

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

Э.Г. Биленко, А.Ю. Изобелло, И.И. Сможевский

Физико-технический институт НАН Беларуси  
г. Минск, Республика Беларусь

*Объектом исследования является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Цель работы – определение влияния термомеханических параметров формообразования на механические свойства СВМПЭ. В процессе работы определен температурный интервал нагрева СВМПЭ, при котором еще сохраняются его прочностные свойства. Определена температура, выше которой происходит оплавление данного полиэтилена с потерей его механических свойств. Установлено, что из ряда таких параметров воздействия на СВМПЭ, как давление, температура, время, наибольшее влияние на механические свойства оказывает температура.*

**Ключевые слова:** температура, механические свойства, сверхвысокомолекулярный полиэтилен

## **STUDY OF THE EFFECT OF THERMO- MECHANICAL PARAMETER OF FORMING SAMPLES OF UHMWPE ON THEIR MECHANICAL PROPERTIES**

E.G. Bilenko, A.J. Isabello, I.I. Smogevski

Physical-technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus  
Minsk, Republic of Belarus

*The object of the study is ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). The aim of the work is to determine the influence of thermo – mechanical forming parameters on the mechanical properties of UHMWPE. In the process of work the temperature interval of heating of UHMWPE at which its strength properties still remain is defined. The temperature above which this polyethylene is melted with the loss of its mechanical properties is determined. It is established that temperature has the greatest influence on mechanical properties from a number of such parameters as pressure, temperature, time.*

**Keywords:** temperature, mechanical properties, ultra-high molecular weight polyethylene

## **Введение**

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен обладает уникальными специфическими свойствами – имеет высокие прочностные характеристики, повышенную ударо- и износостойкость, низкий коэффициент трения, морозоустойчивость. При этом обладает повышенной химической стойкостью к кислотам, щелочам, солям и агрессивным газам.

Эти свойства материала были определены как для образцов, полученных методом горячего прессования либо прессования с последующим спеканием порошка, так и для волокон СВМПЭ. Соединение волокон в полотно расширяет область применения СВМПЭ. Можно изготавливать тонкостенные изделия, в частности, контейнеры для перевозки багажа самолетами. На сегодняшний день вершиной технологии является процесс изготовления полотна с ортогонально расположенными волокнами, которые предварительно обработаны терморезактивным клеем.

Установлению зависимости влияния термомеханических параметров формования, в частности, температуры, на свойства полотна из волокон СВМПЭ, а так же на отдельные волокна, посвящена данная работа.

## **Материалы и оборудование**

В качестве объекта исследования использовалось полотно Endumax XF23 фирмы Teijin (Япония, производство в Голландии). Полотно изготавливают путем склеивания (ламинирования) двух полос из сверхвысокомолекулярного полиэтилена TA23 (ширина 133 мм, толщина 50–60 мкм) под углом 90° относительно друг друга (рис. 1) [1].

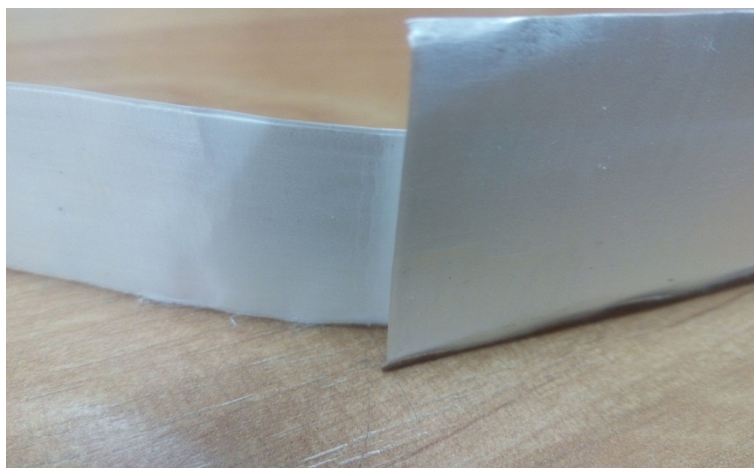


Рис. 1. Вид полотна Endumax

Для исследования влияния температуры на волокна СВМПЭ использовались электропечи WT 100/1260 (Uterna, Литва) и SNOL 6.7/1300 (Snol, Литва). Терморегулятор печи WT 100/1260 (OMRON E5CH-T, Япония) имеет функцию программирования, позволяя задавать начальную и конечную температуры нагрева, время нагрева и выдержки.

