

УДК 514.18: 678.5.05:004.925.8

Колосова Е.П.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Ванин В.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Колосов А.Е.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ. 2. Моделирование структуры дисперсно-наполненных реактопластов, а также проектирование технологии и оборудования для формования полимерных композитов

Проанализированы различные аспекты геометрического моделирования технических объектов и процессов формования ненаполненных и наполненных полимерных композитов. Детально рассмотрены вопросы моделирования структуры и свойств дисперсно-наполненных реактопластов, а также проектирования конструктивно-технологических параметров технических средств для формования полимерных композитов.

Ключевые слова: моделирование, геометрия, структура, фрактал, дисперсный наполнитель, полимер, композит, реактопласт, термопласт.

Постановка проблемы. В предыдущем сообщении [1] были рассмотрены некоторые подходы к геометрическому моделированию структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных полимерных композиционных материалов (ПКМ). В то же время практически не были затронуты вопросы моделирования (описания) структуры полимерной матрицы как ненаполненной, так и наполненной дисперсными наполнителями. Также не были отражены подходы к проектированию конструктивно-технологических параметров технических средств формования полимерных композитов с учетом геометрии формируемых изделий.

Заметим, что класс ПКМ не ограничиваются вышеуказанным типом макронаполнителей полимерной матрицы. В соответствии с законами развития природы и диалектики, а также в результате глубокого проникновения исследователей в наномир, постоянно появляются новые типы армирующего наполнителя, в том числе гибридные. Так, например, последние три десятилетия ознаменовались появлением «прорывных» дисперсных углеродных наполнителей наноразмерного

уровня (прежде всего, это фуллерены, углеродные нанотрубки, астралены, кристаллиты, графен, аэрогели графена и другое). Широкое применение этих наполнителей в промышленном масштабе позволяет ожидать появления новых устройств и технологий с «выдающимися» функциональными свойствами, которые по некоторым характеристикам в несколько раз превосходят свойства «традиционных» ПКМ, армированных макроволоконными.

Например, к подобным ПКМ относят: теплоизоляционные (в том числе вспененные и сотовые); электропроводные; электроизоляционные; коррозионностойкие; трещиностойкие; токопроводящие; фрикционные; антифрикционные; гидрофобные; сорбционные; дугостойкие; огнестойкие; бронезащитные; интеллектуальные с сенсорами и актюаторами [2] и другие.

Поэтому актуальным является моделирование структуры и свойств дисперсно-наполненных реактопластов, в первую очередь, наноразмерного уровня. Не менее важным является разработка подходов к проектированию параметров технологии и оборудования для формования ПКМ с учетом геометрии формируемых изделий.

Вышеуказанные аспекты нашли краткое отражение в настоящей статье.

Целью статьи является краткий аналитический обзор различных аспектов геометрического моделирования технических объектов и процессов формирования полимерных композитов как наполненных, так и не наполненных, включая моделирование структуры молекулярных структур и дисперсно-наполненных реактопластов, а также проектирования конструктивно-технологических параметров технических средств для формирования полимерных композитов.

Изложение основного материала.

Подходы к описанию структуры высокомолекулярных веществ.

Как известно, ПКМ состоят из полимерной матрицы, синтезированной на основе высокомолекулярных веществ, а полимер – это высокомолекулярное соединение, состоящее из мономерных звеньев [3]. Причем число мономерных звеньев в полимере (так называемая степень полимеризации) должно быть достаточно велико. А молекулярная масса полимеров составляет величину от нескольких тысяч до нескольких миллионов.

Полимеры характеризуются диверсификацией существующих форм макромолекул, среди которых: линейные, разветвлённые (частный случай – звездообразные), ленточные, плоские, гребнеобразные, полимерные сетки и так далее [4]. Исходя из вышеописанного, становится понятным, почему структура полимеров не может быть описана с помощью единого универсального подхода. Согласно [4], для описания подобных структур условно выделяют четыре структурных уровня: молекулярные; топологические; супрамолекулярные, которые строятся самопроизвольно из комплементарных, то есть имеющих геометрическое и химическое соответствие фрагментов; дисперсионно-коллоидные. Эти уровни, впрочем, являются взаимосвязанными. Очевидно, что вследствие существующего различия между этими уровнями для описания каждого из них необходим индивидуальный подход и описательный «язык».

