

УДК 14.11

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_112

**ТВЕРДОФАЗНАЯ ПРОКАТКА РЕАКТОРНОГО ПОРОШКА
СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
С ПОСЛЕДУЮЩИМ ОРИЕНТАЦИОННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

**SOLID-PHASE ROLLING OF REACTOR POWDER OF ULTRAHIGH
MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE WITH SUBSEQUENT ORIENTATION
HARDENING**

*М.М. Цыганков¹, Т.Д. Шидловский¹, Ю.М. Бойко¹, Л.П. Мясникова¹, В.Ф. Дроботько²,
С.А. Терехов², А.П. Борзенко², И.М. Макмак², О.С. Новак³*

*M.M. Tsygankov, T.D. Shidlovskii, Yu.M. Boiko, L.P. Miasnikova, V.F. Drobotko, S.A. Terekhov,
A.P. Borzenko, I.M. Makmak, O.S. Novak*

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе,

² Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, ³ НПО Спецматериалов

В статье рассмотрен метод переработки реакторных порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена в высокопрочные высокомодульные волокна и пленки. Описаны комплексные исследования механических свойств прокатанных тонких лент из реакторных порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена с последующей многоступенчатой зонной ориентационной вытяжкой. Установлено влияние изменения средней скорости деформации при прокате на модуль упругости и предел прочности на разрыв. Образцы были исследованы методом рентгеноструктурного анализа, что позволило установить тип структуры прокатанных пленок на финальных стадиях. Произведен поиск оптимальных режимов прокатки спеченных порошков для получения прекурсоров, обеспечивающих достижение предельных ориентационных удлинений и получение, соответственно, высокопрочного полимерного материала.

Ключевые слова: реакторные порошки сверхвысокомолекулярного полиэтилена, СВМПЭ, метод прокатки, упрочнение, метод многостадийной зонной ориентационной вытяжки.

The article discusses a method for processing ultra-high-molecular-weight polyethylene reactor powders into high-strength, high-modulus fibers and films. Comprehensive studies of the mechanical properties of rolled thin tapes made of ultra-high-molecular-weight polyethylene reactor powders with subsequent multi-stage zone orientation extraction are described. The effect of changes in the average rate of deformation during rolling on the modulus of elasticity and tensile strength has been established. The samples were examined by X-ray diffraction analysis, which made it possible to determine the type of structure of the rolled films at the final stages. A search has been made for optimal rolling modes of sintered powders to obtain precursors that ensure the achievement of maximum orientational elongations and, accordingly, obtain a high-strength polymer material.

Keywords: ultra-heavy-molecular-weight polyethylene reactor powders, UHMWPE, rolling method, hardening, multistage zone orientation extraction method.

Введение

В 2023 году в АО «НПО Спецматериалов» впервые в России было открыто производство нетканого баллистического полотна из нити сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) под торговой маркой «РУССИЛ». СВМПЭ «РУССИЛ» успешно применяется для производства гибких [1] и жестких защитных элементов, тыльных слоев многослойных композитных броневых структур, в средствах индивидуального [2] и коллективного бронирования [3]. Нить СВМПЭ производится методом переработки реакторных порошков (РП). Для повышения защитных и эксплуатационных характеристик [4] изделий из СВМПЭ «РУССИЛ» необходимо развивать технологии как производства непосредственно баллистического полотна [5], так и технологии производства его компонентов.

В настоящее время интенсивно развивается твердофазный («сухой») метод переработки РП СВМПЭ в высокопрочные высокомодульные волокна и пленки [6, 7], альтернативный дорогостоящему и экологически небезопасному методу гель-технологии (прядение малоконцентрированного 3–5 % раствора СВМПЭ в полярных растворителях, кристаллизация полимера из состояния геля и последующее упрочнение путем ориентационной вытяжки) [8].

Твердотельная прокатка полимеров с последующим деформационным упрочнением позволяет осуществить непрерывный процесс производства ориентированных высокомодульных пленок, пленочных нитей и лент непосредственно из продуктов синтеза полимеров, т.н. реакторных порошков. Детальные исследования структурных изменений в ориентированных прокатанных и отожженных пленках полиэтилена низкой плотности со структурой монокристалла были проведены еще в 60–70-х годах прошлого века в работах А. Келлера и др. [9].

Основная часть

На начальных этапах растяжения были выявлены различные моды деформации, такие как внутри- и межламеллярное скольжение, наклоны цепей, определены критические напряжения сдвига для действующих мод деформации в данных температурно-временных условиях дефор-

мирования. При сжатии наблюдалось скольжение по различным кристаллографическим плоскостям, двойникование, мартенситный переход и переход из орторомбической в моноклинную решетку. Обзор этих работ дан в главе III монографии В.А. Марихина, Л.П. Мясниковой «Наномолекулярная структура полимеров» [10]. При дальнейшем растяжении происходит твердофазный переход кристаллов со складчатыми цепями (КСЦ) в ламелях в кристаллы с выпрямленными цепями (КВЦ) в образующихся фибрillах [10].

