

Х. Хури Мусса^а, Г. Шаллита^{а}, В. Яред^б, М. Аби Ризк^б*

^а*Équipe MMC, CRSI, Lebanese University, Faculty of Engineering, Roumieh, El-Metn, Lebanon*

^б*Advanced Plastic Industries – API company, Dbayeh highway, Seaside road, Dbayeh, El-Metn, Lebanon*

АНАЛИЗ С ПРЕДСКАЗАНИЕМ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИТНОГО СЛОЯ ИЗ ПОЛИПРОПИЛЕНА, НАПОЛНЕННОГО ТАЛЬКОМ, НА КОЛЬЦЕВУЮ ЖЕСТКОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИКОВОЙ ТРУБЫ¹

H. Houry Moussa, G. Challita, W. Yared, and M. Abi Rizk*

PREDICTIVE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF A POLYPROPYLENE-TALC COMPOSITE LAYER ON THE RING STIFFNESS OF A MULTILAYER PLASTIC PIPE

Keywords: plain pipe, multilayer pipe, polypropylene-talc composite, ring stiffness, finite-element modeling

The ring stiffness of a multilayer sewage pipe reinforced with a composite polypropylene-talc layer, was investigated. The ring stiffnesses of plain and multilayer polypropylene pipes were determined experimentally and analyzed analytically. A finite-element model was developed to predict the ring stiffness of different multilayer pipe configurations as a function of layer thicknesses and talc content in the composite layer. The results obtained well agreed with experimental data.

Ключевые слова: труба гладкая, труба многослойная, композит пропиленовый наполненный тальком, жесткость кольцевая, моделирование конечно-элементное

Исследована кольцевая жесткость многослойной канализационной трубы с композитным слоем из полипропилена (ПП), наполненного тальком. Кольцевая жесткость гладкой и многослойной труб из ПП определена экспериментально и проанализирована

*Автор, с которым следует вести переписку: georges.challita@ul.edu.lb

Corresponding author: georges.challita@ul.edu.lb

¹Перевод с англ.

численно. Для предсказания кольцевой жесткости многослойных труб разной конфигурации в зависимости от толщины слоя и содержания талька в композитном слое разработана конечно-элементная модель. Полученные численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Введение

Большинство старых канализационных труб сделаны из жестких материалов, таких как бетон или глина, — хрупких и выходящих из строя при ударе камнем или движении грунта. Кроме того, выделение серной кислоты из бытовых/городских сточных вод вызывает внутреннюю коррозию бетона, что еще больше ослабляет конструкцию и является серьезной проблемой в жарком сухом климате [1—3]. Смещение грунта и проникновение корней деревьев создает проблемы для традиционных канализационных систем [4]. В настоящее время большинство требований, предъявляемых к современным системам канализационных труб, способны удовлетворить системы из гибких пластиковых труб [5—10]. По сравнению с жесткими материалами пластиковые трубы демонстрируют превосходный набор свойств. В [11] разработали конечно-элементную модель полиэтиленовой трубы, подверженной внутреннему давлению, остаточным напряжениям и нагрузкам от грунта. Оценено и обсуждено влияние каждой из нагрузок на эксплуатационный ресурс трубы. Результаты показали, что срок службы полиэтиленовых труб может превышать 100 лет. Поливинилхлорид, полиэтилен высокой плотности (ПЭВП) и стеклопластики широко используют в системах канализации. Однако за последние несколько десятилетий постепенно возросла популярность полипропилена (ПП) в качестве материала для труб безнапорных канализационных систем в силу некоторых его преимуществ по сравнению с другими материалами: удельная жесткость, термостойкость, химическая стойкость в широком диапазоне pH, хорошая абразивная стойкость и отличные долговременные свойства [12—14]. Кроме того, включение в полипропиленовую матрицу неорганических наполнителей в виде частиц — эффективный способ улучшения ее механических характеристик. В настоящее время для этой цели широко используют такие неорганические материалы, как карбонат кальция, каолин, слюду, тальк и стеклянные шарики. Как показали в [15], модуль Юнга полипропилена можно повысить, добавив в него тальк и волластонит. В [16] провели эксперименты с композитами на основе ПП, наполненными тальком, каолином и CaCO_3 , и сравнили их механические свойства. В [17] показали, что модуль упругости при изгибе полипропилена с тальком возрастает с увеличением содержания наполнителя; оптимальное наполнение тальком — 30—50% по массе. Результаты испытания на растяжение, проведенного в [18] при скорости деформирования 5 мм/мин, показали, что модуль упругости ненаполненного ПП увеличился с 1,89 до 4,9 ГПа при содержании талька 40% по массе. В [19] использовали по-

липропиленовый войлок вместе с бананово-полиэфирным войлоком для ремонта канализационной трубы из полиэфир-полиэтилентерефталата. ПП и другие полимеры использовали в [20] в качестве наполнителей в металлических цилиндрах и экспериментально и численно исследовали их влияние на поперечную деформацию при действии осевых сжимающих нагрузок.

