

К.Д. Орманбеков*, А.Ж. Жасұлан¹, З.А. Сатбаева^{1,2}, Г.М. Андыбаева^{2,3}, Т. Жанабай⁴

¹Инжиниринг центр «Упрочняющие технологии и покрытия»,
Университет имени Шакарима города Семей,

071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Физкультурная, 4в

²ТОО «Plasma Science»,
070018, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Гоголя 7Г

³ТОО «Инжиниринговый центр «Иннотехмаш»,
070010, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Серикбаева 37

⁴Университет Сакарья,
54050, Турция, г. Сакарья, ул. Академийолу, 5-20

*e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Аннотация: Исследование демонстрирует значительное влияние облучения электронным пучком на трибологические и механические свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ). Облучение электронным пучком, метод, использующий электроны высокой скорости для модификации свойств материала, было применено к ПТФЭ с целью потенциального улучшения его износостойкости и механической твердости, что особенно важно для применения в условиях повышенного износа. В ходе экспериментов образцы ПТФЭ облучали различными дозами и оценивали их износостойкость, микротвердость и шероховатость поверхности после облучения. Результаты трибологических испытаний показали заметное улучшение износостойкости и микротвердости с увеличением доз облучения. В частности, облученные образцы продемонстрировали уменьшение объема износа и улучшенные поверхностные характеристики по сравнению с необлученным образцом. Облученный образец (ПТФЭ-2) показал наибольшую стойкость к абразивному износу и значительное повышение твердости поверхности, что свидетельствует о том, что облучение электронным пучком эффективно укрепляет материал, вызывая сшивание и другие структурные изменения в полимерной матрице. Кроме того, были выявлены изменения шероховатости поверхности. Облученные образцы показали измененные параметры, что способствовало повышению их износостойкости. Эти изменения объясняются физико-химическими преобразованиями, вызванными воздействием электронного пучка, которые модифицируют поверхностные и подповерхностные области полимера. Данное исследование подтверждает, что облучение электронным пучком является эффективным методом для улучшения механических и трибологических свойств ПТФЭ, делая его более подходящим для высокотехнологичных инженерных применений, где необходимы высокая прочность и устойчивость к экстремальным условиям. Полученные результаты открывают новые перспективы для использования ПТФЭ в секторах, требующих высокой производительности, расширяя его применение за пределы традиционных областей.

Ключевые слова: Политетрафторэтилен (ПТФЭ), облучение электронным пучком, коэффициент трения, износ, микротвердость.

Введение

Полимеры играют ключевую роль в машиностроении благодаря их уникальным характеристикам, включая стойкость к коррозии, малый вес и способность сохранять свои свойства при высоких температурах. Один из наиболее популярных синтетических полимеров, используемых в промышленности, – это политетрафторэтилен (ПТФЭ), широко известный как тефлон. Это полимер с особыми физико-химическими свойствами, которые делают его идеальным для применения в условиях повышенного износа и воздействия агрессивных химических сред. ПТФЭ обладает уникальной молекулярной структурой, где атомы углерода и фтора формируют прочные ковалентные связи. Эта структура делает материал стойким к воздействию кислот, щелочей и органических растворителей, придавая ему отличные антипригарные и антифрикционные свойства. Более того, низкий коэффициент

трения и высокая термическая стабильность делают ПТФЭ незаменимым в таких отраслях, как аэрокосмическая, автомобильная и химическая промышленности. Полимер способен сохранять свои свойства даже при экстремальных температурах и нагрузках, что значительно расширяет возможности его применения в сложных инженерных задачах [1-9].

Межмолекулярные взаимодействия в ПТФЭ в основном обусловлены силами Ван-дер-Ваальса, которые слабее ковалентных связей, но достаточно сильны для обеспечения высокой стойкости материала к агрессивным средам и температурным воздействиям. ПТФЭ полимеризуется путем свободнорадикальной полимеризации тетрафторэтилена, при которой свободные радикалы инициируют реакцию, формируя длинные цепи полимера. Этот процесс обеспечивает материалу уникальные свойства, такие как высокая инертность и устойчивость к воздействию ультрафиолетового излучения и других факторов [10-15].