Во время прокатки при входжении полимера в узкое пространство между валками происходит резкое уменьшение толщины материала, сопровождающееся преимущественным выстраиванием молекулярных цепей вдоль направления прокатки, что приводит к увеличению прочности материала в этом направлении, в то время как в поперечном направлении молекулярные цепи ориентируются очень незначительно [11]. Причем молекулы линейных полимеров, таких, как полиэтилен (ПЭ) [10], полиоксиметилен (ПОМ) [12] и полиэтилентерефталат (ПЭТФ) [11] могут почти идеально выстраиваться в направлении прокатки.

Метод прокатки обладает еще и тем преимуществом, что подавляет образование пор, часто возникающих при обычной ориентационной вытяжке за счет образования микрошвейк, предваряющих образование макрошвейки. Оказалось, что образование этих пор можно подавить в процессе прокатки за счет сжимающей составляющей при односторонней прокатке в канале, образованном по окружности одного вала другим валком, имеющим толщину, соответствующую ширине канала [13], по типу шип-паза.

В работе [14] такая же конструкция использовалась при исследовании возможностей твердофазной переработки разных РП СВМПЭ непрерывным способом и влияния температуры валков на деформационно-прочностные свойства прокатанных лент. При сравнении степеней вытяжки прокатанных лент при растяжении на инстроне и при многоступенчатой ориентационной вытяжке, обнаружена существенная разница в величине достижимых степеней вытяжки, которая объясняется не только существенным отличием в скорости деформирования, но и разной деформируемостью РП с разной морфологией.

Механизм прокатки кристаллических полимеров был подробно описан в [15] на основании сравнительного исследования структуры поверхностей прокатываемых образцов, прилегающих к валкам и послойного исследования объема по толщине, методом Фурье-ИК спектроскопии. Была обнаружена заметная разница в молекулярной ориентации в объеме и на поверхности пленок, причем, если после первой прокатки молекулярная ориентация в середине прокатываемого образца вообще не наблюдалась, и только постепенно увеличивалась с увеличением степени прокатки, то даже при предельной прокатке разориентация «с»-осей в объеме оставалась чуть больше, чем на поверхности.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию структурно-деформационных процессов, происходящих при прокатке, представляется затруднительным сформулировать научно-обоснованный путь к получению прокатанного материала, оптимального для последующего деформационного упрочнения, поскольку все результаты получены на разных полимерах, при разных температурах, разных скоростях прокатки и при разных конструкционных характеристиках валцов.

Недавно начатые нами комплексные исследования механических свойств прокатанных тонких лент из реакторных порошков СВМПЭ с последующей многоступенчатой зонной ориентационной вытяжкой показали, что механические характеристики прокатанных образцов, упрочненных последующей ориентированной вытяжкой, существенно зависят от степени предварительной прокатки [16].

Важными параметрами процесса прокатки являются температура валков, средняя скорость деформации при прохождении валков (скорость вращения валков, диаметр валков), толщина исходной спеченной пленки, подвергаемой прокатке, и механические свойства полимера, т.н. прекурсора для деформационного упрочнения (ориентационной вытяжки) [17].

Целью настоящей работы был поиск оптимальных режимов прокатки спеченных порошков для получения прекурсоров, обеспечивающих достижение предельных ориентационных удлинений и получение, соответственно, высокопрочного материала. Как известно, не все РП СВМПЭ могут быть переработаны «сухим»

методом. Несмотря на многочисленные работы, посвященные поиску критериев пригодности РП СВМПЭ для твердофазной переработки, существуют многие разнообразные оценки, начиная от низкой плотности молекулярных зацеплений, низкой насыпной плотности, высокой степени кристалличности, высокой температуры плавления, высокой энталпии плавления и, заканчивая типом морфологии порошка [6]. Для проведения работы был выбран РП СВМПЭ, синтезированный на металлоценовом катализаторе Ф-97, поскольку, как было показано в [18], он хорошо спекается и ориентируется.

Исследования проводили на реакторном порошке СВМПЭ-5230, синтезированном в лабораторных условиях в Институте высокомолекулярных соединений РАН (г. Санкт-Петербург) путем сусpenзионной полимеризации в толуоле на одноцентровом металлоценовом катализаторе Ф-97 при температуре 30 °C. Молекулярная масса порошка $M_w = 4 \times 10^6$ г/моль, насыпная плотность 0,056 г/см³.

Образцы для прокатки толщиной около 0,35 мм готовили путем холодного компактирования РП с последующим спеканием при 130 °C при давлении 100 МПа в течение 30 минут в пресс-форме прямоугольной формы (9×50 мм) с открытыми торцами.

