УДК 539.4:517

М. Мемарианфард, Р.А. Турусов*, Х. Мемарианфард*
*Технологический университет К.Н. Туси, *НИУ МГСУ*

ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОНОЛИТНОСТИ ТОЛСТОСТЕННОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ОБОЛОЧКИ

Представлены экспериментальные и численные исследования трещинообразования в толстостенных цилиндрических намоточных оболочках из стеклопластика в процессе их изготовления (конкретно, в процессе отверждения и охлаждения). Эксперименты показали, что в конце процесса охлаждения в оптимальном режиме цилиндр получается монолитным без кольцевых трещин. В связи с этим произведен расчет методом конечных элементов остаточных температурных напряжений в толстостенном цилиндре в процессе охлаждения с учетом нестационарной теплопроводности и температурной зависимости механических свойств материала и вязкоупругого поведения полимера. Расчеты проведены для охлаждения в стандартном и оптимальном режимах. Результаты расчетов показали, что при охлаждении цилиндра в оптимальном режиме максимальные радиальные напряжения на самом опасном начальном участке оказываются в несколько раз меньше, чем при охлаждении в стандартном режиме.

Ключевые слова: толстостенный цилиндр, охлаждение, отверждение, намотка, трещина, напряжение, стеклопластик

В настоящее время актуальными становятся работы в космосе и на больших морских глубинах. Для их осуществления требуются емкости с большим массовым совершенством, которое представляет собой отношение произведения давления на внутренний объем емкости к ее массе [1]. Обычно такие емкости по разным причинам изготавливают в виде кокона методами намотки, которые поддаются автоматизации. Простейшая модель кокона — цилиндр с полусферическими заглушками по торцам. В нашем случае это толстостенный цилиндр, толщина которого равна 10 % от внутреннего радиуса и более.

При создании толстостенных цилиндров из армированных полимеров возникает ряд проблем. Первая из них — получение технологической монолитности, т.е. отсутствия кольцевых трещин, которые возникают в толстостенных цилиндрах в процессе изготовления. Композиты с наилучшими физико-механическими свойствами получаются при повышенных температурах отверждения полимерных связующих — от 150 до 350 °С. Кольцевые трещины (разрывы) чаще всего возникают в ходе процесса охлаждения [2]. Основная причина возникновения трещин в армированных волокном толстостенных намоточных цилиндрах заключается в анизотропии химических и физических усадок и геометрии изделий.

Решение проблемы технологической монолитности требует создания такого режима термообработки, который позволил бы получать монолитные толстостенные намоточные изделия из армированных полимеров без трещин [3].

© Мемарианфард М., Турусов Р.А., Мемарианфард Х., 2016

В СССР в 1960—1980-х гг. несколько авторов исследовали термические напряжения в толстостенных намоточных цилиндрах из армированных полимеров. Р.А. Турусов с сотрудниками Института химической физики Российской академии наук (ИХФ РАН) [3—5] исследовали напряжения как на этапе отверждения полимера, так и на стадии охлаждения изделия из армированного полимера, полагая, что важны обе стадии. В.В. Болтин с сотрудниками [6, 7] и В.С. Екельчик [1, 8] исследовали температурные напряжения на стадии охлаждения. Первые исследования остаточных температурных напряжений в толстостенных намоточных цилиндрах на западе в 1980—1990-х гг. представлены работами М.В. Хайера и С.К. Руссо (1987), Т. Тзена, Л.С. Чена (1995), Л.Дж. Стригера, Р.Дж. Хэймана, М.Дж. Хинтона, М.Р. Вайзнома (1999), И.К. Кима и С.Р. Уайта [9—13].

В ИХФ РАН эксперименты проводились на толстостенных намоточных цилиндрах из стеклопластика, изготовленных на основе двух различных полимерных связующих ЭДТ-10 и ЭКР. Намотка стеклопластиков выполнялась по разработанной в ИХФ РАН технологической схеме, приведенной на рис. 1.

