

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-61-70>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМООБРАЗУЮЩЕГО ПОВЕДЕНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОФОРМОВАНИЯ

© Руслан Ильдарович Соловьев¹, Артем Ришатович Сафин¹,
Динар Ансарович Балькаев^{1,2*}, Владимир Владимирович Батраков¹,
Лилия Миниахмедовна Амирова¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева — КАИ, Россия, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10.

² Казанский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18;

*e-mail: dinar.balkaev@yandex.ru

*Статья поступила 17 октября 2022 г. Поступила после доработки 22 декабря 2022 г.
Принята к публикации 28 февраля 2023 г.*

Формообразование композиционных консолидированных пластин в изделия — процесс комплексный. Для получения бездефектных изделий необходимо учитывать, что армированные тканями термопласты практически не растягиваются, а их формообразующее поведение определяется механизмами сдвиговых деформаций внутри слоя и между слоями, процессами скольжения композита по поверхности оснастки и изгибной жесткостью консолидированных пластин. В связи со сложным поведением материала при деформировании оптимизировать процесс термоформования методом проб и ошибок достаточно дорого, поэтому рационально его заменить предварительным моделированием. Присутствующие на рынке программные пакеты, специализирующиеся на моделировании процесса термоформования, для создания корректной модели материала требуют введения таких входных параметров, как драпируемость консолидированной пластины, т.е. способность композита, армированного тканями, принимать пространственную форму, ее изгибная жесткость, коэффициент трения между слоями и оснасткой. Однако до настоящего времени стандарты на их измерение отсутствуют, что значительно сдерживает процесс моделирования термоформования изделий из консолидированных пластин на основе термопластичных связующих. В работе приведены данные экспериментального определения некоторых физико-механических свойств углепластика на основе полипропилена PP01030. Эксперименты включали испытания на растяжение-смещение образца, тесты подвижной рамкой, позволяющие оценить сдвиговое поведение термопластичных композиционных материалов, а также испытания по определению межслоевого трения и трения композита с оснасткой. Испытания проводили при температуре плавления матрицы с использованием специализированных оснасток, изготовленных с учетом опыта физико-механических испытаний термопластичных композиционных материалов зарубежных исследователей. Предложена методика определения изгибной жесткости термопластичных углепластиков. Представленные оснастки не требуют прикладывания сложного усилия, их работа осуществляется путем использования стандартных зажимов на растяжение испытательной машины. Данные, полученные в процессе испытаний, могут быть использованы при виртуальном моделировании термоформования консолидированных композиционных пластин.

Ключевые слова: физико-механические свойства; сдвиговые деформации; изгиб; трение; полипропилен; углепластик.

DETERMINATION OF THE SHAPING BEHAVIOR OF THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS REQUIRED FOR SIMULATION OF THERMOFORMING

© Ruslan I. Solovyov¹, Artem R. Safin¹, Dinar A. Balkaev^{1,2*},
Vladimir V. Batrakov¹, Liliya M. Amirova¹

¹ A. N. Tupolev Kazan National Research Technical University — KAI, 10, ul. K. Marksa, Kazan, 420111, Russia.

² Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya ul., Kazan, 420008, Russia; *e-mail: dinar.balkaev@yandex.ru

Received October 17, 2022. Revised December 22, 2022. Accepted February 28, 2023.

The shaping of composite consolidated plates into products is a complex process. To obtain a defect-free product, we have to bear in mind that thermoplastics reinforced with a fabric practically do not stretch, and their shaping behavior is determined by the mechanisms of shear deformations within a layer or between layers, by the processes of sliding a composite over the surface of tooling and by the flexural rigidity of the consolidated plates. Due to the complex behavior of the material during deformation, the optimization of the thermoforming process by trial and error is rather expensive in implementation and can be successfully replaced by a preliminary simulation. The available software packages intended for modeling the thermoforming process which provide construction of a correct model of the material consistent with the reality, require the introduction of input parameters for the drape of the consolidated plate, its flexural stiffness, the coefficient of friction between layers and with tooling. However, until now there are no standards for their measurement, which significantly hinders the process of modeling the thermoforming of products from consolidated plates based on thermoplastic binders. We present experimental data on the determination of some physical and mechanical properties of carbon fiber reinforced plastics based on polypropylene PP01030, including tensile-displacement tests of the sample, tests with a moving frame that provide evaluating the shear behavior of thermoplastic composite materials, as well as tests for determining the interlayer friction and friction of a composite with tooling. The tests were carried out at the melting temperature of the matrix using specialized tooling, made taking into account the experience of foreign research groups in physical and mechanical testing of thermoplastic composite materials. A method for determining the flexural rigidity of thermoplastic carbon fiber reinforced plastics is proposed. The presented tooling does not require the application of a complex force, and needs only standard tensile test clamps of the testing machine. The data obtained from the physicomaterial tests can be used in virtual modeling of the thermoforming process of consolidated composite plates.

Keywords: physical and mechanical properties; shear deformations; bending; friction; polypropylene; carbon fiber.