Прокатку спеченных прекурсоров осуществляли в валковом прессе специальной конструкции, изготовленном в Донецком физико-техническом институте им. А.А. Галкина и описанном в [16]. Валки выполнены в форме типа шип-паз [19, 21]. Процесс включает в себя прокатку материала внутри канала, сформированного по окружности одного валка другим валком, имеющим толщину, соответствующую ширине канала в первом валке. Второй валок выполняет функцию пуансона, а стенки сторон канала на первом валке составляют боковые ограничения, как в пресс-форме канала. На начальном этапе процесса прокатки наблюдается упругое восстановление деформированных СВМПЭ лент. Всегда на выходе после валков толщина ленты оказывается на 8–39 % больше размера зазора между валками. Для выравнивания толщин, каждую ленту приходилось прокатывать между валками 5–7 раз при одном и том же зазоре. Коэффициент вытяжки валками $\lambda_{\text{пп}}$ оценивали как отношение исходной толщины образца h_0 к толщине прока-

танного образца h : $\lambda_{\text{пр}} = h_0 / h$. Толщина образцов уменьшалась вследствие их удлинения, а ширина практически не изменялась.

Для получения максимального значения степени вытяжки валками λ прокатку многократно повторяли в одном и том же направлении с уменьшением размера зазора после каждого прохода не более 20 % от исходной толщины образца.

Прокатку осуществляли при температуре валков 124 °C со скоростью 30 и 300 см/мин в несколько стадий с последовательно уменьшающимся зазором между валками (от 200 до 50 мкм). Эта температура была выбрана на основании анализа термограмм спеченных порошков по отклонению хода термограммы от базовой линии.

Кроме того, прокатку спеченных пленок проводили и при более низких температурах: 85 °C и 116 °C. Среднюю скорость деформации при прокатке рассчитывали по формуле Целикова

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v_1}{l} \frac{(h_0 - h)}{h_0}, \quad l = \sqrt{\left(\frac{D}{2} (h_0 - h) \right)},$$

где v_1 — скорость вращения валков, (м/с);

h_0 — толщина ленты до прокатки, (м);

h — толщина ленты после прокатки, (м);

D — диаметр рабочего валка, (м),

l — горизонтальная проекция дуги захвата, м.

Тестирование на растяжение прокатанных лент проводилось согласно ГОСТ 14236–81 на двусторонних лопаточках с размерами рабочей части 30×7 мм и толщиной образцов $d = 0,130\text{--}0,140$ мм с помощью машины испытания пластмасс 2167 Р-50 со скоростью 5 мм/мин ($\dot{\varepsilon} = 0,0028 \text{ c}^{-1}$) до разрыва.

Для последующей ориентационной многостадийной вытяжки прокатанные пленки нарезались на полоски вдоль направления прокатки шириной 1 мм. Вытяжка проводилась на локальном (ножевом) нагревателе с длиной контактной зоны около 1 мм. Схема проведения ориентационной вытяжки на локальном нагревателе приведена на рис. 1.

Ориентируемый образец 3, закрепленный в зажимах 2, подается мотором 1 к локальному нагревателю 4 и перемещается по нему под действием груза 5. Процедура повторяется несколько раз с изменением груза или температуры.

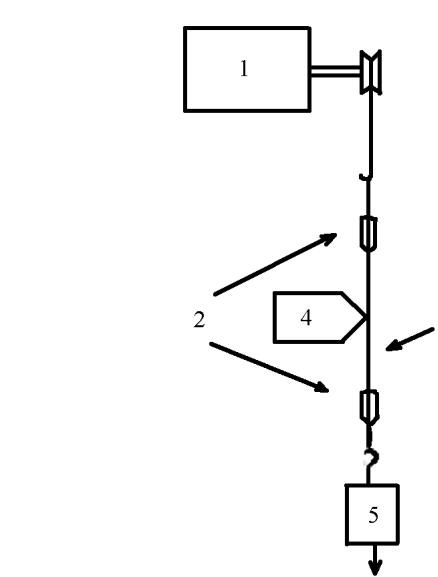


Рис. 1. Схема ориентационной вытяжки

Ориентационная вытяжка представляет собой конкуренцию двух процессов [21].

1. Упрочнения за счет выстраивания молекулярных цепей вдоль направления ориентации и разупрочнения из-за разрывов перенапряженных молекул по термофлуктуационному механизму, согласно формуле Журкова:

$$t = t_0 \exp(U_0 - \sigma\gamma) / KT,$$

где t — время жизни материала под нагрузкой;

t_0 — период колебаний атомов относительно положения равновесия, равный 10^{-13} с;

U_0 — прочность связи;

σ — напряжение;

γ — структурно-чувствительный фактор;

K — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Ориентационную вытяжку останавливали при достижении какой-нибудь степени вытяжки ($\lambda_{\text{лок1}}, \lambda_{\text{лок2}}, \lambda_{\text{лок3}}$), и определяли прочность на разрыв образца, ориентированного до данной степени вытяжки на машине Shimadzu (Япония) при скорости раздвижения зажимов 10 см/мин. Многостадийная зонная ориентационная вытяжка проведена пока только для нескольких образцов.

