

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РЕЖИМЫ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

О. С. Дмитриев, А. А. Барсуков

*Кафедра «Физика», phys@tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

**Ключевые слова:** задача оптимизации; полимерные композиты; режим отверждения; стеклопластики; углепластики; экзотермические процессы.

**Аннотация:** Рассмотрены технологические проблемы, возникающие вследствие экзотермических перегревов внутренних слоев толстостенных пластин из полимерных композитов в процессе отверждения. На основе численного моделирования и экспериментальных исследований установлен характер температурных неоднородностей, являющихся результатом экзотермических процессов при отверждении полимерных композитов. Численно оценено влияние величины ограничений, используемых при решении задачи оптимизации, на температурно-временные режимы отверждения. Рассчитаны оптимальные режимы отверждения плоских изделий различной толщины из стеклопластика и углепластика.

---

### Введение

На современном этапе развития техники полимерные композиты (ПК) на основе термореактивных связующих нашли широкое применение во многих отраслях промышленного производства. Они прочно заняли особое положение среди конструкционных материалов благодаря их уникальным свойствам, отсутствующим у природных и традиционных материалов. Их применяют в электро- и радиотехнике, энергетике, авиации, судостроении, химической промышленности, космической, автомобильной, железнодорожной, сельскохозяйственной технике и многих других областях [1 – 4]. Изделия из полимерных композитов имеют различную толщину и габаритные размеры от мелких и тонкостенных до крупногабаритных, толщина которых может достигать 20...30 мм, а в некоторых изделиях 50...80 мм. Встречаются изделия длиной до 12 м, диаметром до 750 мм и толщиной стенки 300 мм, как, например, высоковольтные вводы с твердой внутренней RIP-изоляцией (англ. *Resin Impregnated Paper* – бумага пропитанная смолой) [4].

Технологический процесс изготовления изделий из ПК предусматривает тепловую обработку, в процессе которой активируется термореактивное связующее и происходит химический процесс сшивки полимера или отверждение. Процесс отверждения термореактивных смол и связующих на их основе сопровождается экзотермической реакцией. Выделяемое тепло ускоряет химический процесс и при бесконтрольном проведении процесса отверждения может приводить к негативным последствиям, связанным с температурной деструкцией связующего, аккумуляции внутренних напряжений, короблению готового изделия и т.д.

Таким образом, качественные показатели изделий из ПК и эффективность производства в конечном итоге определяются оптимальностью температурно-

временного режима отверждения ПК. Поэтому процесс отверждения проводят по заранее определенному температурно-временному режиму, при котором негативные проявления экзотермической реакции отверждения сведены к минимуму или направлены на пользу процесса отверждения. Определение такого режима выполняют методами проб и ошибок, по данным дифференциально-сканирующей калориметрии или с помощью математического моделирования и оптимизации [4 – 14].

### Постановки задачи и метод исследования

Для решения задачи оптимизации технологического процесса требуется экспериментально с помощью специального оборудования определить параметры математической модели, исследовать влияние различных факторов на режим отверждения, определить численные значения ограничений, накладываемых на решение задачи оптимизации, и провести расчет режима отверждения. Для исследования процесса отверждения ПК разработана информационно-измерительная система (ИИС), содержащая в своем составе специальные аппаратно-технические средства, а также математическое, алгоритмическое, программное и метрологическое обеспечение [12].

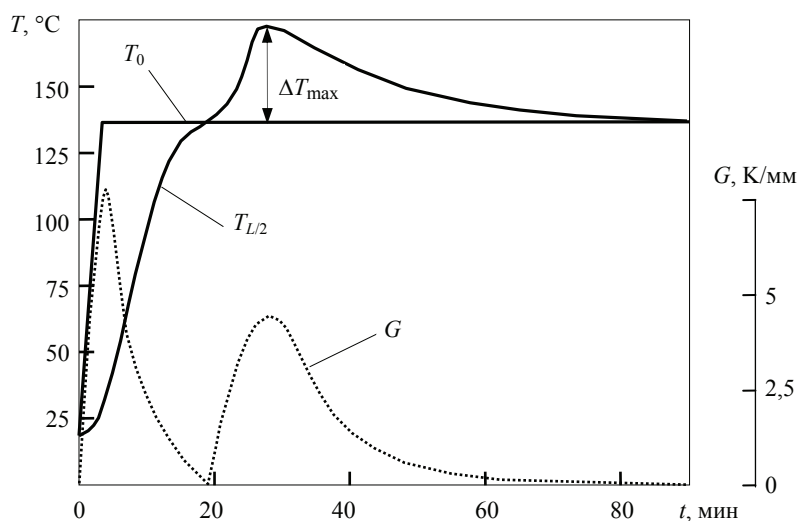
На качество и свойства изделий из ПК оказывают влияние многие факторы: свойства компонентов композита, межфазные взаимодействия связующего и наполнителя, технологический режим отверждения, способ формования, режим давления, время процесса и т.д. [5, 14]. Немаловажную роль в формировании высокого качества изделий из ПК оказывают тепловыделения, вызываемые экзотермической реакцией, так как вследствие низкой трансверсальной теплопроводности ПК отвод тепла от внутренних слоев особенно толстостенного изделия затруднен. Это приводит к перегреву внутренних слоев и существенной неоднородности температурного поля  $T(x, t)$  [15]. Поэтому целесообразно до начала оптимизации режима отверждения провести численные и экспериментальные исследования оценки рисков перегрева вследствие экзотермической реакции процесса отверждения. Для этого необходимо следующее условие – наличие параметров математической модели процесса отверждения, ИИС и экспериментальная база.

