

УДК 541.64 : 539.3

**А. В. Савицкий, Г. Н. Андреева, И. А. Горшкова,  
В. М. Поздняков, И. Л. Фролова**

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫТАЖКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОН ИЗ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Изучено влияние температуры, натяжения, условий сушки и стадийности вытяжки на прочность и модуль упругости  $E$  волокон из ПЭ с  $M=9 \cdot 10^5$  и  $2 \cdot 10^6$ , сформованных из растворов в декалине, парафине и керосине. Показано, что при концентрации ПЭ  $\sim 2\%$  путем трехстадийной вытяжки при температурах  $20-100$ ,  $130-135$  и  $148-150^\circ$  могут быть получены волокна с  $E=200-210$  ГПа. Значения прочности волокон возрастают с увеличением ММ от 5 до 7 ГПа.

В последние годы появились работы по получению высокопрочных и высокомодульных волокон путем формования из растворов высокомолекулярного ПЭ с последующей ориентационной вытяжкой [1-8]. Приведенные в этих и ряде других публикаций значения прочности  $\sigma$  и модуля упругости  $E$  различаются в несколько раз. Для выяснения причин указанных различий и возможности дальнейшего упрочнения волокон нами изучено влияние условий формования и вытяжки на  $\sigma$  и  $E$ .

Использовали ПЭ<sup>1</sup> с  $M=2 \cdot 10^6$  (ПЭ-1) и  $9 \cdot 10^5$  (ПЭ-2). В качестве антиоксиданта применяли фенол-2,2-метил-бис-(4-метил-6-тет-бутилфенол)-*n*-фенил-β-нафтиламин в количестве 1-5% от веса полимера (концентрация в растворе  $(0,5-10) \cdot 10^{-2}\%$ ). Растворы готовили непосредственно перед формированием. Порошок ПЭ перемешивали с растворителем при комнатной температуре в случае применения в качестве растворителей декалина и керосина или при  $60-70^\circ$  при использовании парафина, затем также при перемешивании систему нагревали до температуры  $T$ , необходимой для растворения ПЭ. Известно, что в процессе растворения ПЭ происходят разрывы макромолекул [9]. Измерения вязкости растворов в зависимости от условий приготовления показали, что степень деструкции увеличивается с повышением  $T$ , увеличением длительности растворения и интенсивности перемешивания, а также с повышением ММ.

Понижение ММ в результате деструкции может оказаться настолько значительным, что получение высокопрочных волокон окажется невозможным. В целях сохранения высокой ММ растворение проводили при возможно более низких  $T$  и неинтенсивном перемешивании в бескислородной среде. При охлаждении раствора до  $T \leq 90^\circ$  ПЭ выделяется в виде геля, занимающего весь объем сосуда даже при концентрации  $c \sim 0,5\%$ . Механические воздействия (давление, перемешивание) приводят к уплотнению геля и отделению растворителя. При перемешивании геля ПЭ собирается в комок, и последующее растворение ПЭ осуществить очень трудно, оно сопровождается уменьшением ММ. Поэтому при необходимости повторного растворения гель нагревали до  $130-140^\circ$  без каких-либо механических воздействий. После того, как ПЭ полностью растворился, раствор перемешивали. Отделение растворителя при механическом воздействии использовали для приготовления растворов с  $c \geq 5\%$ : готовили растворы с  $c = 0,3-1\%$ , охлаждали до комнатной температуры, прикладывали давление 0,1 МПа, доводя раствор до объема, соответствующего заданной концентрации.

Для формования волокна раствор продавливали через фильтру диаметром 0,5-2 и длиной 10-30 мм в холодную воду в случае использования в качестве растворителя декалина и керосина или в горячую — в случае парафина. Воздушный промежуток между концом фильтры и поверхностью ванны составлял 2-3 мм, путь волокна в ванне 25-30 см. Концентрация ПЭ в волокне, выходящем из ванны, увеличивалась по сравнению с концентрацией ПЭ в формируемом растворе лишь на 1-2%. Удаление растворителя из волокна осуществляли путем сушки в свободном

<sup>1</sup> Образцы были предоставлены Г. Д. Мясниковым (НПО «Пластполимер»).

