



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2022, № 1, с. 23-33.

Поступила: 27.05.2022

Окончательный вариант: 11.06.2022

© УлГУ

УДК 004.896

Исследование распределения температурного поля в автоклаве

Новицкий В.С.^{*}, Павлов П.Ю.

[*nzxcvb1998@list.ru](mailto:nzxcvb1998@list.ru)

УлГУ, Ульяновск, Россия

Приводятся результаты исследования, посвящённого изучению влияния изменения температуры воздуха при использовании в экспериментальном моделировании. В случае размещения нескольких деталей, которые могут обрабатываться одновременно с использованием конвективного нагрева в автоклаве. Из-за неопределённостей, включая размещение инструмента, конвективные граничные условия меняются в каждом прогоне. В результате температурные характеристики некоторых деталей могут не соответствовать техническим характеристикам процесса из-за недостаточного отверждения или прогрева. Термохимический анализ с использованием моделирования методом конечных элементов обычно проводится перед изготовлением на основе предполагаемого диапазона. Для мониторинга температуры в процессе нагрева, термометры помещаются под детали или на детали вблизи критических мест. Данные могут быть использованы для обратного расчёта с использованием анализа методом проб и ошибок. Однако, поскольку обратная задача теплопередачи некорректна, решение оказывается неединственным. Предложены рекомендации по улучшению процесса изготовления крупногабаритных каркасных пресс-форм и оснасток и автоклавирования с точки зрения скорости нагрева и равномерности температуры.

Ключевые слова: автоклав, оснастка, Ansys CFX симулятор, температура, процесс формования

Введение

Процесс отверждения в автоклаве является незаменимым производственным методом для изготовления крупных и высокоэффективных композитных компонентов, таких как крылья и фюзеляжи [1,2]. В автоклавном процессе температура и давление являются двумя жизненно важными факторами, которые оказывают значительное влияние на механические свойства композитов [3-5]. В качестве отверждения при повышении температуры терморезистивные композиты обычно проходят три стадии [6,7]: низкотемпературное гелеобразование, высокотемпературное отверждение и термическую циклизацию. Как правило, при низких температурах происходит увеличение

молекулярной массы и вязкости смолы. Это может вызвать гелеобразование и начало отверждения, что ведёт к неравномерному распределению температурного поля композитов в процессе обработки в автоклаве. Поэтому очень важно способствовать распределению температурного поля композитных деталей для обеспечения качества продукта. Конвективная теплопередача и теплопроводность являются двумя важными видами теплопередачи режимы в автоклавном процессе. По мере увеличения размера композитного компонента оснастка оказывает значительное влияние на изготовление компонента из-за большой тепловой массы по сравнению с тепловой массой композитной детали. Следовательно, в процессе обработки в автоклаве распределение температурного поля компонента и формы тесно связаны [8,9]. Равномерность температуры оснастки определяет достижение качества конечного композитного компонента. Однако большая форма, обладающая сложностью конструкции, приводит к низкой скорости нагрева. Кроме того, неоднородное температурное поле определяется изменением скорости в процессе обработки в автоклаве. Чрезмерная температура является неблагоприятным фактором, влияющим на отверждение композитной формы, образуя остаточные напряжения и деформации, которые ослабляют качество конечного компонента. Таким образом, повышение скорости нагрева и равномерное распределение температуры формы играет решающую роль в обеспечении качества композитных деталей.

Цель работы состоит в исследовании распределения температурного поля в автоклаве, для улучшения равномерности распределения тепла за счет устранения образования мест теплового затенения, которые отрицательно влияют на проклей детали.

1. Описание установки оснастки с датчиками в автоклав

Процесс работы проводился в полномасштабном промышленном автоклаве с рабочей зоной длиной 6 м и диаметром 3 м. На рис. 1 показана примерная установка оснастки с датчиками. Оснастка была размещена в центре подвижного пола. Ширина, длина и высота оснастки составляет 1, 2 и 0,5 м соответственно. Радиус поверхности оснастки составлял 850 мм.



