

УДК 537.533.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРА СВМПЭ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

<sup>1)</sup> Рахадиллов Б.К., <sup>1)</sup> Сагдолдина Ж.Б., <sup>2)</sup> Баятанова Л.Б., <sup>2)</sup> Рахымжанова К.Б., <sup>1)</sup> Сәндібек А.К.

<sup>1)</sup> *Восточно-Казахстанский государственный университет им. С. Аманжолова,  
Усть-Каменогорск, Казахстан*

<sup>2)</sup> *Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,  
Усть-Каменогорск, Казахстан*

*sagdoldina@mail.ru*

В настоящей работе, представлены результаты исследования влияния электронно-лучевой обработки (ЭЛО) на структуру и механические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). ЭЛО образцов СВМПЭ осуществлялось на промышленном импульсном ускорителе ИЛУ-10. Энергия электронов варьировалась в пределах 2,5–4,5 МэВ, а доза облучения варьировалась в пределах 2–9 МГр. Методом дифференциально-сканирующей калориметрии определены термические характеристики полимерных образцов. Проанализировано влияние облучения на процесс кристаллизации полимера. Было обнаружено, что эффект образования сшивок не является существенным в отношении кристаллической структуры (толщины ламелей) и доза облучения почти не влияет на температуру плавления СВМПЭ. Полученные инфракрасные спектры показали, что во время ЭЛО в образцах СВМПЭ происходит окисление в результате химических реакций полиэтиленовой цепи с кислородом. Установлено, что ЭЛО приводит к изменению морфологии поверхности, то есть поверхность становится шероховатой, увеличивается глубина неровности и структура сферолитов. Результаты механических испытаний показали, что после ЭЛО прочность и твердость СВМПЭ незначительно увеличиваются.

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время достаточно интенсивно ведутся исследования по влиянию ЭЛО на структуру и свойства полимеров. Вместе с тем, недостаточно изучен механизм структурно-фазовых превращений в полимерных материалах при вневакуумной ЭЛО в промышленных импульсных ускорителях. Все эффекты облучения, воздействующие на полимерные материалы, сложно предсказать. Несмотря на простую полимерную структуру, все протекающие в структуре изменения являются достаточно сложными. Поскольку для разрушения химических связей требуется приложение энергии в несколько эВ, можно ожидать, что излучение падающего электронного пучка, составляющее, как правило, несколько МэВ, неминуемо приведет к разрушению связей полимерной цепи. Обычно в полимерах происходит либо разрушение, либо образование новых поперечных межмолекулярных связей (сшивка). Однако в большинстве случаев, имеет место и первое, и второе. Известно, что образование поперечных межмолекулярных связей в полиэтилене улучшает его сопротивление истиранию, что широко используется в ряде промышленных приложений [1]. Ученые обнаружили, что степень кристалличности увеличивается с увеличением поглощенной дозы облучения до 200 кГр и далее не изменяется [2]. Результаты эксперимента, полученные в работе [3] показали, что с увеличением дозы повышается степень кристалличности, а сопротивление усталости увеличивается по сравнению с необлученными образцами, что аналогично характеристикам износостойкости. В результатах работы [4] предполагается, что в СВМПЭ, облученном элек-

тронным пучком при температуре 100 °С, возникает большое количество поперечных межмолекулярных связей по сравнению с необработанным материалом, что повышает прочность полимера на разрыв и его износостойкость. Кроме того, в зависимости от внешних условий облучения в полимере возникают структурные изменения (двойные связи, поперечные межмолекулярные связи, а также образование окислов). Показано, что механические характеристики тесно связаны с модификацией структуры. Предел прочности на разрыв облученных образцов увеличился, в то время как удлинение до разрыва при растяжении по сравнению с необработанными образцами полимеров уменьшается. Экспериментально показано, что с увеличением дозы облучения, как на воздухе, так и в вакууме, скорость износа уменьшается.

Механические характеристики тесно связаны с модификацией структуры, сформированной после электронного облучения. Повышение износостойкости полимерных материалов связано с созданием большого количества поперечных связей при облучении электронным пучком. Результаты, полученные в работе [5], подтвердили, что поперечная сшивка при значительных дозах преобладает над деполимеризацией, даже если облучение выполнялось в воздухе. Таким образом, поиск дальнейших путей повышения износостойкости СВМПЭ и композитов на его основе является актуальной научно-технической проблемой.

СВМПЭ – это разновидность полиэтилена, в котором длина молекулярной цепи ( $-C_2H_2-$ ) превышает один миллион углеродных единиц. Благодаря его

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРА СВМПЭ  
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

уникальным свойствам – высокому сопротивлению изнашиванию и высокой ударной вязкости, СВМПЭ все чаще используется в промышленности в узлах трения деталей машин и механизмов, а также медицине. Изделия из СВМПЭ, помимо низкого коэффициента трения, химической стойкости и сохранения свойств при низких температурах должны обладать и высокой износостойкостью, что может быть достигнуто за счет его наполнения либо поверхностной модификации [5].