Еще одну главу в историю успеха полиолефиновых труб, применяемых для снабжения питьевой водой, газом, в системах канализации и в промышленности, добавляют разработки систем многослойных труб. Растущие требования к сантехнике требуют улучшения существующих систем канализационных труб. При использовании многослойной технологии пластиковые канализационные трубы смогут удовлетворить эти требования. В [21] с помощью подхода механики разрушения исследовали разрушение трехслойной композитной пластиковой трубы, состоящей из двух защитных слоев и основного слоя из ПЭВП. Установили, что при определенных условиях можно задерживать распространение трещины на поверхности раздела слоев, что значительно увеличит долговечность трубы. В [22] представили новую методологию предсказания длительного поведения многослойных пластиковых труб с металлическими прослойками, однослойных труб и кесонных труб. Используя эту методологию, можно было бы выявить слой, в котором начинается разрушение при ползучести под внутренним давлением, и количественно оценить остаточное сопротивление гидростатическому давлению остальных слоев. Кроме того, в [23] предложили новый подход к оценке долговечности полиэтиленовой многослойной трубы путем измерения основных параметров разрушения и расчета соответствующих значений вязкости разрушения полиэтиленовых труб с использованием конечно-элементного моделирования (МКЭ). В [24] представлены результаты испытаний на циклическую усталость неармированного полипропиленового блок-сополимера и кинетики роста трещин в срединном слое, армированном минералами, при разных коэффициентах нагружения. Показано, что медленный рост трещин может иметь место как в армированных, так и неармированных трубах из полипропиленового блок-сополимера. Однако в пределах стандартизованных диапазонов нагружения, по-видимому, он не является решающей модой разрушения в течение требуемого срока эксплуатации упомянутых труб. В [25] с помощью МКЭ исследовали влияние граничных условий на разрушение первого слоя и распределение напряжений в многослойной композитной трубе. Многослойные трубы используют везде, где желательны преимущества термопластов, а также требуется высокая жесткость, например, для канализационных безнапорных труб.

Основное свойство безнапорной трубы — кольцевая жесткость, характеризующая ее способность противостоять прогибу кольца Δ под действием радиальной силы F , как показано на рис. 1. Кольцевая жесткость трубы зависит от жесткости материала и конструкции стенки трубы.

В [26] провели испытания на кольцевую жесткость стеклопластиковых труб с прямоугольным, эллиптическим, яйцевидным и круглым попе-

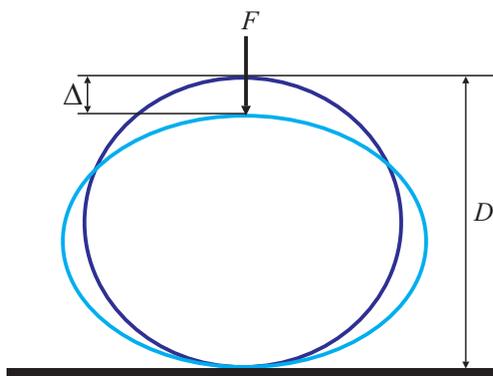


Рис. 1. Прогиб кольца трубы Δ под действием вертикальной силы F .

речным сечением. Установили, что круглые трубы — наиболее жесткие и гибкие среди всех испытанных. Жесткость гибких труб из стеклопластика исследовали в [27] с использованием испытания на сжатие между параллельными плитами, моделирования МКЭ и теоретического анализа. Многочисленные данные о жесткости гибких гладких труб опубликованы в [8, 28—30]. Для расчета модуля упругости в [31] провели испытания на сжатие между параллельными плитами труб из четырех марок ПП. Результаты показали, что модуль упругости и кольцевая жесткость трубы пропорциональны. Кольцевую жесткость многослойных ПП труб измерили в [32] с применением устройства, используемого при испытании на сжатие между параллельными плитами.

В настоящее время многие производители канализационных труб выпускают многослойные композитные трубы с высокой кольцевой жесткостью, обладающие отличной ударной, абразивной, химической стойкостью и сопротивлением термическим напряжениям. Однако до сих пор нет единого мнения об оптимальной конфигурации таких труб.

Цель настоящего исследования — проектирование пластиковой трубы из ПП, наполненной тальком, и ее численное моделирование МКЭ с упором на повышение кольцевой жесткости по сравнению с гладкими трубами из ПП. Приведены экспериментальные результаты испытаний на растяжение и сжатие между параллельными плитами. На основе коммерческого программного обеспечения Abaqus/CAE разработана эффективная численная конечно-элементная модель стандартизированного испытания на кольцевую жесткость по международному стандарту ISO 9969 [33]. Разработанную модель впоследствии использовали для предсказания кольцевой жесткости многослойных труб других конфигураций с разной толщиной слоев и разным содержанием талька в композитном слое.

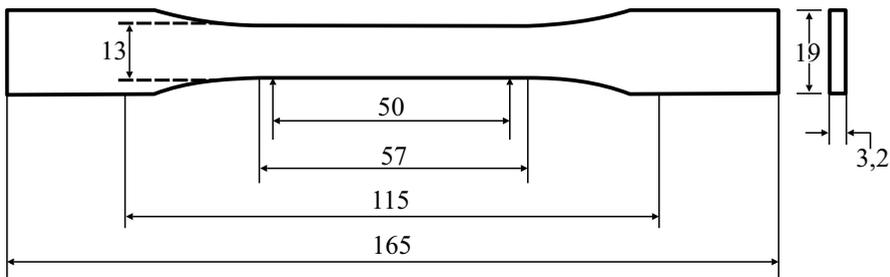


Рис. 2. Образец для испытания на растяжение (размеры указаны в миллиметрах) [35].