Рис. 1. Примерная установка в автоклава

Схема оснастки с 12 точками измерения температуры показана на рис. 1. Положения 12 точек соответствовали положениям термопреобразователя. Выбранные точки покрывали основную область панели оснастки, чтобы охарактеризовать температурное поле. Термопреобразователи были закреплены на поверхности панели оснастки белой изоляционной лентой. Точки расположены на одном конце формы, который находился близко к дверце автоклава и на противоположной стороне, глубже автоклава.

Кривая цикла отверждения включает в себя три стадии постоянной температуры и фазу понижающейся температуры, показанной на рис. 2 кривой цикла отверждения.

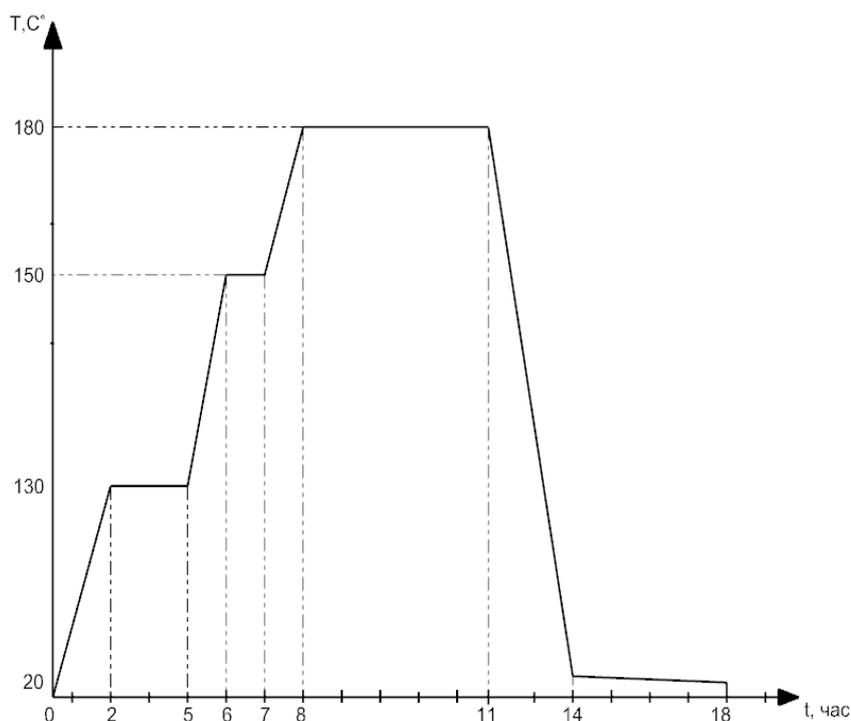


Рис. 2. Кривая цикла отверждения

На первой стадии производится повышение температуры с 20 до 130°C, и температура остается на уровне 130°C в течение 3 часов. На второй стадии температуры повышается со скоростью нагрева 1,8°C/мин до 150°C и запуск вакуумного насоса. На следующем этапе температура повышалась до 180°C. Последней фазой была стадия снижения со скоростью 1,2°C/мин. Температура отверждения определялась тепловыми свойствами композиционных материалов. В расчетной модели давление было установлено на уровне 0,5 МПа, что соответствует 5 кгс/см².

Для проектирования модели, использовалась система проектирования 3D моделей Siemens NX, в которой была разработана модель двухэтажной установки оснастки в автоклав (рис. 3).