В связи с вышеизложенным, целью данной работы являлось изучение закономерности структурных превращений и формирования износостойких модифицированных поверхностных слоев СВМПЭ при вневакуумной ЭЛО.

**ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Для изучения структурно-фазовых состояний после ЭЛО применялись следующие методы исследования: растровая электронная микроскопия (JSM-6490, JEOL), рентгенофазный анализ (X'Pert PRO, PANalytical), инфракрасная колебательная спектроскопия (ИК-Фурье FTIR-801 Simex), метод дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК), измерение твердости методом ТК-2М (в соответствии с ГОСТ 4670-91), механические испытания на растяжение (универсальная установка для испытаний WDW-5E). В качестве материала для исследования был выбран универсальный многофункциональный полимер конструкционного и криотехнического назначения СВМПЭ. Заготовки образцов для исследований в виде круга толщиной 3 мм вырезали из прутка полимера (диаметр прутка 30 мм). В таблице 1 представлены характеристики полимера.

*Таблица 1. Технические характеристики сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ)*

Параметр	Значение
Плотность	0,93 г/см <sup>3</sup>
Температура плавления	135 °С
Температура деформации	79 °С
Предел текучести / прочность при растяжении	20 МПа
Растяжение на разрыв	> 200 %
Модуль упругости при растяжении	680 МПа
Твёрдость по Шору	63

ЭЛО образцов из полимерного материала осуществлялось на промышленном импульсном ускорителе ИЛУ-10. Ускорители типа ИЛУ являются достаточно специфическими линейными высокочастотными ускорителями – это однорезонаторные машины, работающие в режиме стоячей полуволны (в отличие от большинства линейных ускорителей). В состав ускорителя входят: ускоряющая система с выпускным устройством, вакуумной системой и ВЧ генератором; импульсный источник питания; стойка управления. Рабочие частоты ускорителя ИЛУ-10 – 118 МГц, длина ускоряющего промежутка ускорителя ИЛУ-10

– 26 см. Основные параметры ускорителя ИЛУ-10 приведены в таблице 2.

*Таблица 2. Основные параметры ускорителя ИЛУ-10*

Параметр	Значение
Энергия электронов, МэВ	2,5–5
Средняя мощность пучка, кВт	50
Средний ток пучка, мА	15
Потребляемая мощность, кВт	150
Вес ускорителя, т	2,9

Образцы устанавливаются на стол ускорителя электронов, который перемещается относительно пучка электронов. Образцы облучались электронами с энергией 2 МэВ, 3 МэВ и 4 МэВ. При этом варьировалась доза облучения от 2 МГр до 9 МГр. Заготовки перемещались в продольном направлении относительно выпускного отверстия. При этом обрабатываемая площадь составила 1000×80 мм<sup>2</sup>. Режимы ЭЛО полимерного материала представлены в таблице 3.

*Таблица 3. Режимы ЭЛО образца полимера СВМПЭ на ускорителе ИЛУ-10*

№ режима	Энергия пучка, МэВ	Ток пучка, мА	Время экспозиции, с	Кол-во прогибов	Доза облучения, МГр
1	2	6,84	30	6	3
2	3	6,84	30	6	3
3	4	6,84	30	4	2
4	4	6,84	30	6	3
5	4	6,84	30	8	4
6	4	6,84	30	10	5
7	4	6,84	30	12	6
8	4	6,84	30	14	7
9	4	6,84	30	16	8
10	4	6,84	30	18	9

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Результаты механических испытаний на растяжение до и после ЭЛО показаны в таблице 4. Результаты были получены на основе анализа кривых растяжения полимера (рисунок 1).

*Таблица 4. Результаты механических испытаний на растяжение СВМПЭ до и после ЭЛО*

Полимер	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$
	МПа		%
СВМПЭ	до	22	17,9
	после ЭЛО при 2 МГр	23,9	18

Предел прочности ( $\sigma_B$ ) полимера СВМПЭ до облучения составил 22 МПа, предел текучести ( $\sigma_{0,2}$ ) составил 17,9 МПа, после ЭЛО увеличились до 23,9 МПа и 18 МПа, соответственно. Кроме того, относительное удлинение первоначально было до 300%, а после ЭЛО резко снизилось до 10%.