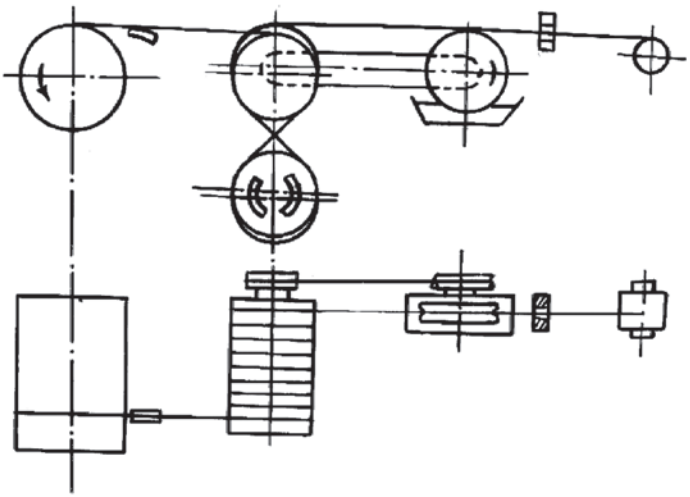

Рис. 1. Технологическая схема намотки изделия из армированных пластиков

Физико-механические характеристики стекловолокна ЭКР: модуль упругости $E_s = 73{,}5$ ГПа; $\nu_s = 0{,}25$; $\alpha_s = 5 \cdot 10^{-6}$; стекловолокна ЭДТ-10 при комнатой температуре: $E_p = 3{,}9$ ГПа; $\nu_p = 0{,}37$; $\alpha_p = 8 \cdot 10^{-5}$.

Термообработка будущего изделия осуществлялась в традиционном режиме: медленное охлаждение с использованием термошкафа для сравнения с результатами охлаждения по разработанному в ИХФ РАН оптимальному режиму охлаждения. Такой способ борьбы с трещинообразованием в толстостенном намоточном цилиндре наиболее легко осуществим в технологическом плане и практически не оказывает влияния на несущую способность готового изделия. Задача оптимизации ставилась следующим образом: необходимо найти режим охлаждения, позволяющий получить монолитное изделие за минимальное время. Выбор минимального времени в качестве целевой функции определялся двумя причинами: зависимостью трансверсальной прочности,

т.е. величины критических нормальных радиальных напряжений, от скорости нагружения и экономическими соображениями. Решение полной системы уравнений задачи оптимизации относится к задачам нелинейного программирования с ограничениями [14]. Минимизация осуществлялась методом Флетчера-Ривса [14]. Задача решалась методом сеток. Входные данные в порядке их значимости:

- относительная толщина;
- температурная зависимость трансверсальной прочности;
- величины коэффициентов температурного расширения;
- величины модулей Юнга (упругости);
- температура отверждения;
- абсолютная толщина (или наружный радиус цилиндра);
- допустимая скорость охлаждения k;
- минимальная допустимая температура в конце охлаждения;
- температура в конце охлаждения (должно выполняться условие $T_k < T_g$).

Здесь представлены результаты экспериментов, проведенных на трех цилиндрических оболочках. Внутренний диаметр цилиндров 150 мм, наружный — 248 мм, т.е. относительная толщина цилиндра ≈ 65 %. Цилиндры наматывались на стальную оправку толщиной 4 мм. Длина наматываемого цилиндра L = 180 мм. Максимальная температура отверждения 160 °С.

Первый цилиндр, отвержденный в стандартном режиме, охлаждался медленно вместе с выключенной печью. Ультразвуковой контроль после завершения процесса охлаждения обнаружил довольно обширную дефектную область на одном радиусе. Кольцевые трещины различной длины были хорошо видны и располагались на разных радиусах цилиндра.

Второй цилиндр охлаждался в оптимальном режиме, целью которого было получение монолитных толстостенных цилиндров за минимальное время. Ход процесса приведен на рис. 2.