1. Экспериментальный анализ

1.1. Материалы. В настоящей работе проанализировали два типа пластика: высокомолекулярный полипропиленовый блок-сополимер BorECO BA212E (Borouge, Borealis Group, 1 George Street # 18-01 Singapore 049145) и композит 1014 TCP 60 MB на основе ПП, наполненного тальком (Masterpak Nile, INDEVCO Group, Менофия, Египет). BorECO BA212E обладает высокой жесткостью, ударной вязкостью и низкой скоростью течения расплава. 1014 TCP 60 MB — это экономичная маточная смесь на основе талька с носителем из сополимера ПП, способствующая стабильности процесса экструзии и улучшающая эксплуатационные характеристики.

Согласно стандарту BS EN 14758-1 [34] содержание талька в матрице ПП не должно превышать 50% по массе. Поэтому 1014 TCP 60 MB с содержанием талька ~ 60% по массе разбавили полипропиленом. Путем разбавления 1014 TCP 60 MB с помощью BorECO BA212E получили два материала Mat20 и Mat30, содержащие 20 и 30% по массе талька соответственно. Следует отметить, что для проверки данных поставщика испытания на растяжение также провели на исходном материале 1014 TCP 60 MB для сравнения с материалами, полученными после разбавления.

1.2. Методы. 1.2.1. *Испытание на растяжение.* Модуль Юнга — это важнейшее свойство, определяющее кольцевую жесткость. Испытания на растяжение провели для труб из разных материалов по стандарту ASTM D638 [35], рекомендующего определение свойств при растяжении неарми-

Табл. 1

Значения модуля упругости при растяжении E и коэффициента Пуассона ν материалов

Материал	E , МПа	ν
BorECO BA212E	1585	0,45
Mat20	2200	0,43
Mat30	2400	0,42
1014 TCP 60 MB	4173	0,38

рованных и армированных пластиков на приталенных образцах (рис. 2). Образцы изготовила компания Advanced Plastic Industries (Zouk Mosbeh, Ливан, www.api.com.lb) литьем под давлением в пресс-форме при температуре от 200 до 225 °С на машине ВМВ Мс150 (6901181, Италия).

Испытания образцов на растяжение до разрушения выполнили на машине (UTM-1352-50 KN, JJ test, Китай) со скоростью деформирования 5 мм/мин при комнатной температуре. Данные о нагрузке и деформации, записанные в ходе испытаний, использовали для определения значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона (все результаты — средние значения пяти измерений для каждого материала, табл. 1).

1.2.2. Испытания на сжатие между параллельными плитами. Образцы труб для испытаний изготовила компания Advanced Plastic Industries с использованием обычных одношнековых экструдеров AMUT (внешний слой EA60, SUALCE/CL, V3689DL — экструдером А; средний слой EA75, RAASE/C, V3689DO — экструдером В; внутренний слой EA60, SUALCE / CL, V3689AJ — экструдером С). Температурный профиль имел семь зон нагрева Z1-Z7: 200, 205, 205, 210, 210, 210 и 210 °С от бункера до фильерной головки. Для определения кольцевой жесткости труб провели их испытания на сжатие между параллельными плитами по стандарту ISO 9969 [33] с использованием испытательной машины ACQUATI G. (Via Vismara, 30, Arese (MI), Италия) (рис. 3). Кольцевую жесткость определяли, используя измеренные значения силы F и прогиба Δ образца трубы, деформированного с постоянной скоростью прогиба. Для каждой конфигурации трубы выполнили по пять испытаний и вычислили средние значения кольцевой жесткости.

Образец трубы длиной 300 мм, закрепленный между двумя горизонтальными и параллельными плоскими стальными плитами, сжимали радиально с постоянной скоростью деформирования 5 мм/мин до достижения прогиба, равного по меньшей мере 0,03 от внутреннего диаметра трубы. В ходе испытания записывали зависимость сила–прогиб.

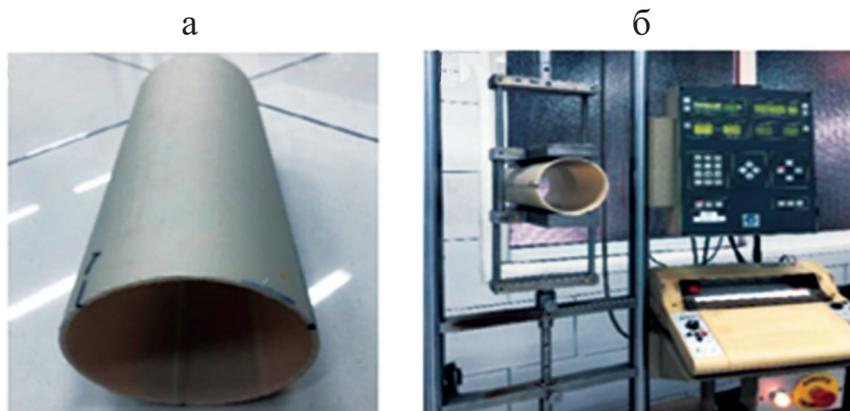


Рис. 3. Испытание на сжатие между параллельными плитами: а — испытываемый образец; б — испытательная машина.