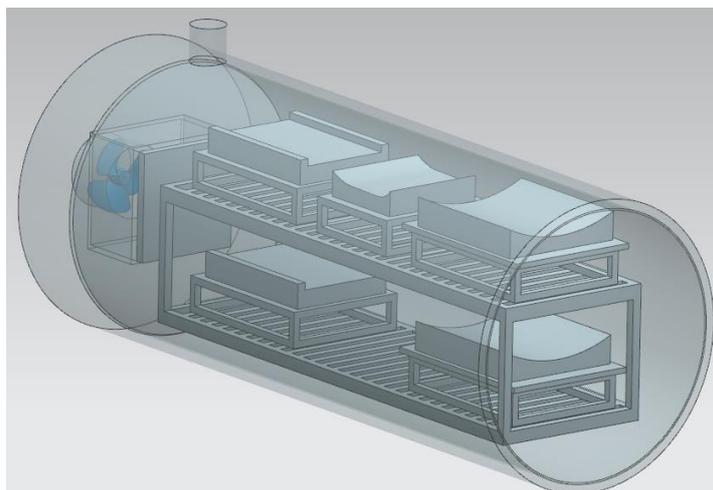


Рис. 3. Двухэтажная установка оснастки в автоклав

2. Задание параметров расчетной модели

После разработки трёхмерной модели автоклава с оснасткой, создавалась схема системы циркуляции воздуха (рис. 4). Схема циркуляции воздуха представляет собой внутреннюю полость с цилиндрическим пространством. Поверхность автоклава представляла собой нескользящую и изолирующую стенки. Граничное условие температуры на входе задавалось графиком нагрева. Средняя скорость входного потока воздуха задавалась 17,38 м/с. Выпускное отверстие задавалось поверхностью с параметром «выход».

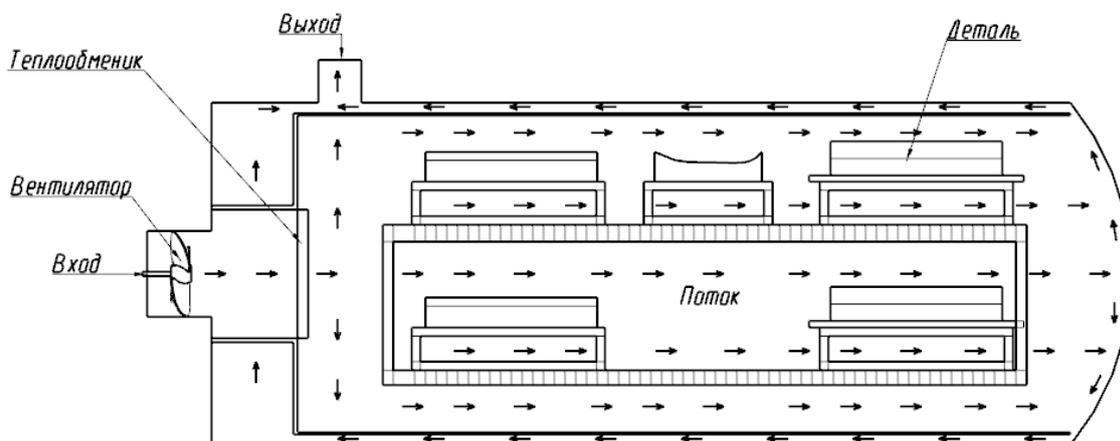


Рис. 4. Схема системы циркуляции воздуха

Из-за сложной структуры оснастки была выбрана неструктурированная сетка, которая была построена в универсальной программной системе ANSYS, где мелкие элементы расчетной модели описывались сеткой с большим разрешением, а крупные с меньшим разрешением с целью уменьшения используемых вычислительных ресурсов (рис. 5).

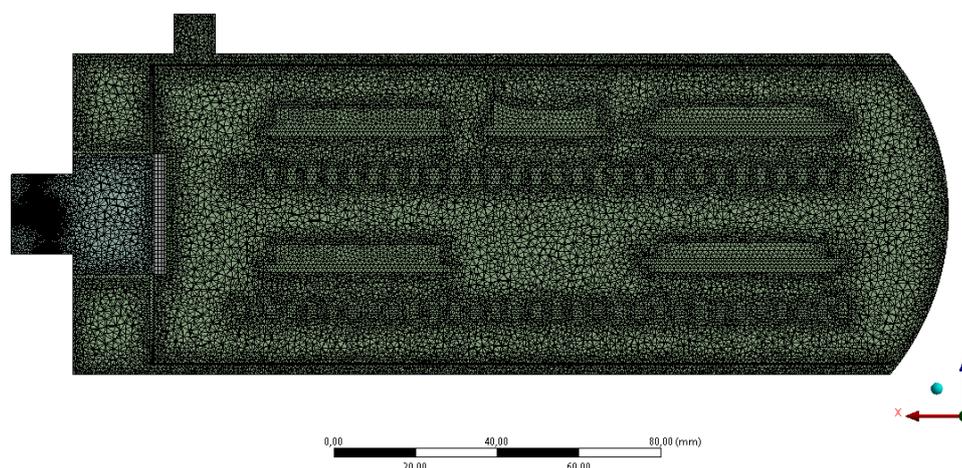


Рис. 5. Геометрия распределения сетки автоклава

3. Результаты эксперимента

Далее рассмотрим результаты расчетов распределения тепла и скорости воздушного потока в автоклаве.