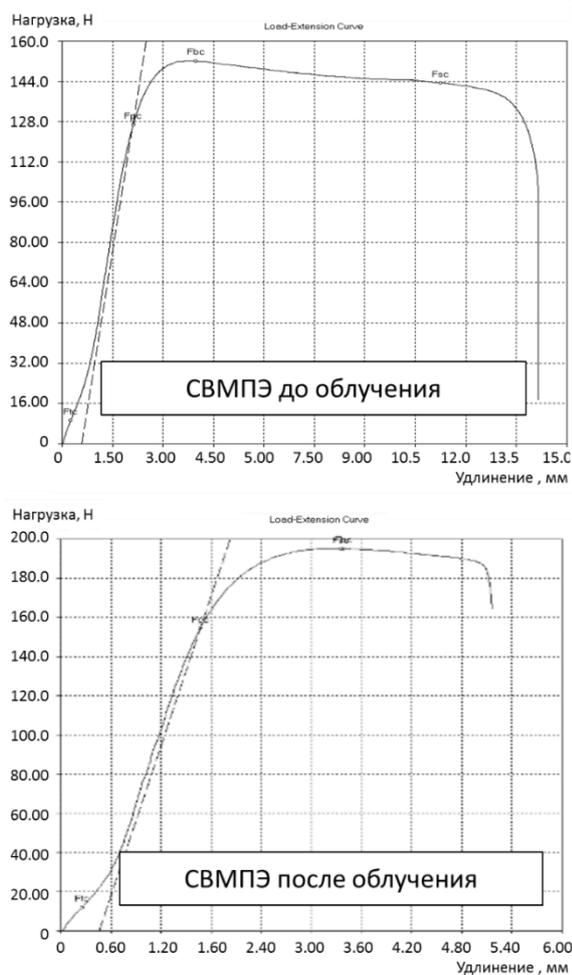


Рисунок 1. Кривые растяжения полимера СВМПЭ до и после ЭЛО при 2 МГр

В результате механических испытаний на растяжение обнаружено, что после ЭЛО прочность полимера СВМПЭ незначительно увеличивается. При облучении пучками заряженных частиц в полимерах возникают промежуточные образования, обладающие высокой реакционной способностью – свободные радикалы, ионы, возбужденные молекулы. Они являются источниками дальнейших химических превращений, приводящих к изменениям химического строения, а следовательно и свойств полимеров [6]. Хотя основные цепные реакции сшивания сопровождаются реакциями разрыва, которые являются основными причинами изменения растягивающего напряжения и удлинения при разрыве в процессе облучения, многие другие факторы, такие как молекулярный вес, степень кристалличности, концентрация свободных радикалов и степень окисления должны быть приняты во внимание. Погрешность измерения также следует учитывать.

Сшивание имеет тесную связь с пределом прочности на разрыв, в работе [7] упоминается, что формирование 3D-сети может привести к увеличению прочности на разрыв. Это может быть связано с уве-

личением слияния молекул и межкристаллических связей [8]. В [9] описано, что свободные радикалы образуются в процессе облучения и могут либо реагировать с кислородом, вызывая разрыв цепей, либо реагировать внутренне, образуя сшивки.

На рисунке 2 приведены результаты измерения твердости полимеров до и после ЭЛО. Исследование полимера СВМПЭ, облученного при дозах выше 5 МГр (энергия пучка 4,5 МэВ) не представлялось возможным в результате радиационного старения полимеров.

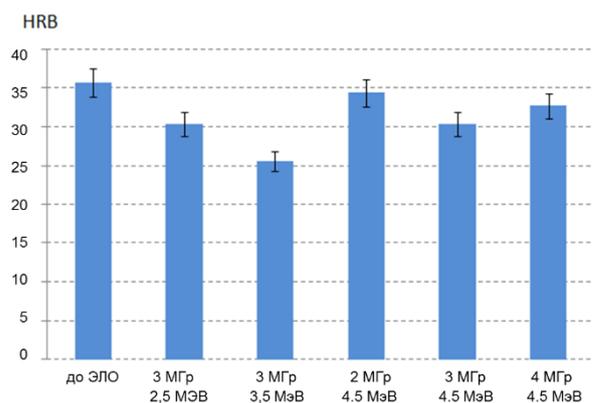


Рисунок 2. Твердость СВМПЭ до и после ЭЛО

На основе анализа полученных результатов обнаружено, что твердость СВМПЭ сравнительно незначительно меняется в исследуемом режиме ЭЛО. Во всех исследуемых режимах облучения при энергиях 3,5 МэВ и 4,5 МэВ и дозе облучения от 2 МГр до 4 МГр твердость полимера СВМПЭ незначительно меняется по сравнению с исходным образцом. Вероятно, это связано с малой толщиной модифицированного поверхностного слоя. Аналогичные результаты были получены и с другими видами полимеров – РА6 и PEI [10]. Хотя и незначительно, но все же нам удалось добиться увеличения твердости материала. Эти результаты совпадают с результатами работы [11], в которой также говорится об увеличении твердости СВМПЭ от 0 до 250 кГр. На основе этих результатов было очевидно, что улучшение твердости материала было связано с образованием сшивки, что подтверждается исследованием плотности сшивки и испытанием на растяжение [12, 13].

