

Безмельницын А.В., Сапожников С.Б. Многомасштабное моделирование и анализ механизма возникновения технологических межслойных напряжений в толстостенных кольцах из стеклопластика // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2017. – № 2. – С. 5–22. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.01

Bezmelnitsyn A.V., Sapozhnikov S.B. Multiscale modeling and formation mechanism analysis of technological interlaminar stresses in thick-walled GFRP rings. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 2, pp. 5-22. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.2.01



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 2, 2017

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI 10.15593/perm.mech/2017.2.01

УДК 539.422.52

МНОГОМАСШТАБНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕЖСЛОЙНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЛСТОСТЕННЫХ КОЛЬЦАХ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКА

А.В. Безмельницын, С.Б. Сапожников

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 20 января 2017 г.
Принята: 06 мая 2017 г.
Опубликована: 30 июня 2017 г.

Ключевые слова:

стеклопластик, намотка, трансверсальные напряжения, многоуровневое моделирование, конечно-элементный анализ, подшипник скольжения.

АННОТАЦИЯ

Толстостенные кольца из стеклопластика нашли широкое применение в высоконагруженных малоподвижных узлах трения рабочих органов дорожных машин в качестве втулок подшипников скольжения. Они должны выдерживать высокие радиальные нагрузки и работать в условиях ограниченной маслоподачи, используя смазочный материал содержащейся в открытых порах втулки. В крупногабаритных конструкциях подшипников скольжения (опорные устройства дорожных машин) толщина втулки может достигать десятков миллиметров. Практика показала, что для снижения динамической составляющей нагрузки при работе дорожных машин необходимо использовать втулки с достаточно большой толщиной стенки. Но увеличение толщины втулки приводит зачастую к расслоению из-за высоких технологических трансверсальных (межслойных), растягивающих напряжений, возникающих в процессе изготовления (при охлаждении изделия до комнатной температуры после намотки и отверждении полимерного связующего). Эти напряжения могут вызывать также заметное коробление толстостенных втулок при механической обработке.

В данной работе показано, что силовая намотка предварительно пропитанной стеклоткани на жесткую оправку приводит к неоднородному обжатю слоев по толщине втулки и искажению исходной геометрии переплетения нитей основы и утка. Нити внутренних слоев искривлены сильнее нитей наружных слоев. Это приводит к тому, что коэффициенты теплового расширения внутренних слоев оказываются больше соответствующих величин наружных слоев, что вызывает возникновение остаточных растягивающих напряжений в трансверсальном (радиальном) направлении.

В работе представлены результаты дилатометрических исследований распределения коэффициентов линейного теплового расширения по толщине в окружном и аксиальном направлении. Объемные доли стекловолокна и матрицы в нитях определены методом выжигания, на основе чего вычислены теплофизические свойства нити как однонаправленного микропластика. Анализ геометрии реального переплетения нитей позволил получить данные для моделирования трехмерной структуры ткани и расчетного определения теплофизических свойств композитных тканевых слоев на мезоуровне в пакете ANSYS Workbench, которые были использованы далее для нахождения остаточных межслойных температурных напряжений во втулке подшипника скольжения из стеклопластика на макроуровне.

© ПНИПУ

© Безмельницын Александр Викторович – инженер, e-mail: Alexandr00786@gmail.com
Сапожников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, e-mail: ssb@susu.ac.ru

Alexandr V. Bezmelnitsyn – Engineer, e-mail: Alexandr00786@gmail.com
Sergei B. Sapozhnikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: ssb@susu.ac.ru



MULTISCALE MODELING AND FORMATION ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL INTERLAMINAR STRESSES IN THICK-WALLED GFRP RINGS

A.V. Bezmelnitsyn, S.B. Sapozhnikov

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 20 January 2017
Accepted: 06 May 2017
Published: 30 June 2017

Keywords:

GFRP, winding, transversal stresses, multiscale modelling, FEA, sliding bearing.

ABSTRACT

Thick-walled GFRP rings are widely used in high-loaded friction units of working elements of road-building machines as sliding bearings. They must endure high radial loads and work in the condition of a limited lubrication by using the lubricant which is located only in the open pores of the bushing. In large structures of sliding bearings (bearing elements of road-building machines) the thickness of a bushing might be dozens of millimeters. The reality is that it is necessary to use bushings with a rather big thickness to reduce the dynamic load for road-building machines. However, if the thickness of a composite ring increases, it often results in the inter-laminar failure which is caused by high technological (inter-layer) and stretching stresses due to the anisotropic thermal expansion and shrinkage of fabric composites. Furthermore, these stresses can also cause a significant distortion of a thick-walled GFRP ring after machining. In this work, it is assumed that the tension winding of the pre-impregnated fabric on a rigid mandrel leads to a heterogeneous compression of the internal layers and a distortion of the original composite woven structure through the thickness. The threads of the inner layers are curved more than the threads of the outer layers. For this reason, the coefficients of thermal expansion (CTE) of the inner layers happen to be larger than the CTE of the outer layers. Irregular distribution of the CTE gives rise to residual tensile stresses in the transverse (radial) direction.

This paper presents the results of dilatometric studies of distributing of the CTE in the thickness of the hoop and axial directions. To determine the volume fraction of filaments and matrix into the threads of GFRP, we used the burn-out method. The observation of slices in the optical microscope allowed us to determine the degree of the curvature of fibres and the thickening of inner ring layers for further 3D modelling. The structure of the woven composite ring was modelled by using impregnated unidirectional (UD microplastic) threads and repeated unit cell. Modulus of elasticity, Poisson's ratios and coefficients of thermal expansion at microscale, macroscale and mesoscale were calculated by FEA (ANSYS Workbench). Thermomechanical properties were used to evaluate the residual technological interlayer stresses in the GFRP sliding bearing bushing at the macroscale.

© PNRPU

Введение

Надежность и долговечность многих конструктивных элементов и технологических машин во многом зависит от эксплуатационных характеристик узлов трения. В настоящее время подшипники скольжения, подпятники, уплотнения и прочие подобные узлы изготавливаются из различных материалов, которые отличаются по своим механическим и физико-химическим характеристикам, стоимости и выбираются исходя из условий эксплуатации.

Наряду с традиционными материалами (баббиты, бронзы и др.) в изготовлении подшипников скольжения производители используют разнообразные композиционные материалы [1, 2].

Подшипники скольжения из традиционных материалов помимо относительно высокой стоимости имеют еще ряд недостатков. При интенсивных статических и динамических нагрузках в зоне контакта вал-подшипник могут возникать напряжения, превышающие предел текучести, вследствие чего происходят необратимые пластические деформации в подшипнике или на валу. Пластическое деформирование компонентов узла трения неизбежно приводит к появлению зазоров, которые становятся причиной ускоренного износа и источником нежелательных вибраций.

Подшипники скольжения, полученные намоткой препрега из стеклоткани, пропитанной смолой, лишены таких недостатков. Благодаря высокой пористости подшипник на

тканевой основе достаточно податливый в трансверсальном направлении. Высокая податливость в радиальном направлении позволяет обеспечить развитую площадку контакта между валом и втулкой, невысокие контактные нормальные и касательные напряжения, которые приводят к минимальному износу вала.

Втулки подшипника из стеклопластика с открытой пористостью насыщают консистентным смазочным материалом, который в процессе работы выделяется в зону трения из пор, снижая коэффициент трения. Применение смазки не влияет на физико-механические свойства композитного подшипника, так как она имеет возможность мигрировать из контактной зоны на периферию, не увеличивая жесткость, как это было бы при сжатии в замкнутом объеме. Самосмазывающиеся подшипники представляют собой «умную» конструкцию и дают возможность отказаться от дорогостоящей и технологически сложной системы маслоподачи.