или фиксированном состоянии или отмычки в ацетоне или октане. В ряде опытов вытяжку подвергали волокно непосредственно после выхода из ванны. Использование в качестве осадительных ванн ацетона, раствора ацетона в воде, октана, изо-октана, раствора декалина в ацетоне не позволило получить волокна лучшего качества, чем при формировании в воде.

При сушке на воздухе в свободном состоянии волокно получалось неоднородным по сечению: за счет веса волокна верхние участки вытягивались больше, чем нижние. Поэтому сушка волокна осуществлялась на поверхности воды. Во избежание склеивания волокон и приклеивания их к стенкам ванны сушку проводили в длинной ванне, а к концам волокна прикрепляли кусочки проволоки весом  $\sim 0,1$  г. Таким образом, получались прямые (нейскривленные) изотропные (нейстироидные) образцы однородного сечения. Фиксированная сушка волокон, находящихся в высокогластическом состоянии, приводила к возникновению ориентации макромолекул вдоль оси волокна, характеризующейся величиной двойного лучепреломления  $(2-3) \cdot 10^{-2}$ . Свойства волокон, высушенных в свободном или фиксированном состоянии, а также их поведение при вытяжке несколько различались.

Вытяжку волокон проводили на лабораторной установке, основным элементом которой является контактный термоградиентный нагреватель, в дальнейшем называемый «утюгом». Отрезок волокна закрепляли в зажимах и нагружали гирей, вес которой выбирали в соответствии с сечением волокна и заданным натяжением  $F$ . С помощью мотора волокно протягивалось по «утюгу» и наматывалось на катушку. Температуру вытяжки  $T_v$  определяли с помощью термопары, вмонтированной в «утюг». Градуировку термопары осуществляли по температурам плавления веществ, помещаемых на «утюг». Кратность вытяжки рассчитывали по отношению скоростей перемещения верхнего и нижнего зажимов:  $\lambda = v_b/v_n$ . Величину  $v_n$  выбирали в соответствии с диаметром волокна, размерами нагревателя и ожидаемой  $\lambda$  [10] и задавали скорость вращения мотора и диаметром катушки. Для определения  $v_n$  нижний зажим был соединен с контактом, передвигающимся по реохорду. На реохорд подавали напряжение  $\sim 0,1$  В от источника питания В5-43, перемещение контакта записывали как функцию времени самописцем ЛКС 4-003. Установка позволяла вытягивать образцы исходной длины от 10 см до 1 м и определять  $\lambda$  в интервале 1,05–100 с точностью 5–10%. Диаграмма перемещение нижнего зажима – время позволяла контролировать однородность вытяжки и в случае непостоянства сечения исходного волокна выбирать участки вытянутого волокна с одинаковой  $\lambda$ .

Для определения  $\sigma$  и  $E$  использовали испытательную машину ZT-10. При  $\sigma \geq 3$  ГПа измерение разрывных нагрузок представляло значительные трудности, так как волокна «выползали» из зажимов. Поэтому при испытании высокопрочных образцов использовали лабораторные разрывные машины, позволяющие охлаждать зажимы жидким азотом, а температуру средней части образца поддерживать равной комнатной. Контрольные измерения прочности капроновых моноволокон на лабораторных машинах с охлаждаемыми зажимами и на ZT-10 дали одинаковые результаты. Сечение образцов определяли двумя способами: по массе волокна определенной длины (плотность считали равной 1 г/см<sup>3</sup>) и путем одновременного измерения толщины и ширины с помощью лабораторного оптиметра-микроскопа. Сечения предельно ориентированных образцов составляли  $(10-20) \times (30-50)$  мкм<sup>2</sup> (иногда волокна были не круглыми в сечении).

Е определяли двумя способами: рассчитывали по кривым растяжения, записанным на ZT-10, или по скорости звука, измеренной импульсным методом на установке, смонтированной на основе генератора Г5-15 и запоминающего осциллографа С8-13. Звуковая волна в волокне создавалась П-образным импульсом, подаваемым от генератора на широкополосный пьезокерамический датчик, находящийся в контакте с волокном. Тем же импульсом запускали развертку осциллографа. На экране регистрировали импульсы, поступившие на находящиеся в контакте с волокном пьезокерамические приемники, первый из которых был расположен на расстоянии 10 мм от датчика, а второй устанавливался в зависимости от измеряемой скорости звука на расстоянии  $L=70-300$  мм от первого. Время прохождения импульса  $\Delta t$  определяли по расстоянию между фронтом первого и второго импульсов, величину скорости звука рассчитывали как  $L/\Delta t$ . Особенностью установки являлось использование резонансных приемников ультразвука; геометрические размеры датчиков подбирали в соответствии с частотой проходящего через волокно звука ( $\sim 1,5$  МГц). Это позволяло определять модуль упругости моноволокон диаметром до 10 мкм с точностью до 5%.