Так, например, молекулярные структуры низкомолекулярных веществ адекватно описываются в виде химических структур и натуральных формул, то есть только мономерные единицы макромолекул могут быть описаны классическими химическими формулами. В случае высокомолекулярных структур ситуация становится менее детерминированной, что обусловлено *статистической (стохастической) природой* результатов

полимеризации высокомолекулярных веществ. Это означает, что одни и те же исходные реагенты после полимеризации превращаются в продукты, которые отличаются своей конечной молекулярной структурой.

Мономерные единицы разных типов могут быть по-разному распределены в полимерной цепи [4]. То есть они по-разному чередуются, а также образуют последовательности цепей разной длины. Поэтому в результате комбинации макромолекул из одних и тех же исходных реагентов на выходе образуются различные молекулярные структуры. Поэтому для детерминации образуемых молекулярных структур полимера, помимо стандартных химических формул, необходимы более сложные конструкции для количественного описания образуемых последовательностей различных типов мономерных единиц.

Ситуация усложняется при использовании олигомеров (например, эпоксидных) в качестве реагентов, которые принимают участие в построении полимерной цепи. Известно, что синтетические олигомеры характеризуются молекулярной неоднородностью, а также существует их распределение по длинам (так называемое молекулярно-массовое распределение) и распределение по функциональным группам (так называемое распределение функционального типа) [4]. Вышеуказанное, в свою очередь, создает дополнительную неопределенность при детерминации молекулярной структуры образующегося полимера.

Таким образом, вследствие вышеупомянутых типов неоднородностей целесообразно разделить структуру полимера на молекулярном уровне на два нижних подуровня. В качестве последних различают молекулярную структуру мономерной единицы и молекулярную структуру полимерной цепи. При этом классическая взаимосвязь «структура – свойства» используется при описании используемых экспериментальных методов, характеризующих *топологическую структуру* рассматриваемых полимеров [4].

Моделирование структуры дисперсно-наполненных реактопластичных полимерных композитов.

Вышеуказанное моделирование необходимо, прежде всего, для полимерного материаловедения. При решении этой задачи перспективным направлением является привлечение аппарата *фрактальной геометрии* [5]. В частности, для ПКМ с дисперсными наполнителями наноразмерного уровня, которые инкорпорируются в жидкую полимерную матрицу, эффективным является

использование принципов комбинированного *фрактально-кластерного подхода*. В рамках реализации системного подхода можно отметить, что фрактальная структура полимерного нанокомпозита одновременно обладает двумя свойствами – динамичностью и информативностью. Она также может обеспечивать синергетическое взаимодействие тандема «структура – свойства» такого материала [6].

В статье [7] структура дисперсно-наполненного ПКМ рассматривается как сочетание двух фракталов (мультифракталов) в виде каркаса частиц дисперсного наполнителя (как макро-, микро-, так и наноразмерного уровня) и полимерной матрицы. Принято, что взаимодействие этих двух фракталов сводится к так называемому «возмущению» структуры полимерной матрицы посредством введения в нее каркаса частиц дисперсного наполнителя. В данном случае под «возмущением» структуры полимерной матрицы подразумевают снижение в ней *степени локального порядка*, величина которой для аморфного состояния полимеров [8] предопределяет совокупность конечных технологических и физико-механических свойств полимерной матрицы.

Такой подход обеспечивает моделирование дисперсно-наполненных ПКМ нового поколения. Такие ПКМ содержат в своей структуре различные (в том числе комбинированные) наноразмерные наполнители (фазы). Последние образуют кластеры, которые, в свою очередь, взаимосвязаны с фрактальной структурой основной полимерной фазы [9]. Это создает предпосылки для моделирования структуры затвердевших блок-полимеров, в частности, эпоксидных олигомеров (ЭО) горячего отверждения, с использованием кластерной физической модели аморфного тела и методов *фрактального анализа* [7]. Причем используемые модели и методы взаимно дополняют друг друга, а их отдельное использование не приносит желаемого синергетического результата.

