

*Х. Хури Мусса<sup>а</sup>, Г. Шаллита<sup>а\*</sup>, В. Яред<sup>б</sup>, М. Аби Ризк<sup>б</sup>*

<sup>а</sup>*Équipe MMC, CRSI, Lebanese University, Faculty of Engineering, Roumieh, El-Metn, Lebanon*

<sup>б</sup>*Advanced Plastic Industries – API company, Dbayeh highway, Seaside road, Dbayeh, El-Metn, Lebanon*

## **АНАЛИЗ С ПРЕДСКАЗАНИЕМ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИТНОГО СЛОЯ ИЗ ПОЛИПРОПИЛЕНА, НАПОЛНЕННОГО ТАЛКОМ, НА КОЛЬЦЕВУЮ ЖЕСТКОСТЬ МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИКОВОЙ ТРУБЫ<sup>1</sup>**

*H. Khoury 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](mailto:georges.challita@ul.edu.lb)

Corresponding author: [georges.challita@ul.edu.lb](mailto:georges.challita@ul.edu.lb)

<sup>1</sup>Перевод 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  $\text{CaCO}_3$ , 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  $\Delta$  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-

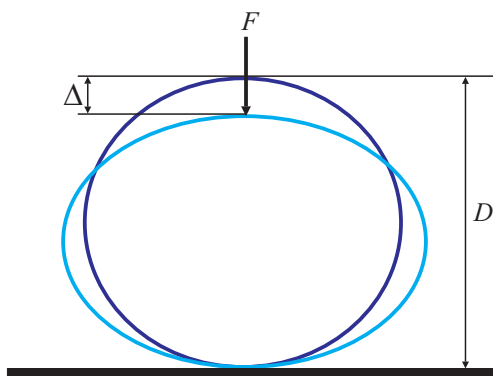


Рис. 1. Прогиб кольца трубы  $\Delta$  под действием вертикальной силы  $F$ .

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.

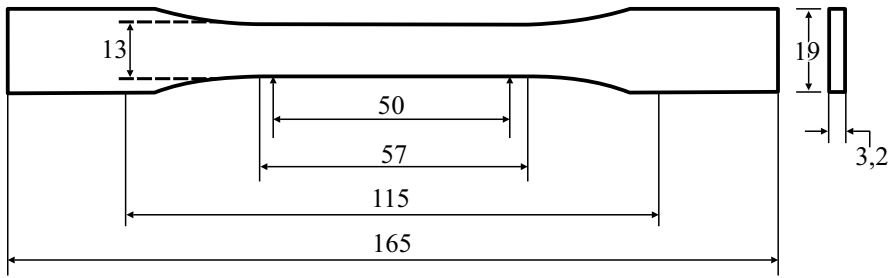


Рис. 2. Образец для испытания на растяжение (размеры указаны в миллиметрах) [35].

## 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  $\nu$  материалов

Материал	$E$ , МПа	$\nu$
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](http://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  $\Delta$  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.

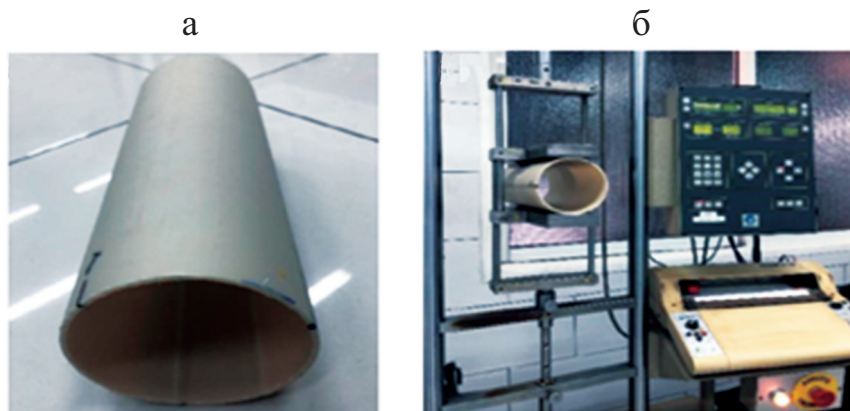


Рис. 3. Испытание на сжатие между параллельными плитами: а — испытываемый образец; б — испытательная машина.



Кольцевую жесткость  $SN$  вычисляли по величине силы  $F$ , необходимой для достижения прогиба  $\Delta$ , 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-

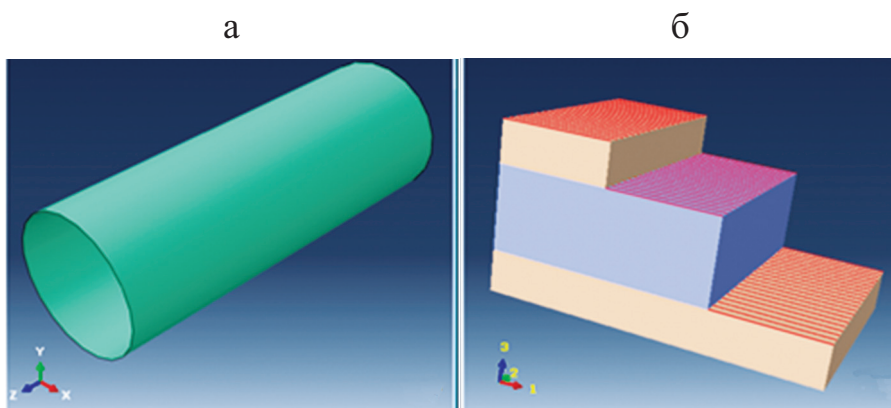


Рис. 4. Модель трубы, созданная посредством Abaqus/CAE (а) и схема поперечного сечения трехслойной трубы (б).