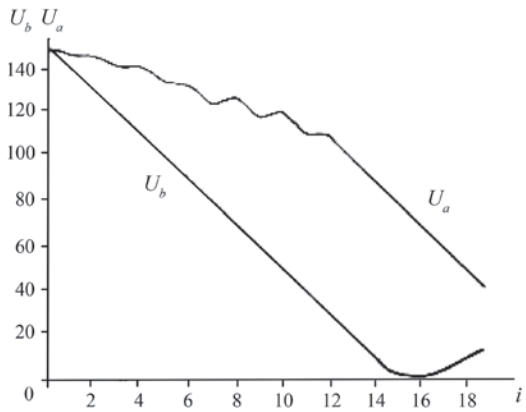

Рис. 2. Оптимальный режим охлаждения цилиндра с относительной толщиной $m = (b - a)/a$, b = 100 мм, k = 2 град./мин, длительность процесса 95,2 мин

Критерием процесса являлось ограничение, налагаемое на радиальные растягивающие напряжения, т.е. при любой температуре процесса растягивающие радиальные напряжения должны быть заведомо меньше трансвер-

сальной прочности отвержденного материала при этой температуре. Общим оказалось то, что в этих режимах для материалов с использованием разных связующих внешняя поверхность цилиндра охлаждалась быстро, а внутренняя — медленно. Пример обобщенного оптимального режима охлаждения приведена на рис. 3.

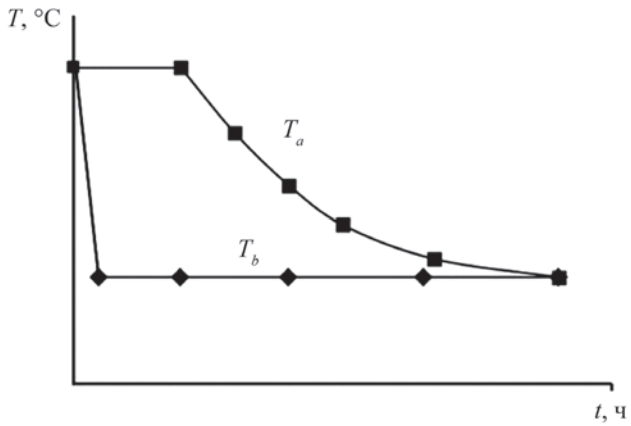

Рис. 3. Оптимальный обобщенный режим охлаждения толстостенной композиционной оболочки: T_a — температура внутренней поверхности; T_b — температура наружной поверхности

После завершения охлаждения в цилиндре дефектов не обнаружили. После этого цилиндр был разрезан на диски. В этих дисках обнаружены трещины, которые раскрывались, очевидно, во время отрезания дисков.

Третий цилиндр охлаждался в оптимальном режиме, соответствующем очень большим значениям m и k (или абсолютным толщинам), полученным расчетным методом по разработанной в ИХФ РАН методике (внешняя поверхность цилиндра охлаждался очень быстро, а внутренняя — медленно). В этом случае после охлаждения никаких дефектов не обнаружено как при первоначальном обследовании всего цилиндра с использованием ультразвукового метода, так и при исследовании дисков, на которые был разрезан цилиндр.

Эти результаты свидетельствуют о значительном влиянии процесса охлаждения на монолитность толстостенного намоточного цилиндра.

Из результатов исследования цилиндров из стеклопластика на основе связующего ЭКР можно констатировать, что трещины в оболочках формируются в процессе отверждения. Причины трещинообразования в ходе этого процесса, вероятно, следует искать в медленном наборе прочности, который начинается только в точке гелеобразования. До этого момента связующее находится практически в жидком состоянии. Например, точка гелеобразования связующего ЭКР соответствует моменту превращения 85 % эпоксидных групп в отличие от обычных смол, начинающих твердеть уже при превращениях 50 % эпоксидных групп [14]. Кроме того, это связующее обладает большой химической усадкой (она почти вдвое больше химической усадки ЭДТ-10).

Для исследований от цилиндра отрезали четыре кольца толщиной 35 мм. Затем кольцо № 4 без оправки прошло термообработку при 60 °С в течение

7 сут. Видимых изменений (в т.ч. и цвета) не обнаружено, увеличилась лишь глубина превращения. Кольцо № 3 прошло термообработку при температуре 90 °С в течение 24 ч. На внутренней поверхности кольца обнаружено локальное отслоение одного-двух монослоев. Кольцо № 1 без оправки прошло термообработку в полном стандартном режиме отверждения цилиндра на основе связующего ЭКР. После завершения термообработки кольцо № 1 изменило цвет — стало коричневым (изначально было светлого желтоватого цвета). Трещин не обнаружено, но внутренние слои кольца локально потеряли устойчивость.