Кольцевую жесткость SN вычисляли по величине силы F , необходимой для достижения прогиба Δ , равного 3% внутреннего диаметра трубы D , по формуле [33]

$$SN = \frac{F(0,0186 + 0,025\Delta / D)}{\Delta \cdot L} \cdot 10^6, \quad (1)$$

где $\Delta / D = 0,03$; L — длина трубы.

Численный анализ

Разработали эффективную численную конечно-элементную модель испытания для определения кольцевой жесткости термопластичных труб с круглым поперечным сечением по международному стандарту ISO 9969 [33].

2.1. Конечно-элементная модель разработана и решена с помощью программного обеспечения Abaqus/CAE и Abaqus/Standard соответственно.

2.1.1. Материалы. Материалы труб, использованные при моделировании МКЭ, считали изотропными. Смоделировали два типа труб А и В с модулями Юнга 1389 и 1700 МПа соответственно и коэффициентом Пуассона 0,44 [31]. Отметим, что эти два материала не использовали для изготовления образцов в настоящей работе; их выбрали в качестве дополнительных материалов для проверки модели с целью расширения диапазона материалов.

Композитный материал (ПП + тальк) считали изотропным (частицы талька ориентированы случайным образом) с большим модулем Юнга, чем у ненаполненного ПП.

2.1.2. Типы конечных элементов. Для моделирования трубы можно использовать два распространенных типа элементов — твердотельные и оболочечные. Оболочечный элемент обычно используют для тонкостенных конструкций постоянной толщины [36]. Поскольку это имеет место для рассматриваемых труб, выбрали оболочечный конечный элемент.

При испытании труб на радиальное сжатие используют пару твердых и жестких плит, передающих требуемое усилие сжатия испытываемому образцу. Плиты должны быть плоскими, гладкими, с чистыми поверхностями для хорошего контакта с образцом; их жесткость и твердость должны быть достаточно большими для предотвращения их изгиба или деформирования, способных отрицательно повлиять на результаты испытаний. Поэтому плиты моделировали с помощью жестких конечных элементов.

2.1.3. Граничные условия. В ходе испытаний верхнюю плиту перемещали с постоянной скоростью, нижняя плита была закреплена. При моделировании взаимодействия между контактирующими поверхностями использовали контакт типа поверхность—поверхность [37]. Поверхность трубы рассматривали в качестве подчиненной, а поверхности верхней и нижней плит — в качестве главных [37]. Взаимодействие между контак-

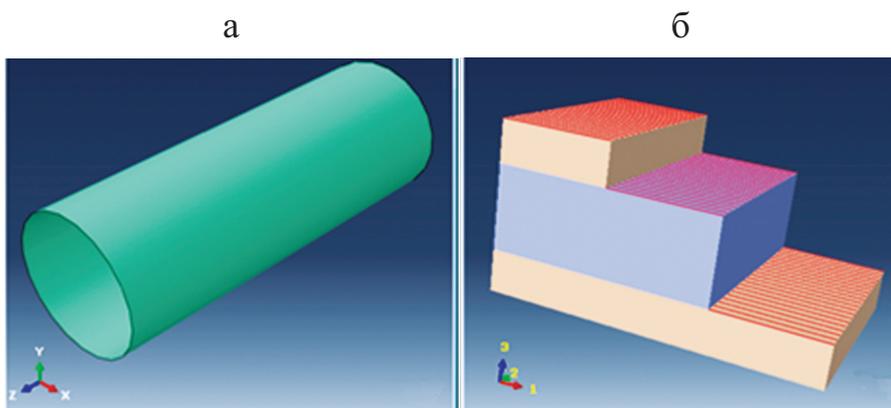


Рис. 4. Модель трубы, созданная посредством Abaqus/CAE (а) и схема поперечного сечения трехслойной трубы (б).

тирующими телами предполагали без учета трения. Для минимизации проникновения подчиненной поверхности в главную и предотвращения передачи растягивающего напряжения через поверхность раздела выбрали жесткую контактную взаимосвязь [37].

Для численного определения кольцевой жесткости многослойной трубы ее поперечное сечение смоделировали как составное. На рис. 4 показан набор слоев трехслойной трубы, крайние слои которой сделаны из непонпленного ПП, а средний — из ПП, наполненного тальком.

2.1.4. Исследование сходимости решения МКЭ. Смоделировали трубы А и В длиной 100 мм, средним диаметром 110 мм и толщиной 5 мм. Численные результаты МКЭ сопоставили с экспериментальными данными испытаний на жесткость, проведенных в [31].