Введение

Композитные материалы находят широкое применение в космической и авиационной промышленности из-за их высокой удельной жесткости и небольшого веса [1, 2], однако в других областях промышленности их используют меньше, что связано с высокой стоимостью изготовления и небольшим объемом производственного процесса [3]. В последние годы наблюдается повышенный интерес к производству изделий из термопластичных материалов, технология изготовления которых предполагает высокую производительность и низкую себестоимость. Полученные термопласты отличаются ударопрочностью, ремонтпригодностью и возможностью вторичной переработки, что обеспечивает их конкурентоспособность по сравнению с композитами с термореактивными матрицами [4]. Полипропилен может служить в качестве модельной матрицы таких материалов, поскольку имеет низкую стоимость и высокую доступность, а результаты экспериментов с ним могут быть перенесены на более высокотемпературные полимеры.

К композитам на основе термопластичных полимеров наиболее часто применяют технологию термоформования, заготовкой в которой является предварительно консолидированная пластина [5, 6]. Главные преимущества данной технологии — простота оборудования, малая стоимость и короткое время цикла — порядка одной минуты [7]. Для придания формы ламинат нагревают выше температуры плавления термопласта, а затем прикладывают усилие при помощи пресса [8]. При термоформовании термо-

пластов, армированных тканями, следует учитывать, что они практически не растягиваются, а их формообразующее поведение определяется механизмами сдвиговых деформаций внутри слоя и между слоями, в ходе которых возможно перемещение одного слоя вдоль поверхности другого [9]. Помимо сдвиговых деформаций, на формообразование влияют процессы скольжения композита по поверхности оснастки, а также изгибная жесткость консолидированной пластины, так как именно это свойство характеризует способность полимерного композиционного материала образовывать складки [10].

Более высокое качество поверхности можно получить, применяя материалы с низкой изгибной жесткостью, так как в таком случае не будет наблюдаться приподнимания слоев материала при формовании поверхности с малым радиусом изгиба [11].

Необходимость учета многих технологических параметров, а также комплекса деформационного поведения самого материала обуславливают сложность оптимизации процесса термоформования методом проб и ошибок. Этот процесс можно заменить предварительным моделированием [4]. Развитие компьютерных технологий, прежде всего компьютерного моделирования процессов формования изделий, способствует снижению затрат на производство и ускорению процесса разработки. Для проведения расчетов с использованием доступных программных пакетов, например ESI PAM-FORM, необходимы такие входные параметры, как драпируемость (способность полотна деформироваться в подве-

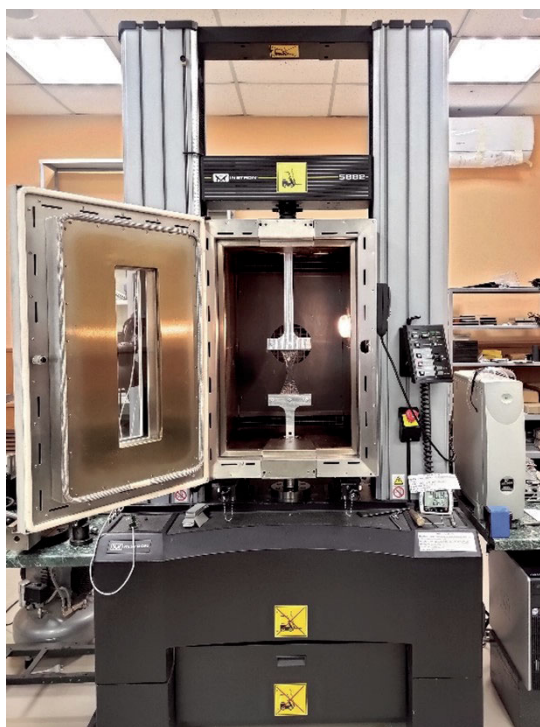


Рис. 1. Машина Instron 5882 с термोकриокамерой

Fig. 1. An Instron 5882 with a thermal cryochamber

шенном состоянии с образованием ниспадающих волн/складок) консолидированной пластины, ее изгибная жесткость, коэффициент трения между слоями и с оснасткой. Однако до настоящего времени стандарты на их измерение отсутствуют, что значительно сдерживает процесс моделирования термоформования изделий из консолидированных пластин на основе термопластичных связующих.

Исходя из вышесказанного, цель данной работы заключалась в проведении ряда физико-механических испытаний термопластичных ламинатов для получения входных параметров материала, необходимых для моделирования термоформования изделий с использованием коммерческого программного пакета ESI PAM-FORM.

Экспериментальная часть

Оборудование. Для испытаний использовали установку, состоящую из универсальной электро-механической машины Instron 5882 с термोकриокамерой (рис. 1), позволяющей нагревать образцы до температуры плавления полипропилена PP01030, и оснасток различной конфигурации, последовательно устанавливаемых в зажимы испытательной машины.

Тест рамкой (Picture Frame Test) проводили с использованием оснастки, представленной на рис. 2. Оснастка состоит из четырех плеч, имеющих пазы, в которые устанавливают прижим-



Рис. 2. Оснастка для проведения теста рамкой

Fig. 2. Tooling for movable frame tests

ные пластины при помощи болтовых соединений. Движение плеч осуществляется растягивающим усилием испытательной машины.

Тест на растяжение-смещение образца является альтернативой тесту рамкой, однако реализуется при помощи простых зажимных пластин испытательной машины (рис. 3).

Испытания на трение проводили с использованием оснастки (рис. 4), состоящей из неподвижной части в виде рамы. Образец устанавливали в оснастку при помощи прижимной пластины, которую зажимали болтовым соединением. Подвижная часть оснастки представляет собой простую зажимную пластину испытательной машины, используемую также в тесте на растяжение-смещение. Подвижную часть оснастки вырывали путем прикладывания растягивающего усилия испытательной машины в областях захвата. Для учета изменения модуля упругости материала, а также его вязкостных характеристик на болтах предусмотрены пружины.