Рентгеновские измерения проводились на дифрактометре ДРОН-3М в геометрии отражения

жения Брэгга–Брентано в Cu К α -излучении (0,15418 нм) при ускоряющем потенциале 30 кВ и токе трубки 20 мА. Параметр кристаллографической плоскостной ориентации (СРО) определяется как отношение между 200 и 110 площадями кристаллических пиков полного разложения экспериментальной WAXS кривой на кристаллические и аморфные компоненты.

Установлено, что модули упругости и пределы прочности на разрыв при прокатке уменьшаются с увеличением средней скорости деформации лент при трех различных постоянных температурах. Большие скорости деформации $\sim 22\text{--}36\text{ s}^{-1}$ приводят к появлению дефектов и уменьшению прочностных характеристик. Молекулы в складчатых кристаллитах ламелей должны разгибаться и выстраиваться в направлении прокатки, причем при большой скорости

прокатки многие молекулы будут рваться и прочность уменьшается, а при медленной прокатке разгибание и выстраивание молекул в одном направлении происходит эффективнее и прочность увеличивается.

Как видно из рис. 2, эффект увеличения скорости деформации аналогичен эффекту снижения температуры испытания.

Поскольку наилучшие деформационно-прочностные свойства демонстрировали пленки, прокатанные при 124 °C, то для последующей многостадийной зонной ориентационной вытяжки были выбраны пленки из образцов, параметры процесса прокатки которых представлены в табл. 1.

Как следует из табл. 1 достаточно тонкие пленки, пригодные для последующей ориентационной вытяжки на локальном нагревателе,

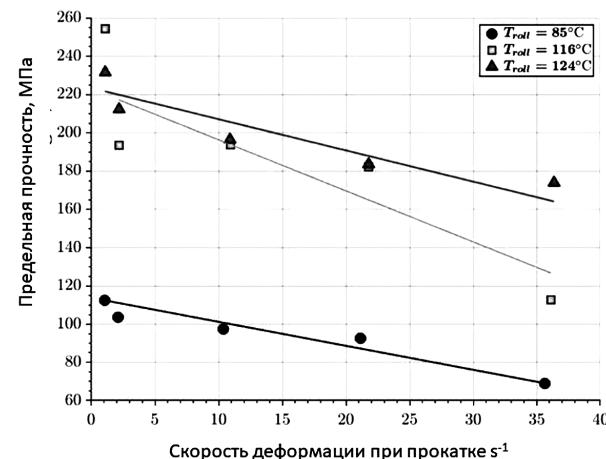
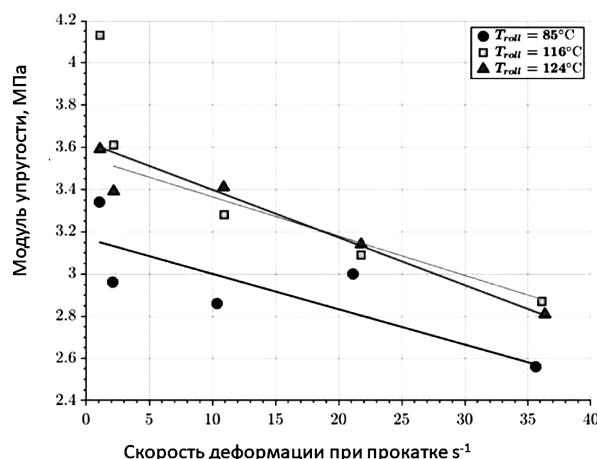


Рис. 2. Упругие модули и пределы прочности на разрыв как функции скорости деформации для спеченных лент СВМПЭ-5230 при трех различных температурах прокатки 85 °C, 116 °C и 124 °C

Таблица 1

Параметры процесса прокатки

| № обр. | Кол. цикл. | m , мг | $d_{\text{исх}}$, мкм | $d_{\text{мв}}$, мкм | $d_{\text{пп}}$, мкм | $T_{\text{пп}}$ | $V_{\text{пп}}$, см/мин | λ_d , $d_{\text{исх}} / d_{\text{пп}}$ | b , мм | L , мм | $\lambda_{\text{пп}}$ |
|--------|------------|----------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------|--|----------|----------|-----------------------|
| 41(3) | 3 | 150 | 350 | 100 | 118 | 124 | 30 | 2,97 | 9,5 | 145 | 2,9 |
| 41(4) | 4 | 150 | 350 | 50 | 50 | 124 | 30 | 7,0 | 9,6 | 240 | 4,8 |
| 42(2) | 2 | 150 | 350 | 200 | 200 | 124 | 300 | 1,42 | 9,4 | 82 | 1,64 |
| 42(3) | 3 | 150 | 350 | 100 | 105 | 124 | 300 | 3,43 | 9,5 | 165 | 3,3 |
| 42(4) | 4 | 150 | 350 | 50 | 60 | 124 | 300 | 5,92 | 9,6 | 250 | 5,0 |

m — величина навески РП;