Сходимость решения МКЭ при определении кольцевой жесткости при измельчении конечно-элементной сетки иллюстрируют данные рис. 5. Видно, что расчетное значение кольцевой жесткости не зависело от из-

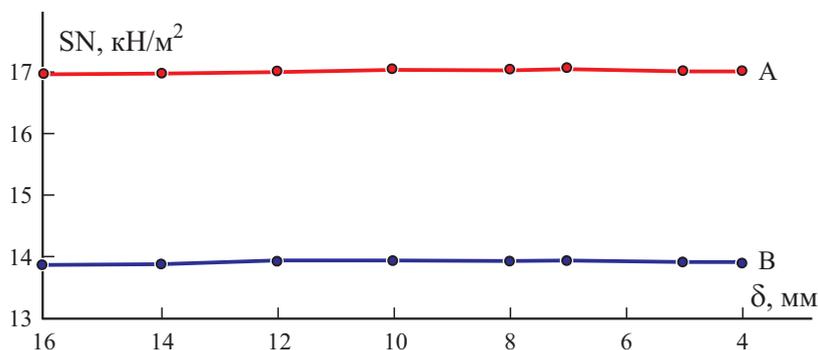


Рис. 5. Зависимость кольцевой жесткости SN от размера конечного элемента δ при расчете МКЭ труб А и В.

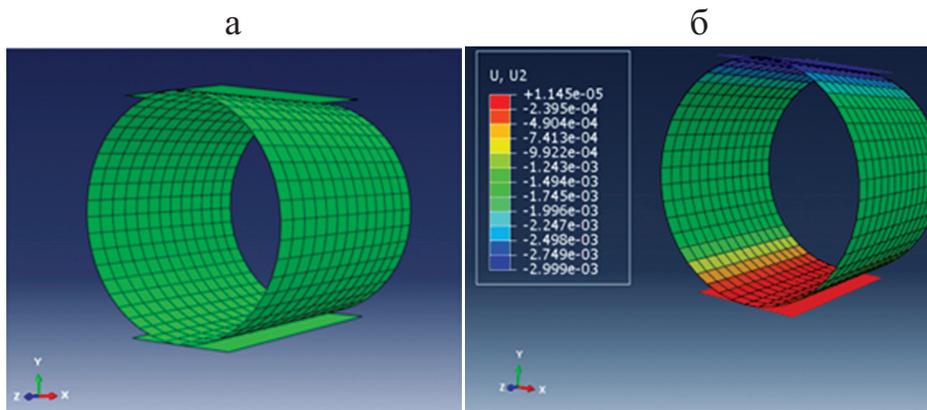


Рис. 6. Конечно-элементная модель трубы: исходная геометрия (а) и радиальное перемещение u нагруженной трубы (метры) (б).

мельчения сетки. Модель с более крупной сеткой способна обеспечить значение кольцевой жесткости, аналогичное вычисляемому с более мелкой сеткой. Однако другие выходные переменные (например, распределение напряжений) нельзя точно вычислить с помощью грубой сетки. Поэтому с учетом умеренных вычислительных затрат выбрали конечный элемент размером 8 мм.

В [36] описали и подтвердили правильность конечно-элементных моделей для проверки кольцевой жесткости, а также изучили их сходимость по отношению к размеру элемента δ для разных моделей оболочек. Продемонстрировали, что расчетная кольцевая жесткость не зависела от измельчения сетки.

2.2. Проверка модели. Разработанную модель МКЭ проверили путем сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными данными, приведенными в литературе и полученными от производителя труб компании Advanced Plastic Industries.

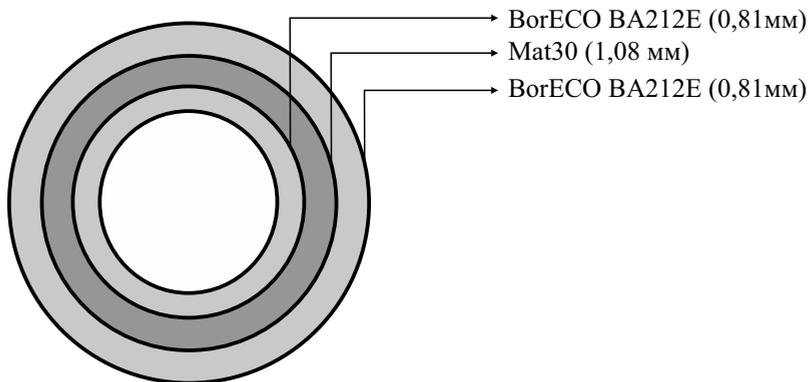


Рис. 7. Вид поперечного сечения образца трубы API-3. Размер слоев указан в табл. 2.

Спецификация образцов

Образец	Тип трубы	Материал	Длина	Диаметр	Толщина
			мм		
API-1	Однослойная	BorECO BA212E	300	110	2,7
API-2	Однослойная	BorECO BA212E	300	110	3,4
API-3	Трехслойная	Внутренний слой BorECO BA212E	300	110	0,81
		Средний слой Mat30	300	110	1,08
		Наружный слой BorECO BA212E	300	110	0,81

Для определения модуля упругости в [31] провели испытания на кольцевую жесткость по стандарту ISO 9969 [33] на образцах длиной 100 мм. Рассмотрели четыре материала:

A — коммерческий полипропиленовый блок-сополимер PP-B;

B — высокомодульный полипропилен PP-НМ;

C — блок-сополимер полипропилена PP-B с высокой скоростью течения расплава;

D — блок-сополимер полипропилена PP-B, наполненного 30% CaCO_3 .