Следует, однако, отметить, что применение фрактального анализа по отношению к структуре аморфных (полимерных) тел дает только общие представления об их структуре. В отличие от фрактального анализа, *кластерная модель* конкретизирует особенности структуры аморфных тел согласно подходов, используемых в физике полимеров. В таком случае вышеуказанное понятие «возмущения» полимерной матрицы при введении в нее дисперсных частиц наполнителя может быть конкретизировано. Например, в виде изменения показателя фрактальной размерности

D затвердевшего дисперсно-наполненного композита [10].

В таком случае изменение величины фрактальной размерности D наполненного композита свидетельствует об изменении как его структурной организации, включая вариацию его эксплуатационных свойств, так и о состоянии (в том числе объемном распределении) дисперсного наполнителя. Так, например, анализ зависимостей эксплуатационных (физико-механических) свойств таких материалов от их фрактальной размерности подтвердил применимость к таким нанокомпозитам *принципа мультипликативности* [7].

Из положений теории фрактальной геометрии [5] известно, что частицы дисперсного наполнителя, вводимого в жидкую полимерную матрицу, формируют после отверждения последней объемный каркас. Этот каркас также характеризуется фрактальными (в общем случае мультифрактальными [7]) свойствами. В таком случае образованный каркас можно охарактеризовать показателем *фрактальной размерности*. И структура затвердевшей полимерной матрицы также может быть охарактеризована своей размерностью. Поэтому для экспериментально определенной фрактальной размерности D дисперсно-наполненного затвердевшего композита существует соотношение, связывающее две вышеуказанные размерности (каркаса из дисперсных наполнителей и полимерной матрицы).

В анализируемой кластерной модели аморфного тела, которую репрезентует структура моделируемого дисперсно-наполненного композита, модель рассматривается как набор областей локального порядка (кластеров). Последние погружены в неплотноупакованную (например, оптимальное содержание углеродных нанонаполнителей в полимерной матрице не превышает нескольких процентов, а в общем случае, не превышает даже нескольких десятых процента, то есть является «гомеопатической дозой» [11]) полимерную матрицу.

В такой кластерной модели кластеры представляют собой наборы нескольких коллинеарных плотноупакованных сегментов различных макромолекул. Это является аморфным аналогом кристаллитов с вытянутыми цепями. Относительная доля сегментов различных макромолекул во всей структуре композита является параметром ее *порядка*. При этом величины размерности структуры полимерной матрицы и относительной доли плотноупакованных сегментов различных макромолекул во всей структуре также связаны между собой известным соотношением [7].

Также следует особо отметить характерную особенность структуры полимерных нанокомпозитов. В процессе инкорпорирования нанонаполнителей в жидкую полимерную матрицу образуются крупные агрегаты (или агломераты) частиц наполнителя вследствие его физико-химической природы, в частности, Ван-дер-Ваальсовского взаимодействия. После затвердевания композита эти агрегаты (агломераты) частиц являются концентраторами напряжений, то есть центрами зарождения и дальнейшего распространения трещин в композите при его нагружении.

В связи с этим в адекватных кластерных моделях наполненных полимеров необходимо учитывать изменение такого геометрического параметра, как максимального *эквивалентного радиуса* агрегатов частиц одного размера [7]. Отмечается эффективность применения низкочастотного ультразвука (УЗ) для деагломерации таких частиц [11, 12]. Другие аспекты формования реактопластов, в том числе с использованием УЗ, приведены в [13, 14].

Проектирование технических средств формования реактопластов.

Структурно-параметрическое геометрическое моделирование.