Давление на волокна СВМПЭ передавалось через силиконовую мембрану за счет разницы давлений внутри и снаружи мембраны. Разрезание создавалось вакуумным пластинчато-роторным насосом НВР-16Д (БАКМА, Россия) с остаточным давлением 6,7 Па. Сжимающее давление на СВМПЭ варьировалось от атмосферного до 1 бара.

Механические свойства исследовались на разрывной машине WDW-100E (TIME Group Inc., Китай), нагрузка 100 кН, класс точности 1.

### Результаты исследований

С целью определения максимальной температуры, при которой сверхвысокомолекулярный полиэтилен способен сохранять свою структуру были проведены опыты по нагреву и выдержке при данной температуре в течении 30 минут (рис. 2).

Анализируя рис. 2, можно отметить, что для данного материала температура в 160 °С является критической, если нагрев происходит в атмосфере воздуха. Превышение данного порога вызывает необратимые изменения в материале: его обугливание и расслоение.

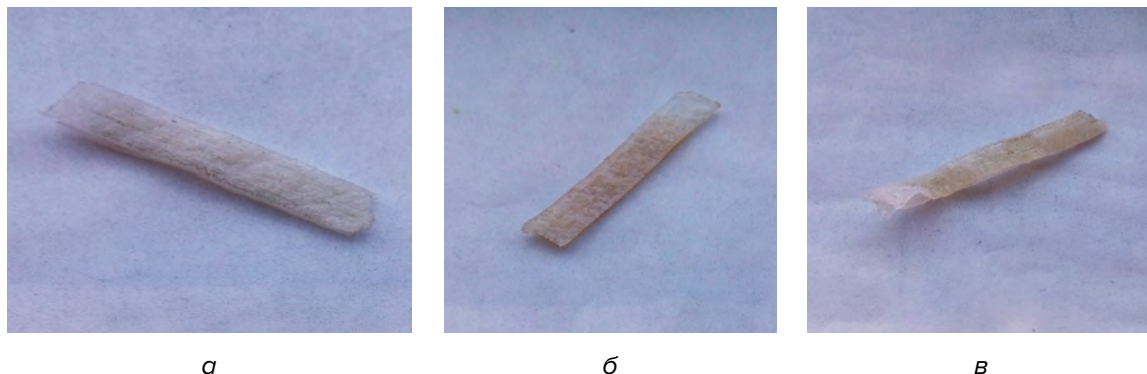


Рис. 2. Вид образцов после печного нагрева:  
а – 163 °С; б – 170 °С; в – 175 °С

В работе [2] отмечено, что при нагреве СВМПЭ выше температуры плавления его кристаллическая фаза не переходит в вязкотекучее состояние, а остается деформационно-упругим. При этом отмечено, что порядка 90 % материала перерабатывается такими методами, как: горячее прессование, холодное прессование с последующим спеканием, плунжерная экструзия. Во всех этих процессах СВМПЭ доводят до состояния расплава, то есть нагревают до температуры 150–200 °С.

В нашем случае нагрев Endumax до температур 150–200 °С на воздухе вызывает оплавление волокон материала, коробление и изменение линейных размеров образцов.

Результаты испытаний на растяжение образцов Endumax после воздействия на них температуры приведены в табл. 1. Испытываемые образцы имели размеры: толщина 0,13 мм, ширина 20 мм, длина общая 200 мм, длина рабочая 100 мм.

Табл. 1

#### Влияние температуры нагрева полотна Endumax на механические свойства нитей

№ образца	Температура нагрева, °С	Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	$\sigma_{ср}$ , МПа	Модуль упругости, ГПа	$E_{ср}$ , ГПа
1	20	2,40	925	901	60,7	60,7
2		2,28	877		60,7	
3	110	2,34	900	936	59,4	62,4
4		2,65	1021		70,7	
5		2,30	886		57,2	

Продолжение табл. 1

№ образца	Температура нагрева, °С	Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	$\sigma_{cp}$ , МПа	Модуль упругости, ГПа	$E_{cp}$ , ГПа
6	130	2,75	1058	1078	69,8	68,3
7		2,84	1092		69,8	
8		2,82	1083		65,4	
9	150	2,58	993	1035	55,8	61,2
10		2,94	1131		66,9	
11		2,55	981		60,9	
12	160	2,74	1052	1042	61,3	66,6
13		2,58	991		68,1	
14		2,82	1083		70,5	

