



Научная статья

2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 678.028.31

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.034



ВЛИЯНИЕ КИНЕТИКИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЙ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Олег Сергеевич Дмитриев ¹, Александр Андреевич Барсуков ²

^{1, 2} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия

¹ oleg.s.dmitriev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8824-4592>

² phys@tstu.ru

Аннотация. В статье изучены явления перегрева внутренней части плоских изделий из полимерных композитов, возникающие при отверждении и тепловыделениях термореактивных связующих. На примере одного из распространенных полимерных композитов – стеклопластика, исследованы теплофизические и кинетические характеристики процесса его отверждения. На основе исследованных характеристик проведены численные и экспериментальные исследования экзотермических перегревов и температурных градиентов, возникающих при отверждении, сделан их анализ и сравнение. Приведена постановка оптимизационной задачи процесса отверждения полимерных композитов, основанной на математическом моделировании и поиске температурно-временного режима отверждения, минимизирующего критерий оптимальности при соблюдении ограничений, налагаемых на решение задачи оптимизации процесса отверждения. Рассмотрено влияние кинетики тепловыделений и ограничений величины экзотермических перегревов и градиентов температуры на режимы процесса отверждения. Проведены расчеты оптимальных режимов отверждения пластин из стеклопластика различной толщины, позволяющие производить полимерные композиты, обладающие высокими прочностными характеристиками, имеющие минимальную себестоимость при максимальной производительности технологического оборудования.

Ключевые слова: задача оптимизации, полимерный композит (ПК), режим отверждения, стеклопластик, градиент температуры, тепловыделения, экзотермический перегрев.

Для цитирования: Дмитриев О. С., Барсуков А. А. Влияние кинетики тепловыделений на оптимальные режимы отверждения полимерных композитов // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 197–202. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.034. EDN: <https://elibrary.ru/WTDGUW>.

Original article

INFLUENCE OF HEAT RELEASE KINETIC ON OPTIMAL CURE CYCLES OF POLYMER COMPOSITES

Oleg S. Dmitriev ¹, Alexander A. Barsukov ²

^{1, 2} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

¹ oleg.s.dmitriev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8824-4592>

² phys@tstu.ru

Abstract. The article studies the phenomena of overheating in the inner layers of flat products made of polymer composites, which occur during the curing and heat release of thermosetting resins. Using fiberglass plastic as an example of one of the universal polymer composites, the thermophysical and kinetic characteristics of its curing process were studied. Based on the studied characteristics, numerical and experimental studies of exothermic overheating and temperature gradients occurring during curing were carried out, their analysis and comparison were performed. The formulation of the optimization problem for the curing process of polymer composites is presented, based on mathematical modeling and the search for a temperature-time cure cycle that minimizes the optimality criterion while observing the constraints imposed on the solution of the curing process optimization problem. The influence of heat release kinetics and constraints on the magnitude of exothermic overheating and temperature gradients on cure cycles is considered. Calculations have been made of optimal cure cycles for fiberglass plates of various thicknesses, allowing the production of polymer composite with high strength characteristics, having minimal cost with maximum productivity of process equipment.

Keywords: optimization problem, polymer composite (PC), cure cycle, fiberglass plastic, temperature gradient, heat release, exothermic overheating.

For citation: Dmitriev O.S., Barsukov A.A. (2025). Influence of heat release kinetic on optimal cure cycles of polymer composites. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 197-202. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.034. EDN: <https://elibrary.ru/WTDGUW>

© Дмитриев О. С., Барсуков А. А., 2025

ВВЕДЕНИЕ

Современные темпы роста ассортимента новых полимерных композитов (ПК) на основе термореактивных связующих определяют необходимость повышения эффективности их производства в условиях расширения сфер их применения. Области применения ПК традиционно являются авиация, космонавтика, электро- и радиотехника [1]. Расширяется применение ПК в судостроение и сельскохозяйственную технику [2]. Изделия и детали из ПК могут иметь различные размеры и толщину достигающей 40...60 мм.