В последнее время в среде геометров начало активно развиваться научное направление, известное под названием «методология *структурно-параметрического геометрического моделирования* (СПГМ)». Последняя базируется на применении средств компьютерной техники, что является важным элементом прикладной геометрии и инженерной графики [15]. Использование указанной методологии позволяет при относительно небольших временных затратах получать достаточно точные математические зависимости, которые описывают варианты взаимосвязи между параметрами и характеристиками проектируемых технических объектов и систем.

Так, в частности, применение методологии СПГМ распространяется на сложные геометрические объекты. Среди последних можно выделить различные компоненты и оборудование (инструмент) для машиностроения, а также технологические процессы их изготовления и такое прочее. В рамках СПГМ предпочтительным является применение *системного подхода*. Последний предусматривает представление моделируемого объекта или процесса его формообразования как определенной упорядоченной совокупности некоторых отдельных составляющих компонентов. Они, в свою очередь, могут включать в себя другие составляющие элементы.

Практическое применение рассматриваемой методологии включает принципы комплексного подхода, вариантности, оптимальности, а также принцип открытости и развития, который предусматривает возможность обновления и расширения составляющих компонентов СПГМ [15]. Исходя из базового принципа системного подхода, который предусматривает анализ исследуемого объекта одновременно и как множества определенных взаимосвязанных между собой элементов, и как потенциального компонента высшего иерархического уровня, представляется целесообразным расчленить исследуемую схему объекта на детерминированные укрупненные блоки.

Например, с применением методологии СПГМ может быть спроектировано ультразвуковое (УЗ) дозирующее устройство с прямоугольной излучающей пластиной, которое обеспечивает точный дозированный нанос в структуре тканого полимерного композита [16].

В дальнейшем анализируются только вычлененные укрупненные (базовые) блоки и составляющие их структурные элементы, а также взаимосвязи между ними, в рамках проведения процедуры *синтеза*. Причем исследование всего технологического процесса получения ПКМ (как классических, так и наномодифицированных) и реализующего его оборудования является исключительно сложной задачей, которая до сих пор не решена.

Проектирование технических средств формования термопластов.

Применение методов геометрического моделирования при проектировании технических средств формования термопластов будет рассмотрено на двух характерных примерах. В первом из них рассматривалась процедура реализации обратной задачи геометрического моделирования при проектировании экструзионных головок червячно-дискового (шнекового) экструдера, используемых для формования профильных изделий из полимерных термопластичных материалов [17].

Целью такого моделирования является определение оптимальной формы канала формирующей головки. Это, в оптимальном случае, приведет к сбалансированному расходу полимера на выходе из формирующей головки и к получению необходимого профиля изделия. В модельных расчетах учитывались эффекты, связанные с изменением формы и размеров профиля изделия после его выхода из экструзионной головки. Полимер рассматривался как вязкоупругая жидкость, а для описания зависимости скорости сдвига от вязкости перерабатываемого материала применялась модель вязкости Берд-Карро.

Возможность изменения формы формующего канала с использованием алгоритма оптимизации позволяет проводить расчет геометрии формирующих каналов головок по наперед заданным размерам экструдированных изделий [18]. В разработанном подходе геометрия формующего канала экструзионной головки определяется путем решения обратной задачи моделирования. При этом целевой профиль задается как форма экструдата в направлении течения полимера. Формализация решаемой задачи заключается в определении необходимой геометрии формующего канала головки на выходе. Оптимальная геометрия «обеспечивает» выравнивание скоростей полимерного расплава в области свободной поверхности, а также заданную геометрию сечения полимерного профиля [19].

Для применения оптимизирующего алгоритма начальная ограниченная задача преобразуется так, что она может быть решена как серия неограниченных задач. Основной подход заключается в сведении к минимуму псевдо-целевой функции (1) геометрии целевого профиля:

$$\Phi(X) = F(X) + f(X), \quad (1)$$

где $\Phi(X)$ – псевдо-целевая функция геометрии целевого профиля; $F(X)$ – постоянные геометри-

ческие параметры; $f(X)$ – штрафная функция отклонения геометрии профиля от наперед заданного профиля; X – набор геометрических параметров формующего канала согласно (2):

$$X = \{x^k\}. \quad (2)$$

Для вычисления «обратной задачи экструзии» реализован алгоритм Флетчера-Ривса (ФР), который применяется при детерминации геометрии формующего канала экструзионной головки для обеспечения необходимой формы экструдированного профиля.