Была также изготовлена оснастка для определения модуля упругости при изгибе при помощи консольного теста Пирса (рис. 5). Она состоит из горизонтальной платформы, подвижной тележки, которая приводит в движение образец, поворотного плеча, а также толкателя.

Методика исследований

Испытания термопластичных композиционных ламинатов проводили при температурах,



Рис. 3. Оснастка для проведения испытаний на растяжение-смещение

Fig. 3. Tooling for tensile-displacement tests

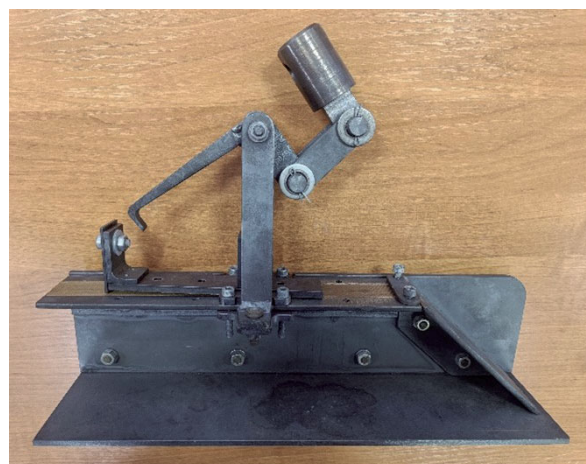


Рис. 5. Оснастка для проведения испытаний на изгиб

Fig. 5. Tooling for bending tests

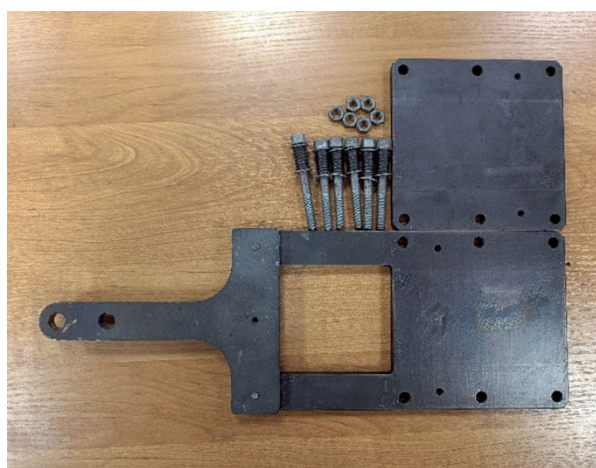


Рис. 4. Оснастка для проведения испытаний на трение

Fig. 4. Tooling for friction tests

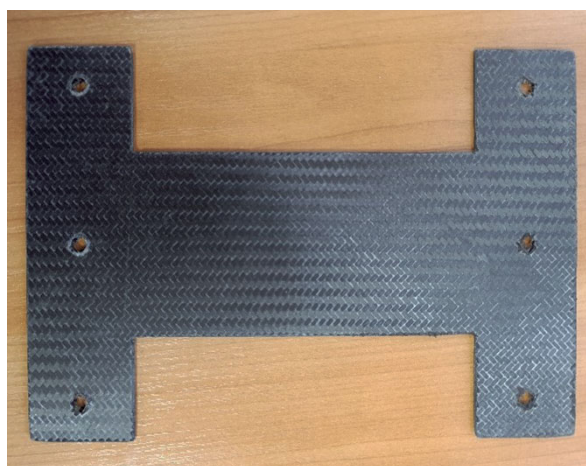


Рис. 6. Конфигурация Т-образца

Fig. 6. T-sample configuration

необходимых для плавления термопластичной матрицы. Для оценки результатов необходимо проведение испытаний при нескольких температурах. Испытания следует проводить при поддержании постоянной температуры по всему образцу [12, 13].

Дополнительное обязательное требование — соблюдение граничных условий испытаний, реализуемое при помощи специальной конфигурации зажимов, используемых для закрепления образца в оснастке. Следует брать во внимание, что испытания термопластичных композиционных материалов неразрывно связаны с нагревом матрицы выше температуры плавления, поэтому в местах контакта композита с оснасткой для испытаний возможно возникновение различных эффектов, таких как прилипание, окисление поверхности оснастки и адгезия, которые необходимо учитывать.

Тест на растяжение-смещение проводили с предварительным нагревом в термо-криокамере до достижения температуры испытания, соответ-

ствующей для трех образцов 170, 180 и 190 °С. Размеры образцов составили 70 × 210 × 2 мм, ширина в области захвата — 150 мм, что соответствует ширине самого захвата (рис. 6).

В отличие от прямоугольной геометрии [14], которая не сохраняет волокна на границах целыми, конфигурация Т-образца имеет два основных преимущества: она увеличивает поверхность зажима на образце; уменьшает краевые деформации, препятствующие получению картины чистого сдвига, поскольку волокна остаются целыми по краям образца.

Образец фиксируют в оснастке при помощи пластин, которые прижимают с помощью болтового соединения (рис. 7). Такая фиксация образца позволяет минимизировать деформацию волокна в областях зажимов, обеспечивая при этом большую поверхность сцепления. Благодаря этому образец в ходе испытания не проскальзывает



Рис. 7. Т-образец в захватах

Fig. 7. T-sample in grips

и уменьшается влияние на результаты испытаний краевых эффектов [15, 16].

