



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)
УДК 677.071.252.4

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.031

EDN: MUQYBS

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУЗИИ И ОРИЕНТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МУЛЬТИФИЛАМЕНТНЫХ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ НИТЕЙ

Данил Дементьевич Ефрюшин¹, Александр Анатольевич Беушев²

^{1, 2} ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул, Россия

¹ dsibh@mail.ru

² baa7@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0233-3805>

Аннотация. В статье представлено комплексное исследование процесса производства мультифиламентной полностью ориентированной полипропиленовой нити и установление взаимосвязи между технологическими параметрами, формируемой надмолекулярной структурой и конечными эксплуатационными свойствами материала. Подробно рассмотрены три ключевых этапа технологического процесса: экструзия расплава, ориентационная вытяжка и пневмоспутывание. Показано, что уже на стадии экструзии и формования через фильтры под действием напряжений сдвига происходит первичное ориентирование макромолекул и формирование элементов дальнего порядка, которое фиксируется в шахте охлаждения. Последующая ориентационная вытяжка при повышенной температуре приводит к дальнейшему упорядочению структуры, рекристаллизации и значительному повышению прочности элементарных филаментов. Обоснован выбор литьевой марки полипропилена PP H270 GP/1 с высоким показателем текучести расплава, что обусловлено требованиями процесса экструзии и влиянием молекулярно-массовых характеристик на структурообразование. Сформирована многоуровневая структурная модель готового продукта, объясняющая его высокую удельную прочность, стойкость к истиранию, химическую инертность и гидробионность. Делается вывод, что целенаправленное управление параметрами каждого технологического передела позволяет получать материал с заданным комплексом свойств.

Ключевые слова: мультифиламентная полипропиленовая нить, ориентационная вытяжка, экструзия, надмолекулярная структура, изотактический полипропилен, филамент, пневмоспутывание, рекристаллизация.

Для цитирования: Ефрюшин Д. Д., Беушев А. А. Влияние параметров экструзии и ориентационной вытяжки на формирование надмолекулярной структуры и свойств мультифиламентных полипропиленовых нитей // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 185–188. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.031. EDN: <https://elibrary.ru/MUQYBS>.

Original article

INFLUENCE OF EXTRUSION PARAMETERS AND ORIENTATIONAL STRETCHING ON FORMATION OF SUPRAMOLECULAR STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYPROPYLENE MULTIFILAMENT YARN

Danil D. Efryushin¹, Aleksandr A. Beushev²

^{1, 2} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ dsibh@mail.ru

² baa7@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0233-3805>

Abstract. The paper presents a comprehensive study of the production process of fully oriented polypropylene multifilament yarn. It declares the relationship between process parameters, the resulting supramolecular structure, and the final performance properties of the material. Three key stages of the technological process are considered in detail: melt extrusion, orientation stretching, and pneumatic entangling. It is shown that already during the extrusion and spinning stages, the primary orientation of macromolecules and the formation of long-range order elements occurs under the influence of shear stress, which is fixed in the cooling well. Subsequent orientation stretching at elevated temperatures leads to further structural ordering, recrystallization, and a significant increase in the strength of the elementary filaments. The choice of PP H270 GP/1 injection-molded polypropylene grade with a high melt flow index is justified, driven by the

© Ефрюшин Д. Д., Беушев А. А., 2025

requirements of the extrusion process and the influence of molecular weight characteristics on structure formation. A multi-level structural model of the final product is presented, explaining its high specific strength, abrasion resistance, chemical inertness, and hydrophobicity. It is concluded that targeted control of the parameters of each technological stage allows to obtain the production of a material with a specified set of properties.

Keywords: polypropylene multifilament yarn, orientation stretching, extrusion, supramolecular structure, isotactic polypropylene, filament, pneumatic entangling, recrystallization.