Процесс изготовления втулки подшипника состоит из нескольких этапов: намотка ленты препрега на стальную разъёмную оправку, нагрев по специальному температурному режиму (гелеобразование, полимеризация и охлаждение), разборка оправки и снятие втулки. Силовая намотка неотвержденного вязкоупругого препрега на оправку (намотка с натяжением) приводит к неоднородному обжатию слоев и искажению исходной геометрии переплетения нитей в препреге по толщине втулки. Это усложняет процедуру проектирования узла подшипника скольжения и в существующих методиках [3] не рассматривается, сводя определенную степень «незнания» к отказу от рассмотрения напряженного состояния, ограничиваясь учетом лишь тепловых эффектов. Неоднородность структуры приводит к тому, что коэффициенты теплового расширения внутренних слоев оказываются больше соответствующих величин наружных слоев, что вызывает возникновение остаточных растягивающих напряжений в трансверсальном (радиальном) направлении вплоть до образования трещин, что недопустимо по условиям эксплуатации [4–6].

Кроме того, остаточные напряжения часто приводят к изменению размеров и формы изделия при механической обработке. Втулки на тканевой основе, полученные силовой намоткой, имеют по толщине различия в микроструктуре, модулях упругости, коэффициентах теплового расширения [7–9].

Тканевые композиты в зависимости от вида пряжи (стекло, угле, органические), способа переплетения нитей обладают различными теплофизическими свойствами, для исследования которых применяют многоуровневое моделирование (микро-, мезо- и макро-) [10–12]. В данной работе использовалась ткань с сатиновым переплетением как наиболее прочная в окружном направлении

В этом аспекте наиболее важным является корректное задание геометрии переплетения, которое заранее неизвестно для колец, получаемых силовой намоткой препрега стеклоленты и должно быть изучено с использованием микрошлифов. На микроуровне нить, состоящую из волокон, связанных между собой матрицей, моделировали в [13]. Для описания механического поведения тканевого слоя на мезоуровне в работах [14–16] создана представительная ячейка из нитей утка и основы, пропитанных полностью полимерной матрицей. Эта модель, однако, не может быть использована для прогноза физико-механических характеристик тканевого слоя с высокой пористостью.

В работах [17, 18] авторы полагают, что причиной расслоения толстостенных мотаных колец являются температурно-технологические напряжения (ТТН), связанные с неоднородной по толщине микроструктурой, но не приводят методики для оценки их величины.

Для оценки качества расчетных моделей результаты численного исследования сопоставлены с экспериментальными данными. Механика возникновения ТТН во втулках, полученных силовой намоткой препрега стеклотенты, является предметом обсуждения данной статьи.

1. Материал и технология

Втулка была изготовлена из препрега методом «сухой» намотки [19]. На вращающуюся металлическую оправку диаметром 75 мм, была послойно намотана стеклотента сатинового переплетения, предварительно пропитанная эпоксифенольной смолой с добавлением 5 % этанола и 5 % ацетона для понижения вязкости связующего. Толщина кольца составляла 15мм (около 80 слоев ткани) Сила натяжения ~5 кг/см обеспечивала обжатие препрега и уплотнение структуры намотанной заготовки. После намотки препрега оправку оборачивали хлопчатобумажной киперной лентой с натяжением ~6 кг/см и помещали в сушильный шкаф. Процесс отверждения состоял из нескольких этапов. На первом этапе проводили ступенчатый нагрев 80 °С (выдержка 2 часа), 120 °С (выдержка 2 часа), 160 °С (выдержка 8 часов), 180 °С (выдержка 3 часа). При нагреве происходило размягчение полимерной матрицы и переход ее в вязкотекучее состояние. Под воздействием неравномерно распределённого по толщине поля давления, сформированного в процессе намотки, происходит искажение исходной геометрии переплетения нитей основы



Рис. 1. Втулка подшипника скольжения
Fig. 1. Bushing of the sliding bearing

и утка и усиление компактирования внутренних слоев. Второй этап заключался в охлаждении до комнатной температуры. Повышенная плотность внутренних слоёв приводит к увеличению коэффициента теплового расширения (КТР). Существенная неоднородность КТР по толщине особенно сильно проявляется в толстостенных кольцах (внутренние слои имеют большее значением КТР по сравнению с внешними). При охлаждении происходит неравномерная температурная усадка, формируются ТТН. На третьем этапе охлажденную кольцевую заготовку снимают с оправки, торцы обрабатывают на шлифовальном станке до ширины 15 мм (рис. 1).

2. Экспериментальные исследования

2.1. Структура ткани

Кривизну нитей в ткани определяли путем непосредственного наблюдения срезов с помощью оптического микроскопа Olympus VX51 в проходящем свете. Образцы толщиной ~0,2 мм были вырезаны из втулки подшипника скольжения таким образом, что поверхности спилов были перпендикулярны нитям основы или нитям утка. На рис. 2 показана мезоструктура внутренних и внешних слоёв толстостенного кольца, изготовленного намоткой.

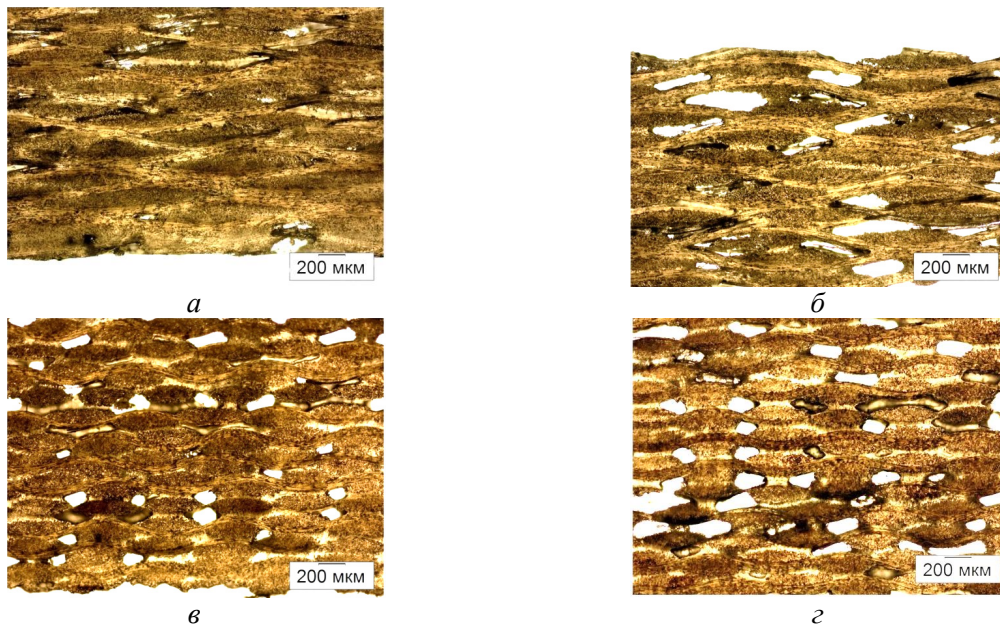


Рис. 2. Мезоструктура втулки: *a* – внутренние слои (нити основы параллельны, а нити утка перпендикулярны плоскости среза); *б* – внешние слои (нити основы параллельны, а нити утка перпендикулярны плоскости среза); *в* – внутренние слои (нити основы перпендикулярны, нити утка параллельны плоскости среза); *г* – внешние слои (нити основы перпендикулярны, нити утка параллельны плоскости среза)

Fig. 2. Mesostructure of the bushing: *a* – inner layers (the warp threads are parallel, and the weft threads are perpendicular to the plane of the cut); *b* – outer layers (the warp threads are parallel, and the weft threads are perpendicular to the plane of the cut); *c* – inner layers (the warp threads are perpendicular, the weft threads are parallel to the plane of the cut); *d* – outer layers (the warp threads are perpendicular, the weft threads are parallel to the plane of the cut)

