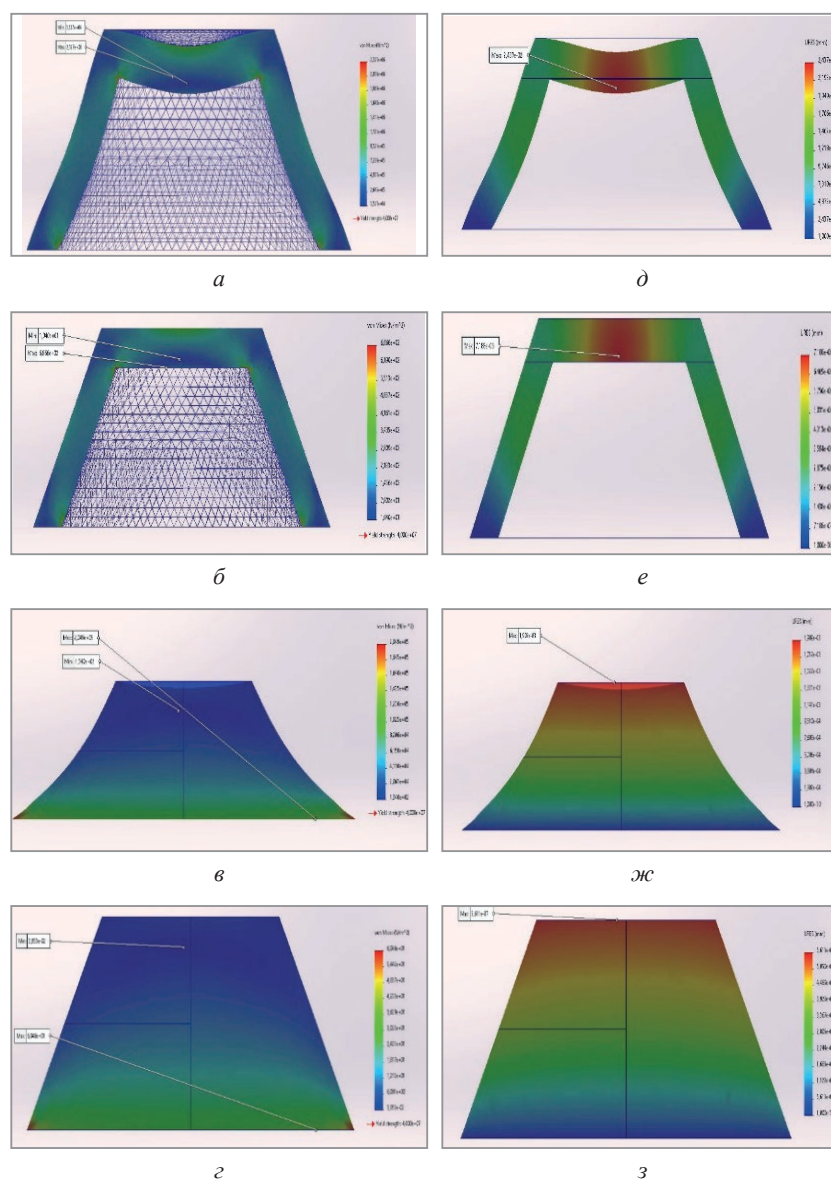


Рис. 7. Распределение напряжений и перемещений при нагрузках машинной и ручной формовки в моделях:  
 а, д – в пустотелой модели при нагрузке 200 кН/м<sup>2</sup>; б, е – в пустотелой модели при нагрузке 0,059 кН/м<sup>2</sup>;  
 в, ж – в цельной модели при нагрузке 200 кН/м<sup>2</sup>; г, з – в цельной модели при нагрузке 0,059 кН/м<sup>2</sup>

На следующем этапе с помощью программы Компас 3D помещаем модель в формовочную смесь (рис. 8).

