

Оптимизация режима отверждения толстостенных изделий авиационного назначения из композиционного материала

Авторы: Д.В. Савинов, Е.А. Пузырецкий, Л.П. Шабалин, Н.Ф. Салихов

Учреждение: НОЦ «ЦКТ» НИЛ №6, КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

Аннотация

В работе описан расчётно-экспериментальный подход к подбору безопасного режима отверждения толстостенного изделия авиационного назначения исходя из экзотермического температурного пика. Подход включает такие стадии как комплекс лабораторных исследований свойств материала, проведение расчётных и экспериментальных работ на элементарных образцах с целью калибровки и валидации расчётной модели отверждения, анализ параметров теплового потока полимеризационной печи, построение расчётной модели отверждения изделия из композиционного материала и оптимизация режима полимеризации. В работе приводятся результаты расчётных и экспериментальных исследований, а также результаты их сопоставления. Результаты сопоставления говорят о высокой эффективности предлагаемого подхода – погрешность моделирования экзотермического пика не превышает 5%.

Ключевые слова: подбор температурного режима, отверждение композиционного материала, численное моделирование отверждения, толстостенные изделия авиационного назначения, натурный и вычислительный эксперимент.

Основные результаты:

1. Анализ объекта исследования – в качестве объекта исследования выступает толстостенное цилиндрическое изделие авиационного назначения, изготавливаемое из эпоксидного связующего и гибридного (арамидный и углеродный волокна) армирования методом плетения триаксиальных «рукавов».
2. Методика эксперимента – разработана комплексная методология, включающая определение теплофизических и кинетических свойств материалов (по ГОСТ), численное определение коэффициента конвекции полимеризационной печи, валидацию расчётной модели отверждения на серии толстостенных пластин и последующее моделирование процесса отверждения изделия в программном комплексе ESI PAM-Composite.
3. Экспериментальные данные – получены кинетические параметры реакции отверждения (двухстадийная модель Камала-Соурера), параметры уравнения Ди Бенедетто, теплофизические характеристики материалов, а также экспериментальные данные по экзотермическому нагреву образцов различной толщины.
4. Анализ результатов – расчёт по паспортному режиму отверждения показал неприемлемо высокий температурный пик в изделии (234,43 °С против максимальной температуры стеклования 163,5 °С). Валидация модели на элементарных образцах подтвердила её адекватность с погрешностью прогноза пика 5%. В результате обоснована необходимость и предложена безопасная толщина однослойного формования (8 мм) для используемого гибридного материала.
5. Объяснение эффекта – высокий экзотермический пик в толстых сечениях связан с низкой теплопроводностью композита, особенно при использовании арамидных волокон,

и интенсивным тепловыделением при полимеризации. Предложенный метод позволяет количественно учесть эти факторы и скорректировать режим.

6. Практические рекомендации – для безопасного отверждения толстостенных гибридных изделий рекомендовано использование валидированной численной модели для прогноза температурного поля и, при необходимости, разбиение процесса на несколько этапов формования с безопасной толщиной слоя.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует эффективность расчётно-экспериментального подхода к оптимизации режима отверждения толстостенных композитных изделий. Метод, основанный на комплексной характеристике материалов, валидации модели на элементарных образцах и детальном численном моделировании, позволяет с высокой точностью (погрешность ~5%) прогнозировать и предотвращать опасный экзотермический перегрев. Результаты работы имеют практическую значимость для авиационной и других отраслей, где предъявляются высокие требования к качеству и воспроизводимости процессов изготовления ответственных композитных конструкций.

Область применения: авиационная промышленность, машиностроение, производство композиционных материалов.