Распределение скорости воздушного потока в автоклаве на этапе 2 приведена на рис. 6. Средняя скорость потока в рабочей зоне составляет 15,25 м/с. Температура в рабочей зоне от 359К до 459К, что соответствует интервалу 85°С до 180°С.

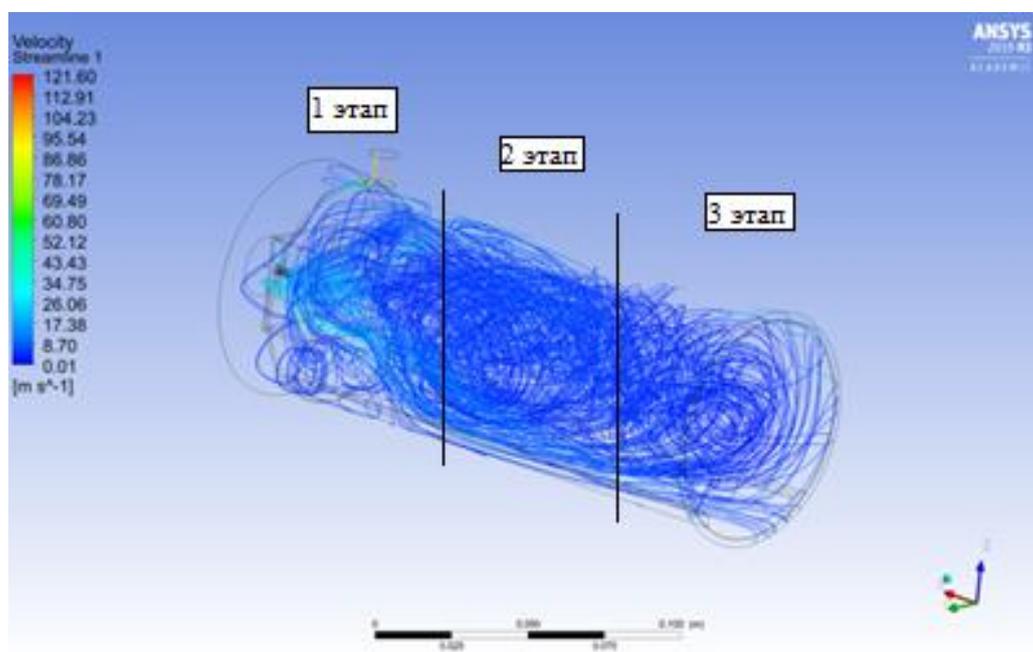


Рис. 6. Распределение скорости потока воздуха в автоклаве

В результате производственной практики и проведенных вычислений выявлено, что при двухэтажной загрузке автоклава имеются зоны температурного затенения и зоны с повышенной температурой. Что, в свою очередь, приводит к возникновению либо участков непрочья, либо к сгоранию детали, особенно при экзотермической химической

реакции в материале детали. Распределение температурного поля в автоклаве приведено на рис. 7.