Внешний диаметр всех образцов 110 мм, толщина стенки 5 мм. Вертикальное перемещение верхней плиты $\Delta = 3$ мм; использовали конечно-элементную сетку с элементами размером 8 мм. Конечно-элементная модель образца трубы из ПП показана на рис. 6.

Испытания по определению кольцевой жесткости провели в компании Advanced Plastic Industries на двух гладких полипропиленовых трубах с разной толщиной стенки (API-1 и API-2) и многослойной трубе (API-3) (рис. 7). Спецификация труб приведена в табл. 2.

2.3. Параметрическое исследование провели на образце трубы диаметром 110 мм с толщиной стенки 3,9 мм (рис. 8). Толщину композитного слоя варьировали от 0 до 100% от общей толщины трубы, а содержание

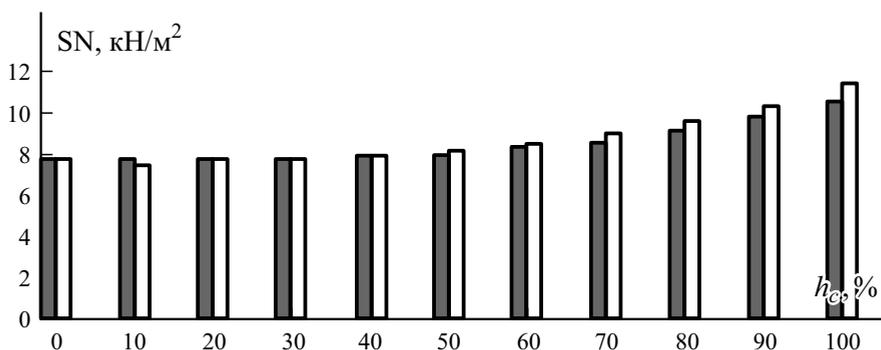


Рис. 8. Кольцевая жесткость SN как функция относительной толщины h_c композитного слоя труб из ПП, наполненного 20 (■) и 30% по массе (□) талька.

Табл. 3

Экспериментальные (exp) и численные (num) результаты испытаний на сжатие между параллельными плитами

Материал	A	B	C	D	API-1	API-2	API-3
Прогиб, мм	3	3	3	3	3,138	3,096	3,138
F_{exp} , Н	224,5	264,34	233,02	329	127,95	235,2	131,84
SN_{exp} , кН/м ²	14,48	17,05	15,03	21,22	2,63	4,9	2,71
F_{num} , Н	215,75	264,05	215,93	314,16	123,06	245,28	126,98
SN_{num} , кН/м ²	13,92	17,03	13,93	20,26	2,53	5,11	2,61
Относительная ошибка, %	3,90	0,11	7,32	4,52	3,8	4,29	3,69

наполнителя — от 20 до 30% по массе. Установили, что толщина композитного слоя и содержание наполнителя существенно влияют на механические характеристики многослойной трубы, особенно на ее кольцевую жесткость.

Результаты и обсуждение

Из данных табл. 3 видно, что корреляция между численными результатами по модели МКЭ и экспериментальными данными приемлемая. Максимальная относительная ошибка 7,3% для полипропиленового блок-сополимера с высокой текучестью расплава при среднем времени расчета около одной минуты. Такая относительно небольшая ошибка приемлема с практической точки зрения, и модель может быть использована для предсказания кольцевой жесткости одно- и многослойных труб из термопласта. Более того, модель может быть эффективным инструментом для исследования других конфигураций труб, что значительно уменьшает экспериментальные затраты.

Добавление композитного слоя толщиной 40% от общей толщины стенки и 30% по массе талька, добавленного в полипропиленовую матрицу, увеличивало кольцевую жесткость на ~3% (API-1 по сравнению с API-3, см. табл. 3).

Из данных рис. 8 видно, что кольцевая жесткость возрастала с увеличением толщины композитного слоя, но различие значений кольцевой жесткости при 20 и 30% по массе наполнения ПП тальком мало. Максимальная относительная разность у многослойных труб с 20 и 30% по массе наполнения тальком 5,6%. Это небольшое различие обусловлено приближенными значениями модуля упругости при растяжении материалов Mat20 и Mat30 (2200 и 2400 МПа соответственно). Согласно европейскому стандарту EN 1852-1 [38] труба должна иметь кольцевую жесткость, равную или превышающую 8 кН/м², чтобы быть классифицированной как SN 8; это отраслевой стандарт для канализационных труб. Поэтому следует выбирать толщину композитного слоя большей 50% от общей толщины трубы. Уменьшения затрат на материалы можно ожидать для труб с толщиной композитного слоя 70 и 80% от общей толщины трубы ($SN = 9,02$ и $9,62$ кН/м² соответственно). Использование

большого содержания талька в многослойной композитной трубе может повысить ее кольцевую жесткость до 20% по сравнению с однослойной.