Согласно модели ориентационного упрочнения [3], для достижения высоких значений  $\sigma$  и  $E$  необходимо, во-первых, формирование исходной структуры полимера в виде однородной «редкой» сетки узлов молекулярных связей с плотностью узлов, достаточной для обеспечения связности макромолекул, и, во-вторых, максимально возможная ориентация полимерных цепей в условиях, исключающих деструкцию. В рамках этой модели объяснить низкие значения  $E$  [6] можно тем, что при получении образцов с не соответствовала ММ, сетка была слишком редкой, не обеспечивалась связность макромолекул. При вытяжке получали большие  $\lambda$ .

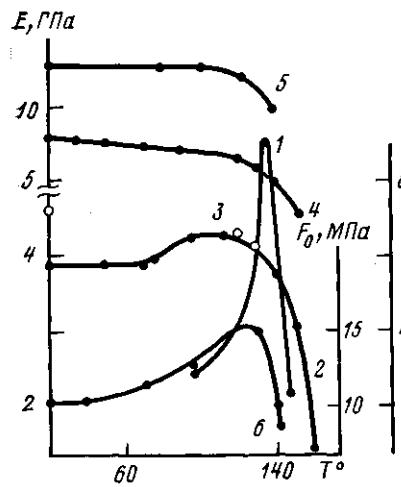


Рис. 1

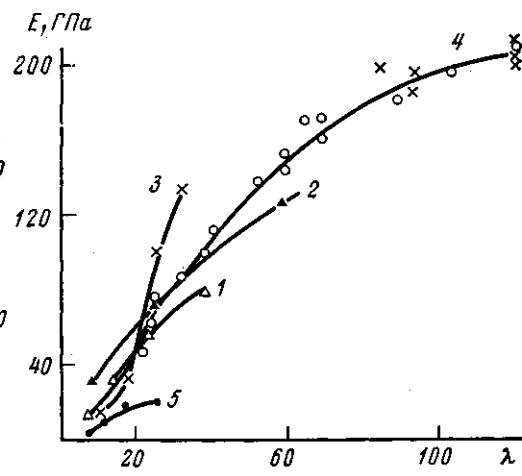


Рис. 2

Рис. 1. Зависимости степени вытяжки  $\lambda$  (1) от максимальной температуры «утюга», акустического модуля  $E$  (2–5) и напряжения  $F_0$ , начала ориентации (6) при комнатной температуре от температуры прогревания волокон, сформованных из растворов ПЭ с  $M=2 \cdot 10^6$ : 1, 2, 6 – изотропные образцы; 3–5 – ориентированные (3 – за счет сушки при фиксированной длине (светлые точки), 4 – вытянут в 29 раз при  $78^\circ$ , 5 – в 47 раз при  $124^\circ$ )

Рис. 2. Зависимости акустического модуля  $E$  от кратности вытяжки на «утюге» при максимальной его температуре  $60$  (1),  $80$  (2) и  $108^\circ$  (3) и двух- и трехстадийной вытяжке в оптимальных условиях (4) для волокон, не содержащих растворитель, и для волокна, содержащего 95% парафина (5) при  $108^\circ$

и малые  $E$  (значений  $\sigma$  в работе [6] не приводится). Зависимость предельно достижимых  $\lambda$  и  $\sigma$  от  $M$  и  $c$  обсуждали в работах [3] и [11]. Оптимальные значения  $c$  при формировании волокон из растворов высокомолекулярного ПЭ можно связать с  $M$  соотношением:  $c = (20-30) M^{-\frac{1}{4}}$ .

