# INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INFRARED HEATING POWER ON THE KINETICS OF THE CURING PROCESS OF FIBERGLASS PARTS BASED ON EPOXY RESIN

**Novikov A.D., Malysheva G.V., Kosimov U.[1]**
[1]Tashkent state transport university (Tashkent, Uzbekistan)
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

**Annotation:** The results of modeling the heating kinetics of a 20 mm thick fiberglass part are presented. The simulation accounted for exothermic effects associated with the curing characteristics of the epoxy binder. Using Siemens NX software, the temperature distribution across the thickness of the fiberglass sample was determined. It was established that the curing process of thick composite structures is significantly influenced by the self-heating of the oligomer and the changing volumetric heat capacity during polymerization.

**Keywords:** glass-fibre-reinforced polymer, epoxy binder, curing, infrared heating.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНОСТИ УСТАНОВКИ ИНФРАКРАСНОГО НАГРЕВА НА КИНЕТИКУ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

**Малышева Г.В., Новиков А.Д., Косимов У.Д.[1]**
[1]Ташкентский государственный транспортный университет, (Ташкент, Узбекистан)
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, (Москва, Россия)

**Аннотация:** Приведены результаты моделирования кинетики процесса нагрева детали из стеклопластика, толщиной 20 мм. При моделировании учитывались экзотермические эффекты, связанные с особенностями отверждения эпоксидного связующего. С использованием программного обеспечения Siemens NX, определено распределение температур по толщине образца из стеклопластика. Установлено, что на процесс отверждения композитных конструкций большой толщины значительное влияние оказывает саморазогрев олигомера, а также изменяющееся значение объемной теплоемкости в процессе полимеризации.

**Ключевые слова:** стеклопластик, эпоксидное связующее, отверждение, инфракрасный нагрев.

**1. Введение.** В настоящее время все более широкое распространение получают такие полимерные композиционные материалы (ПКМ), как стеклопластики, органопластики и базальтопластики, которые используются в авиастроении, машиностроении, при производстве изделий ракетно-космической техники и во многих других отраслях промышленности [1, 2]. Если армирующий наполнитель в таких ПКМ представляет собой ткань, то в условиях единичного и мелкосерийного производства, основной технологией изготовления деталей является вакуумная инфузия, а в условиях серийного производства – пропитка под давлением (разновидностью которой является технология RTM) [3].

Как правило, в качестве связующего при производстве композитных конструкций используют эпоксидные материалы, отверждение которых может происходить при повышенных температурах в диапазоне от 100°C до 200°C. Процесс отверждения (или образования сетчатых полимеров), представляет собой необратимый переход связующего вещества из жидкого

агрегатного состояния в твердое, что приводит к получению полимеров с пространственной структурой. Выбор температуры отверждения определяется составом используемого связующего, однако, на кинетику процесса нагрева и суммарную продолжительность процесса отверждения оказывает влияние механизм теплопередачи, который полностью определяется используемым технологическим оборудованием. Кроме того, существенное влияние оказывает эффект саморазогрева, который тем больше, чем больше высота столба жидкости полимеризующегося олигомера.

Большинство волокнистых армирующих материалов имеют низкие теплофизические характеристики (теплоемкость и теплопроводность), что приводит к возникновению по толщине композитной конструкции больших перепадов температур во время отверждения. К таким армирующим наполнителям относятся стеклянные, базальтовые и органические ткани (ленты, волокна). В научной литературе изучению кинетики процесса нагрева при отверждении деталей из ПКМ, в том числе и стеклопластиков, уделено большое внимание [4-9], однако, подавляющее большинство исследователей рассматривали только нагрев в условиях конвекции, при котором в качестве технологического оборудования для нагрева используются сушильные шкафы (или печи). В настоящее время, все более широкое распространение получают установки инфракрасного нагрева (ИК-установки), которые обеспечивают быстрый нагрев тонкостенных композитных конструкций до температур +150°С и даже более за счет излучения.

**2. Объекты и методы исследований.** В работе проведена теоретическая оценка распределения температуры в процессе нагрева детали в зависимости от мощности используемого нагревателя. Расчетная модель представляет с собой квадратную деталь из стеклопластика (табл. 1) с геометрическими размерами в 200х200х20мм. Оснастка выполнена из такого же материала, как и деталь. В качестве наполнителя использован стохастический стекломат, что позволяло рассматривать данный ПКМ, как изотропный. В качестве связующего использован эпоксидный состав марки ВСК-14-1, который получил широчайшее распространение в авиастроении [10].