Из табл. видно, что с ростом температуры модуль упругости имеет максимальное значение не при комнатной температуре, а после нагрева до 130 °С. Следующий максимум модуля упругости наблюдается в районе критических температур деструкции волокон, то есть при 160 °С. При этом все значения механической прочности после нагрева выше, чем без нагрева, что открывает нам широкий диапазон температур для формообразования изделий из волокон полотна Endumax без потери прочности.

На рис. 3–7 приведены графики изменения усилия растяжения от величины удлинения. Можно видеть, что форма графиков идентична, различия наблюдаются лишь в конечных значениях удлинения и усилия разрыва.

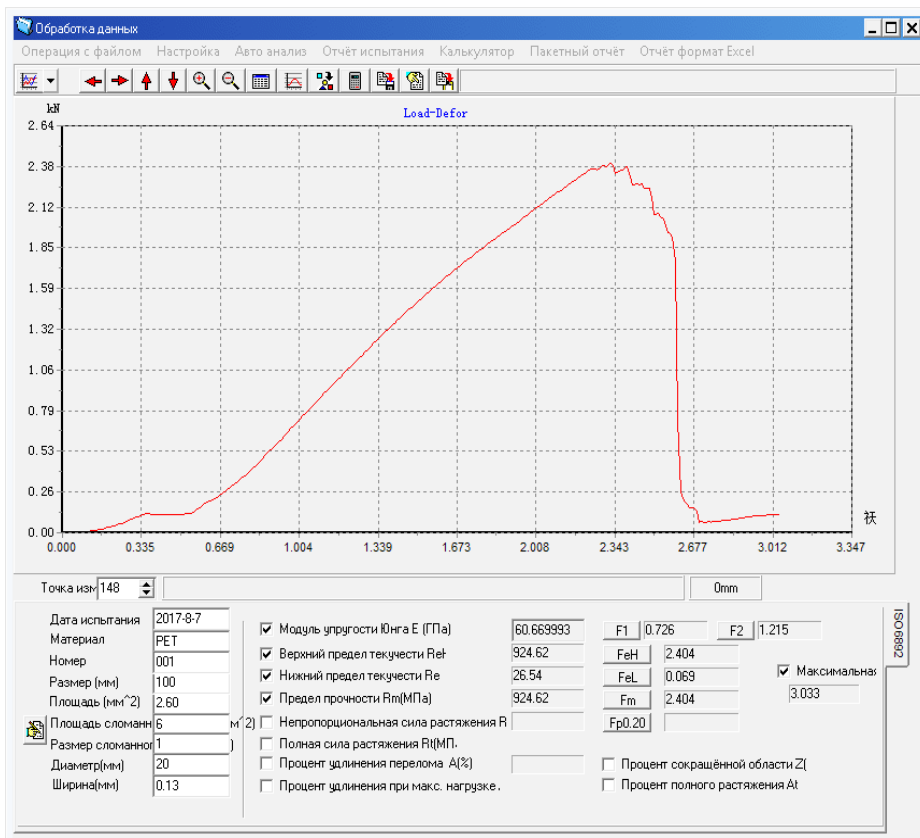


Рис. 3. Диаграмма растяжения исходного образца

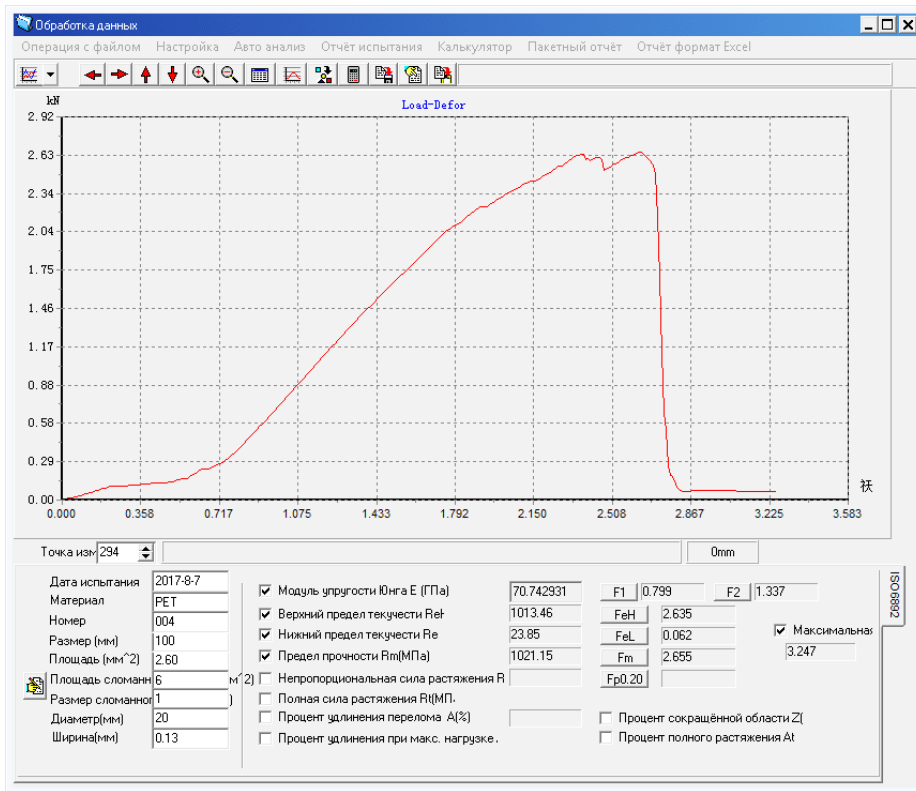


Рис. 4. Диаграмма растяжения образца после нагрева до 110 °С