Основным процессом, при котором формируется структура композита, является тепловая обработка исходного материала ПК (препрега). В течение термообработки активируется химическая реакция сшивки полимерного термореактивного связующего и происходит отверждение материала. Процесс отверждения термореактивных матриц происходит с выделением тепла, которое активизирует химическую реакцию и может приводить к температурной деструкции связующего, накоплению остаточных внутренних напряжений, короблению и расслоению готового изделия [3]. Это приводит к необходимости расчета, поиска и выбора оптимальных технологических режимов отверждения изделий из ПК.

На протяжении многих десятилетий выбор оптимальных технологических режимов отверждения проводился на основе методов дифференциально-сканирующей калориметрии, термомеханического анализа и других методов, а также опыта химиков технологов [4, 5]. Они позволяют определять режимы отверждения тонких изделий толщиной до 3...5 мм, и неприемлемы для толстостенных изделий толщиной до 30...60 мм. В последнее время распространение получили методы, основанные на математическом моделировании [6–9] и решении оптимизационных задач [10–13]. Кроме того, математическое моделирование позволяет провести численные и экспериментальные исследования и оценить риски негативных явлений вызванных экзотермической реакцией процесса отверждения.

Поэтому целью работы является изучение влияния кинетики тепловыделений и экзотермических перегревов на оптимальные режимы отверждения ПК различной толщины, обеспечивая получение композитных материалов с максимально возможными прочностными характеристиками и с минимальной стоимостью.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования из большого числа исследованных ПК был выбран наиболее распространенный полимерный композит – стеклопластик на основе эпоксидного связующего ЭДТ-69Н армированный стеклотканью Т-10-80.

Математическое моделирование предполагает наличие параметров модели процесса отверждения, к которым относятся теплофизические и кинетические характеристики, включая: объемную теплоемкость C , теплопроводность l , мощность тепловыделений W и тепловой эффект реакции отверждения Q , служащие основой для определения энергии активации E и кинетической функции $\phi(\beta)$ процесса отверждения ПК или их экспериментальное определение [14, 15]. Применяемые для этой цели стандартные приборы и установки, как правило, имеют ограниченные функ-

циональные возможности, не позволяющие определять теплофизические характеристики (ТФХ) $C(T, \beta, \gamma)$ и $\lambda(T, \beta, \gamma)$ в процессе отверждения в зависимости от температуры T , степени отверждения β и коэффициента наполнения γ или кинетические характеристики $E(\beta)$ и $\phi(\beta)$ в условиях подобных технологическому процессу получения изделий из ПК. Поэтому определение теплофизических и кинетических характеристик ПК и расчет оптимальных технологических температурно-временных режимов отверждения проводили с помощью разработанной для этой цели информационно-измерительной системы (ИИС) процесса отверждения, позволяющей выполнять экспериментальные исследования свойств ПК, решать прямые, обратные и оптимизационные задачи [11–13].

Первым этапом оптимизации технологического режима обычно является постановка задачи, в которой формулируется целевая функция, реализация которой приводит к достижению требуемых показателей проведения процесса и получаемых характеристик готовой продукции.

Решение задачи оптимизации процесса отверждения изделий из ПК состоит в нахождении специальным поисковым методом температурно-временного режима на поверхностях нагреваемого и отверждаемого изделия $U(t; t_k) = \{T_0(t), T_L(t)\}$ минимизирующего критерий оптимальности

$$I_{t_k} = \min_{U(t; t_k)} \int_0^{t_k} dt,$$

и позволяющего получать качественное изделия за наименьшее время t_k при решении уравнений математической модели [7, 8, 13], соответствующих конкретной технологии формообразования изделий из ПК, а также ограничений, налагаемых на процесс, учитывающих возможности технологического оборудования $U_{j_{\min}}(t) \leq U_j(t) \leq U_{j_{\max}}(t)$, $j = 1, 2, \dots, k_{\text{ст}}$ и условия взаимодействия с исходным перерабатываемым материалом (препрегом)

$$\begin{aligned} \max_{\substack{0 \leq x \leq L \\ t_0 < t \leq t_k}} T(x, t) \leq \bar{T}, \quad \max_{\substack{0 \leq x \leq L \\ t_0 \leq t \leq t_k}} \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right| \leq \bar{G}, \\ \max_{t_0 \leq t \leq t_k} \left\{ \max_{0 \leq x \leq L} T(x, t) - \min_{0 \leq x \leq L} T(x, t) \right\} \leq \Delta \bar{T}. \end{aligned}$$

Типовой технологический режим отверждения является многоступенчатым и включает линейные подъемы температуры и изотермические выдержки, значения которых необходимо определить при расчете режима

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

где \tilde{K} – скорость подъема температуры изделия, К/с; \tilde{T} – температура i -ой ступени, К; $k_{\text{ст}}$ – количество ступеней нагрева.