For citation: Efryushin, D. D. & Beushev, A.A. (2025). Influence of extrusion parameters and orientational stretching on formation of supramolecular structure and properties of multifilament polypro-pylene yarn. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 185-188. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.031. EDN: <https://elibrary.ru/MUQYBS>.

ВВЕДЕНИЕ

Мультифиламентная полностью ориентированная полипропиленовая нить – это синтетическая нить на основе изотактического полипропилена, изготовленная из множества тонких волокон (филаментов), которые скручиваются вместе, образуя прочную и гибкую структуру. Этот материал отличается высокой прочностью, стойкостью к истиранию и влаге, а также эластичностью, что делает его идеальным для производства канатов, шпагатов, строп, тканых лент и других изделий, требующих устойчивости к внешним воздействиям и износу.

Нить состоит из множества тонких нитей (филаментов), скрученных вместе, что обеспечивает её высокую прочность, обладает высокими разрывными показателями относительно своего веса и толщины; устойчива к воздействию щелочей, кислот и других химических реагентов; не впитывает воду и другие жидкости, что предотвращает гниение и сохраняет прочность; благодаря эластичности и гибкости выдерживает многократные изгибы и трение; не выделяет вредных веществ, безопасна для здоровья.

Таким образом, мультифиламентная полностью ориентированная полипропиленовая нить представляет собой высокотехнологичный продукт, чьи эксплуатационные свойства напрямую связаны параметрами технологического процесса её изготовления. Актуальность настоящего исследования заключается в исследовании процесса экструзии, вытяжки и термостабилизации для целенаправленного управления надмолекулярной структурой и, как следствие, получением материала с заданным комплексом механических и эксплуатационных характеристик.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для производства мультифиламентной полностью ориентированной полипропиленовой нити требуется специализированное оборудование, например, экструзионная линия модели Austrofil HT 4x2E/75.

Процесс производства нити состоит из следующих взаимосвязанных операций. Полипропиленовое сырье автоматически всасывается с нижнего уровня в бункер дозирующего устройства. Добавки (в частности, суперконцентраты или мастербатчи) добавляются отдельно в бункер дозирующего устройства, которое вносит их в соответствующей пропорции к полипропиленовому сырью. Сырье через дозирующее устройство попадает в зону загрузки экструдера.

Далее сырье в нагреваемом цилиндре экструдера подвергается плавлению, переходя в вязкотекучее состояние. В зонах нагрева и зонах охлаждения цилиндра экструдера находятся керамические нагреватели и воздуховоды охлаждения.

В материальном цилиндре экструдера шнеком происходит гомогенизация (повышение степени однородности) расплава. Далее шнеком расплав подается через фильтр к формирующему устройству.

Формующее устройство состоит из 4-х насосов, каждый из которых подает расплав на два формующих пакета с фильтрами. Итого образуется 8 потоков.

Единичные филаменты формируются в фильерах и проходят через шахту системы охлаждения воздухом, где охлаждаются с помощью регулируемого потока воздуха, поступающего из теплообменника.

После шахты охлаждения единичные филаменты соединяются в определенное количество мультифиламентных нитей (8 штук), которые проходят через узлы нанесения замасливателя.

После нанесения замасливателя мультифиламентные нити разводятся влево и вправо от машины с помощью приводных галтелей и направляются в модули растяжения.

Нити проводятся с помощью направляющих роликов через блок обрезки и всасывания, который автоматически активируется детектором нити в случае ее обрыва, и попадают на первые две пары галтелей с индукционным нагревом и отдельными приводами.

Далее мультифиламентная нить попадает в камеру с горячим воздухом, где нить в течение определенного времени прогревается циркулирующим там горячим воздухом, и филаменты становятся готовы к следующему процессу вытяжки.

После процесса вытяжки мультифиламентная нить проходит через звукоизолированные сопла перепутывания системы перепутывания, необходимые для создания спаек (узлов) на ните.