**Таблица 1.**

**Свойства стеклопластика**

| | |
|---|---|
| Плотность, кг/м$^2$ | 1800 |
| Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С) | 900 |
| Теплопроводность, Вт/(м·°С): | |
| $\lambda_1$ | 0,55 |
| $\lambda_2$ | 0,55 |
| $\lambda_3$ | 0,51 |
| Коэффициент теплового расширения, °С$^{-1}$ | $5 \cdot 10^6$ |

Процесс моделирования производился в CAD/CAM/CAE программе Siemens NX в приложении Пре/постпроцессор с инструментами для конечно-элементного моделирования и визуализации результатов, которое включает опорные многопрофильные рабочие потоки симуляции.

Процесс моделирования состоял из нескольких этапов:

•Создание электронной геометрической модели детали и оснастки;

•Создание конечно-элементной модели, учитывающей материал его свойства и теплофизические свойства конструкции;

•Задание граничных условий и нагрузок на объекте моделирования.

Дополнительно моделируется конвекция на всех поверхностях детали, кроме нижней поверхности, чтобы учесть характеристики окружающей среды – воздуха в комнате. Для этого задаются такие характеристики, как

- коэффициент конвекции, со значением в 15 $\frac{W}{m^2K}$;

- начальная температура окружающей среды 25°С.

Но при этом в настройках закладывалась возможность нагрева окружающего воздуха со скоростью 0,5$\frac{°C}{мин}$ максимум до 36°С.

Следующим шагом было задание радиационного нагрева, направленного от нагревателей сверху в низ на деталь. В настройках были заданы:

- ИК-спектр;
- значение тепловых нагрузок при различных режимах нагрева ламп в 1600W и 2400W.

Для деталей были заданы термооптические свойства стеклопластика с коэффициентом излучения равным 0,8.

Значения тепловой нагрузки, в зависимости от мощности используемого источника нагрева, приведены в табл. 2.

**Таблица 2.**

**Значения тепловой нагрузки в зависимости от времени, приходящийся на один элемент сетки**

| Время, мин | Мощность ИК-ламп | Тепловая нагрузка |
|---|---|---|
| 0-37 | 1600 | 0,05 |
| 37-40 | | 0,14 |
| 40-… | | 0,27 |
| 0-20 | 2400 | 0,07 |
| 20-23 | | 0,1 |
| 23-… | | 0,35 |

**3.Результаты и обсуждение**

На рис. 1 приведено распределения температур на верхней, центральной и нижней частях детали на 55 минуте нагрева. Первоначально, нагрев проводили до температуры +120°С.

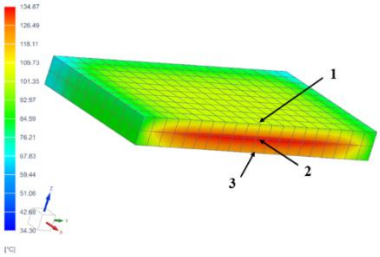


**Рис. 1. Пример расчёта температуры на различных частях детали: 1 – верхняя; 2 – средняя; 3 – нижняя**

Предполагалось, что продолжительность нагрева не будет превышать 30 мин. На рис. 2 и 3 показано, как изменяется значения температуры по толщине стеклопластиковой детали в зависимости от мощности используемой для нагревания ИК-установки.

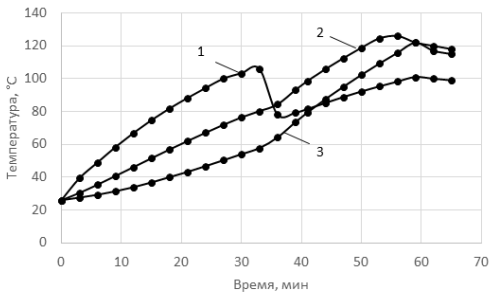


**Рис. 2. Градиент температур по толщине образца при мощности нагревателя 1600W для различных частей детали: 1 – верхняя; 2 – средняя; 3 – нижняя**

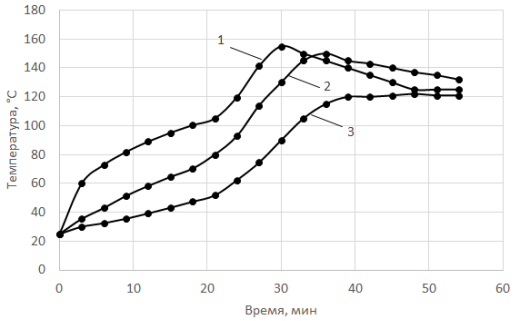


**Рис. 3. Градиент температур по толщине образца при мощности нагревателя 2400W для различных частей детали: 1 – верхняя; 2 – средняя; 3 – нижняя**