Как пример рассмотрен процесс производства изделий из двух наиболее распространенных композитов – стеклопластика и углепластика. Для расчета и анализа режима отверждения с помощью ИИС и исследованных характеристик данных материалов исследованы температурные  $T(x, t)$  и конверсионные  $\beta(x, t)$  поля при отверждении, возникающие экзотермические температуры  $\Delta T = \max_t (T_{L/2}(t) - T_0(t))$ , как

разность температур поверхностей  $T_0$  плоского образца и его серединой по толщине  $T_{L/2}$ , и температурные градиенты  $G = \max_{x,t} \frac{\partial T(x,t)}{\partial x}$ . Оценивались их макси-

мальные значения на определенном этапе – линейном нагреве или изотермической выдержке. Типичные температурные кривые отверждения ПК при исследовании экзотермической температуры  $\Delta T$  и градиента  $G$  представлены на рис. 1.

Кроме того, в целях проверки адекватности исследованных характеристик ПК как параметров математической модели отверждения реальному процессу проведено сравнение значений экзотермической температуры  $\Delta T$  при отверждении в зависимости от толщины  $L$  плоского образца, полученных при численном моделировании и экспериментальных значений, измеренных при отверждении



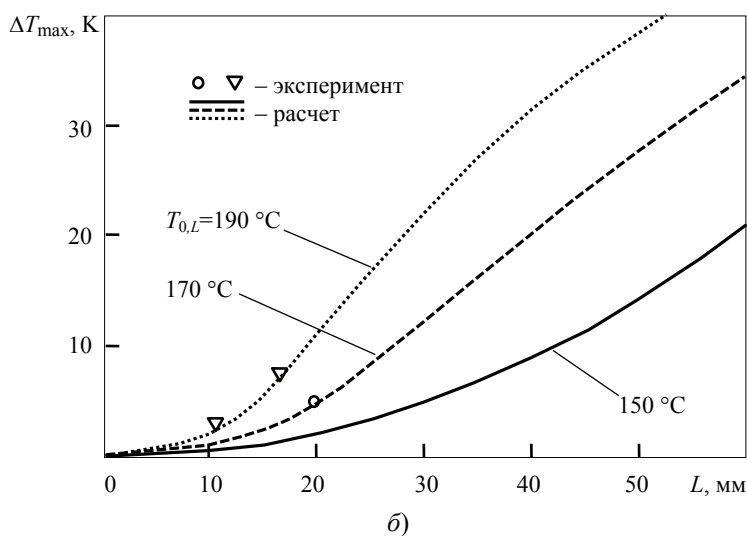
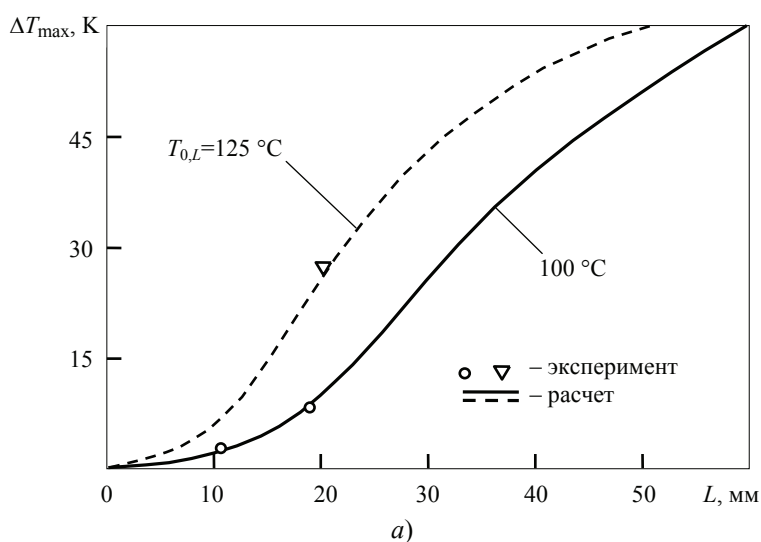
**Рис. 1. Типичные температурные кривые отверждения ПК при исследовании экзотермической температуры  $\Delta T$  и градиента  $G$**

в ИИС плоских образцов из исследованных полимерных композитов. Следует заметить, что подобные исследования можно выполнить только для экзотермической температуры  $\Delta T$ . Для градиента температуры  $G$  данные значения экспериментально измерить невозможно, можно выполнить только вычислительные эксперименты по модели и анализировать только эти значения (см. рис. 1).

### Результаты и обсуждение

Для экспериментального исследования экзотермических процессов проведено отверждение трех образцов из стеклопластика СТ-69Н и трех образцов из углепластика КМУ-7 в одноступенчатом регламентном режиме, предназначенном для производства тонкостенных до 5 мм изделий, а также компьютерное моделирование отверждения образцов по этим же режимам. Отверждение большего числа образцов нецелесообразно ввиду их высокой стоимости и ограничений возможностей оборудования. Следует заметить, что при численном моделировании рассматривался симметричный нагрев пластины толщиной  $L$ , а при эксперименте в ИИС образец отверждался в условиях одностороннего нагрева и термоизоляции другой стороны, то есть имитировалась середина нагреваемой пластины.