Далее после узла перепутывания, мультифиламентная нить проводится через детектор нити, который автоматически активирует блок обрезки и всасывания в случае обрыва нити, к автоматическим поворотным намотчикам.

Намоточное устройство может наматывать одновременно 2 бобины.

После намотки бобины, происходит автоматический поворот турали намотчика на 180° и начинается намотка новой бобины. Готовая бобина снимается с намоточного вала оператором.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

Изучив технологический процесс, можно принципиально выделить 3 основных этапа формирования мультифиламентной полностью ориентированной полипропиленовой нити, каждый из которых формирует особую структуру: экструзия расплава, ориентационная вытяжка, пневмоспутывание.

Важно отметить, что качестве исходного сырья используется не экструзионная марка изотактического полипропилена, а литьевая с высоким показателем текучести расплава РР H270 GP/1. Это необходимо не только для поддержания параметров экструзии, но и во многом определяет свойства будущей нити с точки зрения структуры полимера. Ключевой параметр для данной марки полипропилена ПТР = 27 г/10 мин находится в обратной зависимости со средней

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСТРУЗИИ И ОРИЕНТАЦИОННОЙ ВЫТЯЖКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ НАДМОЛЕКУЛЯРНОЙ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ МУЛЬТИФИЛАМЕНТНЫХ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ НИТЕЙ

молекулярной массой: чем выше ПТР, тем ниже средняя молекулярная масса полимера.

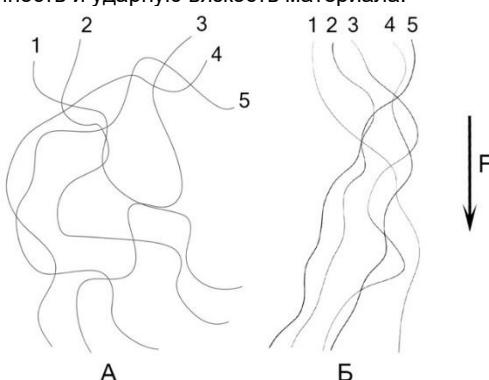
Для изотактического полипропилена РР Н270 GP/1 общего назначения можно дать приблизительную оценку: среднечисловая молекулярная масса (M_n) для такого полимера обычно находится в диапазоне ~ 40000 - 60000 г/моль; среднемассовая молекулярная масса (M_w) — в диапазоне ~ 180000 - 250000 г/моль.

Широкое молекулярно-массовое распределение (высокое отношение M_w/M_n) является характерной особенностью таких "литьевых" марок, так как оно улучшает текучесть расплава.

В процессе экструзии расплав полипропилена гомогенизируется, проходит через систему фильтров для очистки расплава от посторонних включений, а затем поступает на формование при помощи фильтерного комплекта. Макромолекулы полипропилена в расплаве представляют собой совокупность хаотично сплетенных молекулярных клубков, в которых отсутствует дальний порядок — определенный порядок между макромолекулами [1-5].

Проходя через отверстия в фильтерах, макромолекулы полипропилена ориентируются по направлению действия напряжений, создаваемых парой шнек-материальный цилиндр экструдера и насосов, проходят через формующую головку (фильтеру) и принимают форму сечения, заданного отверстием фильтера.

В процессе экструзии макромолекулярные клубки полипропилена начинают вытягиваться в отверстиях фильтеров под действием напряжений, создаваемых шнеком экструдера, при этом возникают области дальнего порядка, т.е. клубки макромолекул стремятся расположиться параллельно друг другу, происходит упорядочивание, возникают области дальнего порядка (кристаллические области - ламеллы), связанные проходными цепями (аморфными областями), которые сохраняются при выходе расплава из формующего отверстия (рис. 1) и обеспечивают высокую прочность и ударную вязкость материала.