$d_{\text{исх}}, d_{\text{пп}}$ — толщина исходной спеченной пленки до прокатки и после прокатки;

$d_{\text{мв}}$ — расстояние между валками; $T_{\text{пп}}$ — температура валков; $V_{\text{пп}}$ — скорость прокатки;

λ_d — уменьшение толщины пленки после прокатки;

b — ширина пленки; L — длина пленки; $\lambda_{\text{пп}}$ — степень вытяжки пленки по длине

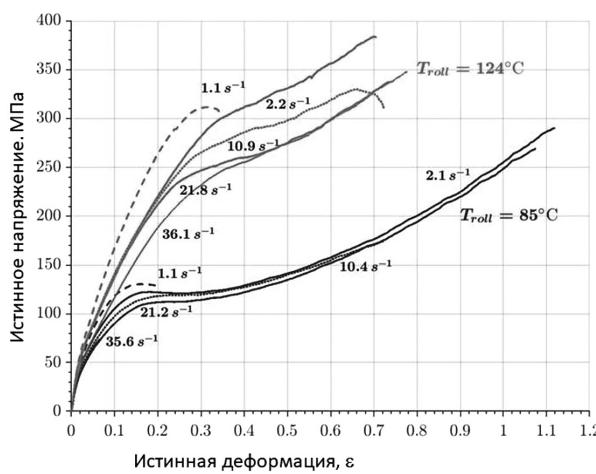


Рис. 3. Истинные кривые «напряжение-деформация» лент СВМПЭ-5230, прокатанных валками, при различных температурах и скоростях деформации

получаются после последовательных третьего (100 мкм) и четвертого (50 мкм) прохода между валками.

Рентгеноструктурный анализ в больших углах, проведенный на дифрактометре ДРОН-3М

в геометрии Брэгга-Брентано с фильтрованным никелем излучением Cu K α ($\lambda = 0,154$ нм), свидетельствует о формировании в прокатанных пленках на последних стадиях прокатки ярко выраженной плоскостной текстуры. Об этом можно судить по соотношению между интенсивностями и площадями рефлексов 110 и 200 в рентгенограммах, представленных на рис. 4, а, б, и в табл. 2.

Экспериментальные кривые были разложены на отдельные пики подгонкой профильных функций программой LIPRAS MATLAB [22]. Использовались профильные симметричные функции Гаусса, Пирсон-VII и псевдо-Фойгта. Подгонка осуществлялась при использовании алгоритмов Trust-Region-Reflective Least Squares и Левенberга-Марквардта. Качество подгонки и разложения оценивали коэффициентом детерминации R^2 и критерием согласия. Кроме интенсивных пиков орторомбической решетки 110 и 200 в рентгенограмме присутствует аморфное гало и пик от метастабильной моноклинной фазы, которая существует только под напряжением.

Таблица 2

Соотношения между интенсивностями и площадями рефлексов

| № образца | D_{110} , nm | D_{200} , nm | $FWHM_{110}$, degree | Peak Ratio, 200/110 | Peak Area Ratio, 200/110 | Mono, M ₀₀₁ , % | Ortho, % | Cryst, % | Amorph. % |
|-----------|----------------|----------------|-----------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|----------|----------|-----------|
| 42(2) | 18,0 | 16,7 | 0,470 0,505 | 1,52 | 1,370 | 29,07 0,199 | 70,93 | 83,54 | 16,46 |
| 42(3) | 15,7 | 15,2 | 0,530 0,548 | 1,53 | 1,336 | 37,08 0,195 | 62,92 | 78,68 | 21,32 |
| 42(4) | 14,7 | 15,8 | 0,565 0,534 | 2,06 | 1,546 | 36,09 0,254 | 63,91 | 84,46 | 15,54 |