Ограничениями задачи являются: максимальная температура \bar{T} , выше которой возникает деструкция связующего, расслоение или растрескивание материала; максимальная разность температуры внутри и

ВЛИЯНИЕ КИНЕТИКИ ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЙ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

на поверхности плоского изделия $\Delta \bar{T}$; максимальный градиент температуры \bar{G} .

Эти ограничения выражают неоднородность температурно-конверсионного поля. Их превышение приводит к формированию напряженной структуры ПК и короблению изделия. Численные значения таких ограничений определяются на основе специальных экспериментов, моделирующих отверждение пластин с искусственно вызванными неоднородностями и последующими механическими испытаниями свойств ПК.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью ИИС процесса отверждения были исследованы и рассчитаны ТФХ неотвержденного $C_{\text{но}}(T)$, $\lambda_{\text{но}}(T)$, отвержденного $C_{\text{от}}(T)$, $\lambda_{\text{от}}(T)$ и в процессе отверждения $C(T, \beta, \gamma)$, $\lambda(T, \beta, \gamma)$ стеклопластика. Кроме того, по результатам процесса отверждения были рассчитаны мощность тепловыделений W и полный тепловой эффект реакции отверждения Q_p , на основе которых рассчитаны энергия активации $E(\beta)$ и кинетическая функция $\phi(\beta)$ процесса отверждения ПК. Результаты исследований представлены на рисунке 1 – 3.

Используя результаты исследования ТФХ и кинетики процесса отверждения стеклопластика, проведено численное моделирование температурно-конверсионных полей процесса отверждения для пластин толщиной от 5 до 60 мм. По результатам расчетов определены экзотермические перегревы и температурные гради-

енты, возникающие при отверждении. Результаты численного моделирования сведены в таблицу 1.

Также проведены экспериментальные исследования экзотермических перегревов внутренних слоев плоских образцов, набранных из препрега стеклопластика толщиной 10,77; 19,32 и 20,12 мм. Образцы нагревали по регламентному режиму со скоростью 3 К/мин до изотермической выдержки с температурой поверхности 100, 130 и 150 °С и отверждали в течение 120 мин.

Полученные результаты экспериментальных исследований и модельных расчетов сопоставили и установили их минимальное отличие δT , не превышающее 1,3 °С, что доказывает адекватность исследованных характеристик ПК и численного моделирования.

Анализируя, приведенные в таблице 1 результаты численного моделирования видим, что с увеличением толщины отверждаемой пластины, экзотермическая температура ΔT_{max} повышается и достигает 60 °С и более, что непременно приведет к превышению допустимого значения, к деформации связующего и требуется их ограничения на приемлемом уровне, который устанавливается химиками-технологами, разработчиками данного связующего. Как правило, допустимый экзотермический перегрев $\Delta \bar{T}$ и предельная температура \bar{T} устанавливается 5...10 К выше последней изотермической выдержки.