При изучении влияния температурно-силового режима вытяжки на  $E$  и  $\sigma$  было принято во внимание следующее: согласно [7], степень вытяжки сухих волокон, сформованных из растворов высокомолекулярного ПЭ, монотонно возрастает от 10 до 35 с повышением температуры вытяжки от  $70$  до  $140^\circ$ . Для волокон, содержащих растворитель, степень вытяжки в зависимости от температуры имеет максимум, составляя  $\sim 50$  при  $100-120^\circ$ ;  $E$  и  $\sigma$  возрастают с увеличением  $\lambda$  [2, 3]; замечательное свойство волокон из высокомолекулярного ПЭ давать высокие  $\lambda$  полностью утрачивается после прогревания волокна при  $T$ , близкой к  $T_{\text{пл}}$  [7].

Поэтому для нахождения оптимальной температуры вытяжки  $T_v$  были изучены зависимости  $\lambda$ ,  $E$  и  $\sigma$  от максимальной  $T$  «утюга»  $T_{\text{вм}}$ . Типичная зависимость  $\lambda$  от  $T$  показана на рис. 1. Для всех подобных зависимостей характерно резкое возрастание  $\lambda(\sigma)$  при приближении  $T_{\text{вм}}$  к  $T_{\text{пл}}$  и последующее падение  $\lambda(\sigma)$  при более высоких  $T$ . При оптимальной  $T_v$  значения  $\lambda$ ,  $\sigma$  и  $E$  монотонно возрастают с увеличением напряжения волокна  $F$  при вытяжке, так что их максимальные значения достигаются при  $F$ , близком к разрывной прочности волокна при  $T_v$ . Зависимости  $E$  от  $\lambda$  при разных  $T_v$  показаны на рис. 2, зависимости  $\sigma$  от  $\lambda$  при  $T_{\text{вм}}=130^\circ$  – на рис. 3. Эти данные представляют часть опытов по формированию и вытяжке, совокупность которых позволяет сделать вывод о том, что при одностадийной вытяжке максимальные значения  $\lambda$ ,  $\sigma$  и  $E$  могут быть достигнуты при  $T_{\text{вм}}$ , близкой к  $T_{\text{пл}}$  исходного полимера, и  $F$ , близком к разрывной прочности волокна при  $T_{\text{вм}}$ . При  $M=2 \cdot 10^6$ ,  $c=2\%$  вытяжка волокон, высушенных в свободном состоянии, позволяет при  $T_{\text{вм}}=130-140^\circ$  получить  $\lambda \approx 90$ ,  $E=150-160$  ГПа,  $\sigma=4-4,9$  ГПа.

При таких больших  $\lambda$  важным моментом для получения высокопрочных волокон является скорость охлаждения и нагревания образца на «утю-

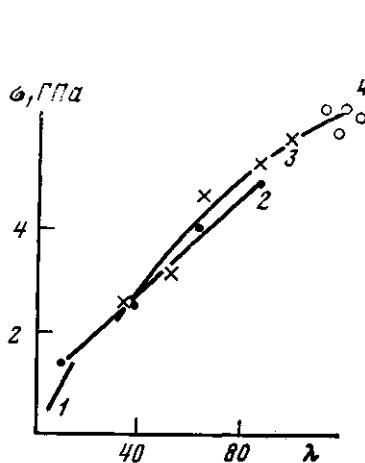


Рис. 3

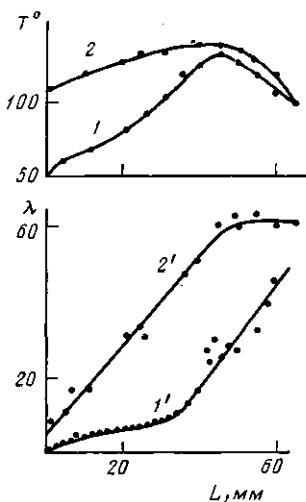


Рис. 4

Рис. 3. Зависимости прочности  $\sigma$  от кратности вытяжки  $\lambda$  для волокон, сформованных из расплава (1), и из 2%-ного раствора ПЭ-1 при одностадийной вытяжке (2), двухстадийной вытяжке (3) и трехстадийной вытяжке (4)

Рис. 4. Изменение температуры (1, 2) и кратности вытяжки (1' и 2') по длине «утюга» для двух различных нагревателей

те». Изменять ее можно, меняя температурный профиль «утюга». На рис. 4 показано, как изменяется  $\lambda$  по мере продвижения волокна по «утюгам» с различным профилем изменения температуры. При одностадийной вытяжке волокон на таких «утюгах» (диаметр волокна 0,1–0,5 мм) значения  $E$  были практически одинаковы, значения  $\sigma$  были несколько выше в случае 2 (рис. 4). В общем случае связь между диаметром волокна  $d$  и скоростью  $v$  повышения  $T$  от 60 до 130–140° и последующего ее понижения до 100° может быть представлена эмпирической формулой  $v=Ad^{-2}$ , где  $A=10^{-6}–10^{-7} \text{ м}^2\cdot\text{с}^{-1}$ . Скорость понижения  $T$  в интервале от 100° до комнатной температуры не влияет на  $s$  и  $E$ .