Результаты изменения температуры плавления, оценка данных для СВМПЭ показаны на рисунки 3 и 4 для первого и второго нагрева. Данные для первого плавления, то есть материала после облучения в твердом состоянии, показывают, что доза облучения почти не влияет на температуру плавления (ТП) СВМПЭ. Это означает, что эффект образования сшивок не является существенным в отношении кристаллической структуры (толщины ламелей) и является практически одинаковым для всех образцов независимо от дозы облучения, что демонстрируется однородная ТП для всех полимеров.

С другой стороны, уменьшение ТП, измеренное во время первого плавления для СВМПЭ, указывает на то, что облучение электронами приводит к существенному уменьшению толщины ламелей даже в твердом состоянии. Это может быть объяснено только значительной степенью разрушения поверхности ламелей и ее истончением из-за разрушения полимерных цепей, предположительно, в результате разрыва.

На рисунках 5 и 6 показаны инфракрасные спектры необлученных и облученных образцов полимера СВМПЭ. ИК-спектр был записан в режиме пропускания с разрешением  $0,1 \text{ см}^{-1}$ . Чтобы обнаружить возникновение сшивания, была проанализирована область спектра между  $2000$  и  $600 \text{ см}^{-1}$ , особенно в области двойных винильных связей (растяжение  $=\text{C}=\text{C}=\text{}$  для винилиденовой группы около  $1647 \text{ см}^{-1}$ ) и области транс-виниленовых групп (около  $965 \text{ см}^{-1}$ ). Пик при  $718 \text{ см}^{-1}$ , комбинированная полоса, связанная с вибрацией качания в плоскости  $=\text{CH}_2$  [14].

Полосы при  $718 \text{ см}^{-1}$  (качающаяся плоскость  $=\text{CH}_2$ ) и  $1460 \text{ см}^{-1}$  (ножничная вибрация  $=\text{CH}_2$ ), которые представляют  $-\text{CH}_2-$  в СВМПЭ не имеют очевид-

ных изменений, иллюстрируя, что основная структура UHMWPE не претерпела никаких изменений в процессе облучения. Полоса поглощения транс-винилена появляется при  $965 \text{ см}^{-1}$  на спектрах облученного СВМПЭ, и ее интенсивность увеличивается с увеличением дозы, в области карбонильных групп ( $1732 \text{ см}^{-1}$ ), которая относится к облученному СВМПЭ, пик появляется и становится шире после увеличения дозы облучения. На спектре облученного образца при дозе  $2 \text{ МГр}$  (рисунок 6) поглощение карбонильных групп ( $\text{C}=\text{O}$ ,  $1742 \text{ см}^{-1}$ ) становится шире после облучения. Они показывают, что реакция окисления СВМПЭ с  $\text{O}_2$  произошла в процессе облучения и после облучения. При окислении образцов полиэтилена включали образование типичных продуктов, таких как изолированные гидропероксиды ( $3707 \text{ см}^{-1}$ ), гидроксилы, связанные с  $\text{H}_2$ , включая гидропероксид ( $3626 \text{ см}^{-1}$ ), лактоны ( $1860 \text{ см}^{-1}$ ). Таким образом, такие результаты являются убедительным доказательством того, что окисление UHMWPE происходило в результате химических реакций полиэтиленовой цепи с  $\text{O}_2$  [12].