Испытание на растяжение-смещение проводят на образцах, в которых волокна в направлениях основы (продольные) и утка (поперечные) изначально ориентированы под углом $\pm 45^\circ$ от направления нагрузки [14, 17]. Если первоначальные направления волокон ориентированы не точно, может возникать скручивание образца. Предварительный сдвиг образца перед началом испытания на растяжение-смещение является одним из источников ошибок. Например, погрешность перед сдвигом менее $\sim 0,5^\circ$ и стандартное отклонение начального угла перед сдвигом менее $\sim 2^\circ$ дают данные с высокой повторяемостью [15]. Угол появления морщин и последующее развитие морщин в тесте растяжения смещения зависят от механических свойств формируемой ткани и размера испытываемого образца; более крупные образцы имеют тенденцию к складыванию при меньших углах сдвига, а амплитуда складок становится более значительной [18]. Данные испытания могут быть модернизированы в целях уменьшения складок при помощи добавления передней и задней пластин [19]. Тем не менее необходимо измерять угол появления морщин и регистрировать осевое усилие и сравнивать их с данными измерений на ранних стадиях испытания, без влияния возможного трения с пластинами, т.е. проводить тесты растяжения-смещения без пластин.



Рис. 8. Конструкция специализированной испытательной оснастки с образцом для проведения испытания теста рамкой

Fig. 8. A specialized test fixture with a sample for testing with a movable frame

Тест рамкой образца линейными размерами $308 \times 308 \times 2$ мм осуществляют предварительным нагревом в термокриокамере до достижения температуры испытания, соответствующей для трех образцов 170, 180 и 190°C .

Конструкция изготовленной оснастки позволяет проводить испытания консолидированных пластин, образцы из которых имеют крестообразную геометрию (рис. 8). Образец фиксируют в раме при помощи зажимных болтовых соединений, позволяющих минимизировать влияние закрепления. Когда образец правильно выровнен и плотно зажат в раме, прикладывают растягивающее усилие машины, расстояние между двумя противоположными углами увеличивается. В результате в образце возникают сдвиговые напряжения и происходит переориентация волокон — индуцируется деформация сдвига.

Чтобы уменьшить вероятность образования складок в области захватов, авторы [20, 21] удалили из образца большую часть поперечных нитей. Однако нить нельзя сжать в продольном направлении, несовпадение укажет на то, что нить выходит из исходной плоскости, а образование складок в ткани будет наблюдаться при меньших углах сдвига, чем при правильном выравнивании образца в раме. Таким образом, лучших результатов удастся достичь правильным выравниванием образца в раме.

Тесты межслоевого трения и трения с оснасткой проводили с предварительным нагревом в термокриокамере до достижения температуры

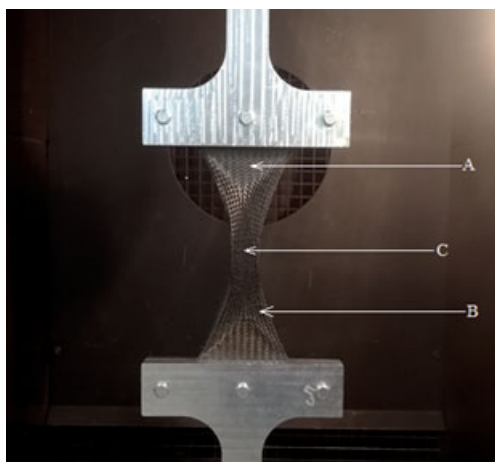


Рис. 9. Зоны деформаций на образце после испытания

Fig. 9. Deformation zones on the specimen after testing

испытания, соответствующей для двух образцов 170 и 180 °С. Образцы прямоугольной формы устанавливали в оснастку плоскопараллельно, поверхности прижимали затягиванием болтовых соединений, при помощи которых приводилась в движение зажимная пластина.

Движение подвижного образца относительно неподвижного происходит путем прикладывания растягивающего усилия на зажимы испытательной машины.

При нагреве образцов выше температуры плавления матрицы между ними происходит сцепление, имитирующее сцепление между слоями материала, которое может быть вызвано альтернативными испытаниями на вырывание слоя [22].

Данный метод упрощает изготовление образцов, поскольку для проведения испытания на вырывание слоя необходимы образцы сложной конфигурации, требуется бездефектное частичное разделение пластины на три части определенной толщины.

Испытания на трение с поверхностью оснастки исключают второй образец — подвижный композитный образец при испытании перемещается по поверхности алюминиевой пластины.

Испытания на изгиб термопластичных композиционных материалов проводили методом консольного теста Пирса. Суть его заключается в том, что прямоугольную полосу ткани на горизонтальной платформе медленно перемещают вперед до тех пор, пока она не свесится по горизонтали с конца платформы и не коснется кончиком плоскости, расположенной под углом к горизонтали. Затем измеряют длину кантилевера (консоли), которую используют для определения жесткости на изгиб на основе теории линейной упругой балки [23]. При испытании следует поддерживать равномерную температуру

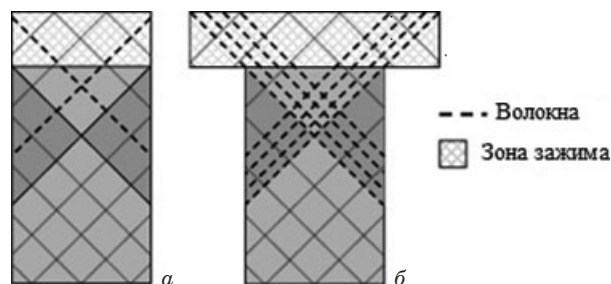


Рис. 10. Принципиальная схема испытаний образцов стандартной геометрии (а) и Т-геометрии (б)

Fig. 10. Schematic diagram for testing specimens with standard geometry (a) and T-geometry (b)

образца, поскольку неравномерный нагрев может привести к его прилипанию к горизонтальной плоскости.