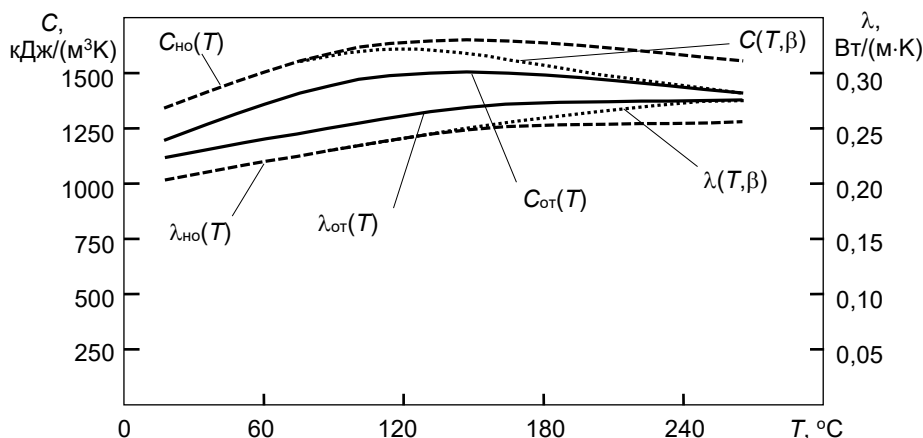


Рисунок 1 – Теплофизические характеристики стеклопластика при $\gamma_s=0,51$

Figure 1 – Thermophysical characteristics of fiberglass plastic at $\gamma_s=0,51$

Таблица 1 – Максимальная экзотермическая температура и градиент температуры в зависимости от толщины L пластины отвержденной при симметричном нагреве с $T_{0,L}$

Table 1 – Maximum exothermic temperature and temperature gradient depending on the thickness L of the plate cured with symmetric heating at $T_{0,L}$

Температура $T_{0,L}, ^\circ\text{C}$	Толщина пластины L , мм						
	5	10	20	30	40	50	60
Максимальная экзотермическая температура ΔT_{max} , К							
100	0,62	2,07	10,31	25,82	40,51	51,32	60,16
130	2,29	7,54	30,74	47,23	56,32	60,12	60,62
150	5,62	16,82	38,22	51,16	58,54	61,92	60,30
Максимальный градиент температуры G_{max} , К/мм							
100	0,44	0,93	2,11	3,12	3,62	3,73	3,62
130	1,49	3,21	5,34	5,46	4,91	4,28	3,71
150	3,04	5,98	7,25	6,13	4,95	4,01	3,30