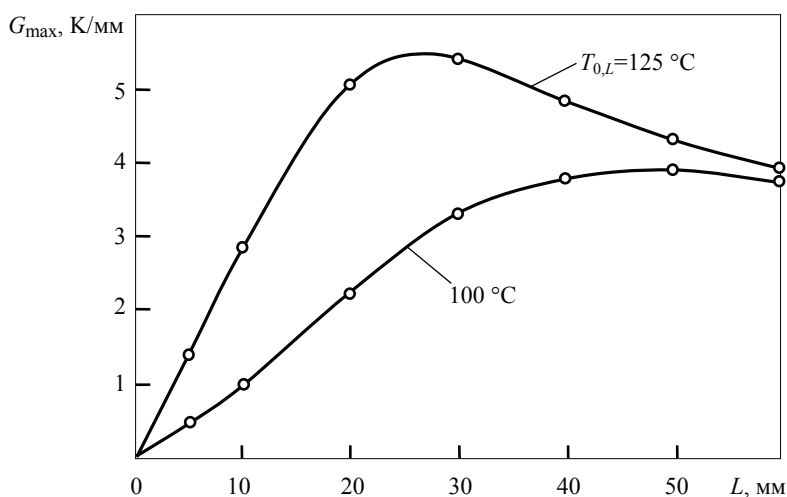
Исследуемые образцы набирали из нескольких слоев препрега, уложенных перекрестной ориентацией волокон и ткани. Образцы из стеклопластика в пересчете на симметричный нагрев имели толщину 20,12; 19,32 и 10,77 мм. Первый образец отверждали при температуре 125 °С, два других – при 100 °С. Образцы из углепластика толщиной 19,43 мм отверждали при температуре 170 °С; толщиной 11,07 и 17,53 мм – при 190 °С. Скорость подъема температуры поверхности до изотермической выдержки для всех образцов составляла 3 К/мин. Общее время отверждения составляло  $t = 120$  мин. Затем провели серию численных экспериментов моделирования процесса отверждения по таким же режимам для плоских изделий толщиной от 10 до 60 мм. Результаты расчетов и сравнения максимальных значений  $\Delta T_{\max}$ , полученных экспериментально и расчетным путем, приведены на рис. 2, а результаты расчетов максимальных градиентов температуры в зависимости от толщины  $L$  показаны на рис. 3. Разница максимальных экзотермических



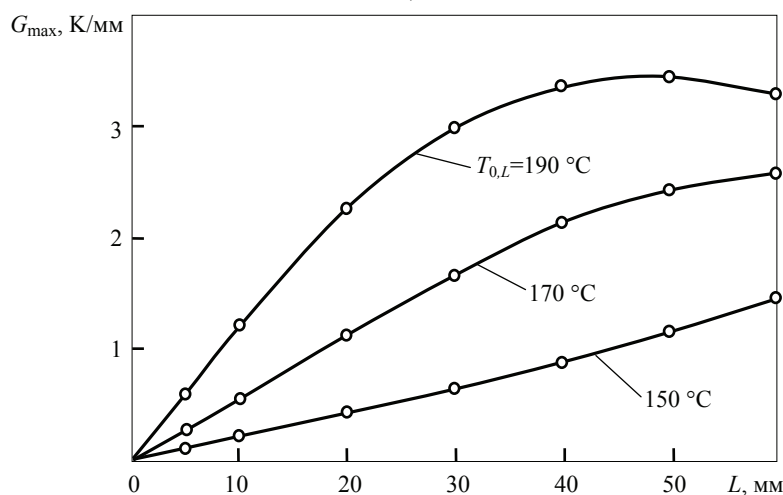
**Рис. 2.** Экзотермическая температура  $\Delta T_{\max}$  в зависимости от толщины  $L$  пластин из стеклопластика СТ-69Н (а) и углепластика КМУ-7 (б), отверждаемых при  $T_{0,L}$

выбросов температур  $\Delta T_{\max}$  для двух материалов, полученных в результате расчета и измеренных экспериментально  $\delta = \Delta T_{\text{расч}} - \Delta T_{\text{эксп}}$ , лежит в пределах  $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что подтверждает адекватность моделирования и исследованных ранее с помощью ИИС характеристик ПК реальному объекту.

Следующий этап – анализ полученных расчетных значений. Из графиков рис. 2, 3 видно, что как экзотермическая температура  $\Delta T_{\max}$ , так и градиент температуры  $G_{\max}$  при увеличении толщины пластины  $L$  имеют экстремум. Это объясняется тем, что для пластин малой толщины до  $10\dots 20$  мм экзотермическая температура  $\Delta T_{\max}$  с увеличением толщины также увеличивается, и градиент температуры  $G_{\max}$  увеличивается почти по линейному закону. Это связано с плохим оттоком тепла из средних слоев пластины вследствие низкой трансверсальной



a)



b)

**Рис. 3. Максимальный градиент температуры  $G_{\max}$  в зависимости от толщины  $L$  пластин из стеклопластика СТ-69Н (a) и углепластика КМУ-7 (б), отверждаемых при  $T_{0,L}$**

теплопроводности ПК (для стеклопластика  $\lambda = 0,22 \dots 0,27$  Вт/(м·К), углепластика  $\lambda = 0,42 \dots 0,45$  Вт/(м·К)) [6]. При увеличении толщины отверждаемой пластины выше 30 мм рост экзотермической температуры  $\Delta T_{\max}$  замедляется, а градиент температуры  $G_{\max}$  не только не замедляет свой рост, но и начинает уменьшаться. Это, видимо, связано с соизмеримостью скорости протекания процесса и скорости повышения температуры средних слоев пластины из ПК. В этом случае процесс отверждения в средних слоях успевает пройти при меньших температурах, и экзотермическое тепло средних слоев пластины уходит на нагрев и отверждение поверхностных слоев.