Собственно, стратегия оптимизирующего метода ФР [20] состоит в построении последовательности точек, $k = 0, 1, 2, \dots$, таких, что выполняется условие $f(x^{k+1}) < f(x^k)$, $k = 0, 1, 2, \dots$. Реализация алгоритма ФР проводилась для полимерного изделия, которое представляет собой L-образный однокамерный полый профиль с внешними размерами 15 мм x 30 мм и с внутренним ребром толщиной 1,5 мм (см. рис. 1, а).

Вариация геометрической формы и конструктивных параметров канала с использованием алгоритма оптимизации позволяет проводить расчет геометрии формирующих каналов экструзионных головок по заданным размерам термопластичных экструдированных изделий. Результаты

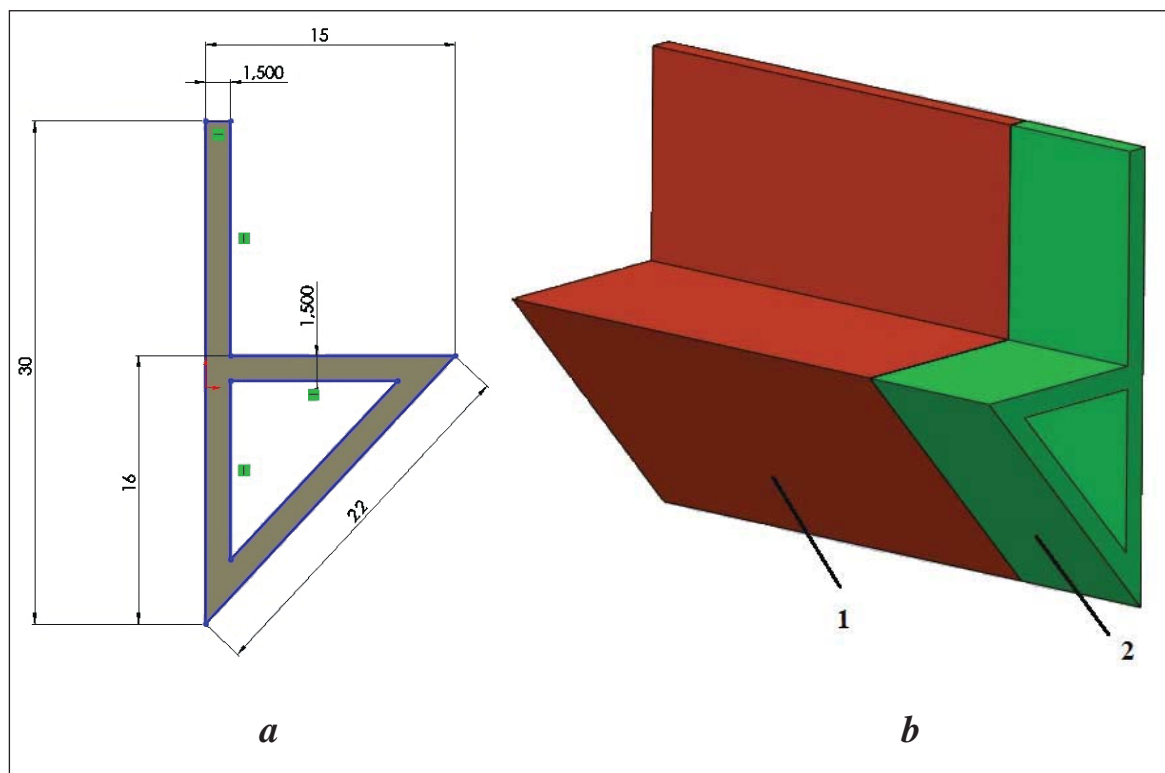


Рис. 1. Расчетная модель формирования изделия [17]: а – натурные размеры сечения экструдированного профиля; б – схема разбивки на участки формующего канала экструзионной головки и вытекающего из нее экструдата (1 – экструдированный профиль; 2 – формующий канал)

проведенных исследований позволяют получать аналитические зависимости и рассчитывать наиболее целесообразные конструктивные параметры экструзионных головок, а также выбрать оптимальные технологические параметры процесса получения изделий, в том числе сложной формы, как из существующих, так и из новых полимерных композиций.