Для дальнейшего повышения  $\sigma$  необходимо либо, согласно работе [3], повышать  $M$  и понижать соответственно  $s$ , либо использовать многостадийную вытяжку. В общем случае увеличение стадийности не приводит к симметричному повышению  $T$  и  $E$  [4]. «Дотягивание» образцов, предельно ориентированных при оптимальных  $T$  и максимально возможных  $F$ , при более высоких  $T$ , как правило, не приводило к заметному повышению  $E$  и  $\sigma$ . Достигаемое на стадии II увеличение  $E$  до 190–200 ГПа иногда сопровождалось уменьшением  $\sigma$  до 2,8–3,5 ГПа. Наблюдения в оптический микроскоп показали, что после I стадии вытяжки в прозрачных и однородных по диаметру волокнах в результате «дотягивания» появлялись утолщения, в которых волокно становилось непрозрачным. При растяжении волокон разрывы происходили именно в непрозрачных утолщенных местах. Таким образом, «дотягивание» волокон, предельно ориентированных при температурах, близких к  $T_{\text{пп}}$  исходного полимера, приводило к образованию дефектов, по-видимому, в результате разрывов натянутых цепей. Следовательно, при двухстадийной вытяжке температура и натяжение на первой стадии процесса должны быть такими, чтобы волокно не было предельно ориентированным.

Для нахождения оптимального температурно-силового режима многостадийной вытяжки было изучено изменение свойств исходных и вытянутых волокон при нагревании до различных  $T$ . На рис. 1 показано, как изменяется  $E$ , измеряемый при комнатной  $T$ , от температуры прогревания. Как видно из рис. 1 (кривая 2), для исходных изотропных волокон существует область температур 80–105°, после отжига при которых  $E$  возрастает. При этом наблюдается и возрастание напряжения  $F_0$  начала ориентации, проводимой при комнатной температуре. После отжига при

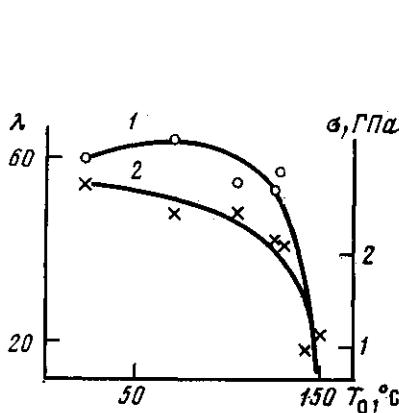


Рис. 5

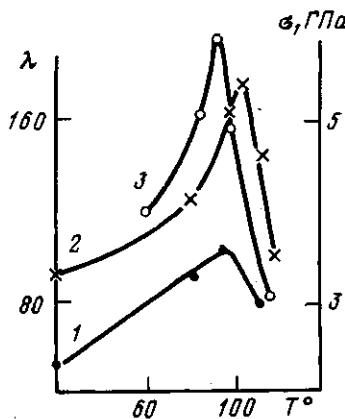


Рис. 6

Рис. 5. Зависимости предельной степени вытяжки  $\lambda$  (1) и прочности  $\sigma$  (2), достигаемой при  $T_{\text{вм}}=150^\circ$  на волокнах сформованных из 7,7%-ного раствора ПЭ-1 в декалине, от температуры отжига  $T_0$ .

Рис. 6. Зависимость степени вытяжки  $\lambda$  (1) и прочности  $\sigma$  (2, 3) от температуры отжига (1 и 2) или вытяжки (3) при  $M=2 \cdot 10^6$  и  $c=2\%$

более высоких температурах  $E$  и  $\sigma$  уменьшаются. При этом волокна утрачивают способность давать большие  $\lambda$  при вытяжке (рис. 1 и 5), соответственно уменьшаются и достигаемые значения  $\sigma$  (рис. 5, см. также [3] и [7]).