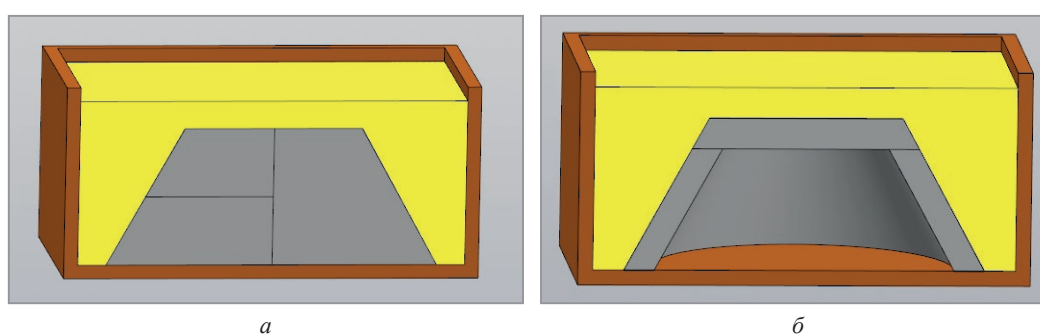


Рис. 8. Вид моделей в опоке: а – цельная; б – пустотелая



Произведен расчет и анализ напряженно-деформационного состояния формовочной смеси и модели при ручной и машинной формовке. Важно, чтобы усилие запрессовки позволило форме держать свой отпечаток, но формовочная смесь не стала настолько плотной, чтобы выходящие при заливке газы ее разрушили [6, 7].

Когда делается расчет, программа сама определяет, как соединены части между собой. Это делается автоматически, потому что расчет проводится для всей сборки, компоненты в которой уже привязаны друг к другу. Стоит отметить, что также автоматически указывается клеевой шов. При необходимости сами связи и их тип можно задавать вручную [7]. Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчетов моделирования нагрузки на пустотелую и цельную модели, передаваемые через формовочную смесь

Модель	Давление на деталь, МПа	Напряжение, кН/м <sup>2</sup>		Перемещение, мм
		max	min	max
Пустотелая	0,000059	0,5553	$3,47110 \cdot 10^{-2}$	$1,721 \cdot 10^{-7}$
	0,2	1882	117,6	$5,834 \cdot 10^{-4}$
	0,4	3765	235,3	$1,167 \cdot 10^{-3}$
Цельная	0,000059	0,543	$3,39310 \cdot 10^{-2}$	$1,702 \cdot 10^{-7}$
	0,02	1841	115	$5,77 \cdot 10^{-4}$
	0,4	3681	230,1	$1,154 \cdot 10^{-3}$

Распределения напряжений и перемещений для пустотелой и цельной модели представлены на рис. 9, 10. Максимальное и минимальное напряжения, а также максимальное и минимальное перемещения отмечены на рисунках красным и синим цветом соответственно. Необходимо отметить, что эти изображения сильно искажены с целью подчеркнуть малые деформации, которые без этих искажений будут незаметны.