Такую же, как и кольцо № 1, термообработку прошло кольцо № 2, в котором не обнаружены ни трещины, ни локальная потеря устойчивости слоев. Это означает, что на стадии нагревания, когда в анизотропном свободном кольце возникают окружные напряжения сжатия, внутренние слои могут потерять устойчивость.

В настоящей статье рассматривается толстостенный однонаправленный цилиндр из стеклопластика, намотанного на оправку, с внутренним радиусом цилиндра, равным наружному радиусу оправки a = 75 мм, внешним радиусом цилиндра b = 125 мм и длиной 180 мм; толщина стальной оправки 4 мм (оправка не приклеена к намотанному на нее композитному толстостенному цилиндру). В отличие от приведенных режимов, разработанных в ИХФ РАН, где задача решалась численно методом сеток, здесь с целью сопоставления приводятся результаты прямых расчетов кинетики радиальных напряжений в анизотропном цилиндре при его охлаждении, выполненные методом конечных элементов.

Рассматриваются две задачи. Первая — для случая, когда цилиндр охлаждается в стандартном режиме от 150 °С до комнатой температуры при скорости охлаждения 0,5 °С/мин. Вторая — для случая, когда цилиндр охлаждается в режиме, близком к оптимальному (скорость охлаждения внешней поверхности оболочки 10 °С/мин, внутренней поверхности оболочки — 0,5 °С/мин).

Как известно, физико-механические характеристики полимеров зависят от температуры. В области температур стеклования T_g связующего его коэффициент линейного расширения увеличивается почти втрое, затем значение T_g остается неизменным. В области стеклования коэффициент Пуассона полимера возрастает до 0,5, а его модуль упругости уменьшается до 0,01 · E. Здесь E — модуль упругости полимера при комнатой температуре [15—17].

Эффективные свойства однонаправленного композиционного материала определяются с помощью гомогенизации элементарной ячейки композита с учетом температурной зависимости физико-механических свойств полимера [18—20].

Задача решалась численно при следующих начальных и граничных условиях:

$$T_0 = 150\ ^\circ\text{C},\ T_\infty = 20\ ^\circ\text{C},\ T(r, \theta, z, 0) = T_0;$$
$$T(a, t) = T_0 - kt;\ \ T(b, t) = T_0 - kt; \qquad (1)$$
$$\sigma_r(a) = 0;\ \sigma_r(b) = 0,$$

где k — скорость охлаждения.

Для численного решения этой задачи применен метод конечных элементов, вычисления выполнялись с помощью программы ANSYS.

На рис. 3. приведен график зависимости максимальных остаточных радиальных макронапряжений $\sigma_{r,\max}$ от времени при охлаждении (от 150 до 20 °C) для стандартного и оптимального режимов охлаждения. На рис. 5 представлено распределение радиальных температурных напряжений в цилиндре в конце процесса охлаждения (по стандартному режиму).