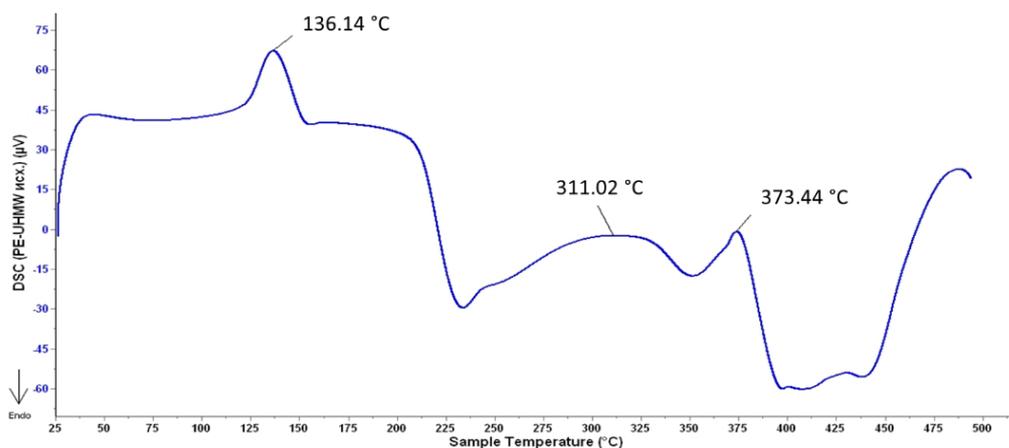


Рисунок 3. Термограмма ДСК исходного образца СВМПЭ

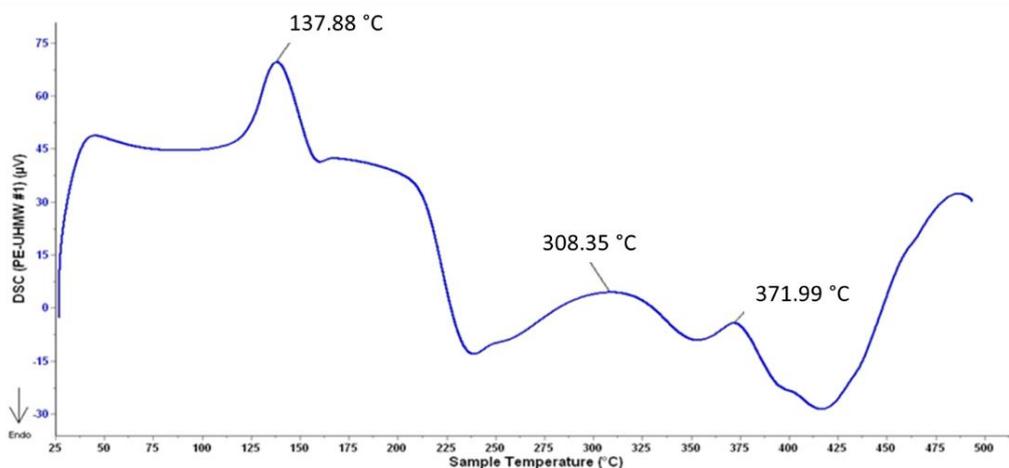


Рисунок 4. Термограмма ДСК облученного СВМПЭ при  $2 \text{ МГр}$

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛИМЕРА СВМПЭ  
НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