Обсуждение результатов

Определение сдвигового поведения. При испытании на растяжение-смещение влияние зажимных пластин, расположенных на каждом конце образца (рис. 9), выражается тем, что зона А остается недеформированной во время испытания. Зона С находится в режиме чистого сдвига, в то время как в зоне В угол между волокнами соответствует половине суммы общих углов в зонах А (90°) и С (2θ).

Т-геометрия образца позволяет получить четко различимые зоны растяжения и сдвига, что практически невозможно при использовании простой прямоугольной геометрии образцов. Данное утверждение подтверждает ряд исследователей, которые использовали обе конфигурации образцов [17, 24, 25]. Исследование авторов работы [15] показало, что большая часть разброса данных при испытаниях на растяжение-смещение вызвана не внутренними вариациями материала, а несовершенной подготовкой образца. Для успешного протекания сдвиговых деформаций необходимо соблюдение граничных условий на концах образца, что невозможно с использованием простой прямоугольной геометрии (рис. 10).

Результаты испытаний: максимальная нагрузка 0,376 кН наступает при температуре 170 °С, максимальное напряжение при растяжении — 3,903 МПа. Результаты при 180 и 190 °С отличаются несильно по удлинению, однако повышение температуры с шагом в 10° приводит к уменьшению напряжений в 1,5 и 1,9 раза для ступеней 170 – 180 °С и 180 – 190 °С соответственно (рис. 11, табл. 1).

Главным преимуществом теста на растяжение-смещение является то, что деформация сдвига может быть вызвана простыми зажимами на

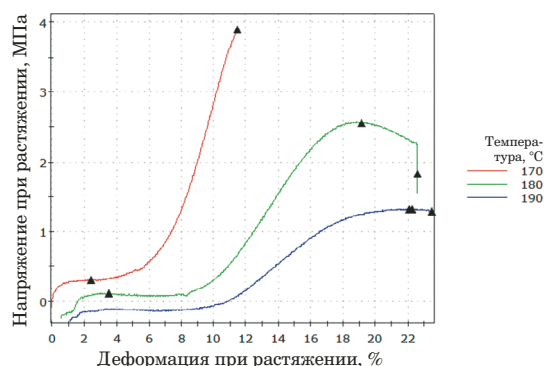


Рис. 11. Зависимости напряжения от деформации при испытании образцов на растяжение-сдвиг

Fig. 11. Stress-strain curve for tensile-displacement tests of specimens

растяжение, однако наличие трех сдвиговых зон усложняет анализ данных, полученных в ходе испытания. К тому же этот тест очень чувствителен к эффектам кромки, перекоса и силы зажатия [26].

При проведении теста рамкой консолидированных пластин необходимо учитывать опыт использования подобных оснасток, поскольку данные испытания изначально применялись для анализа тканей, которые в отличие от пластин не обладают высокой жесткостью. В работах [27, 28] подробно описаны испытания с помощью рам различной длины, отличающиеся конструкцией зажимов, конфигурацией образцов, соотношением длин ткани и рамы, типом частей рычага для переплетения нитей. Исследования показали, что характеристика сдвига в плоскости имеет низкую повторяемость, что препятствует подаче правильных исходных данных материала в модель материала. Авторы [20, 21] для уменьшения вероятности образования складок в области захватов удаляли из образца большую часть поперечных нитей. Ряду исследователей удалось получить конструкцию, исключающую при больших углах сдвига образование складок в областях плеч и интересующей области. Авторы работы [29] отмечают, что вязкоупругая природа термопластичного полимерного компонента обуславливает существенную зависимость поведения

Таблица 1. Результаты испытаний на растяжение-сдвиг

Table 1. Results of tensile-displacement tests

$T, ^\circ\text{C}$	Максимальная нагрузка, кН	Напряжение, МПа	Удлинение, мм
170	0,376	3,903	28,606
180	0,249	2,579	55,113
190	0,128	1,326	55,939

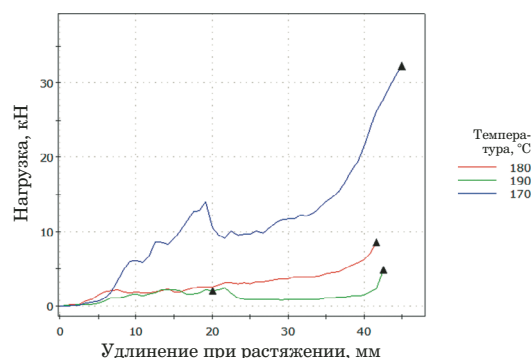


Рис. 12. Зависимости нагрузки от удлинения образцов при тесте рамкой

Fig. 12. Load/elongation dependence for specimens tested with a movable frame

полного сдвига от скорости деформации и температуры.

Результаты испытаний теста рамкой при 170, 180 и 190 °C представлены на рис. 12 и в табл. 2. Максимальная нагрузка (32,316 кН) наступает при температуре 170 °C, максимальное напряжение при растяжении — 2934,483 МПа.