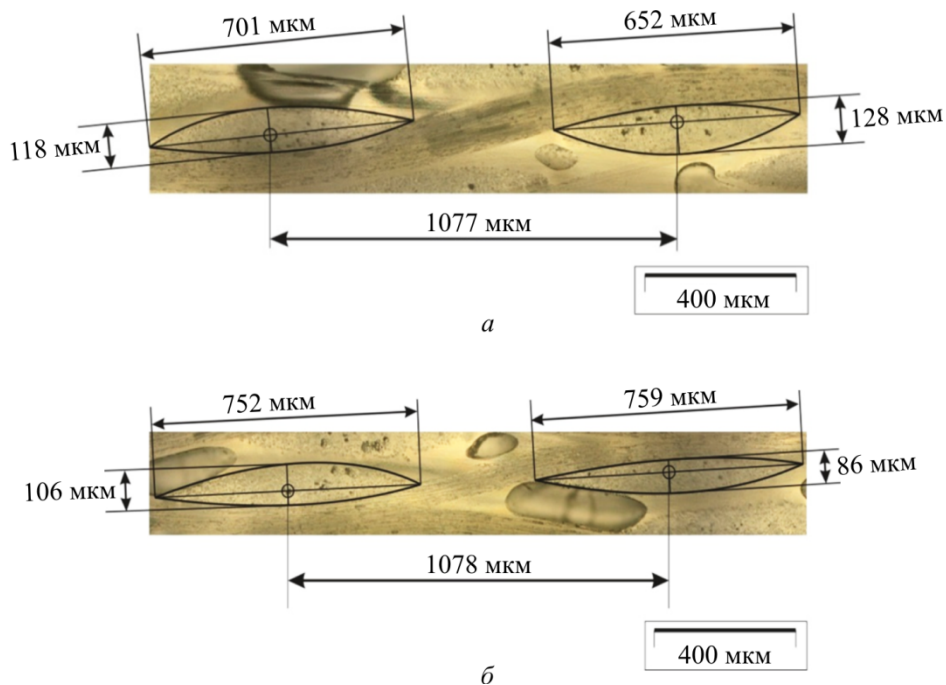


Рис. 3. Поперечное сечение нитей: *a* – внешний слой (нити основы параллельны, а нити утка перпендикулярны плоскости среза); *б* – внутренний слой (нити основы параллельны, а нити утка перпендикулярны плоскости среза)

Fig. 3. Cross-section of threads: *a* – the outer layer (the warp threads are parallel, and the weft threads are perpendicular to the plane of the cut); *b* – the inner layer (the warp threads are parallel, and the weft threads are perpendicular to the plane of the cut)

На рис. 2, 3 видно, что внутренние слои спрессованы сильнее, чем наружные, а нити имеют меньшую высоту и большую ширину. Полученные снимки в дальнейшем будут использованы при трехмерном моделировании представительных ячеек внутреннего и внешнего слоя кольца.

2.2. Физикомеханические свойства

Для определения распределения по толщине физикомеханических свойств было исследовано пять колец, из которых вырезаны сегменты с центральным углом 90° , и каждый разделён на образцы толщиной $\sim 2,5$ мм, как показано на рис. 4.



Рис. 4. Образцы, полученные из кольца
Fig. 4. Samples taken from the ring

2.3. Определение модуля упругости

Окружной модуль упругости был определен с помощью трёхточечного изгиба. Образцы устанавливались на специальные роликовые опоры, а в центр прикладывалась нагрузка (рис. 5). Для уменьшения трения в области контакта подшипника и роликов наносилась антифрикционная паста. Траверса перемещалась вниз на 1 мм со скоростью 5 мм/мин. Расстояние между опорами составляло 50 мм. По результатам испытаний были получены диаграммы «нагрузка – перемещение траверсы».

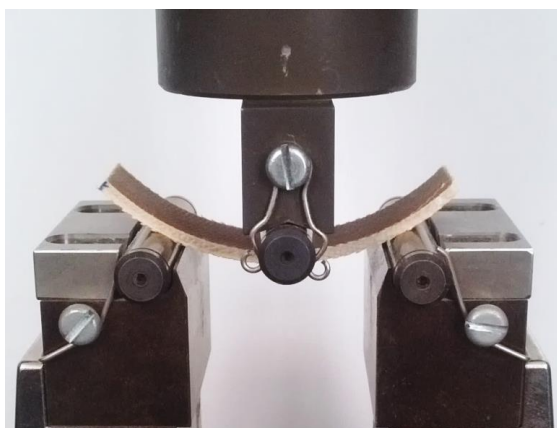


Рис. 5. Образец в нагрузочном приспособлении
Fig. 5. The sample is in the loading unit

Для определения значений модуля упругости и модуля сдвига было смоделировано испытание сегмента кольца на трёхточечный изгиб в пакете ANSYS Workbench [20].

Распределение модуля упругости по толщине кольца представлено на рис. 6. Нулевая толщина соответствует внутреннему диаметру.

2.4. Определение объёмной доли смолы, стекловолокон и пор

Методом выжигания [21] были определены массовые доли стеклянных волокон и полимерной матрицы. Каждый образец был взвешен, и определен его объем. После чего образцы помещали в печь на 4 часа при температуре 550°C. После выжигания слои, состоящие из стеклоткани, взвешивали и определяли их массовую долю от общей массы образца. Вычитанием из полной массы сегмента массы оставшегося стекла была найдена массовая доля полимерного связующего. Зная плотность смолы и плотность стекла, используемого для производства стеклоткани, нашли объем стекловолокон и смолы. Объем пор (пустот) был найден из общего объема материала вычитанием объема стеклоткани и смолы. Распределение плотности, объемной доли стеклоткани, смолы и пор по толщине представлено на рис. 7.

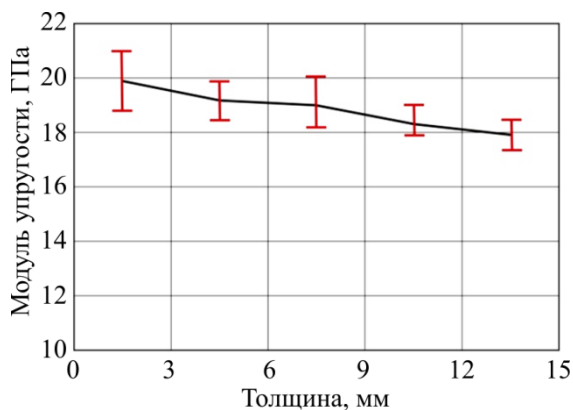


Рис. 6. Диаграмма распределения окружного модуля упругости по толщине кольца
Fig. 6. Diagram of the distribution of the circumferential modulus of elasticity along the thickness of the ring

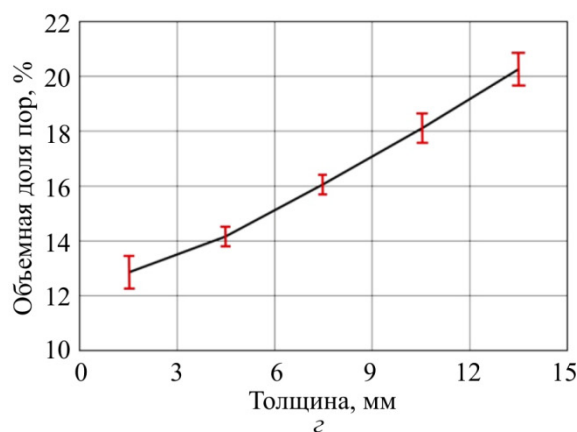
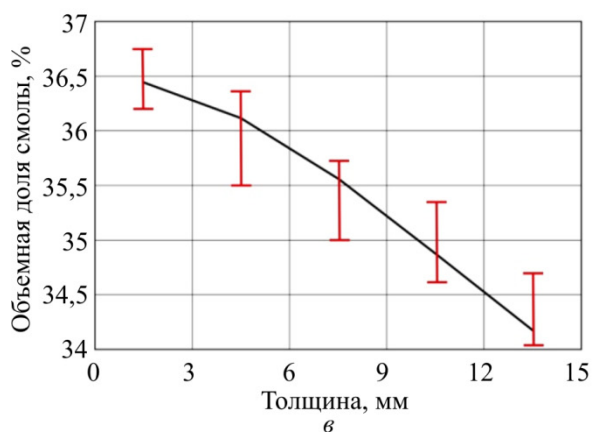
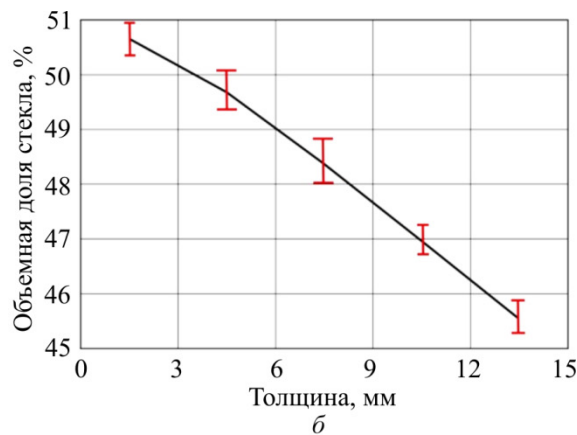
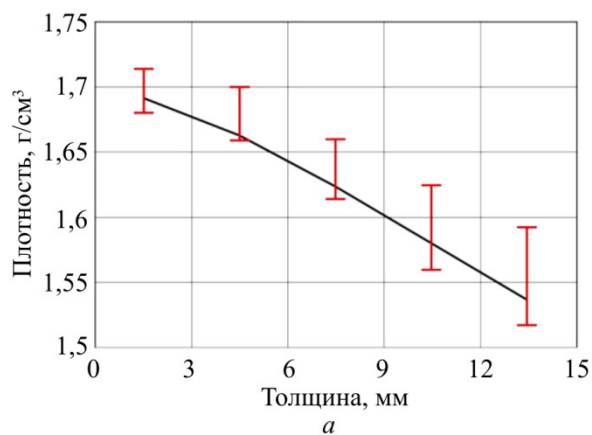