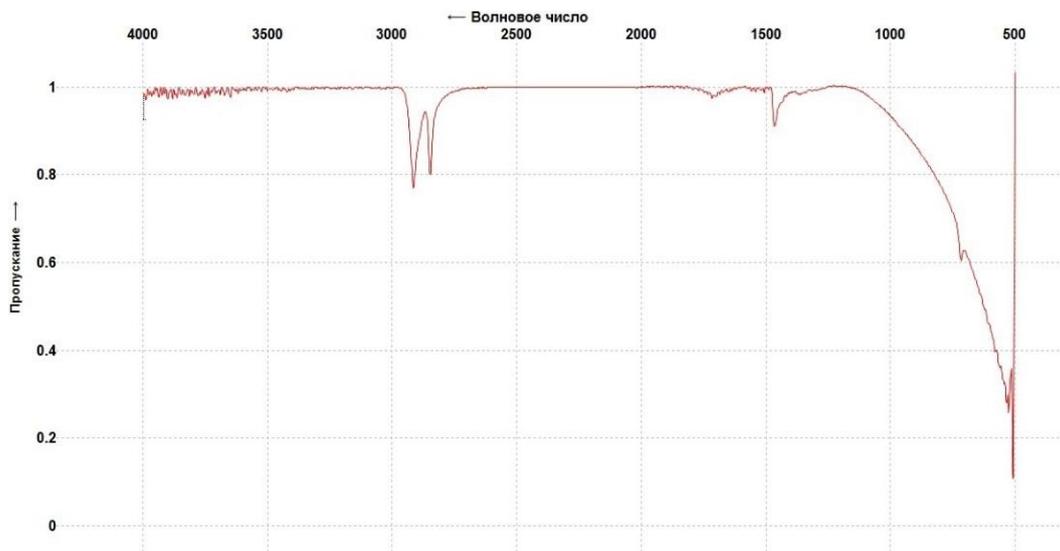


Рисунок 5. ИК спектры необлученного образца СВМПЭ

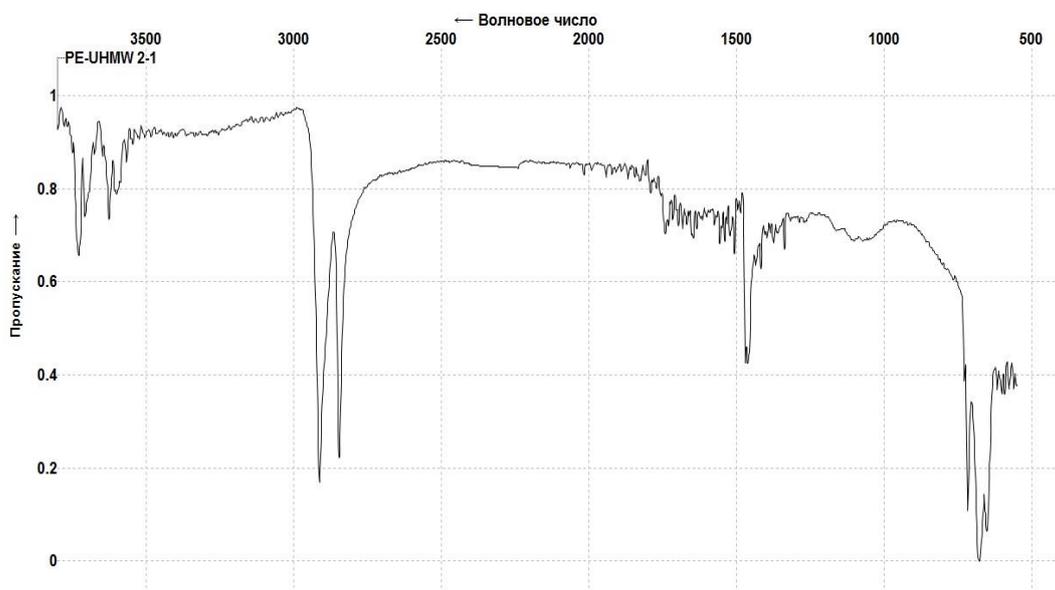


Рисунок 6. ИК спектры облученного образца СВМПЭ при дозе 2 МГр

Морфология поверхности для необлученного и облученного полимера изображена на рисунке 7. Видно, что до облучения поверхность имеет однородную сфералитную гомогенную структуру.

В облученной пленке ясно видно, что морфология значительно улучшается, то есть поверхность становится шероховатой, увеличивается глубина неровности и структура сферолитов. Воздействие электронного излучения приводит к существенному изменению морфологии поверхности. После ЭЛО на поверхности наблюдается области агломерации, трещины и поры. На микроуровне формируются сферолиты, состоящие из радиально ориентированных фибрилл. Эти изменения четко указывают на смещение молекул полимера под влиянием облучения. Это,

возможно, связано с повышением объёмной поверхности за счет взаимодействия электронов со свободными радикальными группами молекулы полимера и уменьшает интенсивность кристалла [15, 16]. ЭЛО может стимулировать фазовое превращение кристаллических и аморфных фаз, потому что атомы в материале динамически смещаются под воздействием электронного удара при облучении электронным пучком. Облучение может привести к деградации и, следовательно, увеличению энтропии и вызывает изменение фазового перехода. Причиной фазового перехода вызванного облучением, является изменение энтропии и свободной энергии Гиббса [17].

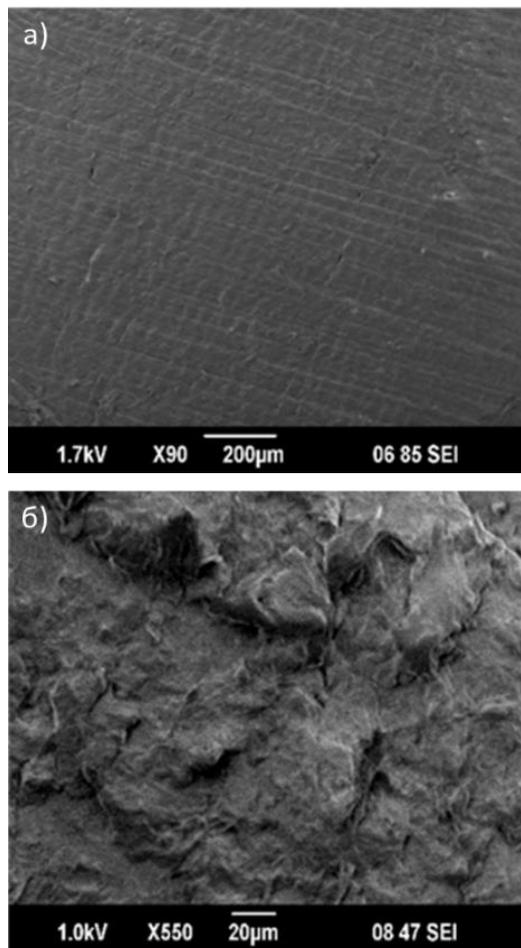


Рисунок 7. РЭМ изображение СВМПЭ до (а) и после облучения при дозе 3 МГр, 4,5 МэВ (б)

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных экспериментальных данных и их анализа были сделаны следующие выводы:

1. Установлено, что после ЭЛО на ускорителе ИЛУ-10 значительные изменения механических свойств полимера СВМПЭ не наблюдается. Это связано с малой толщиной модифицированного поверхностного слоя.