Еще одним характерным примером эффективности применения геометрического моделирования для технических объектов и процессов является моделирование конструктивно-технологических параметров процесса экструзионно-выдувного формования термопластов [21]. При моделировании использовалось предположение, что экструдированная заготовка для получения на ее основе выдувного изделия представляет собой тонкостенную оболочку из расплавленного полимерного материала, которая имеет пренебрежимо малую жесткость. В стенке модельной полимерной оболочечной заготовки выделялось кольцо высотой dz на вертикальной координате z (рис. 2).

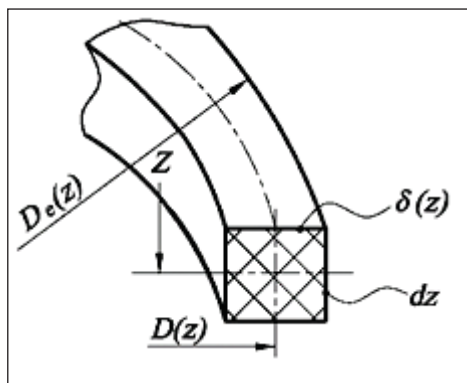


Рис. 2. Геометрия рассматриваемого участка моделируемой полимерной заготовки [21]: $\delta(z)$ – толщина стенки полимерной заготовки; $D_e(z)$ – наружный диаметр заготовки; $D(z) = D_e(z) - \delta(z)$ – срединный диаметр заготовки

При моделировании считалось, что под действием внутреннего избыточного давления p полимерная заготовка подвергается деформациям растяжения. В то же время деформации в направлении оси OZ ограничены конструкцией пресс-формы для экструзионно-выдувного формования и не принимались во внимание. Таким образом, считалось, что растяжение полимерной заготовки происходит в тангенциальном направлении. Этот процесс сопровождается увеличением наружного диаметра $D_e(z)$ и соответствующим уменьшением толщины стенки полимерной заготовки $\delta(z)$.

В результате были получены аналитические зависимости, связывающие геометрические пара-

метры (диаметр, толщина стенки) формуемой полимерной заготовки и параметры конечного сформированного изделия, с технологическими параметрами процесса экструзионно-выдувного формования полимерного изделия [21]. В качестве последних использовались: скорость тангенциальной вытяжки полимерной заготовки, динамическая вязкость расплава полимера, внутреннее давление раздувания, коэффициент тангенциальной вытяжки, а также время формования.

Были приведены иллюстрации моделирования различных технологических режимов. Основные вычисления проводились для режимов внутреннего давления раздувания от 1 кПа до 3 кПа для полимерной заготовки из полиэтилена высокой плотности при температуре 200°C с эффективной динамической вязкостью $8300 \text{ Па}\cdot\text{с}$, средним диаметром полимерной заготовки $0,05 \text{ м}$ и толщиной ее стенки $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Расчетно-экспериментальным путем было показано, что процесс раздувания полимерной заготовки имеет две характерные стадии. Первая стадия характеризуется умеренными режимами деформирования и ограничивается коэффициентом тангенциальной вытяжки $k = 2,5$. Вторая стадия носит интенсивный характер деформирования, что может привести к дефектам отформованного изделия.

Показано, что одним из путей предотвращения возникновения дефектов отформованного изделия является уменьшение внутреннего давления раздувания полимерной заготовки. При этом основным фактором, ограничивающим скорость раздувания полимерной заготовки вследствие повышения внутреннего давления раздувания, является максимальный габаритный диаметр отформованного полимерного изделия.