Симбатное увеличение  $E$  и  $F_0$  можно объяснить увеличением степени кристалличности материала. Такое объяснение подтверждается данными ДТА. Для волокон, высущенных в фиксированном состоянии, исходные значения  $E$  выше; по данным ДСК, для них выше и степень кристалличности, а также не наблюдается увеличение  $E$  в результате прогревания. При  $T \geq 135^\circ$  в волокне происходят необратимые структурные изменения. С повышением  $T$  скорость этих изменений растет и после отжига при  $T \geq 150^\circ$  волокно становится неотличимым по своей способности к вытяжке и поведению при нагревании [3] от волокна, сформованного из расплава. При  $M=2 \cdot 10^6$  после отжига при  $150^\circ$  в результате вытяжки достигаются предельные значения  $\lambda=20$ ,  $\sigma=1.2$  ГПа. Изменение  $E$  с температурой прогревания зависит от  $\lambda$  и  $T_b$  (рис. 1, кривые 4 и 5). Значительное уменьшение  $E$  происходит при  $T > 120^\circ$ .

Из приведенных данных видно, что температуру I стадии вытяжки следует выбирать в интервале  $80-130^\circ$ . Зависимость  $\lambda$  и  $\sigma$  от температуры I стадии вытяжки при одинаковой температуре II стадии ( $140^\circ$ ) приведена на рис. 6, а зависимость  $\sigma$  от  $\lambda$  при температуре I стадии  $90^\circ$ , II стадии  $140^\circ$  — на рис. 3. Дальнейшее увеличение  $T_{II}$  не приводит к существенному приросту  $E$  и  $\sigma$ . При  $M=2 \cdot 10^6$ ,  $c=2\%$ ,  $T_1=90^\circ$ ,  $T_{II}=140^\circ$  достигаются  $\lambda=120$ ,  $\sigma=5.5$  ГПа,  $E=180-190$  ГПа. В результате семи-восьми стадийной вытяжки на «утюге» с постепенным ступенчатым повышением  $T_{\text{вм}}$  при данных  $M$  и  $c$  было получено волокно с  $\sigma=7.0 \pm 0.5$  ГПа [3]. Это значение согласуется с расчетным на основе модели ориентационного упрочнения [3].

Для выяснения возможности получения волокна с такой же прочностью путем трехстадийной вытяжки были изучены закономерности изменения  $E$  и  $\sigma$  при различных температурно-силовых режимах процесса. Оказалось, что, как и в случае двустадийной вытяжки, само по себе увеличение числа стадий и последовательное повышение  $T_b$  не позволяют достичнуть симбатного повышения  $E$  и  $\sigma$ . При трехстадийной вытяжке необходим такой режим первых двух стадий, чтобы в результате их волокно не было предельно ориентированным. В табл. 1 приведены данные по оптимальному режиму вытяжки волокна.

При  $M=(1-2) \cdot 10^6$  и  $c=2\%$  получаются волокна с  $E=190-210$  ГПа и  $\sigma=5.5-7.0$  ГПа. Указанные в табл. 1 значения  $\lambda$  относятся к волокнам,

Таблица 1

## Оптимальный режим многостадийной вытяжки образцов

Стадия	$T^\circ$	$F$ , МПа	$\lambda$ (% от $\lambda_{\text{пр}}$ )
I	90	0,1–10	1–7(5)
II	125–135	5–10	60–70(50)
III	148–150	2–4	140–160

Таблица 2

Влияние условий сушки на свойства волокон, сформованных из 2%-ных растворов ПЭ с  $M=9 \cdot 10^5$  в декалине (образцы 1–3) или керосине (образец 4)

Образец, №	Условия сушки	Стадия	$T_B^\circ$	$\lambda$	$E$ , ГПа	$\sigma$ , ГПа
1	В свободном состоянии	I	90	6,6	—	—
		II	131	66	150	—
		III	148	125	205	$5,2 \pm 0,5$
2	При фиксированной длине	I	90	3,2	7,2	—
		II	131	27	89	—
		III	148	73	196	$4,5 \pm 0,2$
3	Без сушки	I	20 *	8,6	—	—
		II	131	65	175	$4,3 \pm 0,3$
		III	148	115	194	$5,0 \pm 0,4$
4	При фиксированной длине	I	63 *	—	3,7	—
		II	136	—	30	$4,3 \pm 0,3$
		III	149	77	162	$5,0 \pm 0,3$

\* На этой стадии вытягивалось волокно, содержащее растворитель.