2. Методом ДСК определены термические характеристики полимерных образцов. Проанализировано влияние облучения на процесс кристаллизации полимера. Также выявлено, что после ЭЛО температура плавления СВМПЭ практически не изменяется.

3. Определено, что во время ЭЛО в образцах СВМПЭ происходит окисление в результате химических реакций полиэтиленовой цепи с  $O_2$ . Никаких новых функциональных групп не было создано, видимо, связано с тем, что облучение просто вызвало разрыв связей, чтобы сформировать свободные радикалы, а затем перегруппировать, чтобы вызвать сшивание.

4. Установлено, что ЭЛО приводит к изменению морфологии поверхности, то есть поверхность становится шероховатой, увеличивается глубина неровности и структура сферолитов. На микроуровне формируются сферолиты, состоящие из радиально ориентированных фибрилл. Эти изменения четко указывают на смещение молекул полимера под влиянием облучения.

*Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК по программе «Грантовое финансирование научных исследований» (код проекта AP05134982).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mc Kellop H., Shen F., Lu B., Campbell P., Salovey R. Development of an extremely wear-resistant ultra high molecular weight polyethylene for total hip replacements // J. Orthopedic research. – 1999. – Vol. 17(2). – P. 157–167.
2. Kim S., Kang P.H., Nho Y.C., Yang O.B. Effect of electron beam irradiation on physical properties of ultrahigh molecular weight polyethylene // J. Appl Polym Sci. – 2005. – Vol. 97. – P. 103–116.
3. Urries I., Medel F.J., Rios R., Gomez-Barrena E., Puertolas J.A. Comparative cyclic stress-strain and fatigue resistance behavior of electron-beam- and gamma-irradiated ultrahigh molecular weight polyethylene // Journal of Biomedical Materials Research. – 2004. – Vol. 70B. – P. 152–160.
4. Visco A.M., Torrisi L., Campo N., Emanuele U., Trifiro A., Trimarchi M. Mechanical Performance of Electron-Beam-Irradiated UHMWPE in Vacuum and in Air // J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater. – 2009. – Vol. 89B. – P. 55–64.
5. Slouf M., Synkova H., Baldrian J., Marek A., Kovarova J., Schmidt P., Dorschner H., Stephan M., Gohs U. Structural changes of UHMWPE after e-beam irradiation and thermal treatment. J Biomed Mater Res Part B: Appl Biomater. – 2008. – Vol. 85B. – P. 240–251.
6. Raghu S, Archana K, Sharanappa C, Ganesh S, Devendrappa H. The physical and chemical properties of gamma ray irradiated polymer electrolyte films // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2015. – Vol. 426. – P. 55–62.
7. Oka T., Kanbe H., Yatagai F., Hama Y., Changes in the chemical structure and the mechanical properties of single-site polyethylene induced by ion-beam irradiation J Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. – 2003. – Vol. 208. – P. 181–184.
8. Al-Ali M., Madi N.K., Al Thani N.J., El-Muraikhi M., Turos A., Mechanical and thermal properties of gamma-ray irradiated polyethylene blends // Vacuum. – 2003. – Vol. 70. – P. 227–236.
9. V. Premnath, W.H. Harris, M. Jasty, E.W. Merrill Gamma sterilization of UHMWPE articular implants an analysis of the oxidation problem Biomaterials. – 1996. – Vol. 17. – P. 1741–1753.
10. Сагдолдина Ж.Б., Туякбаев Б.Т., Маулит А., Кенесбеков А.Б., Исследование влияния электронного облучения на износостойкость полимерных материалов, Поликомтриб-2019, Гомель, Беларусь, 2019, С. 144.
11. Sharif J., Aziz S.H.S.A., Hashim K. Radiation effects on LDPE/EVA blends // Radiat. Phys. Chem. – 2000. – Vol. 58(2) – P. 191–195.