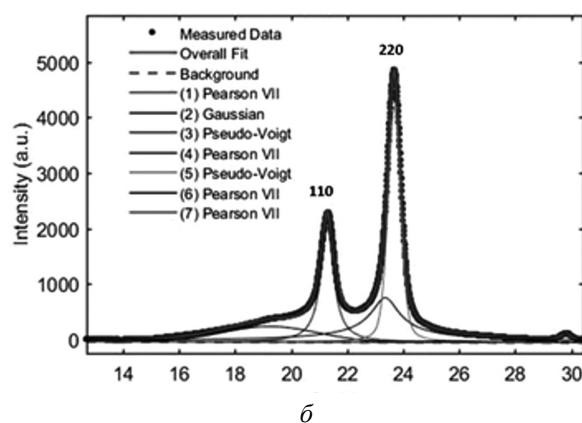
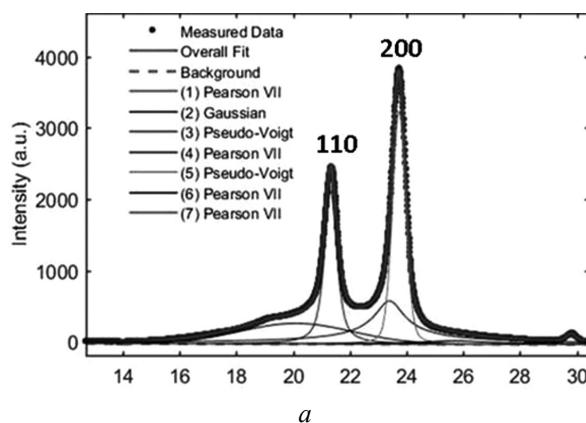


Рис. 4: а — Рентгенограмма прокатанной пленки СВМПЭ 5230 -42(3);
б — рентгенограмма пленки ВМПЭ 5230 -42(4)

Видно, что поперечные размеры кристаллитов D_{110} уменьшаются с каждым проходом, в то время как закономерности в изменении размеров кристаллитов в направлении, перпендикулярном кристаллографической плоскости 200, не наблюдается. В то же время, с увеличением числа проходов все заметнее становится развитие плоскостной текстуры прокатанных пленок, и больший вклад в рассеяние начинает вносить рассеяние от моноклинной кристаллической фазы, что свидетельствует о генерации микронапряжений, поскольку моноклинная фаза нестабильна и может существовать только под напряжением.

Для проведения деформационного упрочнения путем разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе метода многостадийной зонной ориентационной вытяжки были выбраны прокатанные образцы 42(3) и 42(4).

На рис. 5 показаны зависимости разрывной прочности прокатанных и упрочненных пленок от результирующей степени вытяжки $\lambda_{\text{общ}} = \lambda_{\text{пр}} \times \lambda_{\text{лок}}$.

Вопреки ожиданиям оказалось, что более прочные прекурсоры 42(4), прокатанные до более высоких степеней продольной вытяжки ($\lambda_{\text{пр}} = 5,0$), тянутся хуже, чем прекурсоры, полученные после третьего прохода валков (42(3), $\lambda_{\text{пр}} = 3,3$), и, соответственно демонстрируют худшие механические свойства в ориентированном состоянии. Причем, если при общей степени вытяжки $\lambda_{\text{общ}} = 20$ прочности образцов еще одинаковы, то при дальнейшей вытяжке прочность образца не только не возрастает, но даже немного уменьшается. В то же время, образец 42(3) после

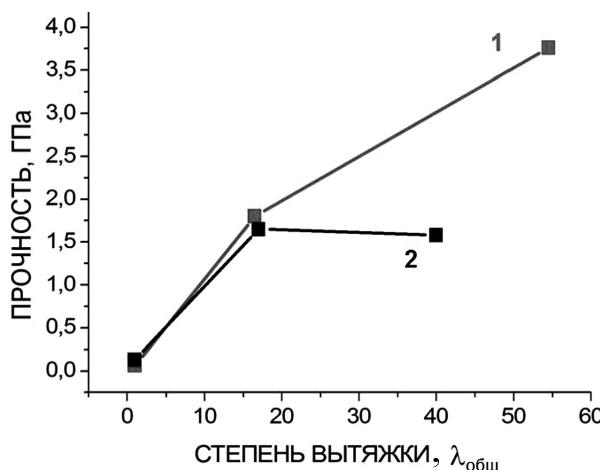


Рис. 5. Зависимости разрывной прочности от результирующей степени вытяжки

20-кратной общей вытяжки все еще сохраняет пластичность и эффективно упрочняется вплоть до 60-кратной вытяжки. Измерения прочности проводились не менее, чем на 8 образцах. Прочность ориентированных образцов, полученных и, прокатанных пленок 42(3), не уступает промышленным гель-волокнам Spectra и Dyneema.

Заключение

Можно сделать вывод, что во время 4-го прохода между валками, несмотря на существенное уплотнение фибрillярной структуры, которое обеспечивает повышенную прочность прекурсора, в нем генерируются микродефекты, которые «срабатывают» при дальнейшей ориентационной вытяжке. Баланс между упрочнением и разупрочнением, о котором говорилось выше, нарушается. Это предположение планируется в дальнейшем проверить, в частности, при помощи метода ИК-спектроскопии, проводя сравнительную оценку количества концевых групп в прекурсорах после 3-го и 4-го проходов между валками. В дальнейшем также планируется провести сравнительное деформационное упрочнение остальных пленок, прокатанных при температуре валков 124 °C и выше.