Максимальные температуры экзотермических выбросов  $\Delta T_{\max}$  (см. рис. 2) при толщине отверждаемой пластины  $L = 30$  мм могут достигать превышения температуры на  $\Delta T = 43$  К ( $T = 168$  °С) для стеклопластика и на 23 К ( $T = 213$  °С) для углепластика, а при толщине пластины 50 мм соответственно на 60 и 40 К,

то есть до 185 и 230 °С, что неизбежно приведет к деструкции связующего и ухудшению прочностных характеристик, вплоть до расслаивания и разрушения изделия из ПК [15].

Градиенты температуры также достигают катастрофических величин. При толщине отверждаемой пластины  $L = 30$  мм градиент температуры в стеклопластике достигает  $G = 5,2$  К/мм, а в углепластике –  $G = 2,9$  К/мм. При  $L = 50$  мм в углепластике максимальный градиент  $G = 3,4$  К/мм, что является недопустимым по причине резкого ухудшения прочностных характеристик ПК из-за растрескивания материала и коробления крупногабаритных толстостенных изделий.

Таким образом, анализ проведенных модельных расчетов показывает, что стандартный регламентный режим пригоден для производства только тонкостенных негабаритных плоских изделий толщиной до 10 мм, при котором максимальные температуры экзотермического выброса  $\Delta T_{\max}$  в стеклопластике и углепластике не превышают соответственно 5 и 3 °С. Для крупногабаритных изделий, при изготовлении которых предъявляются требования полного отсутствия коробления, стандартный регламентный режим можно применять при толщине изделия до 5 мм. К такому же выводу пришли и авторы работы [15]. В этом случае процесс отверждения протекает при сравнительно однородном температурно-конверсионном поле и малых градиентах температуры. Для изделий большей толщины необходимо проведение оптимизационных расчетов режимных параметров отверждения ПК. Эти расчеты особенно необходимы при производстве изделий большой толщины и крупных размеров.

Оптимизация режимных параметров любого процесса начинается с постановки задачи, определяются критерии оптимизации, минимизация которых повышает качество готового изделия либо повышает производительность, либо уменьшает стоимость изделия [11].

Для процесса отверждения наиболее важным критерием оптимальности является минимизация времени полного отверждения изделия из ПК  $t_k$  или минимизация напряжений  $\sigma$ , возникших из-за неравномерного поля отверждения. В результате решения задачи будут найдены такие режимные параметры изменения температуры во времени поверхностей изделий

$$U(t; \min t_k) = \{T_0(t), T_L(t)\} \text{ или } U(t; \min \sigma) = \{T_0(t), T_L(t)\},$$

при которой целевая функция будет минимальна при использовании математических моделей [7 – 9], описывающих ту или иную технологию производства комpositных изделий.

В таком случае профиль температурно-временного режима будет описываться линейными функциями на различных участках: нагреве, изотермической выдержке и их повторях, равных числу ступенек повышения температуры  $k_{ст}$ ,

$$U_i(t) = \begin{cases} \tilde{T}_{i-1} + \tilde{K}_i t, & t_{i-1} < t < t_{n_i}, \\ \tilde{T}_i, & t_{n_i} \leq t \leq t_i \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, k_{ст},$$

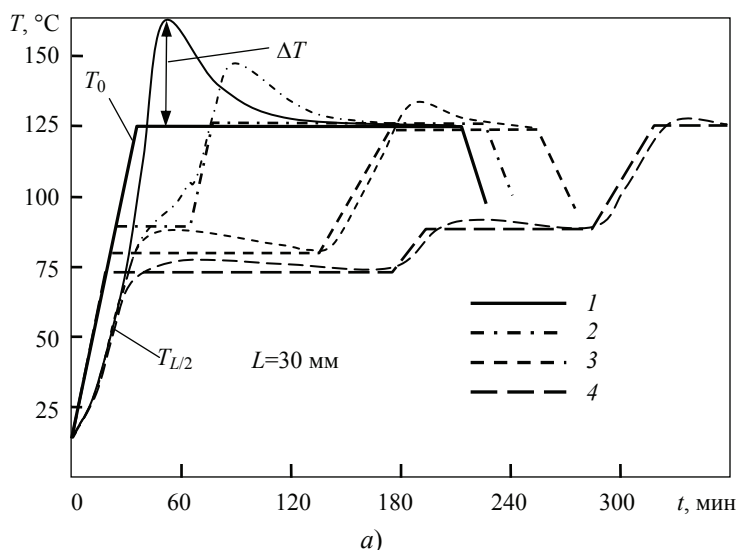
где  $\tilde{K}$  – скорость нагрева изделия, К/с;  $\tilde{T}$  – температура ступеньки  $i$ , К.

Задачу оптимизации дополняют ограничения, наложенные на решение. Это предельная температура  $\bar{T}_{\max}$ , при превышении которой связующее термически разлагается и изделие расслаивается или трескается. Следующие ограничения связаны с перепадом температуры внутри и на поверхности плоского изделия  $\Delta \bar{T}$  и градиентом температуры  $\bar{G}$  и выражают неоднородность температурного поля.