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-

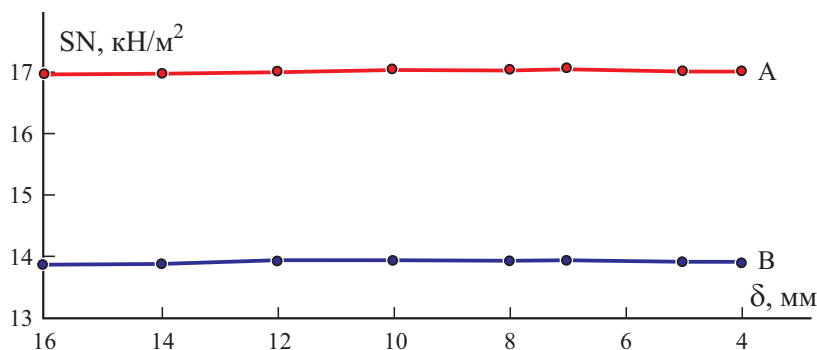


Рис. 5. Зависимость кольцевой жесткости SN от размера конечного элемента  $\delta$  при расчете МКЭ труб А и В.



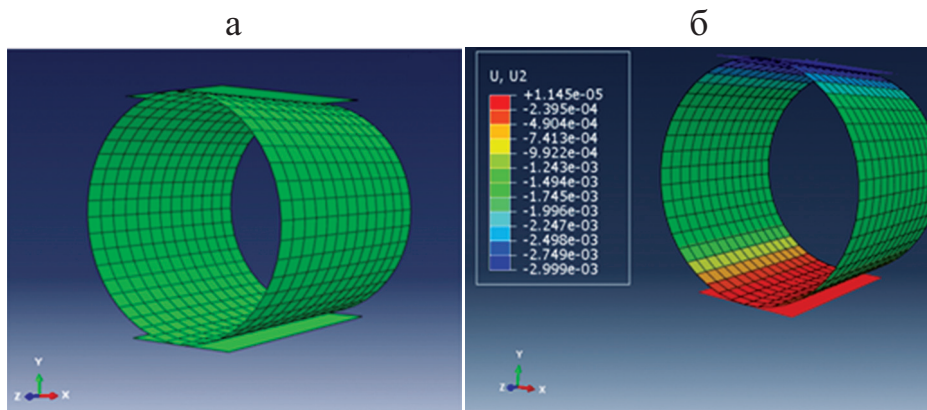


Рис. 6. Конечно-элементная модель трубы: исходная геометрия (а) и радиальное перемещение  $u$  нагруженной трубы (метры) (б).

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  $\delta$  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.

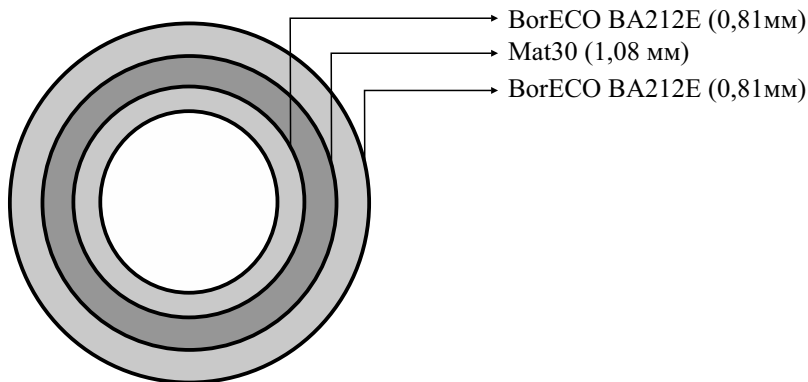


Рис. 7. Вид поперечного сечения образца трубы API-3. Размер слоев указан в табл. 2.

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<sub>3</sub>.

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

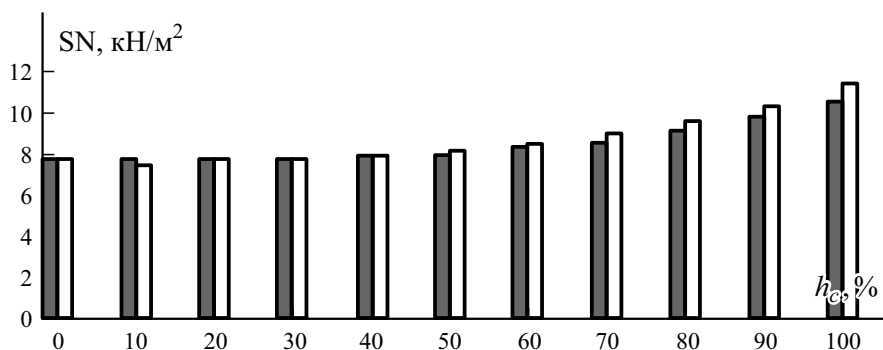


Рис. 8. Кольцевая жесткость SN как функция относительной толщины  $h_c$  композитного слоя труб из ПП, наполненного 20 (■) и 30% по массе (□) талька.

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 <sup>2</sup>	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 <sup>2</sup>	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/м<sup>2</sup>, 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/м<sup>2</sup> 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](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)

---