Оптимальная температура термоформования — 180 °C; при ней напряжение при растяжении уменьшается в 3,7 раза по сравнению с 170 °C. При нагреве до 190 °C напряжение уменьшается в 1,7 раза по сравнению с 180 °C. Кроме того, температура 190 °C может вызвать сильное провисание ламината при его нагревании в процессе термоформования. Данные результаты хорошо согласуются с тестом на растяжение-сдвиг; индуцированная деформация является чисто ромбической, что может упростить анализ данных. Однако для проведения испытания необходимо изготовление специализированной оснастки.

В работе [24] приведен сравнительный анализ тестов решетчатой рамкой и растяжением-сдвигом. По результатам исследования трех идентичных тканых материалов, полученных семью международными исследовательскими институтами, установлено, что при нормализации оба метода хорошо согласуются друг с другом. Данные этих испытаний могут быть использованы для продвижения работы по эталонному

Таблица 2. Результаты теста рамкой

Table 2. Results of movable frame tests

$T, ^\circ\text{C}$	Максимальная нагрузка, кН	Напряжение, МПа	Удлинение, мм
170 °C	32,316	2 934,483	44,990
180 °C	8,585	779,578	42,490
190 °C	4,873	442,520	41,657

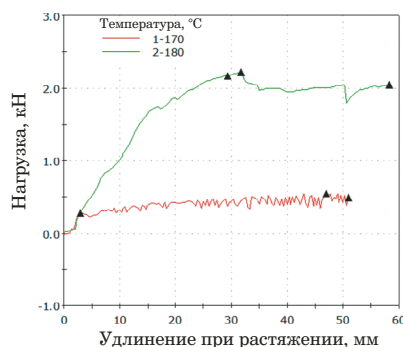


Рис. 13. Зависимости нагрузки от удлинения при испытании образцов на межслоевое трение

Fig. 13. Load/elongation dependence for specimens tested for interlayer friction

тестированию при моделировании термоформования.

Межслоевое трение и трение с оснасткой. При термоформовании композитных ламинатов необходимо учитывать, что формование листа в криволинейную форму происходит не только за счет сдвиговых деформаций, но и из-за скользящего контакта заготовки и оснастки, определяемых коэффициентом трения. Трение может оказывать решающее влияние на геометрию получаемого изделия из термопластичных композитов при формовании. Для моделирования формования очень важно точное описание параметров, регулирующих контактные взаимодействия между слоями ткани, заготовкой и формой, так как сила между слоями формируется за счет скользящего контакта. Эти параметры и являются основными факторами, влияющими на возникновение большинства морщин во время обработки.

Результаты испытания на межслоевое трение приведены на рис. 13. При перерасчете исходных данных получаем, что при температуре 170 °C коэффициент трения составляет 0,28, а при температуре 180 °C — 0,51. Разница в коэффициентах трения для двух образцов обусловлена тем, что нагрев до 170 °C оказался недостаточным для того, чтобы произошло прилипание слоев, в связи с чем коэффициент трения 0,28 не может быть достоверным. При температуре 180 °C коэффициент трения повышается почти в два раза, что является более показательным результатом и позволяет судить о сопротивлении движению слоев заготовки при термоформовании.

Зависимости для двух образцов (см. рис. 13) сильно отличаются по причине того, что при температуре 170 °C образец не испытал сильного сопротивления между слоями и свободно проскользнул, а при температуре 180 °C произошло слипание слоев, что привело к увеличению нагрузки.

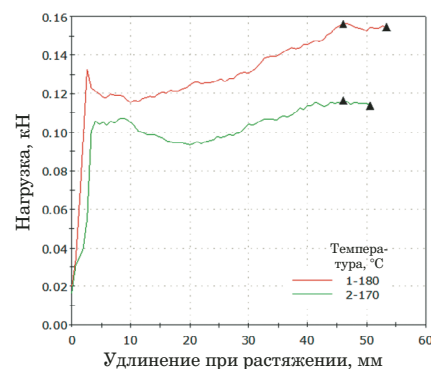


Рис. 14. Зависимости нагрузки от удлинения при испытании образцов на трение в оснастке

Fig. 14. Load/elongation dependence for specimens tested for friction in the tooling

Авторы [30] провели сравнение различных установок для испытания на трение с оснасткой термопластичных композитов при температурах окружающей среды и выше точки плавления полимера. Установили, что результаты измерения трения улучшаются при наличии определенных проектных характеристик установки. Влияние краевых эффектов уменьшается при использовании образцов с большой площадью поверхности, скошенными краями или при протягивании металлической фольги вместо композитного материала. Чтобы усилить реакцию в начальный момент времени, необходимо ограничить растяжение ткани, например, жестко прикрепив ее к поверхности и используя стальную фольгу в качестве внутреннего образца, который удаляют. Влияние давления и температуры в проведении испытания велико, потому следует обратить внимание на их равномерное распределение.

Испытание на трение в оснастке проводили аналогично испытанию на межслоевое трение, однако роль неподвижной поверхности в данном случае выполняла стальная пластина. Результаты испытания на трение с оснасткой приведены на рис. 14. Полученные данные позволяют рассчитать коэффициент трения с оснасткой. Так, при температуре 170 °C коэффициент трения составил 0,04, а при температуре 180 °C — 0,08. Видно, что, как и в случае испытания на межслоевое трение, коэффициент трения при 180 °C в два раза больше, чем при 170 °C. Это свидетельствует о том, что повышение температуры ведет к увеличению коэффициента трения с оснасткой и необходимости его прогнозирования при дальнейшем повышении температуры.