А – неупорядоченная структура полимера в расплаве;
Б – упорядочивание структуры полимера с возникновением элементов дальнего порядка под воздействием внешней приложенной силы

Рисунок 1 – Схематическое изображение структуры полипропилена в расплаве и при формировании

Figure 1 – Schematic representation of the polypropylene structure in the melt and during molding

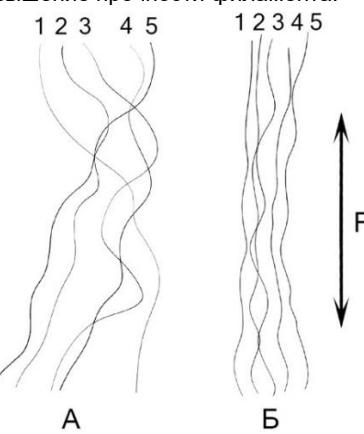
Поскольку макромолекулы обладают собственной упругостью, на выходе из формующего отверстия в расплаве происходит частичная релаксация потока, что сопровождается утолщением филамента, т.е. макромолекулярные клубки частично пытаются вернуться

в исходную неупорядоченную форму [1]. На выходе из единичного отверстия фильтеры получается полипропиленовый единичный филамент толщиной 15,5 мкм, чья частично упорядоченная структура фиксируется, проходя через шахту охлаждения.

В ходе дальнейших операций (вытягивание, пневмоспутывание) каждый единичный филамент не приобретает каких-либо новых физико-механических свойств, а происходит улучшение уже имеющихся, приобретенных на стадии формования: прочность и устойчивость к многократным деформациям.

На стадии ориентационного вытягивания на каждый филамент в мультифиламентной нити действует повышенная температура и ориентирующая сила, и уже фиксированная на стадии формования структура филамента подвергается дополнительному ориентированию, в ходе которого неупорядоченные участки макромолекул частично подвергаются вытягиванию. Таким образом, на данном этапе происходит дополнительно ориентирование макромолекул полипропилена, до этого сориентированных на стадии формования (рис. 2).

С точки зрения структуры полимерного материала протекают процессы рекристаллизации с повышением степени кристалличности, что существенно влияет на повышение прочности филамента.



А – частично упорядоченная структура полимера, фиксированная в шахте охлаждения;
Б – повышение степени упорядоченности макромолекул полимера в процессе ориентационной вытяжки

Рисунок 2 – Схематическое изображение структуры полипропилена при ориентировании

Figure 2 – Schematic representation of the polypropylene structure during orientation

Исходя из вышеуказанного следует отметить, что полностью ориентировать полимерные макромолекулы практически невозможно: это достижимо термодинамически (получить полностью ориентированные макромолекулы теоретически возможно), но не достижимо кинетически (для получения полностью ориентированных макромолекул требуется бесконечно большое время с охлаждением вблизи температуры плавления, что неосуществимо в условиях реального производства) [1].

Далее филаменты в мультифиламентной нити подвергаются пневмосоединению, проходя через звукоизолированные сопла перепутывания системы перепутывания, необходимые для создания спаек (узлов) на нити, что позволяет получить спутанный мультифиламент из единичных филаментов. При этом дополнительно повышается механическая прочность, так как

результатирующая прочность зависит от прочности единичных филаментов и их количества в готовой нити.

Таким образом, проведенное исследование позволяет утверждать, что формирование комплекса уникальных свойств мультифиламентной полностью ориентированной полипропиленовой нити представляет собой результат направленного многоуровневого структурообразования на последовательных стадиях технологического процесса.

Рассмотренный процесс устанавливает четкую взаимосвязь между технологическими параметрами производства, формируемой структурой на молекулярном и надмолекулярном уровнях и комплексом конечных физико-механических свойств нити.

ВЫВОДЫ

Таким образом мультифиламентная полностью ориентированная полипропиленовая нить – это высокоупорядоченная полимерная система, представляющая собой совокупность элементарных нитей (филаментов), состоящих из макромолекул полипропилена с высокой степенью изотактичности, сориентированных преимущественно вдоль оси нити и закрепленных в таком состоянии посредством термостабилизации.