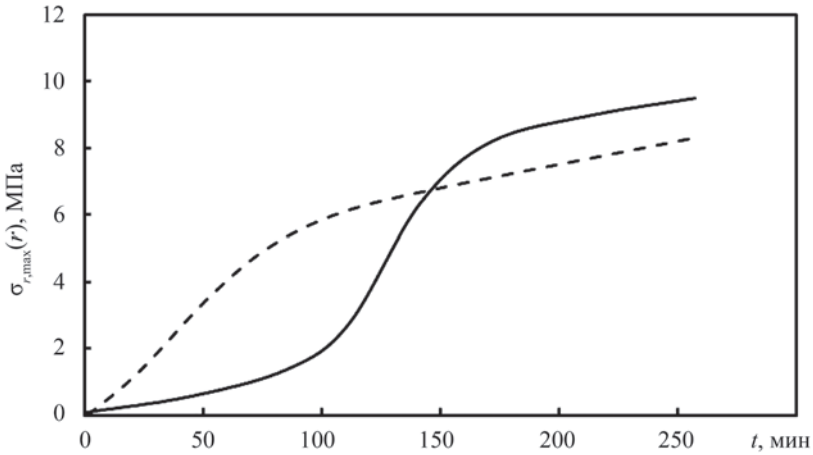

Рис. 4. Зависимости максимальных остаточных радиальных напряжений от времени при охлаждении: *1* — по стандартному режиму (пунктир); *2* — по оптимальному режиму (сплошная линия)

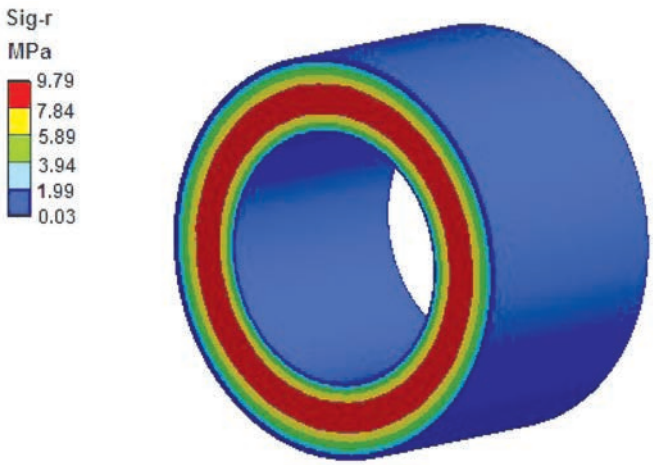

Рис. 5. Распределение радиальных напряжений в цилиндре в конце процесса охлаждения

На рис. 4 в сравнении представлены зависимости максимальных остаточных температурных радиальных напряжений от времени при охлаждении по стандартному и оптимальному режимам. Из результатов расчетов, приведенных на рис. 4, видно, что максимальные радиальные напряжения на самом опасном начальном участке при охлаждении цилиндра в оптимальном режиме

оказываются в несколько раз меньше, чем при охлаждении в стандартном режиме. Результаты расчетов методом конечных элементов практически совпали с результатами расчета методом сеток.

Следует отметить, что результаты расчетов показали, что максимальные радиальные напряжения в цилиндре (при охлаждении в стандартном режиме) не превышают 10 МПа, что существенно меньше трансверсальной прочности однонаправленного стеклопластика при нормальной температуре. Этого не достаточно для объяснения происхождения радиальных трещин в намоточном композите в процессе охлаждения. Однако, по нашему мнению, дефекты и трещины в композиционных материалах из армированных полимеров часто образуются вследствие значительной концентрации напряжений на микроуровне, т.е. на уровне элементарной ячейки композита волокно — матрица [21].

Библиографический список

1. *Екельчик В.С., Клюнин О.С.* Новый подход к созданию облегченных металлопластиковых баллонов высокого давления для сжатых газов // Вопросы материаловедения. 2003. № 2 (34). С. 26—31.

2. *Турусов Р.А., Мемариандфард Х.* Дискретная модель в анализе остаточных напряжений однонаправленных намоточных цилиндров из армированного пластика в процессе охлаждения // Вестник МГСУ. 2015. № 1. С. 27—35.

3. *Турусов Р.А., Коротков В.Н., Рогозинский А.К., Куперман А.М., Суляева З.П.* Технологическая монолитность оболочек из полимерных композитных материалов // Механика композитных материалов. 1987. № 6. С. 1072—1076.

4. *Турусов Р.А., Коротков В.Н., Рогозинский А.К.* Температурные напряжения в цилиндре из композитного материала в процессе его охлаждения и хранения // Механика композитных материалов. 1983. № 2. С. 290—295.

5. *Коротков В.Н., Дубовицкий А.Я., Турусов Р.А., Розенберг Б.А.* Теория оптимизации режима охлаждения толстостенных изделий из композитных материалов // Механика композитных материалов. 1982. № 6. С. 1051—1055.