12. Kieran A.M., James E. K., Brian McEvoy, Olivier V., Damien R., Richard C., Clement H.L. The effects of high energy electron beam irradiation in air on accelerated aging and on the structure property relationships of low density polyethylene // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 2013. – Vol. 297. – P. 64–74.
13. Dongliang D., Meiwu Sh., Effects of electron beam irradiation on structure and properties of ultra-high molecular weight polyethylene fiber // *Journal of Industrial Textiles*. – 2017. – Vol. 47. – P. 1357–1377.
14. Tretinnikova O.N., Ogataa S., Ikada Y. Surface crosslinking of polyethylene by electron beam irradiation in air // *Polymer*. – 1998. – Vol. 39(24). – P.6115–6120.
15. Feulner R., Brocka Z., Seefried A., Kobes M.O., Hülдер G., Osswald T.A., The effects of e-beam irradiation induced cross linking on the friction and wear of polyamide 66 in sliding contact // *Wear*. – 2010. – Vol. 268. – P. 905–910.
16. Shifeng Zhu, Meiwu Shi, Meifang Zhu, Effects of Electron-Beam Irradiation Crosslinking on PA6 Fibers // *Fibers and Polymers*. – 2013. – Vol. 14(4). – P. 525–529.
17. Nagase T., Nino A., Hosokawa T., Umakoshi Y. Phase Stability of an Amorphous Phase Against Electron Irradiation Induced Crystallization in Fe-Based Metallic Glasses // *Materials transactions*. – 2007. – Vol. 48(6). – P. 1340–1349.

### **ӨЖМПЭ ПОЛИМЕРІН ЭЛЕКТРОНДЫ-СӘУЛЕЛІ ӨНДЕУДІҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ**

<sup>1)</sup> Б.К. Рахадиллов, <sup>1)</sup> Ж.Б. Сағдолдина, <sup>2)</sup> Л.Б. Баятанова, <sup>2)</sup> К.Б. Рахымжанова, <sup>1)</sup> А.Қ. Сәндібек

<sup>1)</sup> С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік университеті, Өскемен, Қазақстан

<sup>2)</sup> Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан мемлекеттік техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Осы жұмыста өте жоғары молекулалық полиэтиленнің (ӨЖМПЭ) құрылымы мен механикалық қасиеттеріне электрондық-сәулелі өңдеудің (ЭСӨ) әсерін зерттеу бойынша жұмыстардың нәтижелері ұсынылған. ӨЖМПЭ үлгілерінің ЭСӨ ИЛУ-10 өнеркәсіптік импульстік үдеткішінде жүзеге асырылды. Электрондар энергиясы 2,5–4,5 МэВ шегінде өзгеріп, ал сәулелену мөлшері 2–9 МГр шегінде өзгеріп отырды. Дифференциалды-сканерлеу калориметрия әдісімен полимерлік үлгілердің термиялық сипаттамалары анықталды. Сәулеленудің полимердің кристалдану процесіне әсері талданды. Қаптаманың пайда болу әсері кристалдық құрылымға (ламелдердің қалыңдығына) қатысты маңызды емес және сәулелену дозасы ӨЖМПЭ балку температурасына әсер етпейді. Алынған инфрақызыл спектрлер ЭСӨ кезінде ӨЖМПЭ үлгілерінде оттегі бар полиэтилен тізбегінің химиялық реакциялары нәтижесінде тотығу болатынын көрсетті. ЭСӨ бетінің морфологиясының өзгеруіне әкеледі, яғни беті кедір-бұдыр болып, сферолиттердің тегіс емес терендігі мен құрылымы артады. Механикалық сынаулар нәтижелері ЭСӨ-дан кейін ӨЖМПЭ беріктігі мен қаттылығы шамалы ұлғаятынын көрсетті.

### **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ELECTRON-BEAM PROCESSING OF UHMWPE POLYMER ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES**

<sup>1)</sup> B.K. Rakhadilov, <sup>1)</sup> Zh.B. Sagdoldina, <sup>2)</sup> L.B. Bayatanova, <sup>2)</sup> K.B. Rahymzhanova, <sup>1)</sup> A.K. Sandibek

<sup>1)</sup> Sarsen Amanzholov East Kazakhstan state university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

<sup>2)</sup> D. Serikbayev East Kazakhstan state technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

This work presents the results of research on the influence of electron beam processing (EBP) on the structure and mechanical properties of ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE). EBP of UHMWPE samples was carried out on an industrial pulse accelerator ILU-10. The electron energy varied in the range of 2.5–4.5 MeV, and the radiation dose varied in the range of 2–9 MGy. Thermal characteristics of polymer samples were determined by differential scanning calorimetry. The influence of irradiation on the polymer crystallization process is analyzed. It was discovered that the effect of crosslinking is not significant about the crystal structure (thickness of the lamellae) and the radiation dose almost does not affect the melting temperature of UHMWPE. The obtained infrared spectra showed that during EBP, the UHMWPE samples occur oxidation as a result of chemical reactions of the polyethylene chain with oxygen. Installed, that EBP leads to a change in the surface morphology, that is, the surface becomes rough, the depth of irregularity and the structure of spherulites increases. The results of mechanical tests showed that after EBP, the strength and hardness of UHMWPE increase slightly.