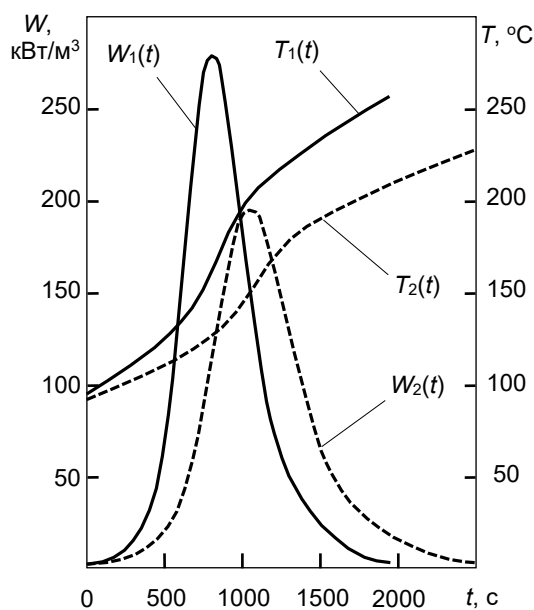


Рисунок 2 – Мощность тепловыделений при отверждении стеклопластика

Figure 2 – Heat release power during fiberglass plastic curing

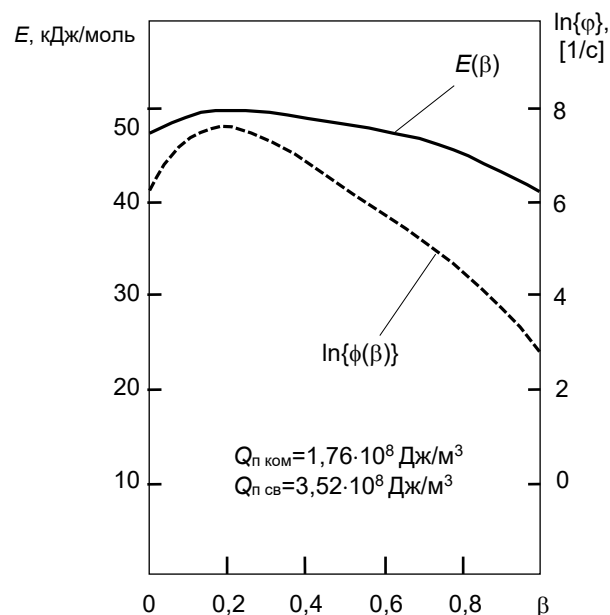


Рисунок 3 – Кинетические характеристики отверждения стеклопластика

Figure 3 – Kinetic characteristics of fiberglass plastic curing

Аналогично, с увеличением толщины отверждаемой пластины максимальные градиенты температуры G_{\max} повышаются и достигают 7,25 К/мм, причем увеличение толщины более 20...30 мм вызывает аномальное уменьшение максимальных градиентов температуры. Это, по-видимому, объясняется растягиванием фронта отверждения по толщине пластины при ее увеличении. В результате, даже при больших разностях температуры по толщине, наблюдается уменьшение градиента температуры. Полученные значения максимальных градиентов температуры, судя по исследованиям, приведенным в таблице 1, сильно ухудшат механические характеристики материалов, и требуется определение численных значений ограничений, налагаемых на решение задачи оптимизации. На основе опыта экспериментальных исследований, проведенных совместно с ВИАМ и выводов авторов работ [3, 10], допустимые значения градиентов температур \bar{G} лежат в пределах 0,5...1 К/мм.

С использованием программного обеспечения ИИС и результатов исследования свойств стеклопластика было проведено численное моделирование процесса отверждения по регламентному одноступенчатому и двухступенчатому режиму пластин толщиной 30 мм, а также режимы отверждения при задании различных ограничений. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Здесь мы видим, что регламентный режим для отверждения пластин толщиной 30 мм совершенно не подходит, так как перегревы и градиенты температуры достигают неприемлемых значений. Ужесточение ограничений вызывает увеличение количества ступеней нагрева, температура этих ступеней уменьшаются, а время выдержки увеличивается, что позволяет создавать более однородную структуру ПК. В результате перегревы и градиенты температуры уменьшаются до приемлемых величин, но продолжительность всего процесса увеличивается. Тем не менее, это гарантирует получение

изделий из ПК большой толщины без потери их качества из-за деструкции связующего и с минимальными остаточными напряжениями, не вызывающими коробление крупногабаритных изделий. В результате сопоставления полученных экзотермических перегревов и максимальных градиентов температуры с результатами механических испытаний, приведенных в [3, 10], были выбраны приемлемые ограничения, которые лежат на пределе допустимых значений и не сильно затягивают время проведения процесса отверждения изделий.

Налагая, полученные в результате анализа ограничения на решение оптимизационной задачи, были рассчитаны оптимальные режимы отверждения плоских изделий из стеклопластика различной толщины. Результаты расчетов приведены на рисунке 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована кинетика тепловыделений при отверждении толстостенных плоских изделий из ПК на основе термореактивного связующего. На основе численного моделирования процесса отверждения просчитаны различные варианты ведения процесса и на основе анализа возможных экзотермических перегревов и возникающих градиентов температуры исследовано их влияние на режимы отверждения и определены значения ограничений, которые необходимо использовать при решении оптимизационной задачи процесса отверждения.

С учетом сформулированных ограничений и исследованных характеристик композита рассчитаны оптимальные режимы отверждения пластин из стеклопластика различной толщины, позволяющие получать материалы с высокими прочностными характеристиками.

ВЛИЯНИЕ КИНЕТИКИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ НА ОПТИМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ОТВЕРЖДЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

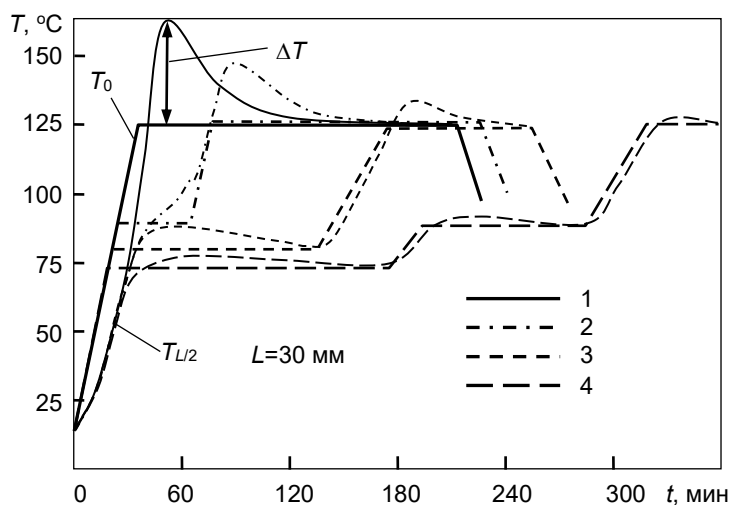


Рисунок 4 – Рассчитанные режимы отверждения пластин из стеклопластика толщиной 30 мм, при задании различных ограничений:

- 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

Figure 4 – Calculated cure cycles of 30 mm thick fiberglass plates with different constraints:

- 1 – standard one-step cycle, $\Delta T = 43$ K, $G = 5,2$ K/mm;
- 2 – standard two-step cycle, $\Delta T_1 = 17$ K, $G_1 = 2,1$ K/mm, $\Delta T_2 = 24$ K, $G_2 = 3,0$ K/mm;
- 3 – when setting constraints $\Delta \bar{T} = 10$ K, $\bar{G} = 1$ K/mm;
- 4 – optimal cycle, when setting constraints $\Delta \bar{T} = 5$ K, $\bar{G} = 0,5$ K/mm

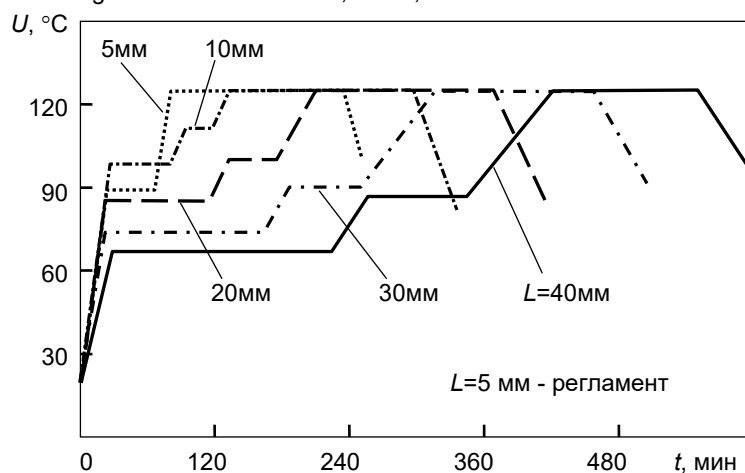


Рисунок 5 – Оптимальные режимы отверждения плоских изделий из стеклопластика различной толщины

Figure 5 – Optimal cure cycles for flat fiberglass products of different thicknesses

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. 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.

4. Чуцкова, Е. Ю. Опыт применения дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования кинетических закономерностей отверждения эпоксидного клея ВК-36Р / Е. Ю. Чуцкова, В. М. Алексахин, Д. Я. Баринов, Л. А. Дементьева // Труды ВИАМ. 2015. № 1. С. 12–25. doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12.
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. Хасков, М. А. Моделирование процессов отверждения термореактивных матриц на примере сложно-профильного 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.

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. Дмитриев, О. С. Моделирование теплофизических характеристик полимерных композитов в процессе отверждения / О. С. Дмитриев, А. А. Барсуков, Д. Я. Баринов // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31, № 2. С. 355–370.

10. 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.

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 // Теплоловые процессы в технике. 2013. № 10. С. 467–475.

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

13. 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.

14. Dmitriev, O. S. Computer-measuring system for research into properties of glutinous prepreps and calculation of curing cycles of the polymer composite materials on their base / O. S. Dmitriev, S. V. Mischenko, A. O. Dmitriev, V. N. Kirillov // Polymer Science, Series D. 2010. V. 3, № 1. P. 20–25. doi: 10.1134/S199542121001003X.

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

Информация об авторах

О. С. Дмитриев – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Тамбовского государственного технического университета.

А. А. Барсуков – аспирант кафедры физики Тамбовского государственного технического университета.

REFERENCES

1. Kablov, E. N. (2020). New Generation Materials and Technologies for their Digital Processing, *RAS Herald*, Vol. 90, No. 2, pp. 225–228. (In Russ.) doi: 10.1134/S1019331620020124.