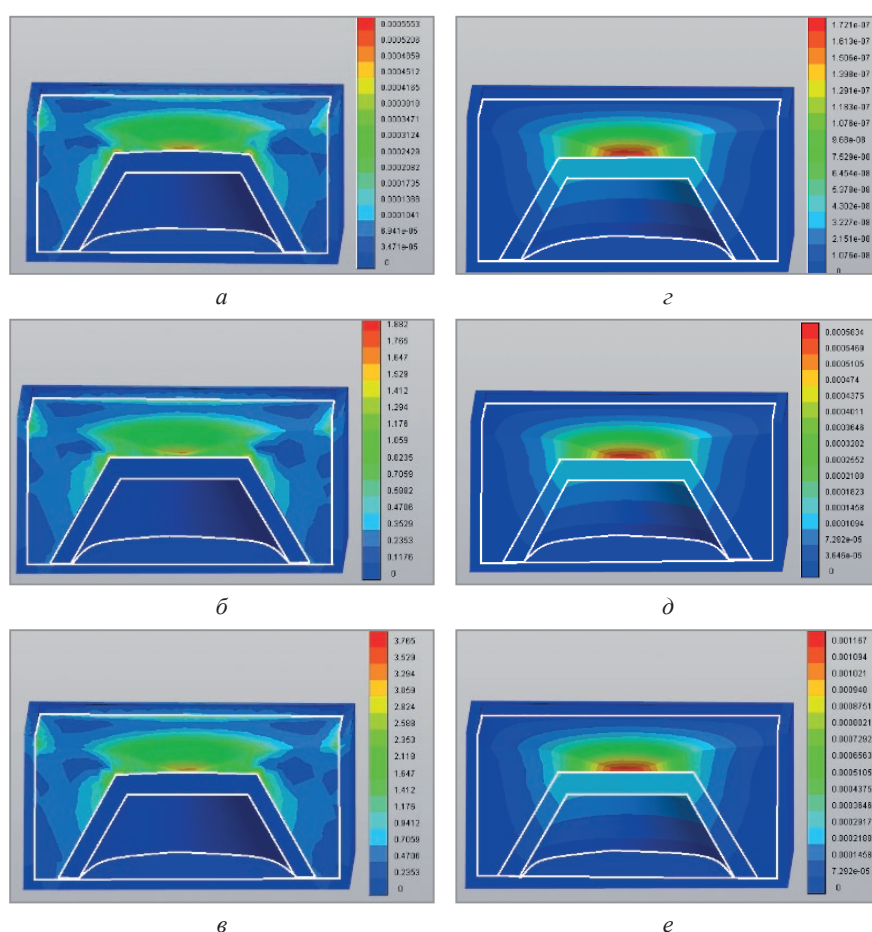


Рис. 9. Распределение напряжений и перемещений для пустотелой модели при давлении:  
 а, г – 0,000059 МПа; б, д – 0,2; в, е – 0,4 МПа;  
 а, б, в – распределение напряжений; г, д, е – распределение перемещений