Рис. 7. Диаграмма распределения по толщине кольца: а – плотности; б – объёмной доли стекла; в – объёмной доли смолы; г – объёмной доли пор
Fig. 7. Diagram of the distribution along the thickness of the ring of: a – density; b – the volume fraction of glass; c – the volume fraction of resin; d – the volume fraction of pores

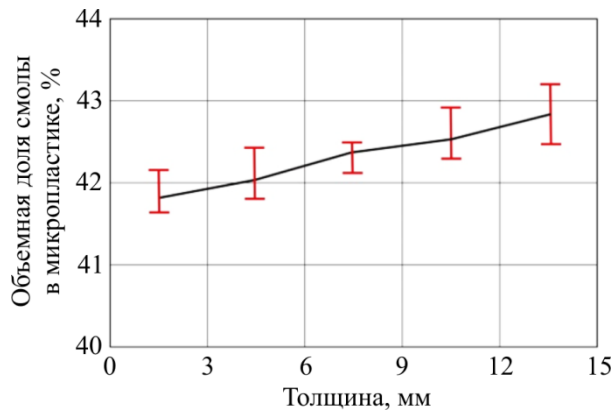


Рис. 8. Диаграмма распределения объёмной доли смолы в микропластике по толщине кольца

Fig. 8. Diagram of distribution of the volume fraction of resin in microplastics along the ring thickness

Из рис. 6 видно, что плотность по толщине втулки распределена не равномерно. Это можно объяснить тем, что у колец, полученных силовой намоткой, формируется поле давлений, приводящее к большему по сравнению с наружными уплотнению внутренним слоям.

Структура изготовленной втулки является очень пористой (см. рис. 2), в связи с этим было принято допущение, что вся смола содержится только в нитях. Исходя из этого было получено распределение объёмной доли смолы в микропластике по толщине кольца (рис. 8).

Полученные данные о соотношении объёмных долей стеклонитей, смолы и пор будут использованы в дальнейшем микро- и мезомоделировании представительных ячеек слоёв.

2.5. Измерение коэффициентов теплового расширения

Для исследования КТР из каждой втулки было вырезано по пять образцов, соответствующих разным участкам по ее толщине (рис. 9). Образцы вырезались в виде длинных параллелепипедов с размерами 2×4×17 мм (в окружном направлении) и 2×4×15 мм (в осевом).

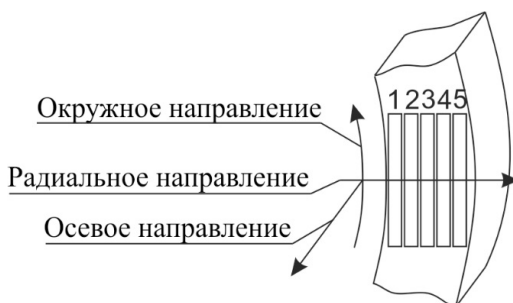


Рис. 9. Схема расположения образцов

Fig. 9. Layout of samples

Определение КТР образцов проводилось на dilatометре NETZSCH DIL402C. Во время эксперимента температура изменялась от 22 до 90°C, скорость нагрева составляла 1 °C/мин, после чего образец остывал до комнатной температуры. В качестве результата измерения брали среднее значение изменения длины в цикле «нагрев–охлаждение» при температурном диапазоне от 22 до 90°C.

КТР определялся по формуле

$$\text{КТР} = \Delta L / (L \cdot \Delta T), \quad (1)$$

где L – начальная длина образца; ΔL – изменение длины образца и ΔT – изменение температуры.

Распределение КТР по толщине для стеклопластиковой втулки представлено на рис. 10.

2.6. Растяжение в радиальном направлении

Для исследования трансверсальной (в радиальном направлении) прочности стеклопластиковой втулки рассмотрено её растяжение сосредоточенными силами в радиальном направлении (рис. 11), которое сопровождается разгибом и изменением радиуса кривизны [23, 24]. Испытания проводили на универсальной электромеханической машине Instron 5882. Регистрацию нагрузки проводили с помощью штатного силоизмерителя с макси-

мальной нагрузкой 5 кН. Скорость перемещения траверсы составляла 5 мм/мин. Для рассмотренного кольца нагрузка расслоения составила $9,0 \pm 0,6$ кН (испытано пять образцов).

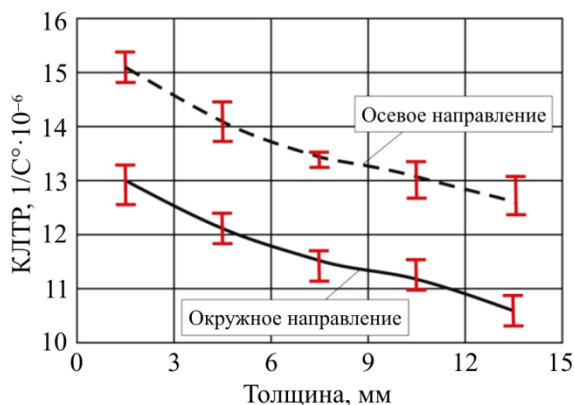


Рис. 10. Диаграмма распределение КТР по толщине втулки в осевом и окружном направлениях

Fig. 10. Diagram of the distribution of CTE along the thickness of the bushing in the axial and circumferential directions



Рис. 11. Образец в захватах
Fig. 11. The sample is in clamps

2.7. Трансверсальное растяжение

Для определения прочности материала колец Z_t при трансверсальном растяжении (направление Z) были проведены испытания на образцах с размерами $15 \times 15 \times 10$ мм (рис. 12), вырезанных из тела кольца. Подобная вырезка полностью снимает трансверсальные ТТН.

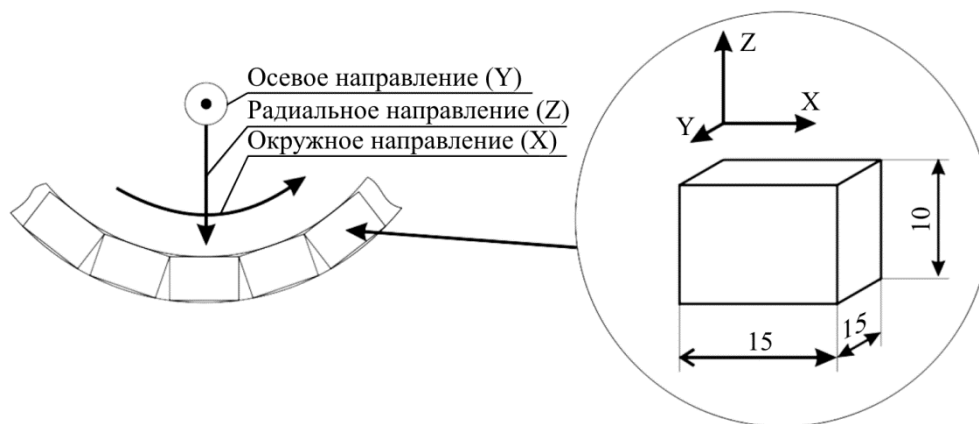


Рис. 12. Схема расположения образцов для определения трансверсальной прочности
Fig. 12. Schematic design of samples for determination of transversal strength

Вследствие малых размеров, исключающих возможность непосредственного захвата и приложения растягивающих усилий к образцам, использовали известную технологию вклеивания [26], в которой предусмотрено использование специальных элементов-переходников, к которым прикладывается нагрузка, и разрушение происходит не по клею, а по образцу, так как его прочность существенно ниже. Чтобы исключить влияние возможного изгиба на результаты испытаний, в нагрузочном приспособлении (рис. 13) нами предусмотрена установка шарнирных узлов с перекрещивающимися осями (аналогия – Карданов шарнир) и вклеивание образца с использованием кондуктора, минимизирующего случайные боковые отклонения.