6. *Болотин В.В., Благонадежин В.Л., Варушкин Е.М., Перевозчиков В.Г.* Остаточные напряжения в намоточных элементах конструкций из армированных пластиков. М. : Изд. ЦНИИ информации, 1977.

7. *Bolotin V.V., Vorontsov A.N.* Formation of residual stresses in components made out of laminated and fibrous composites during the hardening process // Mechanics of composites. September 1976. Vol. 12. Issue 5. Pp. 701—705.

8. *Афанасьев Ю.А., Екельчик В.С., Кострицкий С.Н.* Температурные напряжения в толстостенных ортотропных цилиндрах из армированных полимерных материалов при неоднородном охлаждении // Механика композитных материалов. 1980. № 4. С. 651—660.

9. *Hyer M.W., Rousseau C.Q.* Thermally-induced stresses and deformations in angle-ply composite tubes // Journal of Composite Materials. 1987. Vol. 21. No. 5. Pp. 454—480.

10. *Jerome T. Tzeng.* Prediction and experimental verification of residual stresses in thermoplastic composites // Journal of Thermoplastic Composite Materials. April 1995. Vol. 8. No. 2. Pp. 163—179.

11. *Tzeng T., Chien L.S.* A thermal viscoelastic analysis for thick-walled composite cylinders // Journal of Composite Materials March. 1995. Vol. 29. No. 4. Pp. 525—548.

12. *Wisnom M.R., Stringer L.G., Hayman R.J., Hinton M.J.* Curing stresses in thick polymer composite components. Part I: Analysis // 12th International Conference on Composite Materials, Paris, July 1999. Woodhead Publishing Ltd, 1999. P. 859. Режим доступа: http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap859.pdf.

13. *Li C., Wisnom M.R., Stringer L.G., Hayman R., Hinton M.J.* Effect of Mandrel contact on residual stresses during cure of filament wound tubes // 8th International Conference on Fibre Reinforced Composites, 13—15 September 2000, Newcastle-upon-Tyne, UK. 2000. Pp. 105—112.

14. *Gorbatkina Yu.A.* Adhesive strength of fibre-polymer systems. New York ; London : Ellis Horwood, 1992. 264 p.

15. *Турусов Р.А.* Адгезионная механика. М. : МГСУ, 2015. 230 с.

16. *Бабич В.Ф.* Исследование влияния температуры на механические характеристики жестких сетчатых полимеров : автореф. дисс. … канд. техн. наук. М., 1966. 12 с.

17. *Гуревич Г.И.* Деформируемость сред и распространение сейсмических волн. М. : Наука, 1974. 482 с.

18. *Nemat-Nasser S., Hori M.* Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials. Amsterdam : Elsevier Science Publishers, 1993.

19. *Aboudi J.* Mechanics of Composite Materials, a Unified Micromechanical Approach. Amsterdam : Elsevier Science Publishers, 1991.

20. *Zihui Xia, Yunfa Zhang, Fernand Ellyin.* A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications // International Journal of Solids and Structures. April 2003. Vol. 40. Issue 8. Pp. 1907—1921.

21. *Zheng-Ming Huang, Li-min Xin.* Stress concentration factors of matrix in a composite. Subjected to transverse loads // ICCM 2014, July 28—30, Cambridge. Режим доступа: http://www.sci-en-tech.com/ICCM2014/PDFs/321-979-1-PB.pdf.

Поступила в редакцию в марте 2016 г.

Об авторах: **Мемарианфард Махса** — доцент департамента инженерной экологии, **Технологический университет им. К.Н. Туси**, 19697 64499, Иран, г. Тегеран, Бульвар Мирдамад, д. 470, memarian@kntu.ac.ir;

Турусов Роберт Алексеевич — доктор физико-математических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, rob-turusov@yandex.ru;

Мемарианфард Хамед — аспирант кафедры сопротивления материалов, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, hmemariyanfard@yahoo.com.

Для цитирования: *Мемарианфард М., Турусов Р.А., Мемарианфард Х.* Численные и экспериментальные исследования монолитности толстостенной анизотропной оболочки // Вестник МГСУ. 2016. № 7. С. 36—45.