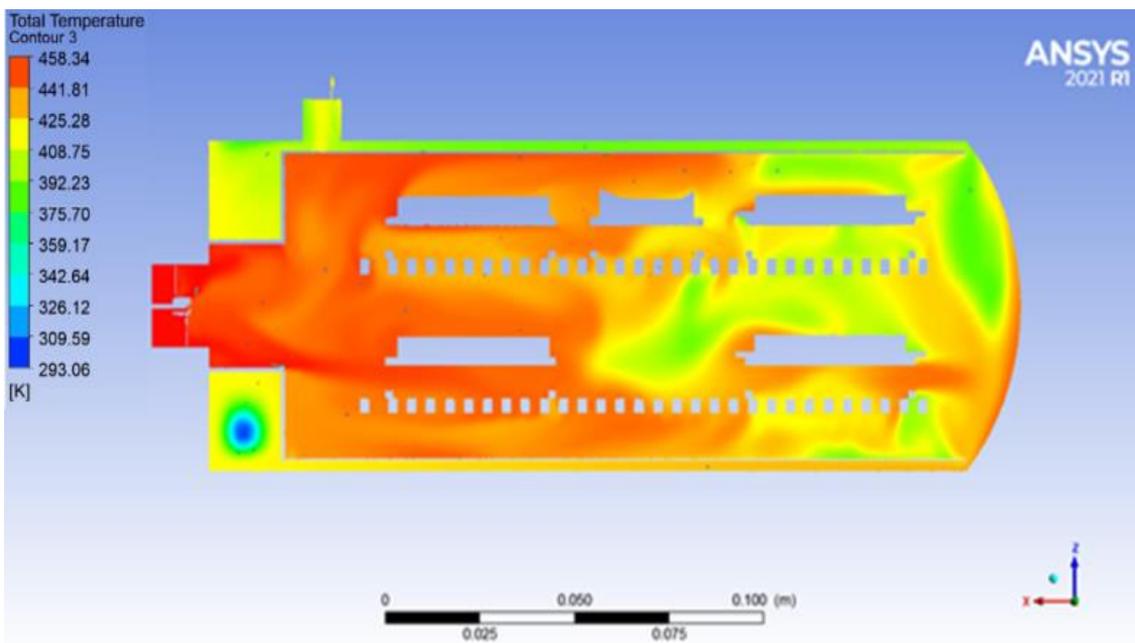


Рис. 7. Величина скорости течение температуры газа автоклава

На рис. 8 приведено распределение температуры на поверхностях заготовок и технологической оснастки.

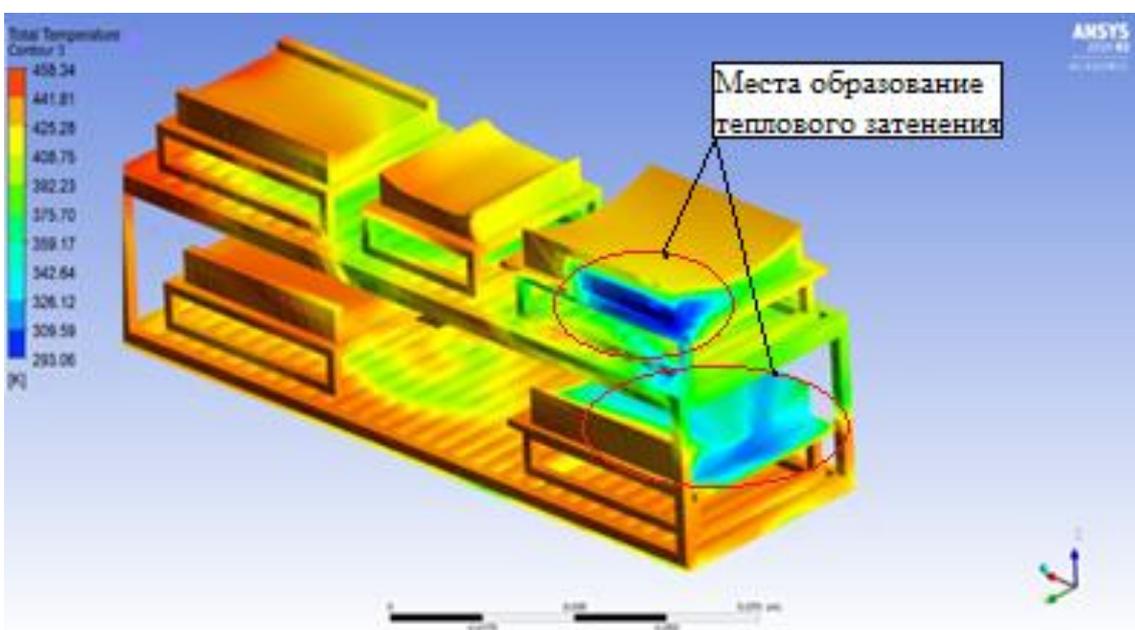


Рис. 8. Образование теплового затенения

4. Доработка модели

Для предотвращения мест теплового затенения были смоделированы направляющие экраны (рис. 9). Форма экранов была выбрана исходя из простой технологии производства и крепления к каркасу заклепками, которая представляет собой изогнутую пластину, изготовленную из сплава алюминия с габаритами 750x150x250 мм и массой 90 г.