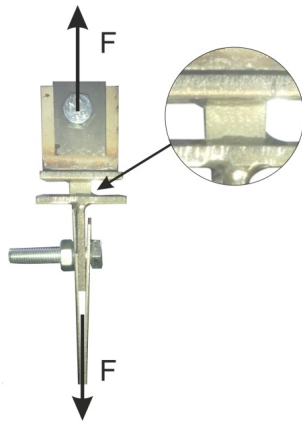


Рис. 13. Схема нагружения образца (по стрелке) в Т-образных захватах
 Fig. 13. The scheme of loading of the sample (in the direction of the arrow) in T-clamps

В результате испытаний пяти образцов был получен трансверсальный (межслойный) предел прочности $Z_t = 12,6 \pm 2$ МПа.

Z_t – трансверсальный (межслойный) предел прочности определяется по формуле

$$Z_t = F/S, \quad (2)$$

где F – нагрузка разрушения; S – площадь поперечного сечения образца.

Это значение будет использовано ниже для сравнения с расчетной оценкой прочности кольца при охлаждении от температуры перехода матрицы из высокоэластического состояния в стеклообразное T_g до комнатной T_r [27, 28].

3. Расчетные исследования

Как было отмечено выше, упругие и теплофизические свойства тканых композитов существенно зависят от геометрии переплетения нитей, соотношения объемной доли смолы и стекловолокон. Таким образом, крайне важно, чтобы разработанная модель воспроизводила реальную структуру кольца возможно более точно. В данном разделе проведено моделирование взаимодействия волокон и матрицы на уровне однонаправленного композита (микропластик); переплетения нитей, составленных из однонаправленного микропластика на мезоуровне и слоёв – на макроуровне.

3.1. Моделирование структуры микропластика (микромеханика)

Упругие и теплофизические свойства микропластика были найдены с использованием конечно-элементного анализа. При моделировании было принято допущение, что вся смола содержится в микропластике. В качестве расчетной модели принята схема повторяющегося элемента (рис. 14) с объемной долей стеклофиламентов ~58 % и с объемной долей смолы ~42 %.

Радиус цилиндра был определен из соотношения объемных долей волокон и смолы в микропластике [25]. На свободных поверхностях представительного элемента были заданы условия зеркальной симметрии, а на других поверхностях осуществлялось взаимодействие с вспомогательными жесткими кубическими элементами за счет контакта типа *No Separation* (рис. 15). Этот тип контакта обеспечивает одинаковость нормальных перемещений во всех точках контактной поверхности и отсутствие ограничений на перемещения в плоскости контакта. На границе раздела фаз использовался тип контакта *Bonded*, обеспечивающий взаимное перемещение всех точек в зоне контакта.

Для построения КЭ модели использовались 20-узловые твердотельные квадратичные элементы высокого порядка SOLID186, доступные в библиотеке элементов системы ANSYS. Количество элементов в модели порядка 8500. Исходя из допущения, что каждая фаза является однородной, изотропной и линейно-упругой, были найдены упругие и теплофизические свойства микропластика.

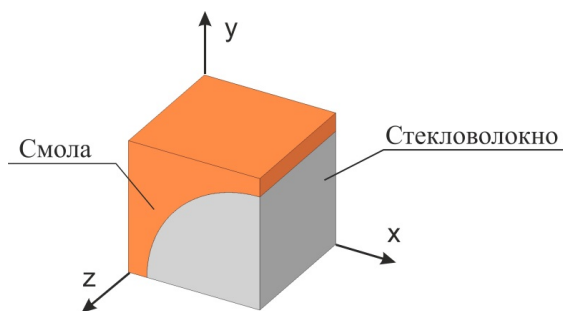


Рис. 14. Микромеханическая модель
Fig. 14. Micromechanical model

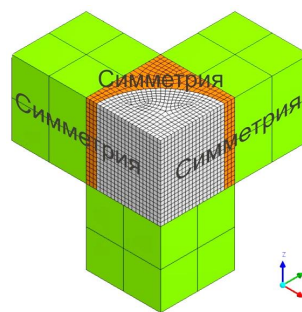


Рис. 15. Граничные условия и сетка конечных элементов микромодел
Fig. 15. Boundary conditions and finite element grid of the micromodel

В табл. 1 приведены характеристики материалов, которые были использованы при микромоделировании МКЭ [22]

Таблица 1

Упругие и теплофизические свойства материалов

Table 1

Elastic and thermophysical properties of materials

Материал	E (ГПа)	$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C}^{\circ})$	ν (коэф. Пуассона)
Эпоксифенольная смола	3,5	63,0	0,35
Стекловолокно	72,0	5,4	0,3

Проведены расчеты деформирования модели под действием кинематического нагружения для случаев одноосного растяжения-сжатия, чистого сдвига.

Далее была решена задача деформирования модели под действием однородного температурного поля.

Результаты расчета теплофизических и механических свойств для элементарной ячейки однонаправленного композита показаны в табл. 2.

Таблица 2

Elastic and thermophysical properties of the unidirectional thread (microplastics)

Table 2

Упругие и теплофизические свойства однонаправленной нити (микропластик)

E_z , ГПа	$E_x = E_y$, ГПа	$G_{xz} = G_{yz}$, ГПа	G_{xy} , ГПа	$\nu_{xz} = \nu_{yz}$	ν_{xy}	$\alpha_z, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_x = \alpha_y, 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
45,3	15,1	4,5	6,4	0,29	0,26	6,4	31,2

Полученные результаты были использованы ниже при конечно-элементном моделировании тканевого препрега, состоящего из переплетенных пропитанных нитей (микропластика). Результаты расчёта хорошо согласуются с литературными данными [23].

3.2. Моделирование переплетения микропластика (мезомеханика)

Кольцо, полученное намоткой препрега из стеклоткани, является слоистым композитом. Геометрия структуры материала втулки была изучена на снимках, полученных с помощью оптического микроскопа (п. 2.1). Эти данные позволили с достаточной точностью

построить представительные ячейки для внутреннего и внешнего слоя кольца (рис. 16) для дальнейшего конечно-элементного анализа [29]. При этом вводилось допущение, что площадь поперечного сечения идеализированных нитей равна средней поперечной площади соответствующих нитей, вычисленной по снимкам.