Список источников

1. Ризванова Е.А., Новак О.С., Сильников Н.М. Переработка волокнистых отходов из СВМПЭ иглопробивным способом для дальнейшего создания войлока // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2024. № 3–4 (189–190). С. 152–156.
2. Сильников Н.М., Новак О.С., Шифрина В.Ю. Повышение защитных характеристик специальных изделий за счет применения полимерной брони // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 7–8 (181–182). С. 122–128.
3. Сильников Н.М., Фомичев А.Б., Гук И.В. и др. Применение сверхвысокомолекулярного полиэтилена «РУССИЛ» для защиты корпусных конструкций судов в сборнике: новые технологии в судостроении НТС-2023; сб. тр. отраслевой научно-технической конференции. Санкт-Петербург, 2023. С. 141–146.

4. Silnikov N.M., Guk I.V., Mikhailin A.I. et al. Dynamical young's modulus and internal friction in ultra-high molecular weight polyethylene composites // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2022. Vol. 4. No 1. Pp. 14–20.
5. Сильников Н.М., Новак О.С., Карапин Г.А. Термомеханическое прессование полотна «РУССИЛ» // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2023. № 7–8 (181–182). С. 144–146.
6. Myansikova L.P., Boiko Yu.M., Egorov V.M. et al. Fine structure of UHMWPE reactor powder and its change in mechanical and thermal fields, Chapter 5. Pp. 93–153 in *Reactor Powder Morphology* ed. by P. Lemstra and L. Myasnikova Nova Sci. Publ., 2011.
7. Ozerin A.N., Ivanchev S.S., Chvalun S.N. et al. Properties of Oriented Film Tapes Prepared via Solid-State Processing of a Nascent Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene Reactor Powder Synthesized with a Postmetallocene Catalyst. *Polym.Sci., A*, 12, 950 (2012).
8. Smith P., Lemstra P.J. High-strength polyethylene fibres from solution and gel spinning. *Macromol. Chem.*, 1979. 180 p. 2983.
9. Keller A., Pope D.P. Identification of Structural Processes in deformation of Oriented Polyethylene J. Mater. Sci. 1971. Pp. 453–478.
10. Марихин В.А., Мясникова Л.П. Надмолекулярная структура полимеров, химия. Ленинград, 1977. 240 с.
11. Bahadur Sh. The Effect of Hot and Cold Rolling on the Properties of Poly(oxymethylene) // *Polymer Journal*, 1975. Vol. 7, No 6. Pp. 613–621.
12. Gezovich D.M. and Geil P.H. Deformation of polyoxymethylene by rolling J. Mater. Sci., 6, 509 (1971)
13. Morawiec J., Bartczak Z., Kazmierczak T., Galeski A. Rolling of polymeric materials with side constraints Materials Science and Engineering A317 (2001). Pp. 21–27.
14. Joo Y. L., Zhou H., Lee S.-G. et al. Solid-State Compaction and Drawing of Nascent Reactor Powders of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Journal of Applied Polymer Science, Vol. 98, (2005). Pp. 718–730.
15. Qiu J., Murata T., Wu X., Kudo M. et al. Plastic deformation mechanism of crystalline polymer materials during the rolling process J Mater Sci (2013) 48:1920–1931.
16. Дроботько В.Ф., Мясникова Л.П., Борзенко А.П. и др. Двухэтапный метод получения высокопрочных лент СВМПЭ путем твердофазного формования // Физика и техника высоких давлений 2023. Том 33, № 2. С. 86–100.
17. Дроботько В.Ф. Мясникова Л.П., Макмак И.М. и др. Влияние прокатки на структуру и механические свойства компактированных пленок из порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Материалы LXVI Международной конференции «Актуальные проблемы прочности» (АПП-2023). 23–27 сентября, Зеленогорск, Санкт-Петербург, Россия. С. 67.
18. Голубев Е.К., Куркин Т.С., Озерин А.Н. Высокопрочные пленочные нити, полученные твердофазной переработкой насцентных реакторных порошков сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Известия Академии наук. Серия химическая. 2023. Том 72, № 3. С. 749–762.
19. New Trends in Physical Science Research Vol. 3, Ch. 9, Discussion on: Structural Changes in UHMWPE Reactor Powders during Sintering under Different Conditions Pp. 89–99, (2022)
20. Bartczak Z. Influence of molecular parameters on high-strain deformation of polyethylene in the plane-strain compression. Part II. Strain recovery Polymer 46, 10339, P. 1033 (2005)
21. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Structural Basis of high-strength high-modulus polymers, Chapter 2 (Pp. 36–92) in the book Oriented Polymer Materials, ed. by S.Fakirov Huethig & Wepf Verlag Zug Heidelberg (1996), Pp. 512.
22. Esteves G., Ramos K., Fancher Ch. M., Jones J. L. LIPRAS: Line-Profile Analysis Software. (2017)

References

1. Rizvanova E.A., Novak O.S., Silnikov N.M. Needle-punched processing of fibrous waste from UHMWPE for further felt production // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2024. No 3–4 (189–190). Pp. 152–156.
2. Silnikov N.M., Novak O.S., Shifrina V.Yu. Improving the protective characteristics of special products through the use of polymer armor // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 7–8 (181–182). Pp. 122–128.