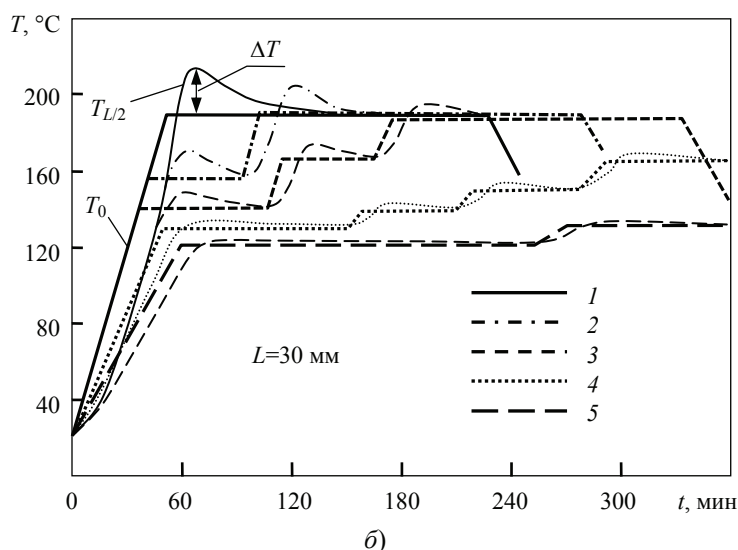
Их превышение приводит к короблению изделия и созданию напряженной структуры композита. Численные значения таких ограничений определяются на основе специальных экспериментов, моделирующих отверждение пластин с искусственно вызванными неоднородностями и последующими механическими испытаниями свойств ПК [15].

Используя исследованные характеристики ПК, с помощью программного обеспечения ИИС выполнены модельные расчеты и оценена возможность применения регламентного режима, предназначенного для отверждения тонких пластин порядка 5 мм, при производстве плоских изделий толщиной до 30 мм и более.

Анализ регламентного режима выполняли по результатам компьютерного моделирования температурно-конверсионных полей при отверждении плоских изделий толщиной  $L = 30$  мм. Для стеклопластика моделировали одноступенчатый режим без ограничений с температурой отверждения  $125$  °С продолжительностью 180 мин и двухступенчатый режим без ограничений с температурой первой изотермической выдержки  $90$  °С продолжительностью 40 мин и второй выдержки при температуре  $125$  °С продолжительностью 150 мин. Скорость подъема температуры поверхности изделия до изотермической выдержки составляла  $3$  К/мин. Для исследования регламентного режима углепластика моделировали одноступенчатый режим без ограничений с температурой отверждения  $190$  °С продолжительностью 180 мин. Результаты расчетов температур плоскостей изделия  $T_0$  и средних слоев  $T_{L/2}$  приведены на рис. 4. Как видим из графика на рис. 4, *a*, даже в случае применения двухступенчатого режима отверждения стеклопластика возникают недопустимо большие значения экзотермической температуры  $\Delta T$  и градиента температуры  $G$ , что также подтверждает ранее сделанные выводы о пригодности регламентного режима только для изготовления пластин из ПК толщиной до 5 мм.



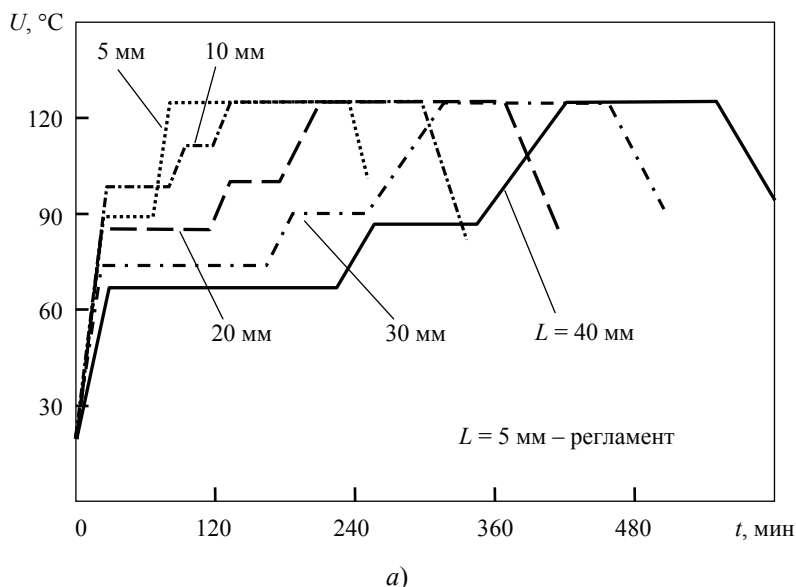
**Рис. 4. Рассчитанные режимы отверждения пластин толщиной 30 мм (начало):**  
*a* – стеклопластик: 1 – регламентный одноступенчатый режим,  $\Delta T = 43$  К,  $G = 5,2$  К/мм;  
 2 – регламентный двухступенчатый режим,  $\Delta T_1 = 17$  К,  $G_1 = 2,1$  К/мм,  $\Delta T_2 = 24$  К,  
 $G_2 = 3,0$  К/мм; 3 – при задании ограничений  $\Delta \bar{T} = 10$  К,  $\bar{G} = 1$  К/мм; 4 – оптимальный, при задании ограничений  $\Delta \bar{T} = 5$  К,  $\bar{G} = 0,5$  К/мм