Несмотря на многочисленные преимущества ПТФЭ, его трибологические свойства, такие как износостойкость и механическая прочность, ограничены, особенно в условиях высокой нагрузки и трения. Для улучшения этих свойств были разработаны различные методы модификации, включая механическое упрочнение, плазменное напыление, добавление наполнителей и электронное облучение. Однако каждый из этих методов имеет свои ограничения и недостатки. Механическое упрочнение часто связано с необходимостью применения высоких давлений или температур, что может привести к деформации материала и неравномерному распределению свойств по объему. Этот метод также не всегда обеспечивает достаточное улучшение износостойкости, особенно в условиях высоких нагрузок и трения. Плазменное напыление позволяет наносить защитные покрытия на поверхность ПТФЭ, однако этот метод требует сложного оборудования и тщательной подготовки поверхности [16-22]. Покрытия, полученные таким образом, могут иметь недостаточную адгезию к основному материалу, что снижает их эффективность в долгосрочной перспективе. Кроме того, плазменное напыление ограничено в толщине наносимого слоя, что может не обеспечивать необходимую долговечность. Добавление наполнителей, таких как углеродные волокна или металлические частицы, может значительно улучшить механические и трибологические свойства ПТФЭ. Однако этот подход имеет свои недостатки, поскольку добавление наполнителей часто ухудшает химическую стойкость и термическую стабильность материала. Кроме того, это может привести к увеличению плотности материала и утрате некоторых его исходных качеств, таких как гибкость и низкий коэффициент трения [23-26].

Несмотря на существующие ограничения и недостатки традиционных методов улучшения свойств ПТФЭ, поиск эффективных решений для повышения его трибологических характеристик остается актуальной задачей. В этом контексте электронное облучение представляет собой перспективный альтернативный подход, который, в отличие от других методов, обеспечивает глубокую модификацию материала на молекулярном уровне. Электронное облучение представляет собой метод обработки материалов, при котором высокоэнергетические электроны воздействуют на материал. Соответственно, обработка электронным пучком позволяет существенно изменять структуру полимера, создавая новые связи между цепями, что может привести к значительным улучшениям механических и трибологических свойств без ущерба для химической стойкости и термической стабильности [27-30].

В случае ПТФЭ электроны могут вызывать сшивание полимерных цепей, что приводит к увеличению плотности сшивок и, как следствие, к улучшению физико-химических свойств материала. В процессе облучения электроны, проникая в материал, вызывают ионизацию и возбуждение молекул, что может приводить к разрыву и повторному соединению химических связей, а также к созданию новых структурных элементов внутри полимера.

Преимущества электронного облучения заключаются в его высокой эффективности, точности и способности контролировать процесс на молекулярном уровне. Этот метод не требует применения высоких температур или агрессивных химических реагентов, что делает его экологически безопасным и экономически эффективным. Облучение электронным пучком также позволяет модифицировать материал с высокой точностью, что особенно важно при создании компонентов с заданными свойствами. Параметры обработки полимера можно регулировать, изменяя дозировку и энергию электронного пучка [31-32]. Для достижения желаемых результатов после облучения необходимо определить оптимальные параметры. Среди параметров электронного облучения важной является энергия пучка, так как она

определяет глубину проникновения электронов в материал, а доза облучения — количество энергии, передаваемое материалу [33-34].

Целью данного исследования является всесторонняя оценка влияния электронного облучения на трибо-механические свойства ПТФЭ. В рамках работы исследованы его механические свойства, устойчивость к износу и трибологические характеристики после обработки электронным пучком. Полученные результаты могут стать основой для разработки новых технологических процессов, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик ПТФЭ и расширение его применения в высокотехнологичных областях.

Материалы и методы

В качестве исходного материала для экспериментов использовался политетрафторэтилен (ПТФЭ) в форме стержня диаметром 30 мм. После приобретения стержень был разрезан на отдельные пластины, каждая из которых имела толщину 3 мм. Для обеспечения равномерной обработки образцов, перед облучением электронным пучком их поверхности подвергались полировке, чтобы достичь шероховатости менее $Ra < 1$ мкм.