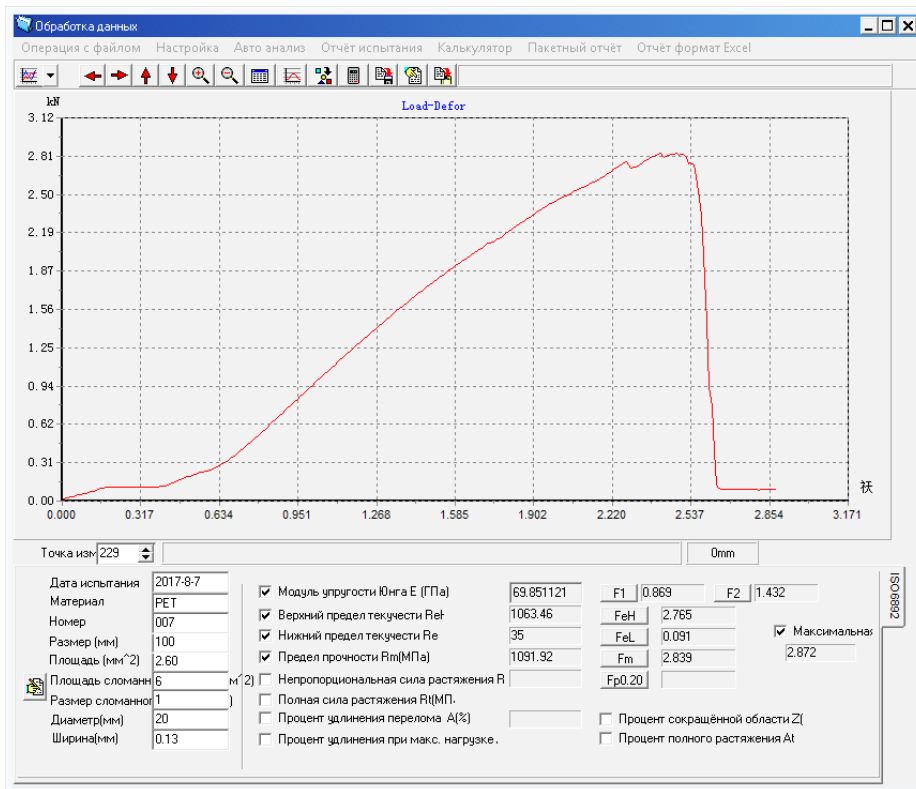


Рис. 5. Диаграмма растяжения образца после нагрева до 130 °С

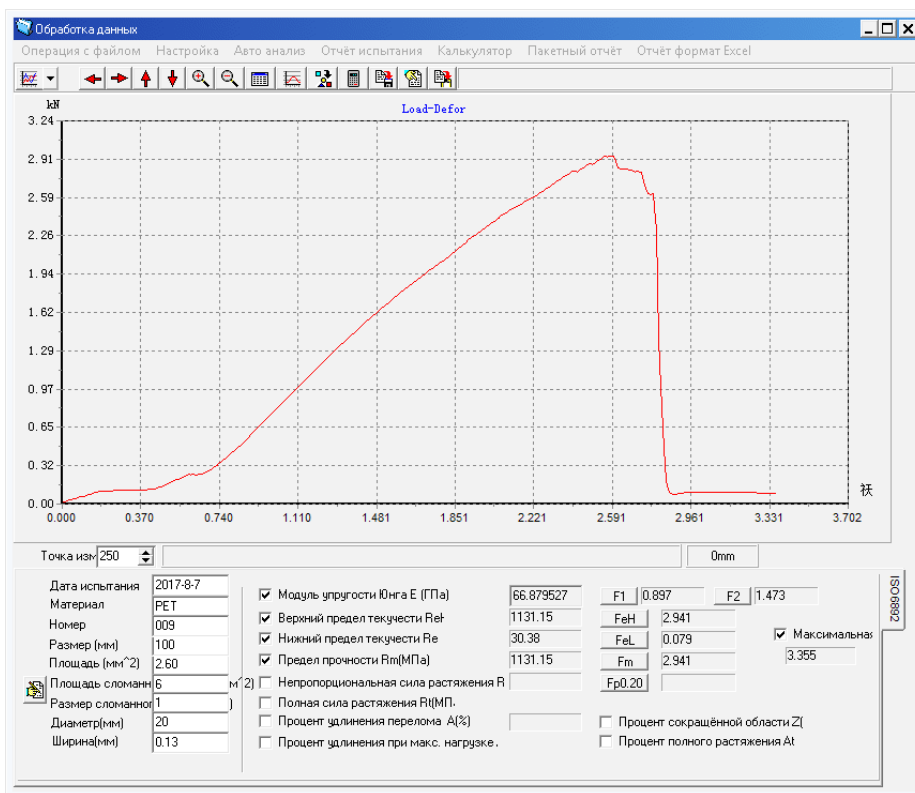


Рис. 6. Диаграмма растяжения образца после нагрева до 150 °С

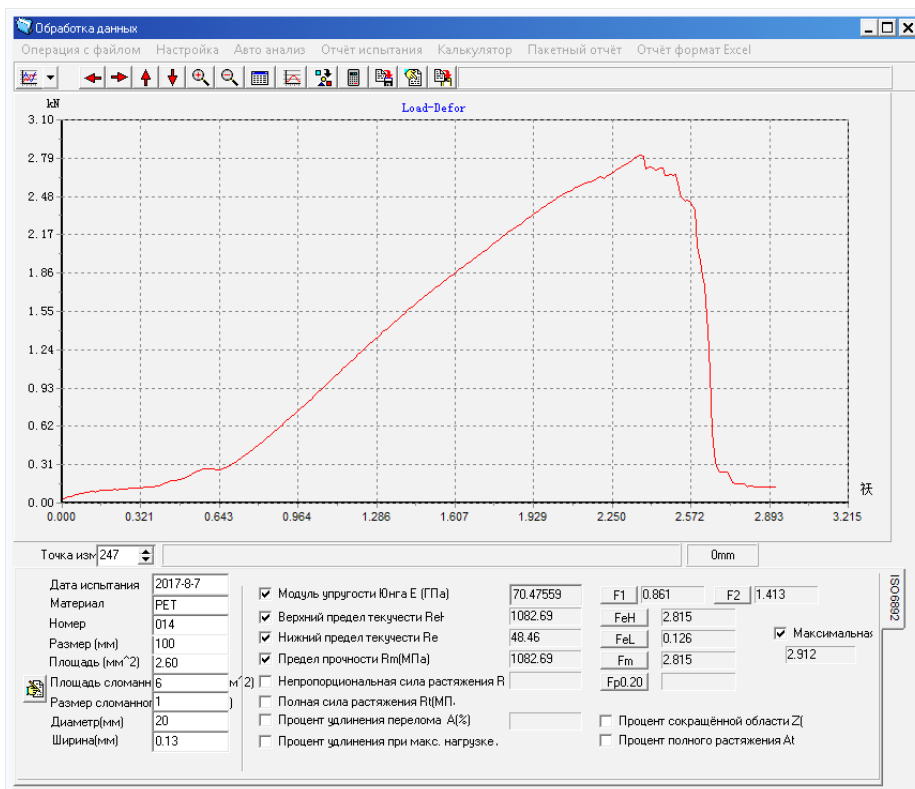


Рис. 7. Диаграмма растяжения образца после нагрева до 160 °С

Наличие пиков на вершине графика свидетельствует о процессе разрушения отдельных волокон, которое происходит несколько раньше, чем образца в целом.