**Рис. 4. Окончание:**

*б* – углепластик: 1 – регламентный режим,  $\Delta T = 23$  К,  $G = 2,9$  К/мм; при задании ограничений: 2 –  $\Delta \bar{T} = 15$  К,  $\bar{G} = 2$  К/мм; 3 –  $\Delta \bar{T} = 10$  К,  $\bar{G} = 1$  К/мм; 4 –  $\Delta \bar{T} = 5$  К,  $\bar{G} = 0,4$  К/мм; 5 – оптимальный,  $\Delta \bar{T} = 5$  К,  $\bar{G} = 0,2$  К/мм

В случае ужесточения ограничений, налагаемых на решение задачи оптимизации, то есть уменьшении их величины, число ступеней в режиме отверждения увеличивается, и время полного отверждения также увеличивается. Соответственно уменьшаются температуры первых изотермических выдержек, а их продолжительность увеличивается. Анализ моделирования режимов отверждения пластин из стеклопластика и углепластика толщиной 30 мм, рассчитанных при задании различных ограничений, представлен также на рис. 4.



**Рис. 5. Оптимальные режимы отверждения плоских изделий различной толщины (начало):**

*а* – стеклопластик СТ-69Н



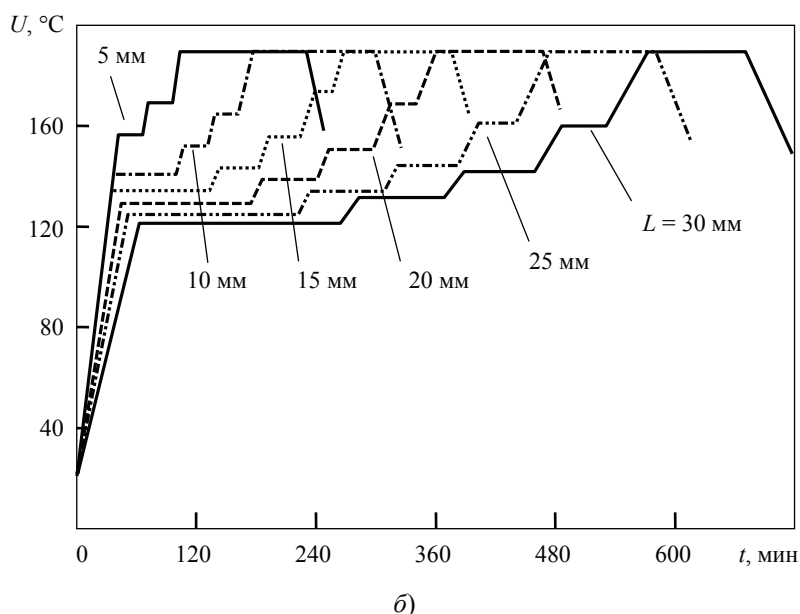


Рис. 5. Окончание: б – углепластик КМУ-7

Заключительной стадией является расчет оптимальных режимов отверждения исследованных ПК. Рассчитанные оптимальные режимы отверждения, минимальные по продолжительности, показаны на рис. 5. При расчете режимов на решение задачи оптимизации накладывали следующие ограничения, значения которых определены на основе механических испытаний: для стеклопластика  $\Delta\bar{T} = 5$  К,  $\bar{G} = 0,5$  К/мм и углепластика  $\Delta\bar{T} = 5$  К,  $\bar{G} = 0,2$  К/мм.

Рассчитанные режимы в отличие от регламентного имеют значительно меньшие перепады  $\Delta T$  и градиенты  $G$  температуры. Из графиков очевидно, что при увеличении толщины стенки плоских изделий из ПК число ступенек увеличивается, температуры первых изотермических выдержек снижаются, их продолжительность увеличивается, что способствует получению более однородной не напряженной структуры ПК и, как следствие, повышению качества материала и прочностных характеристик (см. рис. 5).

### Заключение

Таким образом, основной причиной, вызывающей перегрев внутренних слоев полимерного композита на основе термореактивного связующего, является экзотермическая реакция процесса отверждения. Эти процессы приводят к деструкции связующего и созданию напряженной структуры материала. Поэтому необходима предварительная разработка оптимального режима отверждения и четкое его следование при изготовлении изделий из ПК. Особенно это важно при производстве толстостенных изделий.

В работе представлены результаты исследования влияния экзотермических процессов на режим отверждения и показаны режимы отверждения плоских изделий из стеклопластика и углепластика различной толщины от 5 до 30 и 40 мм, которые получены с помощью ИИС процесса отверждения, используя компьютерное моделирование и оптимизацию. Кроме того, компьютерное моделирование процесса отверждения позволяет просчитывать различные варианты ведения процесса и проводить анализ процесса с оценкой преимуществ и недостатков полу-

ченного режима для данного материала, а также выбирать правильную стратегию поиска оптимального режима. Это позволяет создавать изделия из полимерных композитов с максимально возможными прочностными характеристиками и минимальной стоимостью, обеспечив максимальную производительность работы оборудования.

#### *Список литературы*

1. Каблов, Е. Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки / Е. Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2020. – Т. 90, № 4. – С. 331 – 334. doi: 10.1134/S1019331620020124

2. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер, В. М. Виноградова, Г. С. Головкин [и др.] ; под ред. А. А. Берлина. – СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.