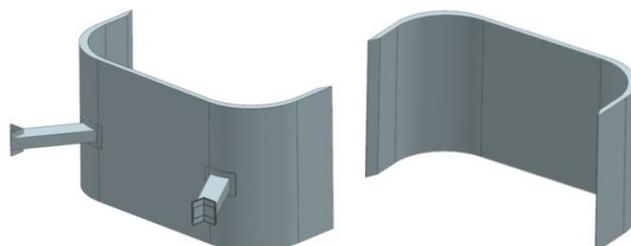


Рис. 9. Направляющая потока и способ крепления

Таким образом, направляющие экраны позволили изменить направление потока (рис. 10), что подтверждается результатом графика температуры в 5 датчиках, показанной на рис. 11.

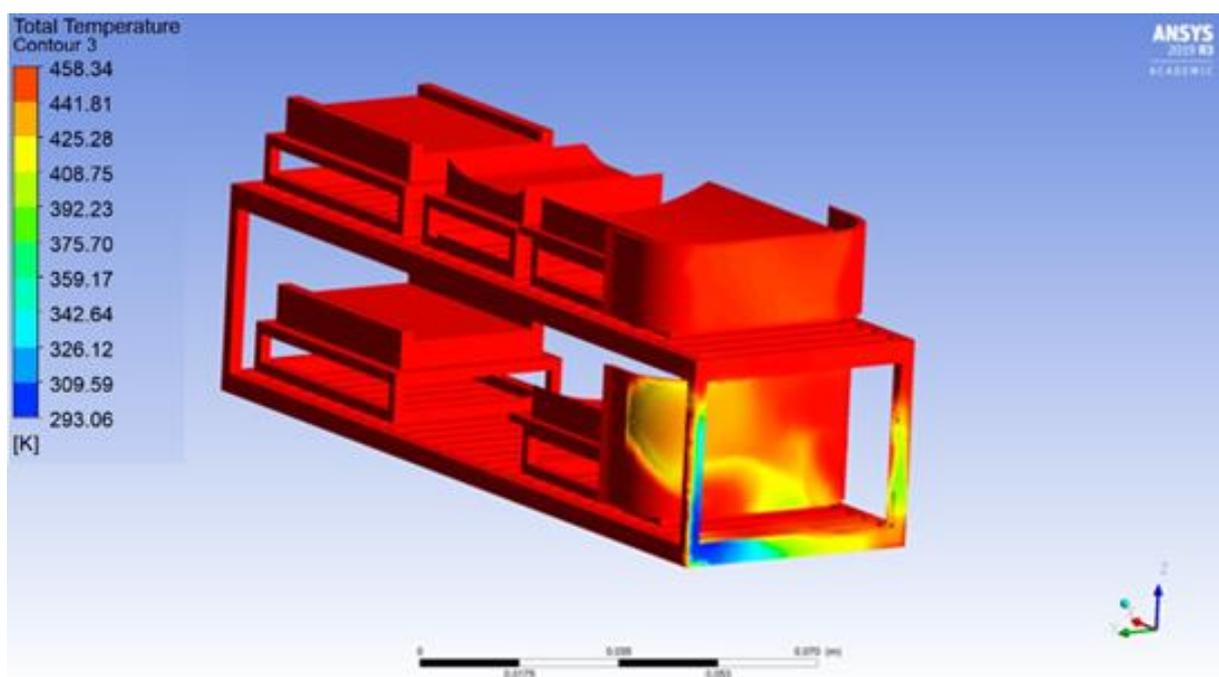


Рис. 10. Доработанная модель

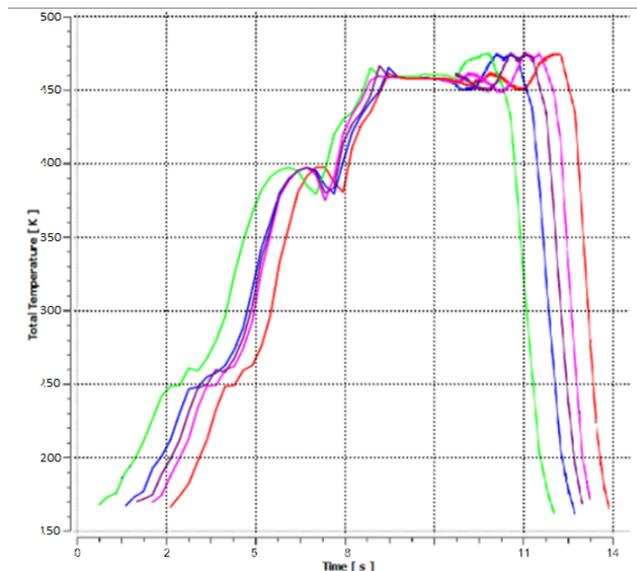


Рис. 11. Разница температур в пяти датчиках

Показатель расхождения были относительно большими в периоды 11 мин. Средняя разница температур в пяти датчиках представлена на рис. 12. График показывает перемещение потока с подветренной стороны на наветренную, из-за того, что направляющие экраны блокировали поток воздуха.

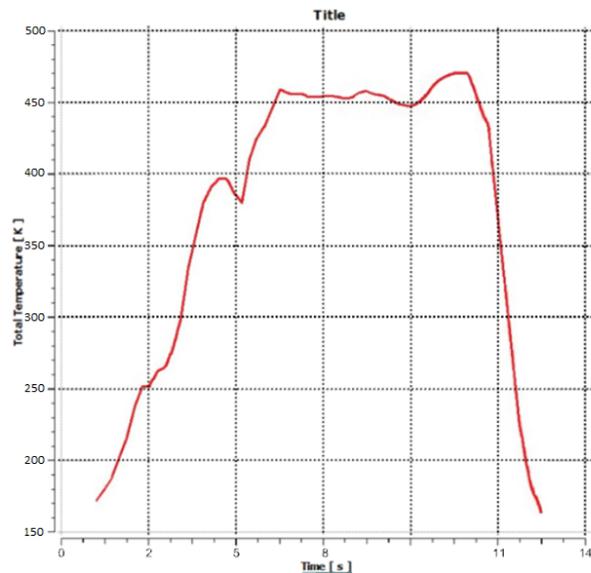


Рис. 12. Средняя разница температур в пяти датчиках