2. Kerber, M. L., Vinogradova, V. M., Golovkin, G. S. et al. (2008). *Polymer composite materials: structure, properties, technology*, Ed. A. A. Berlin., St. Petersburg: Professiya, 560 p. (In Russ.).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.

3. Esposito, L., Sorrentino, L., Penta, F., et al. (2016). Effect of Curing Overheating on Interlaminar Shear Strength and Its Modelling in Thick FRP Laminates. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* (87), 2213–2220. doi: 10.1007/s00170-016-8613-5.

4. Chutskova, E. Yu., Aleksashin, V. M., Barinov, D. Ya. & Dementyeva, L. A. (2015). Experience of using differential scanning calorimetry to study the kinetic laws of curing of epoxy adhesive VK-36R, *Proceedings of VIAM*, 1, 12–25. doi: 10.18577/2307-6046-2015-0-1-12-12.

5. Blaznov, A. N., Atyasova, E. V., Bychin N. V., et al. (2016). The influence of the degree of curing of the binder on the glass transition temperature of composite materials, *South Siberian Scientific Bulletin*, (13)1, 13–20.

6. Khaskov, M. A. & Safronov, E. V. (2019). The optimization of thermosetting matrixes curing schedule on the example of complex shape sample. *Proceedings of VIAM*, (84)12, 46–54. (In Russ., abstract in Eng.), doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-12-46-54.

7. Mishchenko, S. V., Dmitriev, O. S. & Ponomarev, S. V. (1998). Mathematical modeling of curing process of polymer composite material products by hot pressing method, *Transactions of the Tambov State Technical University*, (4)4, 390–399. (In Russ., abstract in Eng.).

8. Mishchenko, S. V., Dmitriev, O. S., Shapovalov, A. V. & Kirillov, V. N. (2001). 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*, (7)1, 7–19. (In Russ., abstract in Eng.).

9. Dmitriev, O. S., Barsukov, A. A., & Barinov, D. Ya. (2024). Modeling the thermophysical characteristics of polymer composites in the curing process, *Thermophysics and Aeromechanics*, (31)2, 329–343. doi: 10.1134/S0869864324020124.

10. Shah, P. H., Halls, V. A., Zheng, J. Q. & Batra, R. C. (2017). Optimal Cure Cycle Parameters for Minimizing Residual Stresses in Fiber-Reinforced Polymer Composite Laminates, *Journal of Composite Materials*. (52)6. 773–792. doi: 10.1177/0021998317714317.

11. Dmitriev, O. S., Kirillov, V. N., Dmitriev, A. O. & Zuev, A. V. (2013). Determination of the optimal modes of curing of thick-walled products from polymer composites, *Thermal Processes in Engineering*, 10, 467–475. (In Russ.).

12. Dmitriev, O. S. & Malkov, I. V. (2016). Influence of heat treatment modes on geometric and mechanical characteristics of carbon composite tubular elements, *Transactions of the Tambov State Technical University*, (22)3, 427–438. (In Russ., abstract in Eng.) doi: 10.17277/amt.2016.03.pp.427-438.

13. Dmitriev, O. S., Zhyvenkova, A. A. & Dmitriev A. O. (2016). Thermo-Chemical Analysis of the Cure Process of Thick Polymer Composite Structures for Industrial Applications, *Advanced Materials and Technologies*, 2, 53–60. doi: 10.17277/amt.2016.02.pp.053-060.

14. Dmitriev, O. S., Mischenko, S. V., Dmitriev, A. O. & Kirillov V. N. (2010). Computer-measuring system for research into properties of glutinous prepreps and calculation of curing cycles of the polymer composite materials on their base, *Polymer Science, Series D*, (3)1, 20–25. doi: 10.1134/S199542121001003X.

15. Dmitriev, O. S., Mishchenko, S. V., Dmitriev A. O., Kasatonov, I. S. & Dmitriev S. O. (2008). Integrated information-measuring system for studying the properties and calculating the curing cycles of polymer composites, *Transactions of the Tambov State Technical University*, (14)2, 230–240. (In Russ., abstract in Eng.).

Information about the authors

O. S. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Physics Department, Tambov State Technical University.

A. A. Barsukov – Postgraduate Student, Physics Department, Tambov State Technical University.