Прочностные испытания спеченных под давлением образцов приведены в табл. 2. Спекание проводили при различных температурах, но одинаковом усилии сжатия. Усилие создавалось с помощью вакуумного насоса за счет разряжения, при этом давление прессования составляло 0,95 МПа. Давление на спекаемые образцы передавалось посредством силиконовой мембраны, которая способна растягиваться на 400 % и имеет температуру эксплуатации 200 °С.

С целью определения спекаемости СВМПЭ были изготовлены образцы для прессования с размерами: толщина 1,15 мм, ширина 20 мм, длина общая 175 мм, длина рабочая 90 мм.

**Табл. 2**

**Влияние температуры спекания пяти слоев полотна Endumax на механические свойства композита**

№ образца	Температура нагрева, °С	Максимальная нагрузка, кН	Предел прочности, МПа	$\sigma_{ср}$ , МПа	Модуль упругости, ГПа	$E_{ср}$ , ГПа
1	110	3,04	132	162	18,5	20,2
2		3,47	150		18,2	
3		3,68	159		21,1	
4		3,69	158		22,3	
5		4,83	213		20,9	
106	130	5,70	250	203	20,3	22,1
107		3,66	161		24,2	
108		4,50	199		20,5	
109		4,76	210		23,2	
110		4,55	195		22,5	
111	150	4,87	214	219	23,4	22,3
112		4,52	199		22,5	
113		5,36	235		22,1	
114		5,06	220		22,3	
115		5,26	229		21,2	

На рис. 8–10 представлены фотографии диаграммы растяжения спеченных образцов, спрессованных при различных температурах.

Результаты исследований показали, что температуры прессования в 110 °С недостаточно для получения однородного материала (рис. 8). На диаграмме растяжения наблюдаются три отдельных пика, которые свидетельствуют о наличии скольжения между слоями при растяжении. Применение данной температуры прессования не позволяет получить прочное клеевое соединение между отдельными слоями СВМПЭ.

Повышение температуры спекания позволяет получить материал, который имеет однородную прочность. Так рис. 9–10 имеют общие черты с рис. 3–7 в виде одного большого пика. При этом у спеченного материала наблюдаются небольшие пики, но они находятся в рамках упомянутого большого пика. Некоторое скольжение слоев спеченного материала позволяет повысить значение относительного удлинения, которое больше чем у одинарного полотна СВМПЭ.