В результате, изменение является эффективным методом улучшения равномерности распределения температуры. Максимальная средняя разница во время стадии повышения температуры составила 458,34К или 184,85°C. Максимальная относительная разница между численными и экспериментальными результатами составила 11,9%.

На рис. 13 показана зависимость температуры детали от времени, использованная в моделировании и в процессе работы. На стадии постоянной температуры и стадии понижающейся температуры температура воздуха испытывала некоторые колебания.

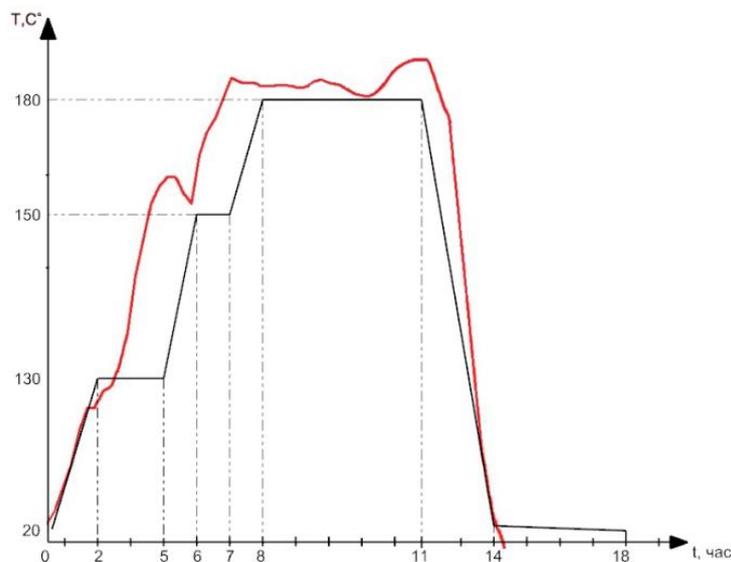


Рис. 13. Зависимость температуры детали от времени, использованная в моделировании и полученная в эксперименте

Подсчитано, что при использовании направляющих экранов сокращения количества запусков автоклава по причине непрочлея мест теплового затенения деталей в производстве композитов позволило сократить потребление электроэнергии на 30,96%, задействование рабочей силы крановщика на 84,20% и оператора автоклава на 78,90%.