Благодарности: Исследования выполнены в рамках Передовой инженерной школы «Комплексная авиационная инженерия» (Соглашение 075-15-2025-129).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 F. Taddei, G. Struzziero, and V. Michaud, “Mitigation of infusion and cure-induced defects for thick thermosetting composites: Current challenges and future trends,” 2025, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/pc.29795.
- 2 E. Ruiz and F. Trochu, “Numerical analysis of cure temperature and internal stresses in thin and thick RTM parts,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 36, no. 6, pp. 806–826, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.10.021.
- 3 G. Zhang et al., “Multi-objective optimisation of curing cycle of thick aramid fibre/epoxy composite laminates,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 23, Dec. 2021, doi: 10.3390/polym13234070.
- 4 Zhang, Jing, Xu, Yachen and Huang, Pei. "Effect of cure cycle on temperature/degree of cure field and hardness for epoxy resin" *e-Polymers*, vol. 10, no. 1, 2010, pp. 007. <https://doi.org/10.1515/epoly.2010.10.1.41>
- 5 S. Chava, S. Namilae, and M. Al-Haik, “Residual stress reduction during composite manufacturing through cure modification: In situ analysis,” *J Compos Mater*, vol. 56, no. 6, pp. 975–988, Mar. 2022, doi: 10.1177/00219983211066545.
- 6 “Cure Cycles & Void Content in Composite Laminates.” Accessed: Jul. 05, 2025. [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/27632863/effect-of-cure-cycles-on-void-content>
- 7 Ya. Chen, P. P. Maung, and G. V. Malysheva, “Investigating Curing Kinetics for a Thin-Walled Carbon Fibre Structure,” *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, no. 5 (134), pp. 58–70, Oct. 2020, doi: 10.18698/0236-3941-2020-5-58-70.
- 8 “ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.”
- 9 R. Gebart, “Thermal runaway criterion for thick polymer composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 182, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.compositesa.2024.108187.

- 10 A. Muc, P. Romanowicz, and M. Chwał, "Description of the Resin Curing Process—Formulation and Optimization," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 1, p. 127, Jan. 2019, doi: 10.3390/POLYM11010127.
- 11 J. Zhang, Y. Xu, and P. Huang, "Effect of cure cycle on temperature/degree of cure field and hardness for epoxy resin," no. 007, 2010, [Online]. Available: <http://www.e-polymers.org>
- 12 S. Chava, S. Namilae, and M. Al-Haik, "Residual stress reduction during composite manufacturing through cure modification: In situ analysis," *J Compos Mater*, vol. 56, no. 6, pp. 975–988, Mar. 2022, doi: 10.1177/00219983211066545.
- 13 "Effects of cure cycles on void content and mechanical properties of composite laminates".
- 14 Y. Li, G. Chen, J. Ge, K. Liu, and J. Liang, "Modeling of curing process and residual stress analysis of thick-section thermosetting composites," *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, vol. 42, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2026, doi: 10.1007/S10409-024-24411-X/METRICS.
- 15 F. Taddei, G. Struzziero, and V. Michaud, "Mitigation of infusion and cure-induced defects for thick thermosetting composites: Current challenges and future trends," 2025, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/pc.29795.
- 16 F. Rothenhäusler and H. Ruckdaeschel, "Interplay of curing and thermal degradation in epoxy resins cured with amino acids: Influence of the maximum curing temperature on the network structure, crystal morphology and mechanical properties," *J Appl Polym Sci*, vol. 140, no. 45, Dec. 2023, doi: 10.1002/app.54655.
- 17 D. Liu et al., "Research on the Thermal Aging Characteristics of Cured Epoxy Resin Insulating Materials for DC Bushings," *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/polym17081064.
- 18 V. I. Khaliulin and V. V. Batrakov, "Analysis of innovative methods application for production of composite integral parts," *Russian Aeronautics*, vol. 59, no. 3, pp. 433–437, Jul. 2016, doi: 10.3103/S1068799816030223.
- 19 "ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ".
- 20 T. A. Moreira, A. R. A. Colmanetti, and C. B. Tibiriçá, "Heat transfer coefficient: a review of measurement techniques," Jun. 01, 2019, Springer Verlag. doi: 10.1007/s40430-019-1763-2.
- 21 K. E. A. Ohlsson, R. Östin, and T. Olofsson, "Step-transient method for measurement of the heat transfer coefficient at surfaces exposed to simulated building outdoor environments using the sol-air thermometer," *J Build Phys*, vol. 42, no. 3, pp. 373–387, Nov. 2018, doi: 10.1177/1744259118764823.
- 22 J. V Beck, "A. M. (Ismail Investigation of Transient Heat Transfer Coefficients in Quenching Experiments," 1990. [Online]. Available: <http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/>
- 23 M. N. Koleva and L. G. Vulkov, "A Galerkin Finite Element Method for the Reconstruction of a Time-Dependent Convection Coefficient and Source in a 1D Model of Magnetohydrodynamics," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/app14135949.
- 24 D. K. Gartling, "CONVECTIVE HEAT TRANSFER ANALYSIS BY THE FINITE ELEMENT METHOD *," 1977.
- 25 L. V. Ivanov, A. Yu. Baranov, A. Yu. Ikonnikova, and M. V. Baranov, "Calculation of natural convection heat transfer coefficient towards LNG based on finite element method," *Journal International Academy of Refrigeration*, no. 3, 2023, doi: 10.17586/1606-4313-2023-22-3-74-79.