Заключение

В настоящем исследовании разработана и проверена численная модель для расчета кольцевой жесткости многослойных композитных труб. Кольцевую жесткость трубы оценивали в ходе испытаний на сжатие между параллельными плитами и анализа МКЭ. Полученные результаты свидетельствуют о хорошем согласовании с максимальной относительной погрешностью 7,3%. Предложенная модель может быть использована для эффективного предсказания кольцевой жесткости многослойных термопластичных труб в зависимости от толщины композитного слоя и содержания в нем талька.

Добавление композитного слоя к гладкой полипропиленовой трубе повысило ее кольцевую жесткость до значений, принятых международными стандартами для систем канализации. При общей толщине трубы 3,9 мм и внешнем диаметре 110 мм кольцевая жесткость возросла на ~ 20%, что достигнуто за счет применения многослойной конфигурации, в которой толщина композитного слоя составляла 80% от общей толщины трубы. Таким образом, многослойные трубы могут иметь большую кольцевую жесткость, чем гладкие трубы такой же толщины.

Благодарность. Авторы признательны за поддержку исследовательской группе ЕЗМ из IUT-Saint Nazaire (Франция).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mori T., Nonaka T., Tazaki K., Koga M., Hikosaka Y., and Noda S. Interactions of nutrients, moisture and pH on microbial corrosion of concrete sewer pipes // *Water Res.* — 1992. — Vol. 26, No. 1. — P. 29—37.
2. Yuan L. and Kyriakides S. Liner wrinkling and collapse of bi-material pipe under axial compression // *Int. J. Solids Struct.* — 2015. — Nos. 60—61. — P. 48—59.
3. Mu S., Zhou H., Shi L., Liu J., Cai J., and Wang F. Research on performance and microstructure of sewage pipe mortar strengthened with different anti-corrosion technologies // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* — 2017. — No. 250. — P. 012036.
4. Ridgers D., Rolf K., and Stål Ö. Management and planning solutions to lack of resistance to root penetration by modern pvc and concrete sewer pipes // *Arboric. J.* — 2006. — Vol. 29, No. 4. — P. 269—290.
5. Farshad M. and Necola A. Strain corrosion of glass fibre-reinforced plastics pipes // *Polym. Test.* — 2004. — Vol. 23, No. 5. — P. 517—521.
6. Klaiber F. W., Lohnes R. A., and Wipf T. J. Investigation of High-Density Polyethylene Pipe for Highway Applications, Final report: Phase I. Iowa DOT Project HR-373. ISU-ERI-AMES 96407, Iowa State University, College of Engineering, Department of Transportation, Iowa, USA, 1996.
7. Frank T. PE-HD spiral pipes for sewage pipelines—electrofusion socket welding up to DN 1800 // *Proc. Plastics Pipes.* — 2001. — Vol. 13.