Заключение

В работе были проведены эксперименты по распределению температурного поля в автоклаве. Разработана численная модель автоклавного процесса с использованием метода конечных объемов. Наконец, был предложен способ управления распределением температуры с помощью направляющих экранов. По итогам работы можно сделать следующие выводы:

1. Разница между прогнозируемой и экспериментальной температурой составила 11,9%, что свидетельствует о неплохой согласованности результатов моделирования с реальным объектом и достаточной адекватности используемой модели.
2. Предлагаемый способ управления позволяет значительно улучшить равномерность температуры в автоклаве и достичь хороших результатов по устранению мест теплового затенения.

Список литературы

1. Upadhy A.R., Dayananda G.N., Kamalakannan G.M., Ramaswamy Setty J., Christopher Daniel J. Autoclaves for Aerospace Applications: Issues and Challenges // *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2011, Article ID 985871, 11 pages, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/985871>
2. Monaghan M., Mallon P. Development of a computer controlled autoclave for forming thermoplastic composites // *Composites Manufacturing*. 1990, v.1, iss. 1, 1990, p. 8-14. ISSN 0956-7143, [https://doi.org/10.1016/0956-7143\(90\)90269-3](https://doi.org/10.1016/0956-7143(90)90269-3).
3. Baran I., Cinar K., Ersoy N., Akkerman R., Hattel J.H. A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes // *Arch Computat Methods Eng*. 2017, v.24, p. 365–395. <https://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>.
4. Sun J., Gu Y., Li Y., Li M., Zhang Z. Role of Tool-Part Interaction in Consolidation of L-Shaped Laminates during Autoclave Process // *Appl. Compos. Mater*. 2011, v.19, p.583–597.
5. Fernlund G., Rahman N., Courdji R., Bresslauer M., Poursartip A., Willden K., Nelson K. Experimental and numerical study of the effect of cure cycle, tool surface, geometry, and lay-up on the dimensional fidelity of autoclave-processed composite parts // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002, v. 33, iss. 3, p. 341-351. ISSN 1359-835X, [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(01\)00123-3](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(01)00123-3).
6. Khoun L., Centea T., Hubert P. Characterization Methodology of Thermoset Resins for the Processing of Composite Materials – Case Study: CYCOM 890RTM Epoxy Resin // *J. Compos. Mater*. 2010, v.44, p.1397–1415.
7. Khoun L. *Process-Induced Stresses and Deformations in Woven Composites Manufactured by Resin Transfer Moulding*. Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, QC, Canada, July 2009.
8. Ma_ezzoli A., Grieco A.D. Optimization of Parts Placement in Autoclave Processing of Composites // *Appl. Compos. Mater*. 2012, v.20, p. 233–248.
9. Twigg G., Poursartip A., Fernlund G. Tool-part interaction in composites processing. Part II: Numerical modelling. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf*. 2004, v.35, iss.1, p.135-141.

Study of the temperature field distribution in an autoclave

*Novitskiy, V.S. *, Pavlov, P.Y.*

* nzxcvb1998@list.ru

Ulyanovsk state university, Ulyanovsk, Russia

The paper discusses a study devoted to the study of the influence of air temperature changes when used in experimental modeling. In the case of placing several parts, simultaneous processing using

convective heating in an autoclave is possible. Due to uncertainties, including instrument placement, the convective boundary conditions change with each run. As a result, the temperature performance of some parts may not match the process specifications due to insufficient curing or heating. Thermochemical analysis using finite element modeling is usually performed before production based on the expected range. To control the temperature during the heating process, thermocouples are placed under or on parts near critical locations. The data can be used for backward calculation using trial and error analysis. However, since the inverse heat transfer problem is ill-posed, the solution turns out to be non-unique. Recommendations are proposed for improving the process of manufacturing large-sized frame molds and tooling and autoclaving in terms of heating rate and temperature uniformity.

Keywords: *autoclave, tooling, Ansys CFX simulator, temperature, molding process*