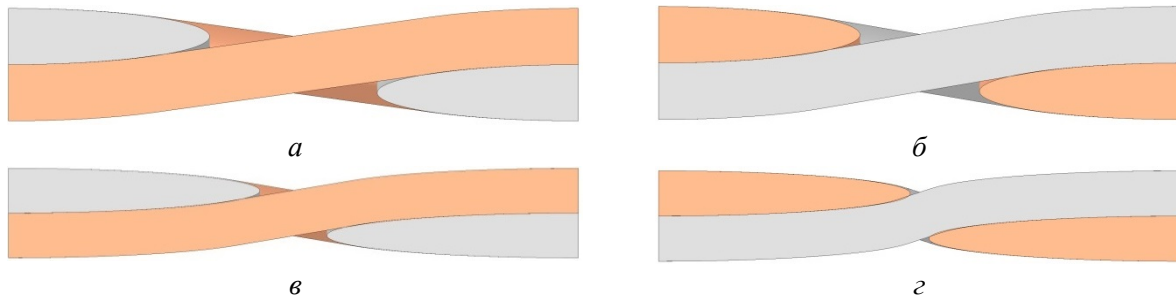


Рис. 16. Представительная ячейка: *a* – внешнего слоя основа; *b* – внешнего слоя уток; *c* – внутреннего слоя основа; *d* – внутреннего слоя уток

Fig. 16. The representative cell: *a* – of the outer layer of the base; *b* – of the outer layer of wefts; *c* – of the inner layer of the base; *d* – of the inner layer of wefts

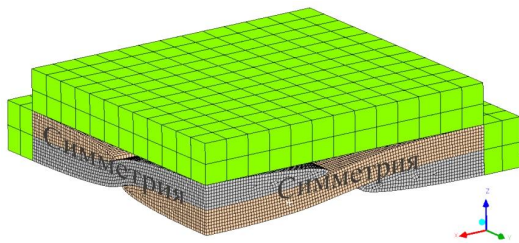


Рис. 17. Граничные условия для представительной ячейки
Fig. 17. Boundary conditions for a representative cell

В работе слой ткани (неравноплотное полотняное переплетение), состоящей из переплетённых нитей, пропитанных эпоксифенольным связующим, был смоделирован с помощью повторяющейся представительной ячейки. Используя условия симметрии, граничные условия на плоских гранях задали по аналогии с пунктом 0 (рис. 17).

каждого элемента локальная система координат назначалась таким образом, чтобы ось *Z* каждого элемента направлялась вдоль волокон нити (рис. 18). На границе соприкосновения волокон использовался тип контакта *Bonded*.

Для построения КЭ модели представительной ячейки также использовались элементы типа SOLID186. Количество элементов в модели порядка 132000.

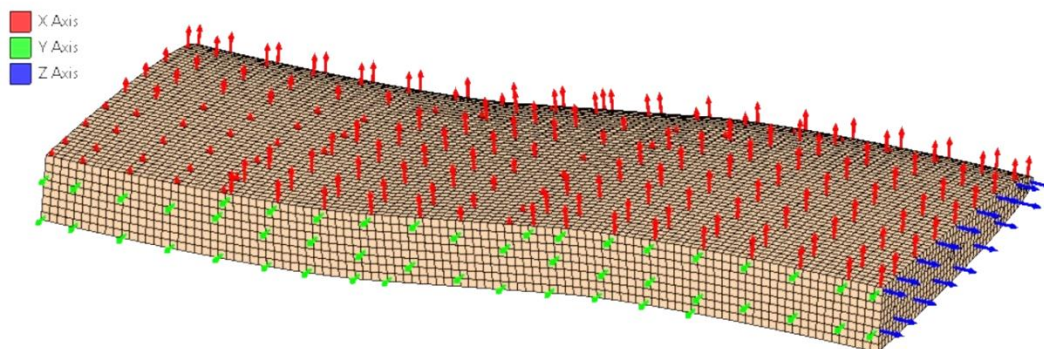


Рис. 18. Геометрия нити с локальной системой координат каждого конечного элемента
Fig. 18. Geometry of the thread with the local coordinate system of each finite element

Результаты вычислений теплофизических и механических свойств представительных ячеек представлены в табл. 3.

Таблица 3

Упругие и теплофизические свойства представительных ячеек

Table 3

Elastic and thermophysical properties of representative cells

Показатели	Представительная ячейка внутреннего слоя	Представительная ячейка наружного слоя
E_x (ГПа)	22,7	20,1
E_y (ГПа)	21,0	18,5
E_z (ГПа)	5,5	4,3
G_{xz} (ГПа)	3,15	3,02
G_{yz} (ГПа)	3,12	2,93
G_{xy} (ГПа)	4,25	4,2
ν_{xy}	0,38	0,34
ν_{xz}	0,43	0,46
ν_{yz}	0,45	0,49
α_x ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	14,9	12,5
α_y ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	16,2	13,3
α_z ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	32,2	32,5

3.3. Оценка остаточных межслойных напряжений в кольце (макромеханика)

Мезомоделирование (п. 3.2) позволило определить упругие и теплофизические свойства внутреннего и внешнего слоя втулки. Полученные данные использованы при создании макромоделей кольца с ортотропными и неоднородно распределенными по толщине свойствами.

Для оценки трансверсальной прочности стеклопластика при растяжении в составе кольца был проведен конечно-элементный анализ напряженного состояния, нагрузка для которого была взята из экспериментов (п. 2.6) на растяжение диаметрально приложенными силами и равнялась 9,0 кН. В расчете при моделировании из соображения симметрии была рассмотрена 1/4 кольца под нагрузкой $F = 4,5$ кН. Результаты МКЭ-анализа напряженного состояния кольца в цилиндрической системе приведены на рис. 19 (нормальные напряжения σ_x).

Численное моделирование показало, что при нагрузке 9,0 кН максимальное значение трансверсальных напряжений ≈ 11 МПа. Следует отметить, что результаты измерения предела прочности, экспериментально полученные при радиальном одноосном растяжении колец (см. рис. 11), не согласуются с данными, которые были получены при трансверсальном растяжении кубиков (см. рис. 13) на 1,4 МПа. Это, очевидно, связано с тем, что в целых втулках присутствуют ТТН, которые снимаются в процессе вырезки образцов (см. рис. 11).

В процессе производства втулку нагревали (полимеризация) до температуры 180 °С и охлаждали до комнатной температуры, затем снимали с металлической оправки. Такой технологический цикл вызывает появление ТТН в кольце вследствие неоднородного распределения КТР по толщине (п. 2.5), что вызывает неравномерную температурную усадку. Используя упругие характеристики (п. 3.2) и распределение по толщине КТР, вычислили ради-

альные ТТН, образующиеся после отверждения и охлаждения во втулке подшипника. При охлаждении, когда температура достигает T_g , матрица втулки переходит из высокоэластического в стеклообразное состояние, которое сопровождается скачкообразным увеличением модуля упругости и снижением скорости протекания релаксационных процессов, возникают ТТН. Для эпоксидных полимеров на основе смолы ЭД 20 $T_g \approx 90^\circ\text{C}$ [30]. При моделировании возникновения ТТН в процессе охлаждения до комнатной температуры T_r ($T_r = 20^\circ\text{C}$) в расчёте задавали изменение температуры $\Delta T = T_r - T_g = -70^\circ\text{C}$. Результат численного моделирования в цилиндрической системе координат показан на рис. 20.

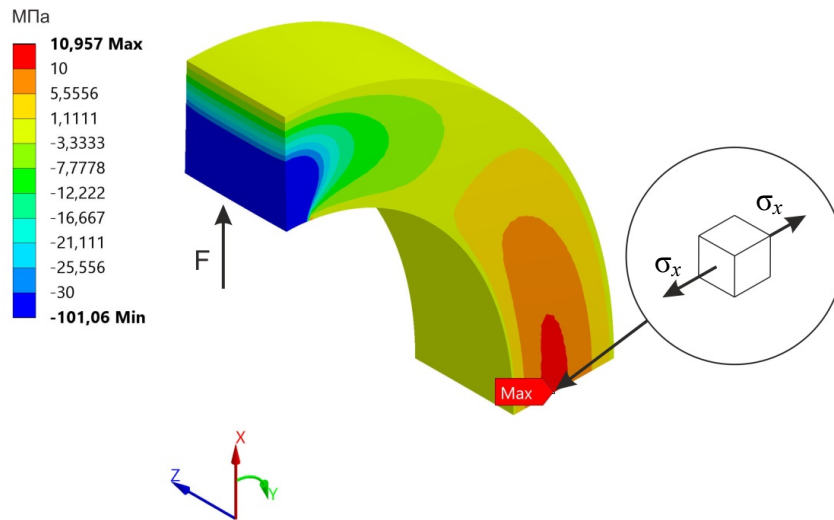


Рис. 19. Радиальные напряжения σ_x при растяжении кольца
 Fig. 19. Radial stresses σ_x when the ring is stretched