3. Хасков, М. А. Моделирование процессов отверждения термореактивных матриц на примере сложнопрофильного образца / М. А. Хасков, Е. В. Сафронов // Труды ВИАМ. – 2019. – Т. 84, № 12. – С. 46 – 54. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-46-54

4. Славинский, А. З. Разработка и постановка на серийное производство высоковольтных вводов с твердой внутренней RIP-изоляцией на классы напряжения 110-220 кВ в период 2002 – 2005 г. / А. З. Славинский, С. Д. Кассихин, А. Е. Кирпичев [и др.] // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2006. – № 3. – С. 24 – 32.

5. Блазнов, А. Н. Влияние степени отверждения связующего на температуру стеклования композитных материалов / А. Н. Блазнов, Е. В. Атясова, Н. В. Бычин [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 13 – 20.

6. Чуцкова, Е. Ю. Опыт применения дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования кинетических закономерностей отверждения эпоксидного клея ВК-36Р / Е. Ю. Чуцкова, В. М. Алексашин, Д. Я. Баринов, Л. А. Деметьева // Труды ВИАМ. – 2015. – № 1. – С. 12 – 25. doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12

7. Мищенко, С. В. Математическое моделирование процесса отверждения изделия из полимерных композиционных материалов методом горячего прессования / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, С. В. Пономарев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1998. – Т. 4, № 4. – С. 390 – 399.

8. Мищенко, С. В. Математическое моделирование процесса отверждения изделий из полимерных композиционных материалов методом вакуумного автоклавного формования в технологическом пакете / С. В. Мищенко, О. С. Дмитриев, А. В. Шаповалов, В. Н. Кириллов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 7 – 19.

9. Dmitriev, O. S. Thermo-Chemical Analysis of the Cure Process of Thick Polymer Composite Structures for Industrial Applications / O. S. Dmitriev, A. A. Zhyvenkova, A. O. Dmitriev // Advanced Materials and Technologies. – 2016. – № 2. – P. 53 – 60. doi: 10.17277/amt.2016.02.pp.053-060

10. Дмитриев, О. С. Влияние режимов термообработки на геометрические и механические характеристики углепластиковых трубчатых элементов / О. С. Дмитриев, И. В. Малков // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 3. – С. 427 – 438. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.427-438

11. Дмитриев, О. С. Определение оптимальных режимов отверждения толстостенных изделий из полимерных композитов / О. С. Дмитриев, В. Н. Кириллов, А. О. Дмитриев, А. В. Зуев // Тепловые процессы в технике. – 2013. – № 10. – С. 467 – 475.

12. Дмитриев, О. С. Интегрированная информационно-измерительная система исследования свойств и расчета режимов отверждения полимерных композиций / О. С. Дмитриев, С. В. Мищенко, А. О. Дмитриев, И. С. Касагонов, С. О. Дмитриев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 230 – 240.

13. Struzziero, G. Numerical Optimisation of Thermoset Composites Manufacturing Processes: A Review / G. Struzziero, J.J.E. Teuwen, A.A. Skordos // Composites Part A. Science and Manufacturing. – 2019. – Vol. 124. – art. 105499. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105499

14. Shah, P. H. Optimal Cure Cycle Parameters for Minimizing Residual Stresses in Fiber-Reinforced Polymer Composite Laminates / P. H. Shah, V. A. Halls, J. Q. Zheng, R. C. Batra // Journal of Composite Materials. – 2017. – Vol. 52, № 6. – pp. 773–792. doi: 10.1177/0021998317714317

15. Esposito, L. Effect of Curing Overheating on Interlaminar Shear Strength and Its Modelling in Thick FRP Laminates / L. Esposito, L. Sorrentino, F. Penta, C. Bellini // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2016. – Vol. 87. – P. 2213 – 2220. doi: 10.1007/s00170-016-8613-5

---

## A Study of Exothermal Processes and Their Effect on Cure Cycles of Polymer Composites

O. S. Dmitriev, A. A. Barsukov

*Department of Physics, phys@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

**Keywords:** optimization task; polymer composite; cure cycle; fiberglass; carbon fiber reinforced polymer; exothermic process.

**Abstract:** Technological problems arising as a result of exothermic overheating in the inner layers of thick-walled polymer composites plates during curing process are considered. On the basis of numerical modeling and experimental studies the character of temperature inhomogeneities, which are the result of exothermic processes during the cure of polymer composites, has been established. The influence of the constraints magnitude used to solve the optimization task on the temperature-time cure cycles has been numerically evaluated. Optimal cure cycles for flat products of various thicknesses made of fiberglass and carbon fiber reinforced polymers were calculated.

### *References*

1. Kablov E.N. [New generation materials and technologies for their digital processing], *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* [Herald of the Russian Academy of Sciences], 2020, vol. 90, no.2, pp. 225-228, doi: 10.1134/S1019331620020124 (In Russ., abstract in Eng.)

2. Kerber M.L., Vinogradova V.M., Golovkin G.S. et al. *Polimernye kompozicionnye materialy: struktura, svoystva, texnologiya, Pod red. A.A. Berlin*. [Polymer composite materials: structure, properties, technology], St. Petersburg: Professiya, 2008, 560 p. (In Russ.)