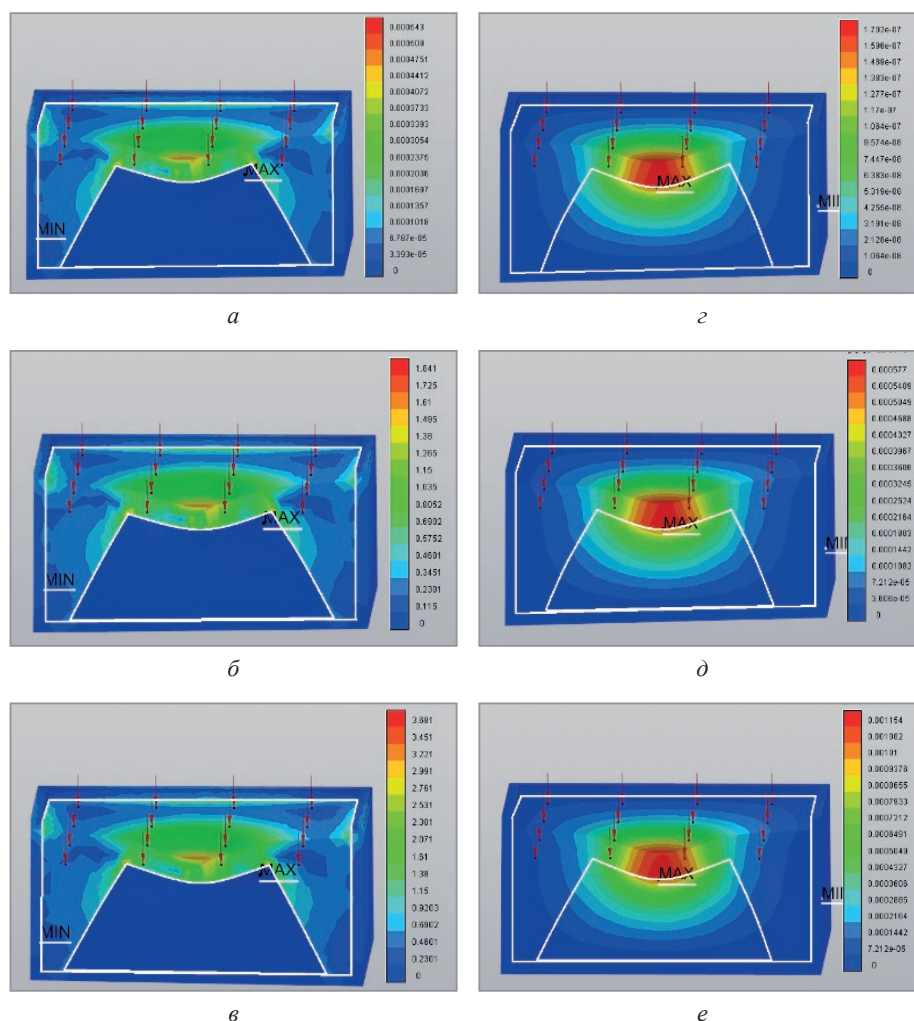


Рис. 10. Распределение напряжений и перемещений для цельной модели при давлении:  
 а, з – 0,000059 МПа; б, д – 0,2; в, е – 0,4 МПа;  
 а, б, в – распределение напряжений; з, д, е – распределение перемещений

Из рисунков 9, 10 можно сделать вывод, что максимальное напряжение как в пустотелой, так и в цельной деталях приходится на середину верхней части. При нагрузке 0,000059 МПа для обеих деталей не возникает серьезных напряжений. При нагрузке 0,2 МПа разница напряжений между двумя деталями минимальна: в пустотелой детали – 1882 кН/м<sup>2</sup>, в цельной – 1840 кН/м<sup>2</sup>. При нагрузке 0,4 МПа напряжение увеличивается вдвое как с первой деталью, так и со второй: в пустотелой – 3765 кН/м<sup>2</sup>, в цельной – 3681 кН/м<sup>2</sup>. Минимальное напряжение для обеих деталей приходится на нижнюю часть.

Проведенное исследование выявило существенную разницу в воздействии на модельный комплект при различных способах формовки. Машинная формовка с давлением 0,2, 0,4 МПа вызывает значительные механические напряжения в обеих деталях, превышающие показатели ручной формовки на несколько порядков. При этом пустотелая конструкция демонстрирует повышенную чувствительность к механическим воздействиям, проявляя более высокий уровень деформаций и напряжений по сравнению с цельной деталью при одинаковом давлении. В отличие от машинного способа ручная формовка с давлением 0,000059 МПа оказывает минимальное воздействие на модельный комплект, создавая равномерное распределение напряжений без выраженных концентраторов. Сравнительный анализ подтверждает компромиссный характер выбора технологии: машинная формовка обеспечивает интенсивное уплотнение смеси, но создает существенные нагрузки на оснастку, в то время как ручной способ сохраняет ресурс модельного комплекта, но менее эффективен для уплотнения. Конструкция цельной детали в обоих случаях показывает лучшую устойчивость к деформациям, что свидетельствует о ее повышенной надежности. Полученные результаты создают объективную основу для оптимизации технологических параметров процессов формовки с учетом требований к качеству уплотнения смеси и сохранности модельного комплекта.