Выводы. Обоснована целесообразность и показана эффективность применения геометрического моделирования при проектировании конструктивно-технологических параметров технических средств для формования термопластичных и реактопластичных композитов. Показано, что для различных объектов целесообразно использование соответствующих методов геометрического моделирования. В частности, моделирование структуры полимерной матрицы как высокомолекулярного вещества предусматривает привлечение аппарата топологии, а для моделирования структуры дисперсно-наполненных композитов целесообразно применение аппарата фрактальной геометрии. В то же время для моделирования технологического цикла формования композитов эффективно применение методологии структурно-параметрического геометрического

моделирования. Указанная методология позволяет на стадии конструкторско-технологического проектирования создать единый и сквозной автоматизированный процесс разработки технологии и технологического инструмента с привлечением различных дисциплин.

Моделирование конструктивно-технологических параметров формования термопластов также имеет свою специфику. Разработанная для конкретных случаев методика позволяет решить обратную задачу процесса экструзионного формования непрерывных изделий на базе реализации алгоритма оптимизации Флетчера-Ривса. Это позволяет при известных свойствах перерабатываемого термопластичного материала и геометрических параметрах получаемого экструзией полимерного изделия спроектировать необходимую

конфигурацию экструзионной головки. А результатом моделирования конструктивно-технологических параметров процесса экструзионно-выдувного формования термопластов являются аналитические зависимости, связывающие геометрические параметры (диаметр, толщина стенки) формуемой полимерной заготовки и параметры конечного сформованного изделия с технологическими параметрами процесса экструзионно-выдувного формования полимерного изделия.

При этом сочетание применяемых структурного и параметрического подходов обеспечивает наглядное воспроизведение состава моделируемого объекта, высокоэффективное компьютерное варьирование многих его параметров и характеристик, а также возможность проведения его комплексной оптимизации.

Список литературы:

1. Колосова Е. П., Ванін В. В., Колосов А. Е. Некоторые аспекты геометрического моделирования технических объектов и процессов формования полимерных композитов. 1. Моделирование структуры ориентированных макроволоконистых композитов. Вчені записки Таврійського нац. університету імені В.І. Вернадського. Сер.: Технічні науки. 2018. Т. 29 (68). № 3. С. 1–7.
2. Сівецький В. І., Колосов О. Є., Сокольський О. Л., Івіцький І. І. Технології і устаткування для формування виробів з традиційних та інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів: монографія. К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2017. 120 с.
3. Берлин Ал. Ал., Вольфсон С. А., Ошмян В. Г., Ениколопов Н. С. Принципы создания композиционных полимерных материалов: монография. М.: Химия, 1990. 240 с.
4. Irzhak V. I., Solov'ev M. E., Irzhak T. F. Architecture of Polymers: Topological Structure–Properties Relationship. Review Journal of Chemistry. 2018. Vol. 8, No. 1. P. 76–182. DOI: 10.1134/S2079978018010028
5. Федер Е. Фракталы: монография. М.: Мир, 1991. 254 с.
6. Ананьева Е. С., Ананьев М. И., Маркин В. Б., Ишков А. В., Новоженев В. А., Новоженев А. В., Ларионова И.С.. Модификация эпоксидианового реактопласта горячего отверждения наноматериалами различной природы. Известия Алтайского государственного университета. 2012. 3(1)75. С. 155–159. <http://izvestia.asu.ru/2012/3-1/chem/01.ru.html>
7. Козлов Г. В., Микитаев А. К. Новый подход к фрактальным размерностям структуры полимерных дисперсно-наполненных композитов. Механика композитных материалов и конструкций. 1996. Т. 2. № 3–4. С. 144–157.
8. Sanditov D.S., Kozlov G.V., Belousov V.N., Lipatov Yu.S. The model of fluctuation free volume and cluster model of amorphous polymers. Ukrainian Polymer Journal. 1992. Vol. 1. No. 3–4. P. 241–258.
9. Ролдугин В. И. Фрактальные структуры в материаловедении. Материаловедение. 2005. № 4. С. 22–29.
10. Новиков В. У., Козлов Г. В. Фрактальная механика наполненных полимеров. Пластические массы. 2005. № 2. С. 21–27.
11. Колосов О. Є. Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: монографія. К.: ВПІ ВПК «Політехніка», 2015. 227 с.
12. Колосов О. Є., Сівецький В. І., Колосова О. П. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: монографія. К.: ВПК «Політехніка», 2015. 295 с.
13. Колосова О. П., Ванін В. В., Вірченко Г. А., Колосов О. Є. Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волоконистих матеріалів: монографія. К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. 164 с.
14. Колосова О. П., Ванін В. В., Колосов О. Є., Сівецький В. І. Моделювання процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних матеріалів: монографія. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 235 с.
15. Kolosov A. E., Virchenko G. A., Kolosova E. P., Virchenko G. I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. Chem. and Petrol. Eng. 2015. Vol. 51. Is. 7–8. P. 493–500. DOI: 10.1007/s10556-015-0075-3