M. Memarianfard, R.A. Turusov, H. Memarianfard

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF MONOLITHIC CHARACTER OF THICK-WALLED ANISOTROPIC SHELL

This paper presents t experimental and numerical studies of cracking in the thick-walled filament-wound cylindrical shells made of fiber reinforced plastic during the manufacturing process (specifically, in the process of curing and cooling). The experiments have shown that, when the cylinder is cooled by optimum cooling regime, at the end of the cooling process the obtained cylinder is monolithic and without ring cracking. In this regard, the residual thermal stresses in thick-walled cylinder in the cooling process is calculated using finite element method with account for transient heat conduction and

the temperature dependence of the mechanical properties of the material and the viscoelastic behavior of the polymer. The calculations are conducted for cooling in standard and optimum regimes. The results showed that the maximum radial stress in the most dangerous initial area is several times less when the cylinder is cooled down in the optimum regime than when it is cooled in the standard regime.

Key words: thick-walled cylinder, cooling, curing, winding, crack, stress, fiberglass

References

1. Ekel'chik V.S., Klyunin O.S. Novyy podkhod k sozdaniyu oblegchennykh metallo-plastikovykh ballonov vysokogo davleniya dlya szhatykh gazov [New Approach to the Creation of Lightweight Reinforced-Plastic High Pressure Cylinders for Compressed Gases]. *Voprosy materialovedeniya* [Problems of Materials Science]. 2003, no. 2 (34), pp. 26—31. (In Russian)

2. Turusov R.A., Memaryanfard H. Diskretnaya model' v analize ostatochnykh napryazheniy odnonapravlennykh namotochnykh tsilindrov iz armirovannogo plastika v protsesse okhlazhdeniya [Discrete Model in the Analysis of Residual Stresses in Unidirectional Winding Cylinders Made of Fiber-Reinforced Plastic]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 1, pp. 27—35. (In Russian)

3. Turusov R.A., Korotkov V.N., Rogozinskiy A.K., Kuperman A.M., Sulyaeva Z.P. Tekhnologicheskaya monolitnost' obolochek iz polimernykh kompozitnykh materialov [Monolithic Technology of the Shells of Polymer Composite Materials]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. 1987, no. 6, pp. 1072—1076. (In Russian)

4. Turusov R.A., Korotkov V.N., Rogozinskiy A.K. Temperaturnye napryazheniya v tsilindre iz kompozitnogo materiala v protsesse ego okhlazhdeniya i khraneniya [Thermal Stresses in a Cylinder Made of a Composite Material in the Process of Cooling and Storage]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. 1983, no. 2, pp. 290—295. (In Russian)

5. Korotkov V.N., Dubovitskiy A.Ya., Turusov R.A., Rozenberg B.A. Teoriya optimizatsii rezhima okhlazhdeniya tolstostennykh izdeliy iz kompozitnykh materialov [Optimization Theory of Cooling Regime of Thick-Walled Products Made of Composite Materials]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. 1982, no. 6, pp. 1051—1055. (In Russian)

6. Bolotin V.V., Blagonadezhin V.L., Varushkin E.M., Perevozchikov V.G. *Ostatochnye napryazheniya v namotochnykh elementakh konstruktsiy iz armirovannykh plastikov* [Residual Stresses in Winding Elements of Constructions Made of Reinforced Plastics]. Moscow, Izdatel'stvo TsNII informatsii Publ., 1977. (In Russian)

7. Bolotin V.V., Vorontsov A.N. Formation of Residual Stresses in Components Made out of Laminated and Fibrous Composites during the Hardening Process. Mechanics of Composites. September 1976, vol. 12, no. 5, pp. 701—705. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/BF00856324.