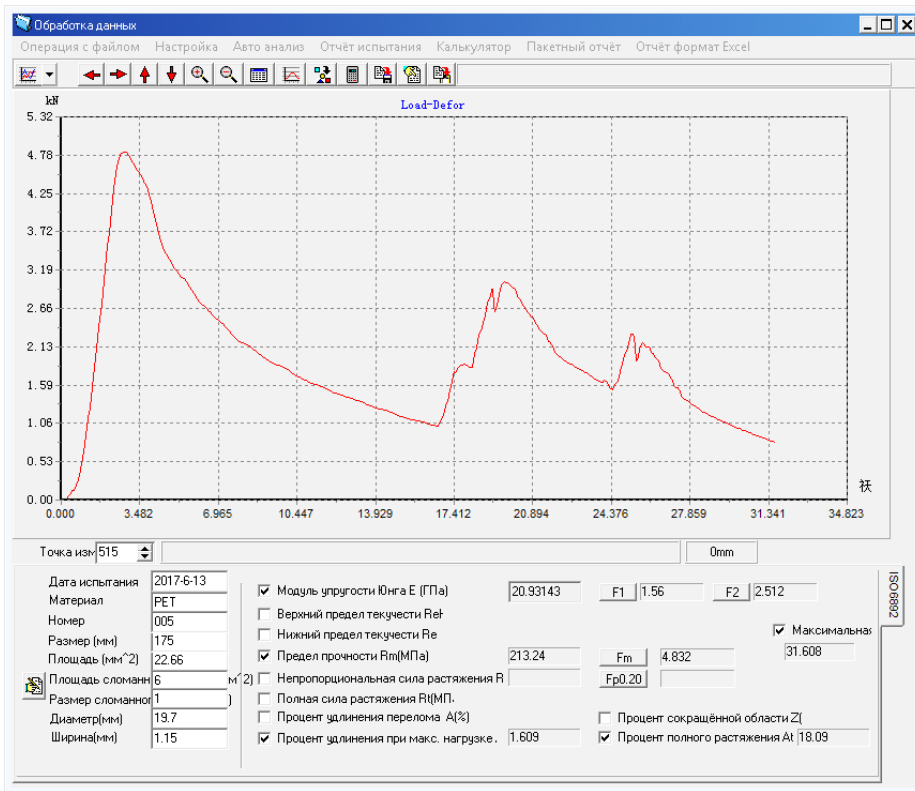


Рис. 8. Диаграмма растяжения образца, спеченного при 110 °С

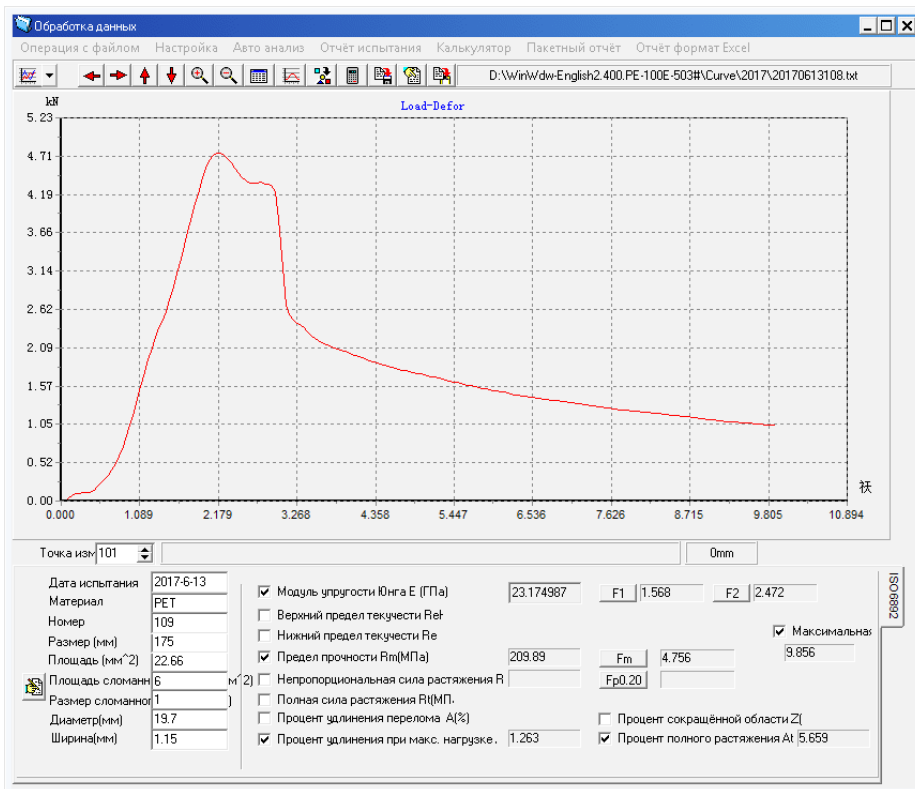


Рис. 9. Диаграмма растяжения образца, спеченного при 130 °С



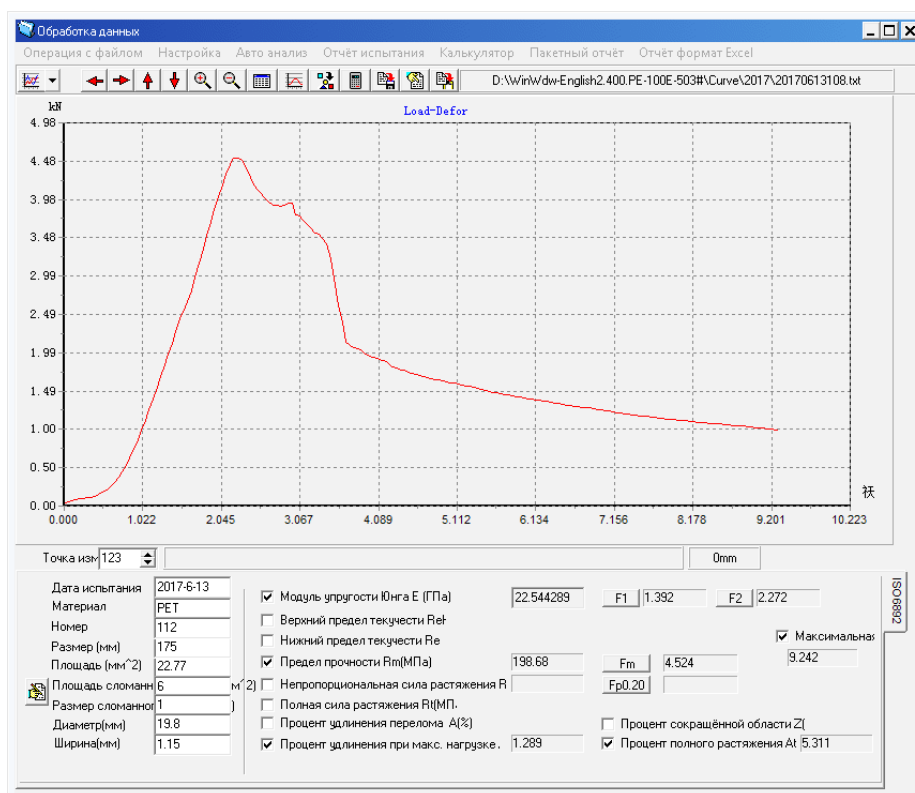


Рис. 10. Диаграмма растяжения образца, спеченного при 150 °С

Спекание при 150 °С позволяет получить материал с высокими прочностными свойствами, при которых наблюдается так же наибольшее удлинение при максимальной разрывной нагрузке. Стоит отметить, что данная температура спекания ниже, чем типичная температура для СВМПЭ в виде порошка. Стандартный режим спекания, это давление 3–5 МПа и температура 180–220 °С [3].

### Заключение

Исследовано влияние температуры нагрева на прочностные свойства как отдельного полотна СВМПЭ, так и композита на его основе.

Проведенные исследования установили, что температура нагрева для СВМПЭ марки Endumax XF23 фирмы Teijin (Япония, производство в Голландии) в 130 °С является оптимальной, так как полотно из данного материала имеет максимальные прочностные свойства.

Разработаны рекомендации по температуре спекания. Рекомендовано проводить спекание материала с целью придания ему формы в интервале температур 130–150 °С. При этом модуль упругости готового изделия составит 22 ГПа.

*Работа выполнена в рамках договора № 1/17-8 от 15.03.2017 г.*