В результате проведенных расчетов установлено, что при мощности нагревательной установке в 1600 Вт (рис. 2) не удается обеспечить нагрев до требуемой температуры за заданный промежуток времени (30 мин) и поэтому ограничились нагревом до температуры +110 °С. На 35 минуте нагрев выключался, в результате чего верхняя часть детали очень быстро остывала до температуры +80 °С. Однако, в это же время началась экзотермическая реакция, которая, фактически, стала дополнительным источником нагрева, что позволило на 55 минуте достичь температуры в средней части детали +130 °С. Экзотермическая реакция обеспечила прогрев средней и нижней частей детали, например, температура на нижней части детали достигла температуры +100 °С только к 60 мин. Таким образом, использование для нагрева ИК-установки, мощностью 1600 Вт не только не обеспечивает равномерный прогрев детали из стеклопластика по толщине, но и не позволяет достичь требуемой температуры нагрева за заданный промежуток времени. На 60 минуте нагрева, разница между верхней и нижней частями детали из стеклопластика составила чуть более 20 °С.

Анализ результатов, приведенных на рис. 3, позволяет сделать следующие выводы: при мощности 2400 Вт деталь из стеклопластика нагревается существенно быстрее и достигает температуры +160°С в течение 30 мин. Однако, характер распределения температур в разных частях детали полностью аналогичен тому, что представлено на рис. 2, т.е. непосредственно сразу же после отключения источника нагрева, происходит быстрое охлаждение верхней части детали, тогда как средняя и нижняя части, наоборот, нагреваются. Таким образом, на пике экзотермической реакции на всем временном промежутке наблюдается более равномерный прогрев всех слоев и достижение необходимых температурных значений. На 50 минуте нагрева, разница между верхней и нижней частями детали из стеклопластика составила около 10°С.

При уменьшении толщины детали имеет место пропорциональное снижение значений градиента температур по толщине и для деталей из стеклопластика, толщиной 5 мм он составляет не более 15°С, а для деталей, толщиной 10 мм, не превышает 26°С.

**4. Заключение.** Разработана модель из изотропного стеклопластика и проведены расчеты, позволившие определить кинетику изменения температур на различных частях детали (верхней, средней и нижней) при использовании для нагрева инфракрасных установок.

В результате проведенных расчетов установлено, что для изотропной детали из стеклопластика, толщиной 20 мм, не удается обеспечить ее равномерный прогрев по толщине при использовании установок ИК-нагрева, заданной мощностью в 1600W и 2400W. Сравнительный анализ двух рассмотренных установок показал, что только установка, мощностью 2400W позволяет обеспечить нагрев верхней части детали из стеклопластика до заданной температуры в +130°С за 22 мин, однако значения градиента температур по толщине составило 45°С.

Таким образом, только установка ИК-нагрева, мощностью 2400 W может быть использована для отверждения деталей из стеклопластика, толщиной 20мм и более.

**Список литературы**

1. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е., Рубцова Е.В., Петрова А.П. Исследование эпоксидно-полисульфоновых полимерных систем как основы высокопрочных клеев авиационного назначения // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №3. С.7-12.
2. Баурова Н.И., Зорин В.А. Применение полимерных композиционных материалов при производстве и ремонте машин: учеб. пособие. М.: МАДИ, 2016. 264 с.
3. Баженов, А.А., Берлин, А.А. Кульков, В.Г. Ошмян. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 352 с.
4. Maung P.P., Htet T.L., Malysheva G.V. Simulation and optimization of vacuum assisted resin infusion process for large0sized structures made of carbon fiber-reinforced plastic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineeries. 2020. 709 (2). 022041.
5. Yanyan C., Nelyub V.A., Malysheva G.V. An investigation of the kinetics of the heating process for made of carbon fiber in the process of curing // Polymer Science-Series D. 2019. 12(3). PP. 296-299.
6. Кепман А В, Макаренко И В, Страхов В Л. Экспериментальное исследование комплекса термохимических, теплофизических свойств и кинетики процесса отверждения полимерных композиционных материалов // Композиты и наноструктуры, 2016. № 8(4): С. 251-264.
7. Мараховский П С, Баринов Д Я, Чуцкова Е Ю. Отверждение многослойных полимерных композиционных материалов. Часть 2. Формование толстостенной плиты стеклопластика // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2018 (6) С. 7-14.
8. Хасков М А, Сафронов Е В. Моделирование процессов отверждения термореактивных матриц на примере сложнопрофильного образца // Труды ВИАМ, 2019 №12 С.46-54.
9. Баринов Д.Я., Майорова И.А., Мараховский П.С., Зуев А.В., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф. Математическое моделирование температурных полей при отверждении толстостенной плиты стеклопластика // Перспективные материалы. 2015. №4. С.5-14.
10. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие, клеевые препрег. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.