16. Kolosov A.E., Sivetskii V.I., Kolosova E.P., Lugovskaya E.A. Procedure for analysis of ultrasonic cavitator with radiative plate. Chem. and Petrol. Eng. 2013. Vol. 48. Is. 11–12. P. 662–672. DOI: 10.1007/s10556-013-9677-9

17. Sokolskii A.L., Kovalenko K.G., Sivetskii V.I., Kolosova E.P. Realization of the reverse problem of geometrical modeling in designing of die heads for the production of polymer products. Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. 2018. No. 2. P. 109–114. URL: <http://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHHT/2018/2/Sokolskii.pdf>

18. Biba N., Stebunov S., Lishny A. 3D FEM Simulation system for optimization of profile extrusion. Quantor Form Ltd. 2004. P. 1–4.

19. Kovalenko K. G., Sivetskyi V. I., Sokolskyi O. L., Mikulonok I. O. Metodyka rozv'iazannia zvorotnoi zadachi ekstruziinoho formuvannia termoplastiv (in Ukrainian) [Method of extrusion molding of thermoplastics inverse problem solving]. Obrabotka materialov davlenyem: Sbornyk nauchnykh trudov. 2013. № 4(37). P. 177–183.

20. Al-Baali M. Descent Property and Global Convergence of the Fletcher-Reeves Method with Inexact Line Search. Journ. of Num. Analys. 1985. Vol. 5. P. 121–124.

21. Sidorov D. E., Kolosov A. E., Shabliy T. A., Kolosova E. P. Analysis of blown process for producing polymer products by extrusion blow molding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. No. 2/1 (92). P. 14–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126015

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ. 2. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ДИСПЕРСНО-НАПОВНЕНИХ РЕАКТОПЛАСТИВ, А ТАКОЖ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Проаналізовано різні аспекти геометричного моделювання технічних об'єктів і процесів формування ненаповнених і наповнених полімерних композитів. Детально розглянуто питання моделювання структури і властивостей дисперсно-наповнених реактопластів, а також проектування конструктивно-технологічних параметрів технічних засобів для формування термопластичних і реактопластичних полімерних композитів.

Ключові слова: моделювання, геометрія, структура, фрактал, дисперсний наповнювач, полімер, композит, реактопласт, термопласт.

SOME ASPECTS OF GEOMETRICAL MODELING OF TECHNICAL OBJECTS AND PROCESSES FOR FORMING POLYMER COMPOSITES. 2. MODELING OF THE STRUCTURE OF DISPERSE-FILLED THERMOSETS, AS WELL AS THE DESIGN OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR MOLDING POLYMER COMPOSITES

Various aspects of geometric modeling of technical objects and processes of molding of unfilled and filled polymer composites are analyzed. The problems of modeling the structure and properties of disperse-filled thermosetting plastics, as well as the design of structural and technological parameters of technical means for forming of thermoplastic and reactoplastic polymer composites, are considered in detail.

Key words: modeling, geometry, structure, fractal, disperse filler, polymer, composite, thermoset, thermoplastic.