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Teijin. Human Chemistry, Human Solutions / Endumax // Products [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: [http://www.teijinendumax.com/wp-content/uploads/2016/11/brochure-endumax-4-2015\\_web.pdf](http://www.teijinendumax.com/wp-content/uploads/2016/11/brochure-endumax-4-2015_web.pdf). – Дата доступа : 02.06.2017.
- 2 Ашпина, О. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен / О. Ашпина // Полимеры. – 2006. – № 9. – С. 30-33.
- 3 Meister John J. Polymer modification: principles, techniques and applications. New York: Marsel Dekker Inc., 2000. 936 p.

## REFERENCES

- 1 Teijin. Human Chemistry, Human Solutions / Endumax // Products [Electronic resource]. – 2015. – Access mode: [http://www.teijinendumax.com/wp-content/uploads/2016/11/brochure-endumax-4-2015\\_web.pdf](http://www.teijinendumax.com/wp-content/uploads/2016/11/brochure-endumax-4-2015_web.pdf). – Date of access : 02.06.2017.
- 2 Ashpina O. Sverhvyssokomolekulyarnyj poliehtilen [Ultra-high molecular polyethylene] // Polymers. – 2006. –N° 9. – P. 30–33. (in Russian)
- 3 Meister John J. Polymer modification: principles, techniques and applications. New York: Marsel Dekker Inc., 2000. 936 p.

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 24.04.18*