### Выводы

1. В ходе исследования выполнено моделирование нагрузок, действующих на склеенные элементы цельной и пустотелой модели, с использованием программного комплекса SolidWorks и Компас 3D. Проведенный анализ позволил оценить распределение возникающих напряжений и вызванных ими перемещений. Результаты работы наглядно продемонстрировали различие в поведении деталей разной конструкции при одинаковых внешних воздействиях, что подтверждает эффективность применения SolidWorks и Компас 3D для решения задач прочностного моделирования. Разница с данными испытаний на натуральных образцах составила не более 15 %, что позволяет говорить о приемлемости данного способа моделирования простых конструкций.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Никаноров, А. В.** Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов / А. В. Никаноров // Вестник ИрГТУ. Металлургия и материаловедение. – 2018. – № 11. – С. 209–218.
2. **Монастырский, А. В.** PolygonSoft для литейного производства / А. В. Монастырский, Ю. Власов // САПР и графика. – 2022. – № 5. – С. 22–28.
3. **Ковалев, Р. В.** Введение в моделирование динамики механических систем / Р. В. Ковалев, Д. В. Даниленко // САПР и графика. – 2008. – № 4. – С. 26–31.
4. Оптимизация литейных процессов с помощью программного обеспечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosstip.ru>. – Дата доступа: 15.10.2024.
5. **Калиниченко, М. Л.** Технология склеивания: теория, практика, материалы / М. Л. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Калиниченко. – Минск: БНТУ, 2021. – 187 с.
6. Технология литейного производства: учеб. / Б. С. Чуркин [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000. – 662 с.
7. Компьютерное моделирование технологических процессов литейного производства / М. Л. Калиниченко [и др.] // Развитие современной науки: опыт, проблемы, прогнозы: сб. ст. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Петрозаводск: Новая наука, 2025. – С. 85–101.
8. SolidWorks. Обзор возможностей 3D моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru>. – Дата доступа: 15.10.2025.
9. Основные принципы SolidWorks Simulation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://help.solidworks.com>. – Дата доступа: 15.10.2025.
10. ASCON. Описание возможностей системы Компас-3D: функции, технические характеристики и условия лицензирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ascon.net/products/cae>. – Дата доступа: 16.10.2025.

### REFERENCES

1. **Nikanorov A. V.** Sravnitel'nyj analiz komp'yuternyh programm dlja modelirovaniya litejnyh processov [Comparative Analysis of Computer Programs for Modeling Casting Processes]. *Vestnik IrGTU. Metallurgija i materialovedenie = Irkutsk State Technical University Bulletin. Metallurgy and Materials Science*, 2018, no. 11, pp. 209–218.
2. **Monastyrskij A. V., Vlasov Ju.** PolygonSoft dlja litejnogo proizvodstva [PolygonSoft for Foundries]. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*, 2022, no. 5, pp. 22–28.
3. **Kovalev R. V., Danilenko D. V.** Vvedenie v modelirovanie dinamiki mehanicheskix sistem [Introduction to Modeling the Dynamics of Mechanical Systems]. *SAPR i grafika = CAD and Graphics*, 2008, no. 4, p. 26–31.
4. *Optimizacija lit'evykh processov s pomoshch'yu programmnogo obespecheniya* [Optimization of casting processes using software]. Access mode: <http://www.rosstip.ru> (accessed 15.10.2024).
5. **Kalinichenko M. L., Dolgij L. P., Kalinichenko V. A.** *Tehnologija skleivaniya: teorija, praktika, materialy* [Bonding technology: theory, practice, materials]. Minsk, BNTU Publ., 2021, 187 p.
6. **Churkin B. S.** *Tehnologija litejnogo proizvodstva* [Foundry technology]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. gos. prof.-ped. un-ta Publ., 2000, 662 p.
7. **Kalinichenko M. L.** Komp'yuternoe modelirovanie tehnologicheskix processov litejnogo proizvodstva [Computer Modeling of Foundry Processes]. *Razvitie sovremennoj nauki: opyt, problemy, prognozy: sb. st. IX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Development of Modern Science: Experience, Problems, Forecasts: Collection of Articles from the IX International Scientific and Practical Conference*. Petrozavodsk, Novaja nauka Publ., 2025, pp. 85–101.
8. *SolidWorks. Obzor vozmozhnostej 3D modelirovaniya* [SolidWorks. Overview of 3D modeling capabilities]. Access mode: <https://www.solidworks.com/ru> (accessed 15.10.2025).
9. *Osnovnye principy SolidWorks Simulation* [Basic Principles of SolidWorks Simulation]. Access mode: <https://help.solidworks.com> (accessed 15.10.2025).
10. *ASCON. Opisanie vozmozhnostej sistemy Kompas-3D: funkcii, tekhnicheskie harakteristiki i usloviya licenzirovaniya* [ASCON. Description of the capabilities of the Kompas-3D system: functions, technical characteristics, and licensing terms]. Access mode: <https://ascon.net/products/cae> (accessed 16.10.2025).