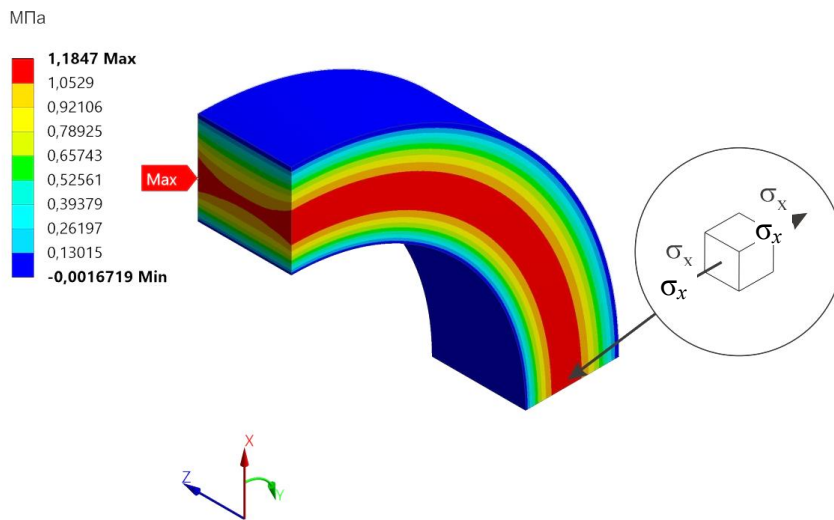


Рис. 20. Температурные технологические напряжения σ_x после охлаждения
 Fig. 20. Temperature technological stresses σ_x after cooling

Максимальное значение трансверсальных ТТН после охлаждения и снятия с оправки $\sigma_x = 1,2$ МПа. Это значение хорошо согласуется с отмеченным выше значением 1,4 МПа, что свидетельствует о достаточно высокой точности расчетов и экспериментов.

По результатам расчёта видно, что ТТН невелики, но могут заметно снизить прочность, если в процессе намотки будут реализована большая разность коэффициентов линейного расширения, чем в рассмотренных кольцах.

Заключение

На оптическом микроскопе была исследована структура толстостенного подшипника скольжения, полученного намоткой стеклоленты, пропитанной эпоксиэфенольной смолой, на стальную оправку. Экспериментальными и численными методами были найдены упругие, прочностные и теплофизические характеристики втулки из ПКМ.

Дилатометрические исследования показали, что КТР по толщине подшипника распределяется неравномерно, различия достигают 40 %, что можно объяснить различной кривизной и толщиной нитей в слое ткани. С использованием экспериментальных данных и мезоструктуры втулки подшипника, полученных на оптическом микроскопе, были разработаны модели: 1) пучка волокон, образующего нить, 2) ткани, состоящей из переплетения нитей основы и утка, и 3) композитной втулки с полярно анизотропными свойствами. Предложенный в данной работе многоуровневый подход позволил с единых позиций рассмотреть проблему возникновения ТТН в толстостенных, пористых, кольцевых элементах конструкции, полученных силовой намоткой тканевого препрега на жёсткую оправку. Основой предлагаемого подхода является детализированное численное моделирование на микро-, мезо- и макро-структурном уровнях. Результаты расчета напряженного состояния и оценки прочности композита в составе толстостенного кольца при макро моделировании диаметрального растяжения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Разработанные модели в дальнейшем могут быть использованы для определения упругих и теплофизических свойств тканевых композитов, прогнозирования незапланированного формоизменения (коробления) и оценки технологических остаточных напряжений в толстостенных втулках, полученных намоткой по иным режимам.

Исследование выполнено в Южно-Уральском государственном университете (национальном исследовательском университете) за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00327)

Библиографический список

1. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. – М.: Машгиз, 1963. – 244 с.
2. Зиновьев Е.В., Левин А.Л., Бородулин М.М. Полимеры в узлах трения машин и приборов: справ. – М.: Машиностроение, 1980. – 203 с.
3. Neale M.J. The Tribology handbook" (2nd ed.). – Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001 – 582 p.
4. Shokrieh M.M. Residual Stresses in Composite Materials, (1st edition). – Woodhead Publishing Ltd., 2013. – 408 p.
5. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures / M.R. Wisnom, M. Gigliotti, N. Ersoy, M. Campbell, K.D. Potter // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2006. – Vol. 37. – No. 4. – P. 522–529. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2005.05.019
6. Assessment of cure-residual strains through the thickness of carbon–epoxy laminates using FBGs. Part II: Technological specimen / M. Mullea, F. Collombeta, P. Oliviera, R. Zitouna,

C. Huchetteb, F. Laurinb, Y.H. Grunevaldc // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2009. – Vol. 40. – No. 10. – P. 1534–1544. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2008.10.008

7. Влияние натяжения и искривления армирующих волокон на прочность и деформативность стеклопластиков / под ред. Ю. М. Тарнопольского и В. В. Перова. – М.: ВИАМ, 1966. – 54 с.

8. Влияние технологических условий намотки на свойства полимерных композиционных материалов / Захарычев С.П. [и др.] // *Вестник ТОГУ. Технические науки*. – 2010. – № 1(16). – С. 55–64.

9. Analysis and control of the compaction force in the composite prepreg tape winding process for rocket motor nozzles / X. He, Y. Shi, C. Kang, T. Yu // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2016. – № 7. – С. 1–10. – DOI: dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.07.004

10. Jacob A. *Micromechanics of Composite Materials A Generalized Multiscale Analysis Approach* (1st Edition). – Elsevier Inc, 2012. – 1032 p.

11. Chen Z., Yang F., Meguid S.A. Multi-level modeling of woven glass/epoxy composite for multilayer printed circuit board applications // *International Journal of Solids and Structures*. – 2014. – Vol. 51. – No. 21–22. – P. 3679–3688. DOI:10.1016/J.IJSOLSTR.2014.06.030

12. McWilliams B., Dibelka J., Yen C.F. Multi scale modeling and characterization of in elastic deformation mechanisms in continuous fiber and 2D woven fabric reinforced metal matrix composites // *Materials Science & Engineering A*. – 2014. – Vol. 618. – P. 142–152. DOI:10.1016/J.MSEA.2014.08.063

13. Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites / B.A. Bednarczyk, B. Stier, J-W. Simon, S. Reese, E.J. Pineda // *Composite Structures*. – 2015. – Vol. 121. – P. 258–270. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.11.013

14. Computational geometrical and mechanical modeling of woven ceramic composites at the mesoscale / Fagiano C., Genet M., Baranger E., Ladevèze P. // *Composite Structures*. – 2014. – Vol. 112. – P. 146–156. DOI:10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.01.045

15. Ivanov D.S., Ivanov S.G., Lomov S.V., Verpoest I. Unit cell modelling of textile laminates with arbitrary inter-ply shifts // *Composites Science and Technology*. – 2011. – Vol. 72. – P. 14–20. DOI:10.1016/J.COMPSCITECH.2011.08.003

16. Hallal A., Younes R., Fardoun F. Review and comparative study of analytical modeling for the elastic properties of textile composites // *Composites Part B: Engineering*. – 2013. – Vol. 50. – P. 22–31. DOI:10.1016/j.compositesb.2013.01.024

17. Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.

18. Исследование влияния микроструктуры полимерных композиционных материалов на эксплуатационные свойства подшипников скольжения импульсных тепловых машин / А.И. Богомолов [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2014. – № 4 (32). – С. 158–176.

19. Аношкин А.Н. *Теория и технология намотки конструкций из полимерных композиционных материалов*. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2003. – 118 с.

20. Зиновьев Р.С., Сапожников С.Б., Безмельницын А.В. Оценка прочности и жесткости вкладышей подшипников скольжения из стеклопластика // *Композиты и наноструктуры*. – 2012. – № 3. – С. 10–18.

21. ASTM D2584-11 Standard test method for ignition loss of cured reinforced resin ASTM International (2011).

22. Любин Дж. *Справочник по композитным материалам: в 2 кн. Кн. 1*. – М.: Машиностроение, 1988. – 447 с.