Данный материал характеризуется многоуровневой структурой:

1 Макромолекулярный уровень: цепи изотактического полипропилена обладают стереорегулярностью, что позволяет формироваться областям с повышенной упорядоченностью;

2 Надмолекулярный уровень: в процессе ориентационной вытяжки формируется фибрillлярно-кристаллическая структура. Макромолекулы вытягиваются из первоначального клубкообразного состояния и складываются в упорядоченные кристаллические области (ламеллы), связанные проходными цепями (аморфными областями);

3 Микроуровень: отдельные элементарные филаменты, получаемые экструзией расплава через фильеры с последующей фиксацией структуры и дополнительной ориентационной вытяжкой;

4 Макроуровень: сама мультифиламентная нить, состоящая из множества элементарных нитей, соединенных между собой посредством пневмосплющивания.

Свойства конечного продукта формируются на трех критически важных этапах технологического процесса: экструзия расплава, ориентационная вытяжка, пневмосплющивание.

В результате описанных процессов нить приобретает комплекс свойств, выгодно отличающих её от мононити и нетканых материалов из полипропилена:

- Высокие прочностные характеристики при малой линейной плотности;
- Низкая плотность (0,90–0,91 г/см³), что обеспечивает высокую удельную прочность;
- Высокая стойкость к истиранию и многократным деформациям;
- Химическая инертность к действию кислот, щелочей, органических растворителей;
- Гидрофобность и отсутствие капиллярного эффекта;

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.

- Биологическая инертность.

Исходя из вышеуказанного, мультифиламентная ориентированная полипропиленовая нить представляет собой высокотехнологичный продукт, чьи эксплуатационные свойства напрямую связаны со структурой исходного полимера и параметрами технологического процесса её изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулезnev В. Н., Шершнев В. А. Химия и физика полимеров: Учеб. для хим.-технол. вузов. М.: Высш. шк., 1988. 312 с.
2. Иржак, В. И. Структура и свойства полимерных материалов // 3-е изд., стер. Санкт-Петербург : Лань, 2023. 168 с.
3. Аржаков М. С. Химия и физика полимеров. Краткий словарь : учебное пособие // Санкт-Петербург : Лань, 2020. 344 с.
4. Сутягин В.М., Бондалетова Л.И. С 90 Химия и физика полимеров: Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. 208 с.
5. Дорожкин В.П., Галимова Е.М. Д 69 Химия и физика полимеров : учебное пособие // 2-е изд. Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013. 240 с.

Информация об авторах

Д. Д. Ефрюшин – к.х.н., доцент кафедры ХТ АлтГТУ.

А. А. Беушев – к.х.н., доцент кафедры ХТ АлтГТУ.

REFERENCES

1. Kuleznev, V. N. & Shershnev, V. A. (1988). Chemistry and Physics of Polymers: Textbook for Chemical-Technological Universities. Moscow: Vysshaya shkola, 312 p. (In Russ.).
2. Irzhak, V. I. (2023). Structure and Properties of Polymeric Materials. 3rd ed., ster. Saint Petersburg : Lan, 168 p. (In Russ.).
3. Arzhakov, M. S. (2020). Chemistry and Physics of Polymers. A Concise Dictionary: Textbook. Saint Petersburg : Lan, 344 p. (In Russ.).
4. Sutyagin, V.M., Bondaletova, L.I. (2003). Chemistry and Physics of Polymers: Textbook. Tomsk: TPU Publishing House, 208 p. (In Russ.).
5. Dorozhkin, V.P., Galimova, E.M. (2013). Chemistry and Physics of Polymers: Textbook. 2nd ed. Nizhnekamsk : Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (a branch of) KNRTU, 240 p. (In Russ.).

Information about the authors

D. D. Efryushin – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of "Chemical Technology", Polzunov Altai State Technical University.

A. A. Beushev – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor of the Department of "Chemical Technology", Polzunov Altai State Technical University.