8. *Chaallal O., Arockiasamy M., and Godat A.* Laboratory tests to evaluate mechanical properties and performance of various flexible pipes // *J. Perform. Constr. Facil.* — 2015. — Vol. 29, No. 5. — P. 04014130.
9. *Martins J. D. N., Freire E., and Hemadipour H.* Applications and market of PVC for piping industry // *Polímeros.* — 2009. — Vol. 19, No. 1. — P. 58—62.
10. *Yuan Y., Liu C., and Huang M.* The structure and performance of short glass fiber/high-density polyethylene/polypropylene composite pipes extruded using a shearing-drawing compound stress field // *Materials.* — 2019. — Vol. 12, No. 8. — P. 1323.
11. *Poduška J., Hutař P., Frank A., Kučera J., Sadílek J., Pinter G., and Náhlik L.* Soil load on plastic pipe and its influence on lifetime // *J. Mech. Eng.* — 2019. — Vol. 69, No. 3. — P. 101—106.
12. *Jansen N.* Polypropylene: a tried and proven pipe material // *3R Int.* — 1998. — P. 113—116.
13. Brochure, Borouge. Polypropylene materials for non-pressure sewage and drainage systems URL:http://www.borouge.com/IndustrySolution/PDF%20Files/BorEco/2011%2012_Polypropylene%20materials%20for%20Non-Pressure%20Sewage%20Drainage%20Systems.pdf (accessed 28 august, 2019)
14. *Wassenaar J.* Polypropylene materials for sewerage & drainage pipes with reduced energy and carbon footprints // *J. Mater. Sci. Eng. B.* — 2016. — Vol. 6, No. 6.
15. *Hadal R. S. and Misra R. D. K.* The influence of loading rate and concurrent microstructural evolution in micrometric talc- and wollastonite-reinforced high isotactic polypropylene composites // *Mater. Sci. Eng., A.* — 2004. — Vol. 374, Nos. 1—2. — P. 374—389.
16. *Leong Y. W., Abu Bakar M. B., Ishak Z. A. Mohd., Ariffin A., and Pukanszky B.* Comparison of the mechanical properties and interfacial interactions between talc, kaolin, and calcium carbonate filled polypropylene composites // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2004. — Vol. 91, No. 5. — P. 3315—3326.
17. *Kant S., Urmila, Kumar J., and Pundir G.* Study of talc filled polypropylene—a concept for improving mechanical properties of polypropylene // *Int. J. Res. Eng. Technol.* — 2013. — Vol. 2, No. 4. — P. 411—415.
18. *Zhou Y., Rangari V., Mahfuz H., Jeelani S., and Mallick P. K.* Experimental study on thermal and mechanical behavior of polypropylene, talc/polypropylene and polypropylene/clay nanocomposites // *Mater. Sci. Eng., A.* — 2005. — Vol. 402, Nos. 1—2. — P. 109—117.
19. *Kobayashi S., Suna K., and Yasuda T.* Mechanical properties and fracture behavior of nonwoven fabric reinforced plastics for rehabilitation of sewage pipes // *Adv. Compos. Mater.* — 2012. — Vol. 21, Nos. 5—6. — P. 413—423.
20. *Xu L., Gao G., Wang X., Wang J., and Chen X.* A model to characterize the lateral expansion of a cylinder containing a polymer filler subjected to compression // *Mech. Adv. Mater. Struct.* — 2010. — doi:10.1082/15376494.2018.1545414
21. *Hutař P., Zouhar M., Náhlik L., Ševčík M., and Máša B.* Multilayer polymer pipes failure assessment based on a fracture mechanics approach // *Eng. Fail. Anal.* — 2013. — Vol. 33. — P. 151—162.
22. *Farshad M.* Determination of the long-term hydrostatic strength of multilayer pipes // *Polym. Test.* — 2005. — Vol. 24, No. 8. — P. 1041—1048.
23. *Nezbedová E., Fiedler L., Majer Z., Vlach B., and Kněsl Z.* Fracture toughness of multilayer pipes // *Strength Mater.* — 2008. — Vol. 40, No. 1. — P. 134—137.
24. *Arbeiter F., Ševčík M., Pinter G., Andreas F., and Hutař P.* Polypropylene multi layer pipe lifetime assessment under realistic loading conditions — 2014. — doi: 10.13140/RG.2.1.1162.2807
25. *González-Estrada O. A., León J. S., and Pertuz A.* Influence of the boundary condition on the first ply failure and stress distribution on a multilayer composite pipe by the finite element method // *J. Phys. Conf. Ser.* — 2019. — No. 1159. — P. 012013.

26. *Seibi A. C., Kalfat I., Molki A., Webb T., and Flores R.* Shape factor for glass-reinforced plastic pipes with noncircular shapes under diametral loading — an experimental study // *Exp. Tech.* — 2015. — Vol. 39, No. 4. — P. 64—69.

27. *Park J.-S., Hong W.-H., Lee W., Park J.-H., and Yoon S.-J.* Pipe stiffness prediction of buried gfrp flexible pipe // *Polym. Polym. Compos.* — 2014. — Vol. 22, No. 1. — P. 17—24.

28. *Farshad M. and Necola A.* Effect of aqueous environment on the long-term behavior of glass fiber-reinforced plastic pipes // *Polym. Test.* — 2004. — Vol. 23, No. 2. — P. 163—167.

29. *Lee J. H., Kim S. H., Choi W. C., and Yoon S. J.* Pipe stiffness prediction of buried glass fiber reinforced polymer plastic (GFRP) and polymer mortar pipe // *Key Eng. Mater.* — 2017. — Vol. 753. — P. 3—7.

30. *Thomas N. K., George S. P., John S. M., and George S. P.* Stress analysis of underground GRP pipe subjected to internal and external loading conditions // *Int. J. Adv. Mech. Eng.* — 2014. — Vol. 4, No. 4. — P. 435—440.

31. *Thornblom K., Nilsson S. F. and Salberg S. E.* Durability of Non-Pressure Polypropylene Pipe Materials. — SP Report 2007, Borealis AB. SP Technical Research Institute of Sweden; Goteborg, 2007.

32. *Wierzbicki L. and Szymiczek M.* Mechanical and chemical properties of sewage pipes // *Arch. Mater. Sci. Eng.* — 2012. — Vol. 53. — P. 38—45.

33. ISO 9969:2007 (E). Thermoplastics pipes — Determination of ring stiffness, Switzerland, 2007.

34. BS-EN-14758-1:2012. Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage — Polypropylene with mineral modifiers (PP-MD) Part 1: Specifications for pipes, fittings and the system, London, 2012.

35. D20 Committee, ASTM D638. Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM International. US, 2014.

36. *Fuerle F., Sienz J., Innocente M., Pittman J. F. T., Samaras V., and Thomas S.* Ring stiffness evaluation and optimization of structured- wall PE pipes // 24th Annu. Meet., PPS-24, Italy, 2008.

37. Abaqus/CAE User's Guide. Version 6.14. Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, RI.

38. EN 1852-1:2009. Plastics piping systems for non-pressure underground drainage and sewerage - Polypropylene (PP) - Part 1: Specifications for pipes, fittings and the system, CEN, Brussels, 2009.

Поступила в редакцию 19.02.2021

Окончательный вариант поступил 28.04.2021

Received Feb. 19, 2021 (Apr. 28, 2021)