23. Васильев В.В., Тарнопольский Ю.М. *Композиционные материалы: справочник*. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

24. Hiel C.C., Sumich M., Chappell D.P. A Curved Beam Test for Determination of Interlaminar Tensile Strength of a Laminated Composite // *J. Composite Materials*. – 1991. – Vol. 25. – P. 854–868.

25. Barbero E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 331 p.
26. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.
27. Thermal Residual Stresses in Single-sided Bonded Composite Patching / Z. Wang, J. Xiao, D. Jiang, J. Zeng, F. Yang // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2009 – Vol. 28. – No. 5. – P. 587–599. DOI: 10.1177/0731684407085416
28. Остаточные напряжения в полимерных композиционных материалах: учеб. пособие / В.П. Матвеевко [и др.]. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – 250 с.
29. Yu H., Heider D., Advani S. Prediction of effective through-thickness thermal conductivity of woven fabric reinforced composites with embedded particles // Composite Structures. – Vol. 127. – P. 132–140. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.015
30. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 231 с.

References

1. Chernavsky S.A. Podshipniki skol'zheniya [Sliding Bearings]. Moscow, Mashgiz, 1963, 244 p.
2. Zinov'ev E.V., Levin A.L., Borodulin M.M. Polimery v uzлах treniya mashin i priborov. Spravochnik [Polymers in joint of friction of machines and devices. Handbook]. Moscow, Engineering, 1980, 203 p.
3. Neale M.J. The Tribology handbook" (2nd ed.). Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001, 582 p.
4. Shokrieh M.M. Residual stresses in composite materials, 1st ed. Woodhead Publishing Ltd., 2013, 408 p.
5. Wisnom M.R., Gigliotti M., Ersoy N., Campbell M., Potter K.D. Mechanisms generating residual stresses and distortion during manufacture of polymer–matrix composite structures. Composites Part A. Applied Science and Manufacturing, 2006, vol. 37, no. 4, pp. 522–529. doi: 10.1016/j.compositesa.2005.05.019.
6. Mullea M., Collombeta F., Oliviera P., Zitouna R., Huchetteb C., Laurinb F., Grunevaldc Y.H. Assessment of cure-residual strains through the thickness of carbon–epoxy laminates using FBGs. Part II: Technological specimen. Composites Part A. Applied Science and Manufacturing, 2009, vol. 40, no. 10, pp. 1534–1544. DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2008.10.008.
7. Tarnopol'skij Y.M., Perov V.V. Vliyaniye natyazheniya i iskrivleniya armiruyushchih volokon na prochnost' i deformativnost' stekloplastikov [Influence of tension and curvature of the reinforcing fibers for strength and deformability of GRP]. Moscow, Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut aviatsionnykh materialov, 1966, 54 p.
8. Zakharychev S.P., Ivanov V.A., Otmahkov D.V., Avdeyev V.A., Manakov V.M. Vliyaniye tekhnologicheskikh uslovii namotki na svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov [Effect of technological conditions of winding on properties of polymeric composite materials]. Bulletin of PNU. Technical science, 2010, Vol. 1, no. 16. pp. 55–64.
9. He X., Shi Y., Kang C., Yu T. Analysis and control of the compaction force in the composite prepreg tape winding process for rocket motor nozzles. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, no.7, pp 1–10. doi: dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.07.004.
10. Jacob A. Micromechanics of composite materials a generalized multiscale analysis approach, 1st edition. Elsevier Inc, 2012, 1032 p.
11. Chen Z., Yang F., Meguid S.A. Multi-level modeling of woven glass/epoxy composite for multilayer printed circuit board applications. International Journal of Solids and Structures, 2014, vol. 51, no. 21–22, pp. 3679–3688. DOI: 10.1016/J.IJSOLSTR.2014.06.030
12. McWilliams B., Dibelka J., Yen C.F. Multi scale modeling and characterization of in elastic deformation mechanisms in continuous fiber and 2D woven fabric reinforced metal matrix composites. Materials Science & Engineering A, 2014, vol. 618, pp. 142–152. doi:10.1016/j.msea.2014.08.063.
13. Bednarczyk B.A., Stier B., Simon J-W., Reese S., Pineda E. J. Meso- and micro-scale modeling of damage in plain weave composites. Composite Structures, 2015, vol. 121, pp. 258–270. doi:10.1016/j.compstruct.2014.11.013.
14. Fagian C., Genet M., Baranger E., Ladevèze P. Computational geometrical and mechanical modeling of woven ceramic composites at the mesoscale. Composite Structures, 2014, vol. 112, pp. 146–156. DOI: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.01.045

15. Ivanov D.S., Ivanov S.G., Lomov S.V., Verpoest I., Unit cell modelling of textile laminates with arbitrary interply shifts. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 72, pp. 14-20. DOI:10.1016/J.COMPSCITECH.2011.08.003
16. Hallal A., Younes R., Fardoun F. Review and comparative study of analytical modeling for the elastic properties of textile composites. *Composites Part B: Engineering*, 2013, Vol. 50, pp. 22-31. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.01.024
17. Komkov M.A., Tarasov V.A. Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruksiy raket i sredstv porazheniya [Winding Technique of Composite Construction of Missiles and Weapons]. *Moskva, Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universitetaim. N.E. Baumana*, 2011, 431 p.
18. Bogomolov A.I., Goloshchapov V.M., Savitskiy V.Y., Muzyemnek A.Y., Zinov'ev R.S. Issledovanie vliianiia mikrostruktury polimernykh kompozitsionnykh materialov na ekspluatatsionnye svoistva podshipnikov skol'zheniia impul'snykh teplovykh mashin [Study of polymer composite materials' microstructure influence on operating abilities of journal bearings in pulse heat engine]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskii nauki*, 2014, vol. 32, no.4, pp. 158-176.
19. Anoshkin A.N. Teoriya i tekhnologiya namotki konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Theory and technology of winding designs from polymeric composite materials]. *Perm, Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet*, 2003, 118 p.
20. Zinoviev R.S., Sapozhnikov S.B., Bezmelnitsyn A.V. Otsenka prochnosti i zhestkosti vkladyshei podshipnikov skol'zheniia iz stekloplastika [Evaluation of strength and stiffness of journal bearing's GFRP bushings]. *Composites and nanostructures*, 2012, no.3, pp. 10-18.
21. ASTM D2584-11 Standard test method for ignition loss of cured reinforced resin ASTM International (2011)
22. Lyubin Dj. Spravochnik po kompozitnym materialam v dvuh knigah, kniga 1. [Handbook of composite materials in two books, Book 1]. *Moscow, Mashinostroenie*, 1988, 447 p.
23. Vasil'ev V.V., Tarnopol'skiy Y.M. Kompozitsionnye materialy: Spravochnik [Composite Materials: A Handbook]. *Moscow, Mashinostroenie*, 1990, 512 p.
24. Hiel C.C., Sumich M., Chappell D.P. A Curved beam test for determination of interlaminar tensile strength of a laminated composite. *J. Composite Materials*, 1991, vol. 25, pp. 854-868.
25. Barbero E.J. Finite Element Analysis of Composite Materials. *CRC Press, Taylor & Francis Group*, 2008, 331 p.
26. Tarnopolsky Yu.M., Kincis T.Ya. Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Static testing methods of reinforced plastics]. *Moscow, Khimiia*, 1981, 272 p.
27. Wang Z., Xiao J., Jiang D., Zeng J., Yang F. Thermal Residual Stresses in Single-sided Bonded Composite Patching. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, vol. 28, no. 05, pp. 587-599. DOI: 10.1177/0731684407085416
28. Matveenko V.P. et al. Ostatochnye napryazheniya v polimernykh kompozitsionnykh materialah: uchebnoe posobie [Residual stresses in polymer composite materials: tutorial]. *Perm, Izdatel'stvo Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, 2016, 250 p.
29. Chernin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Yu.V. Epoksidnye polimery i kompozicii [Epoxy polymers and compositions]. *Moscow, Khimiia*, 1982, 231 p.
30. Yu H., Heider D., Advani S. Prediction of effective through-thickness thermal conductivity of woven fabric reinforced composites with embedded particles. *Composite Structures*, vol. 127, pp. 132-140. DOI: dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.015