3. Silnikov N.M., Fomichev A.B., Guk I.V. et al. The use of ultra-high molecular weight polyethylene «RUSSIL» for the protection of hull structures of ships // In the collection: New technologies in shipbuilding NTS-2023. Proceedings of the industry scientific and technical conference. Saint-Petersburg, 2023. Pp. 141–146.
4. Silnikov N.M., Guk I.V., Mikhailin A.I. et al. Dynamical young's modulus and internal friction in ultra-high molecular weight polyethylene composites // Reviews on Advanced Materials and Technologies. 2022. Vol. 4. No 1. Pp. 14–20.
5. Silnikov N.M., Novak O.S., Karanin G.A. Thermomechanical pressing of the «RUSSIL» canvas // Issues of defense technology. Episode 16. Technical means of countering terrorism. 2023. No 7–8 (181–182). Pp. 144–146.
6. Myansikova L.P., Boiko Yu.M., Egorov V.M. et al. Fine structure of UHMWPE reactor powder and its change in mechanical and thermal fields, Chapter 5. Pp. 93–153 in Reactor Powder Morphology ed. by P. Lemstra and L. Myasnikova Nova Sci. Publ., 2011.
7. Ozerin A.N., Ivanchev S.S., Chvalun S.N. et al. Properties of Oriented Film Tapes Prepared via Solid-State Processing of a Nascent Ultrahigh-Molecular-Weight Polyethylene Reactor Powder Synthesized with a Postmetallocene Catalyst. Polym.Sci., A, 12, 950 (2012).
8. Smith P., Lemstra P.J. High-strength polyethylene fibres from solution and gel spinning. Macromol. Chem., 1979. 180 p. 2983.
9. Keller A., Pope D.P. Identification of Structural Processes in the deformation of Oriented Polyethylene J. Mater. Sci. 1971. Pp. 453–478.
10. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Supramolecular structure of polymers, chemistry. Lenin-grad, 1977. 240 p.
11. Bahadur Sh. The Effect of Hot and Cold Rolling on the Properties of Poly(oxymethylene) // Polymer Journal. 1975. Vol. 7. No 6. Pp. 613–621.
12. Gezovich D.M. and Geil P.H., Deformation of polyoxymethylene by rolling J. Mater. Sci., 6, 509 (1971).
13. Morawiec J., Bartczak Z., Kazmierczak T., Galeski A. Rolling of polymeric materials with side constraints Materials Science and Engineering. A317 (2001). Pp. 21–27.
14. Joo Y. L., Zhou H., Lee S.-G. et al. Solid-State Compaction and Drawing of Nascent Reactor Powders of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Journal of Applied Polymer Science, (2005). Vol. 98. Pp. 718–730.
15. Qiu J., Murata T., Wu X. et al. Plastic deformation mechanism of crystalline polymer materials during the rolling process J Mater Sci (2013) 48:1920–1931.
16. Drobotko V.F., Myasnikova L.P., Borzenko A.P. et al. A two-stage method for obtaining high-strength UHMWPE tapes by solid-phase molding // Physics and Technology of High Pressures. 2023. Vol. 33, No 2. Pp. 86–100.
17. Drobotko V.F., Myasnikova L.P., Makmak I.M. et al. The effect of rolling on the structure and mechanical properties of compacted films from ultrahigh molecular weight polyethylene powders // Proceedings of the LXVI International Conference «Actual Problems of Strength» (APP-2023), September 23–27, Zelenogorsk, St. Petersburg, Russia. P. 67.
18. Golubev E.K., Kurkin T.S., Ozerin A.N. High-strength film filaments obtained by solid-phase processing of bulk reactor powders of ultrahigh molecular weight polyethylene // Proceedings of the Academy of Sciences. The chemical series. 2023. Vol. 72, No 3. Pp. 749–762.
19. New Trends in Physical Science Research Vol. 3, Ch. 9, Discussion on: Structural Changes in UHMWPE Reactor Powders during Sintering under Different Conditions. Pp. 89–99. (2022).
20. Bartczak Z. Influence of molecular parameters on high-strain deformation of polyethylene in the plane-strain compression. Part II. Strain recovery Polymer 46, 10339. P. 1033 (2005).
21. Marikhin V.A., Myasnikova L.P. Structural Basis of high-strength high-modulus polymers, Chapter 2 (Pp. 36–92) in the book Oriented Polymer Materials, ed. by S. Fakirov Huethig & Wepf Verlag Zug Heidelberg (1996). 512 p.
22. Esteves G., Ramos K., Fancher Ch. M., Jones J. L. LIPRAS: Line-Profile Analysis Software. (2017).