8. Afanas'ev Yu.A., Ekel'chik B.C., Kostritskiy S.N. Temperaturnye napryazheniya v tolstostennykh ortotropnykh tsilindrakh iz armirovannykh polimernykh materialov pri neodnorodnom okhlazhdenii [Temperature Stresses in Thick-Walled Orthotropic Cylinders Made of Reinforced Polymer Materials in Case of Inhomogeneous Cooling]. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials]. 1980, no. 4, pp. 651—660. (In Russian)

9. Hyer M.W., Rousseau C.Q. Thermally-Induced Stresses and Deformations in Angle-Ply Composite Tubes. Journal of Composite Materials. 1987, vol. 21, no. 5, pp. 454—480. DOI: http://dx.doi.org/10.1177/002199838702100504.

10. Jerome T. Tzeng. Prediction and Experimental Verification of Residual Stresses in Thermoplastic Composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials. April 1995, vol. 8, no. 2, pp. 163—179. DOI: http://dx.doi.org/10.1177/089270579500800202.

11. Tzeng T., Chien L.S. A Thermal Viscoelastic Analysis for Thick-Walled Composite Cylinders. Journal of Composite Materials March. 1995, vol. 29, no. 4, pp. 525—548.

12. Wisnom M.R., Stringer L.G., Hayman R.J., Hinton M.J. Curing Stresses in Thick Polymer Composite Components. Part I: Analysis. 12th International Conference on Composite Materials, Paris, July 1999. Woodhead Publishing Ltd, 1999, p. 859. Available at: http://iccm-central.org/Proceedings/ICCM12proceedings/site/papers/pap859.pdf.

13. Li C., Wisnom M.R., Stringer L.G., Hayman R., Hinton M.J. Effect of Mandrel Contact on Residual Stresses During Cure of Filament Wound Tubes. 8th International Conference on Fibre Reinforced Composites, 13—15 September 2000, Newcastle-upon-Tyne, UK. 2000, pp. 105—112.

14. Gorbatkina Yu.A. Adhesive Strength of Fibre-Polymer Systems. New York, London, Ellis Horwood, 1992, 264 p.

15. Turusov R.A. *Adgezionnaya mekhanika* [Adhesion Mechanics]. Moscow, MGSU Publ., 2015, 230 p. (In Russian)

16. Babich V.F. *Issledovanie vliyaniya temperatury na mekhanicheskie kharakteristiki zhestkikh setchatykh polimerov : avtoreferat dissertatsii … kandidata tekhnicheskikh nauk* [Study of Temperature Influence on the Mechanical Properties of Rigid Cross-Linked Polymers : Abstract of the Dissertation of Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 1966, 12 p. (In Russian)

17. Gurevich G.I. *Deformiruemost' sred i rasprostranenie seysmicheskikh voln* [Deformability of Media and Propagation of Seismic Waves]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 482 p. (In Russian)

18. Nemat-Nasser S., Hori M. Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1993.

19. Aboudi J. Mechanics of Composite Materials, a Unified Micromechanical Approach. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1991.

20. Zihui Xia, Yunfa Zhang, Fernand Ellyin. A Unified Periodical Boundary Conditions for Representative Volume Elements of Composites and Applications. International Journal of Solids and Structure. April 2003, vol. 40, issue 8, pp. 1907—1921. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0020-7683(03)00024-6.

21. Zheng-Ming Huang, Li-min Xin. Stress Concentration Factors of Matrix in a Compo-Site. Subjected to Transverse Loads. ICCM 2014, July 28—30. Cambridge, 3 p. Available at: http://www.sci-en-tech.com/ICCM2014/PDFs/321-979-1-PB.pdf.

About the authors: **Memarianfard Mahsa** — Associate Professor, Department of Engineering Ecology, **K.N. Toosi University of Technology**, 470 Mirdamad Ave. West, 19697, Tehran, Iran; memarian@kntu.ac.ir;

Turusov Robert Alekseevich — Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Strength of Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; rob-turusov@yandex.ru;

Hamed Memaryanfard — postgraduate student, Department of Strength of Materials, **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; hmemariyanfard@yahoo.com.

For citation: Memarianfard M., Turusov R.A., Memarianfard H. Chislennye i eksperimental'nye issledovaniya monolitnosti tolstostennoy anizotropnoy obolochki [Numerical and Experimental Studies of Monolithic Character of Thick-Walled Anisotropic Shell]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 7, pp. 36—45. (In Russian)