Результаты испытаний образцов на трение с оснасткой показали, что при повышении температуры растет сопротивление материала с оснасткой, что в свою очередь может плохо сказаться на качестве изделия, полученного термоформова-

нием, а также привести к возникновению деформаций в детали.

Важным параметром термопластичных композиционных материалов, определяющим их складкообразование и формуемость при формировании сложных поверхностей, является изгибная жесткость. Так, модуль упругости при изгибе измеряют [31] консольным тестом, выполненным в климатической камере.

В ходе проведения данной работы также была рассмотрена возможность определения изгибной жесткости консолидированных пластин при помощи консольного теста Пирса.

Однако необходимо учитывать, что подобные испытания проводятся при температуре плавления полимера, а это усложняет процесс движения образца, возможны прилипание образца к движущейся части оснастки и нарушение геометрии, его расслаивание при движении по поверхности оснастки, вызванное действием сил трения. Ввиду невозможности полного исключения указанных факторов, особенно при высоких температурах, для уменьшения трения были предложены следующие варианты: нанесение на поверхность оснастки пяти слоев антиадгезионного состава Loctite Frecote с интервалом 5 мин, графитовой смазки, фторопласта. Ни одним из указанных способов не удалось решить проблему прилипания образца к подвижной части оснастки, в связи с чем модернизировали ее конструкцию — сократили длину подвижной части оснастки. Расслоение образца предложили уменьшить, обмотав торец образца фторопластовой пленкой или приклеив к торцу образца кусок металла высокотемпературным клеем. От второго способа отказались ввиду низкой надежности клеевого соединения при повышенных температурах. В результате наиболее хорошо себя показала методика определения модуля упругости при изгибе, в которой использовали оснастку с укороченной подвижной частью и нанесенным слоем фторопластовой ленты, смазанной графитовой крошкой, и образец, конец которого обернут фторопластовой пленкой.

Заключение

Предложенные методики определения сдвигового поведения и скользящего контакта термопластичных ламинатов могут быть использованы для определения ряда физико-механических свойств термопластичных композиционных материалов. Найденные свойства, в свою очередь, можно применить в качестве входных параметров материала, необходимых для моделирования термоформования.

Тесты на растяжение-смещение Т-образца и тесты рамкой дали схожие результаты, однако

использование теста рамкой предпочтительнее при наличии материальной базы для изготовления необходимой оснастки. В случае теста рамкой большая площадь образца уменьшает влияние его мелкомасштабных дефектов. Тест на растяжение-смещение требует значительного анализа полученных данных ввиду наличия различных сдвиговых зон.

Испытания на трение, а также испытания по определению изгибной жесткости требуют дальнейшей работы по минимизации множества действующих факторов, таких как прилипание расплава термопласта к поверхности, осуществление равномерного поджатия образцов и т.д.

Задача определения физико-механических свойств термопластичных ламинатов является комплексной и требует дальнейших усилий по продвижению стандартных систем тестирования.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. **Bhattacharyya D., Bowis M., Jayaraman K.** Thermoforming woodfibre-polypropylene composite sheets / *Composites science and technology*. 2003. Vol. 63. N 3 – 4. P. 353 – 365. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00214-2
2. **Dörr D., Gergely R., Ivanov S., et al.** On the applicability of thermoforming characterization and simulation approaches to glass mat thermoplastic composites / *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 47. P. 118 – 125. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.04.148
3. **Schlothauer A., Schwob N., Pappas G. A., Ermanni P.** Thin-Ply Thermoplastic Composites for Foldable Structures / *Book Thin-Ply Thermoplastic Composites for Foldable Structures* / Editor. 2020. DOI: 10.2514/6.2020-0206
4. **Xiong H., Hamila N., Boisse P.** Consolidation modeling during thermoforming of thermoplastic composite prepregs / *Materials*. 2019. Vol. 12. N 18. P. 2853. DOI: 10.3390/ma12182853
5. **Scherer R., Friedrich K.** Inter- and intraply-slip flow processes during thermoforming of CF/PP-laminates / *Composites Manufacturing*. 1991. Vol. 2. N 2. P. 92 – 96. DOI: 10.1016/0956-7143(91)90185-J
6. **Sadighi M., Rabizadeh E., Kermansaravi F.** Effects of laminate sequencing on thermoforming of thermoplastic matrix composites / *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. Vol. 201. N 1 – 3. P. 725 – 730. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.239
7. **Wang P., Hamila N., Boisse P.** Thermoforming simulation of multilayer composites with continuous fibres and thermoplastic matrix / *Composites Part B: Engineering*. 2013. Vol. 52. P. 127 – 136. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.03.045
8. **Akkerman R., Haanappel S.** Thermoplastic composites manufacturing by thermoforming / *Advances in Composites Manufacturing and Process.* — Design Elsevier, 2015. P. 111 – 129. DOI: 10.1016/B978-1-78242-307-2.00006-3
9. **Friedrich K., Hou M.** On stamp forming of curved and flexible geometry components from continuous glass fiber/polypropylene composites / *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1998. Vol. 29. N 3. P. 217 – 226. DOI: 10.1016/S1359-835X(97)00087-0
10. **Ropers S.** Bending behavior of thermoplastic composite sheets. — Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-658-17594-8
11. **Cartwright B., De Luca P., Wang J., et al.** Some proposed experimental tests for use in finite element simulation of composite forming / *Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials (ICCM-12)*, Paris, France. 1999. P. 5 – 9.
12. **Machado M., Murenu L., Fischlschweiger M., Major Z.** Analysis of the thermomechanical shear behaviour of woven-reinforced thermoplastic-matrix composites during forming /

- Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2016. Vol. 86. P. 39 – 48. DOI: 10.1016/j.compositesa.2016.03.032
13. **Mostovoy G. E., Karpov A. P.** Features of Mechanical Testing of Carbon and Carbon-Carbon Composite Materials at a Temperature up to 3000 °C / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2017. Vol. 83. N 5. P. 56 – 61.
 14. **Potter K.** Bias extension measurements on cross-ply unidirectional prepreg / *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2002. Vol. 33. N 1. P. 63 – 73. DOI: 10.1016/S1359-835X(01)00057-4
 15. **Alsayednoor J., Lennard F., Yu W., Harrison P.** Influence of specimen pre-shear and wrinkling on the accuracy of uniaxial bias extension test results / *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2017. Vol. 101. P. 81 – 97. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.06.006
 16. **Polilov A. N., Arutyunova A. S., Tatus' N. A.** Effect of stress concentration near grips on the tensile strength of composites / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2020. Vol. 86. N 11. P. 48 – 59. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-11-48-59
 17. **Guzman-Maldonado E., Hamila N., Boisse P., Bikard J.** Thermomechanical analysis, modelling and simulation of the forming of pre-impregnated thermoplastics composites / *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2015. Vol. 78. P. 211 – 222. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.08.017
 18. **Harrison P., Alvarez M. F., Anderson D.** Towards comprehensive characterisation and modelling of the forming and wrinkling mechanics of engineering fabrics / *International Journal of Solids and Structures.* 2018. Vol. 154. P. 2 – 18. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2016.11.008
 19. **Harrison P., Taylor E., Alsayednoor J.** Improving the accuracy of the uniaxial bias extension test on engineering fabrics using a simple wrinkle mitigation technique / *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2018. Vol. 108. P. 53 – 61. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.02.025
 20. **Haghi Kashani M., Hosseini A., Sassani F., et al.** The role of intra-yarn shear in integrated multi-scale deformation analyses of woven fabrics: a critical review / *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences.* 2018. Vol. 43. N 3. P. 213 – 232. DOI: 10.1080/10408436.2017.1342597
 21. **Hosseini A., Kashani M. H., Sassani F., et al.** Identifying the distinct shear wrinkling behavior of woven composite preforms under bias extension and picture frame tests / *Composite Structures.* 2018. Vol. 185. P. 764 – 773. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.11.033
 22. **Lebrun G., Bureau M. N., Denault J.** Thermoforming-Stamping of Continuous Glass Fiber/Polypropylene Composites: Interlaminar and Tool-Laminate Shear Properties / *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* 2016. Vol. 17. N 2. P. 137 – 165. DOI: 10.1177/0892705704035411
 23. **Selezneva M., Naouar N., Denis Y., Gorbatikh L., et al.** Identification and validation of a hyperelastic model for self-reinforced polypropylene draping / *International Journal of Material Forming.* 2020. P. 1 – 11. DOI: 10.1007/s12289-020-01542-3
 24. **Cao J., Akkerman R., Boisse P., et al.** Characterization of mechanical behavior of woven fabrics: Experimental methods and benchmark results / *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2008. Vol. 39. N 6. P. 1037 – 1053. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.02.016
 25. **Wang P., Hamila N., Pineau P., Boisse P.** Thermomechanical analysis of thermoplastic composite prepreps using bias-extension test / *Journal of Thermoplastic Composite Materials.* 2012. Vol. 27. N 5. P. 679 – 698. DOI: 10.1177/0892705712454289
 26. **Mattner T., Körbel W., Wrensch M., Drummer D.** Compensation of edge effects in picture frame testing of continuous fiber reinforced thermoplastics / *Composites Part B: Engineering.* 2018. Vol. 142. P. 95 – 101. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.01.009
 27. **Lomov S. V., Willems A., Verpoest I., et al.** Picture frame test of woven composite reinforcements with a full-field strain registration / *Textile Research Journal.* 2006. Vol. 76. N 3. P. 243 – 252. DOI: 10.1177/0040517506061032
 28. **Willems A., Lomov S. V., Verpoest I., Vandepitte D.** Optical strain fields in shear and tensile testing of textile reinforcements / *Composites Science and Technology.* 2008. Vol. 68. N 3 – 4. P. 807 – 819. DOI: 10.1016/j.compscitech.2007.08.018
 29. **Mattner T., Wrensch M., Drummer D.** Shear behavior of woven and non-crimp fabric based thermoplastic composites at near-processing conditions / *Composites Part B: Engineering.* 2020. Vol. 185. P. 107761. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107761
 30. **Sachs U., Akkerman R., Fetfatsidis K., et al.** Characterization of the dynamic friction of woven fabrics: experimental methods and benchmark results / *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.* 2014. Vol. 67. P. 289 – 298. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.08.026
 31. **Zouari B., Daniel J.-L., Boisse P.** A woven reinforcement forming simulation method. Influence of the shear stiffness / *Computers & structures.* 2006. Vol. 84. N 5 – 6. P. 351 – 363. DOI: 10.1016/j.compstruc.2005.09.031