сформованным из 2%-ного раствора ПЭ с  $M=2 \cdot 10^6$  и высушенным в свободном состоянии. В скобках приведены значения  $\lambda$  в процентах от предельных для данного волокна. Предельные  $\lambda$  зависят от  $M$ , с и способа сушки. Для волокон, высушенных при фиксированной длине, значения  $\lambda_{\text{пр}}$  не превышают 80, соответственно меньше и промежуточные  $\lambda$ . Достигаемые в результате вытяжки значения  $E$  и  $\sigma$  не зависят от способа сушки (табл. 2). Увеличение  $M$  от  $9 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^6$  не сказывается на предельно достижимых значениях  $E$ , предельные  $\sigma$  при этом возрастают от 5,5 до 7,0 ГПа.

Таким образом, путем трехстадийной вытяжки в оптимальном температурно-силовом режиме можно получить волокна ПЭ с прочностью и модулем упругости, близкими к расчетным. Этот результат имеет немаловажное научное и практическое значение, так как зависимость  $E$  и  $\sigma$  ориентированных волокон от  $M$  универсальна [11], а ориентированные волокна ПЭ с  $M \geq 10^6$  обладают комплексом уникальных свойств [12].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smook K. J., Torfs J. S., van Hutten P. F., Pennings A. J. // Polymer Bull. 1980. V. 2. № 4. P. 293.
2. Kanamoto T., Tsuruta A., Tanako K., Takeda M., Porter R. S. // Polymer J. 1983. V. 15. № 4. P. 327.
3. Савицкий А. В., Горшкова И. А., Демичева В. П., Фролова И. Л. // Высокомолек. соед. А. 1984. Т. 26. № 9. С. 1801.
4. Марихин В. А., Мясникова Л. П., Ценке Д., Хирте М., Вайгель П. // Высокомолек. соед. А. 1984. Т. 26. № 3. С. 210.
5. Константинопольская М. Б., Челун С. Н., Селихова В. И., Озерин А. Н., Зубов Ю. А., Бакеев Н. Ф. // Высокомолек. соед. Б. 1985. Т. 27. № 7. С. 538.
6. Barham P. J. // Polymer. 1982. V. 25. № 8. P. 1112.
7. Smith P., Lemstra P. J. // J. Mater. Sci. 1980. V. 15. № 2. P. 505.
8. Lemstra P. J., Bastiaansen C. W. W., Meijer H. E. H. // Angew. Makromolek. Chemie. 1986. B. 145/146. S. 343.

9. Плагонов М. П., Френкель С. Я. // Высокомолек. соед. А. 1981. Т. 22. № 10. С. 2177.
10. Савицкий А. В., Носов М. П. // Хим. волокна. 1979. № 4. С. 13.
11. Савицкий А. В., Андреева Г. Н., Горшкова И. А., Окромчедлидзе Н. П., Фролова И. Л. // IV Междунар. симпоз. по хим. волокнам. Т. 1. Калинин, 1986. С. 32.
12. Горшкова И. А., Андреева Г. Н., Савицкий А. В., Фролова И. Л. // Механика композит. материалов. 1987. № 2. С. 202.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР

Поступила в редакцию  
23.02.88

A. V. Savitskii, G. N. Andreeva, I. A. Gorshkova,  
V. M. Pozdnyakov, I. L. Frolova

## INFLUENCE OF CONDITIONS OF STRETCHING ON STRENGTH PROPERTIES OF HIGH-MOLECULAR POLYETHYLENE FIBERS

### Summary

Influence of temperature, stretching, drying conditions and stage elongation on the strength and modulus of elasticity  $E$  of PE fibers having  $M=9 \cdot 10^5$  and  $2 \cdot 10^6$  formed from decaline, parafine and kerosene solutions has been studied. For 2% concentration of PE by three-stage stretching at 20-100, 130-135 and 148-150° the fibers having  $E=200-210$  GPA can be prepared. The values of strength of fibers are increased with increase of MM from 5 to 7 GPA.