3. Khaskov M.A., Safronov E.V. [The optimization of thermosetting matrixes curing schedule on the example of complex shape sample], *Tr. Vseross. Inst. Aviats. Mater.* [Proceedings of VIAM], 2019, vol. 84. no. 12, pp. 46-54. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-46-54 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Slavinsky A.Z., Kassikhin S.D., Kirpichev A.E. et al. [Development and serial production of high-voltage bushings with solid internal RIP-insulation for voltage

classes 110-220 kV in the period 2002-2005], *ELEKTRO. Elektrotexnika, elektroenergetika, elektrotexnicheskaya promyshlennost* [ELEKTRO. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry], 2006, no. 3, pp. 24-32. (In Russ., abstract in Eng.).

5. Blaznov A.N., Atyasova E.V., Bychin N.V. et al. [Cure degree effect of binder agent on glass transition temperature of composite materials], *Yuzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik* [South Siberian Scientific Bulletin], 2016, vol. 13. no. 1, pp. 13-20. (In Russ., abstract in Eng.).

6. Chutskova E.Yu., Aleksashin V.M., Barinov D.Ya., Dement'eva L.A. [The differential scanning calorimetry application for kinetic regularities investigation of the epoxy adhesive VK-36R curing process], *Tr. Vseross. Inst. Aviats. Mater.* [Proceedings of VIAM], 2015, no. 1, pp. 12-25. doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12 (In Russ., abstract in Eng.).

7. Mishchenko S.V., Dmitriev O.S., Ponomarev S.V. [Mathematical modeling of curing process of polymer composite material products by hot pressing method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 1998, vol. 4, no. 4, pp. 390-399. (In Russ., abstract in Eng.).

8. Mishchenko S.V., Dmitriev O.S., Shapovalov A.V., Kirillov V.N. [Mathematical modeling of the process of curing products from polymer composite materials by vacuum autoclave molding in a technological package], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2001, vol. 7, no. 1, pp. 7-19. (In Russ., abstract in Eng.).

9. Dmitriev O.S., Zhyvenkova A.A., Dmitriev A.O. Thermo-chemical analysis of the cure process of thick polymer composite structures for industrial applications, *Advanced Materials and Technologies*, 2016, no. 2, pp. 53-60. doi: 10.17277/amt.2016.02.pp.053-060

10. Dmitriev O.S., Malkov I.V. [Influence of heat treatment modes on geometric and mechanical characteristics of carbon composite tubular elements], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 427-438. doi: 10.17277/vestnik.2016.03.pp.427-438 (In Russ., abstract in Eng.).

11. Dmitriev O.S., Kirillov V.N., Dmitriev A.O., Zuev A.V. [Determination of the optimal modes of curing of thick-walled products from polymer composites], *Teplovye processy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2013, no. 10, pp. 467-475. (In Russ.).

12. Dmitriev O.S., Mishchenko S.V., Dmitriev A.O., Kasatonov I.S., Dmitriev S.O. [Integrated information-measuring system for studying the properties and calculating the curing cycles of polymer composites], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 2, pp. 230-240. (In Russ., abstract in Eng.).

13. Struzziero G., Teuwen J.J.E., Skordos A.A. Numerical Optimisation of Thermoset Composites Manufacturing Processes: A Review, *Composites Part A. Science and Manufacturing*, 2019, vol. 124, art. 105499, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105499

14. Shah P.H., Halls V.A., Zheng J.Q., Batra R.C. Optimal Cure Cycle Parameters for Minimizing Residual Stresses in Fiber-Reinforced Polymer Composite Laminates, *Journal of Composite Materials*, 2017, vol. 52, no. 6, pp. 773-792, doi: 10.1177/0021998317714317

15. Esposito L., Sorrentino L., Penta F., Bellini C. Effect of curing overheating on interlaminar shear strength and its modelling in thick FRP laminates, *Int J Adv Manuf Technol*, 2016, vol. 87, pp. 2213-2220. doi: 10.1007/s00170-016-8613-5

## **Untersuchung exothermischer Prozesse und ihr Einfluss auf die Aushärtungsmodi der Polymerverbundwerkstoffe**

**Zusammenfassung:** Es sind technologische Probleme betrachtet, die durch exotherme Überhitzung der Innenschichten dickwandiger Platten aus Polymerverbundwerkstoffen während der Aushärtung entstehen. Auf der Grundlage numerischer Modellierungen und experimenteller Untersuchungen ist die Natur von Temperaturinhomogenitäten ermittelt, die das Ergebnis exothermer Prozesse während der Aushärtung von Polymerkompositen sind. Der Einfluss des Wertes der zur Lösung des Optimierungsproblems verwendeten Restriktionen auf die Temperatur-Zeit-Regime der Aushärtung ist numerisch geschätzt. Es sind die optimalen Aushärtungsarten von Flachprodukten unterschiedlicher Dicke aus Glasfaser und Kohlefaser berechnet.

---

## **Étude des processus exothermiques et de leur influence sur les modes de durcissement des composites polymères**

**Résumé:** Sont examinés les problèmes technologiques résultant de la surchauffe exothermique des couches internes des plaques à paroi épaisse des composites polymères au cours du processus de durcissement. A la base de la modélisation numérique et des études expérimentales, est établie la nature des inhomogénéités de température résultant des processus exothermiques lors du durcissement des composites polymères. Est évaluée numériquement l'influence de la valeur des contraintes utilisées dans la résolution du problème d'optimisation sur les régimes de température et de temps de durcissement. Sont calculés les modes optimaux de durcissement des produits plats de différentes épaisseurs en fibre de verre et en fibre de carbone.

---

**Авторы:** *Дмитриев Олег Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика»; *Барсуков Александр Андреевич* – аспирант кафедры «Физика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

---