Образцы ПТФЭ были подвергнуты обработке электронным пучком с использованием импульсного линейного ускорителя ИЛУ-10, расположенного в АО "Парк ядерных технологий" в г. Курчатове, Республика Казахстан. Для достижения требуемых доз радиационного воздействия параметры электронного пучка были предварительно тщательно откалиброваны. В ходе экспериментов использовались дозы облучения в 100 кГр и 120 кГр, которые применялись за один проход. Для достижения более высоких совокупных доз требовалось несколько проходов. Подробные параметры процесса облучения электронным пучком приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры облучения электронным пучком ПТФЭ

Образец	Энергия пучка, Е, МэВ	Ток пучка, I, мА	Доза за один проход, кГр	Количество проходов	Общая доза радиации, кГр
ПТФЭ-1	2.7	6.84	100	4	400
ПТФЭ-2	2.7	6.84	120	5	600

Испытания образцов на износ в условиях сухого трения проводились с использованием установки «шар-диск» с нагрузкой 12 Н и скоростью скольжения 0,1 м/с на трибометре Anton Paar TRB3 (рис. 1). Испытание проводилось в соответствии с международными стандартами ASTM G99-959, DIN 50324 и ISO 20808. В ходе трибологических испытаний использовался стальной шар 100Cr6 диаметром 6 мм (контртело). Длина испытательного пути составляла 250 метров. Оценка объемного износа проводилась путем анализа профиля дорожки трения с использованием контактного профилометра модели 130. Измерения профиля дорожки трения проводились пять раз в разных точках образца после испытаний, и затем были рассчитаны средние значения. Расчет скользящего износа проводился по формуле (1) ниже:

$$I = \frac{2\pi r \cdot S}{d \cdot P} = \frac{V}{d \cdot P} \quad (1)$$

Где r – радиус контртела, S – площадь поперечного сечения дорожки износа, V – объем удаленного материала, d – общая длина испытательного пути, а P – приложенная нагрузка.

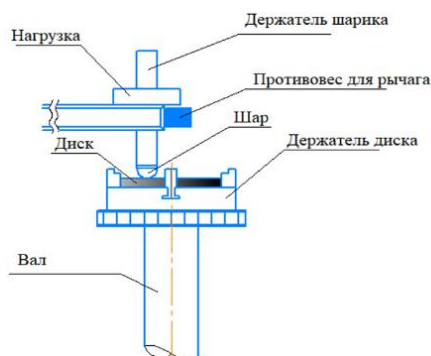


Рисунок 1 – Трибометр и схема метода «шар на диске», используемая для испытаний

Образцы подвергались испытаниям на абразивный износ на экспериментальной установке, использующей схему 'вращающийся ролик – плоская поверхность' с применением свободно движущихся абразивных частиц (рис. 2). Для испытания на истирание с использованием резинового колеса поверхности образцов были отшлифованы и отполированы, а также очищены ацетоном и высушены. Цилиндрический резиновый ролик, прижимаемый своей радиальной поверхностью к плоской поверхности испытуемого образца с силой 22 Н, вращался с частотой 1 с^{-1} . Скорость подачи абразивных частиц между резиновым колесом и образцом, то есть в зону испытания, составляла 41-42 г/мин. В качестве абразивных частиц использовался электрокорунд с размером зерен 200-250 мкм. Износостойкость испытанного обработанного образца оценивалась путем сравнения его износа с износом эталонного образца (исходного образца). Износ измерялся гравиметрическим методом на аналитических весах GOSTMETR VLTE-510S с точностью до 0.0001 г. Образцы взвешивались каждую минуту, и испытания проводились в течение пяти минут. Перед взвешиванием образцы продувались сжатым воздухом для удаления оставшихся частиц песка. Износостойкость испытуемого материала оценивалась по потере массы образцов в ходе испытаний в соответствии с ГОСТ-23.208-79.

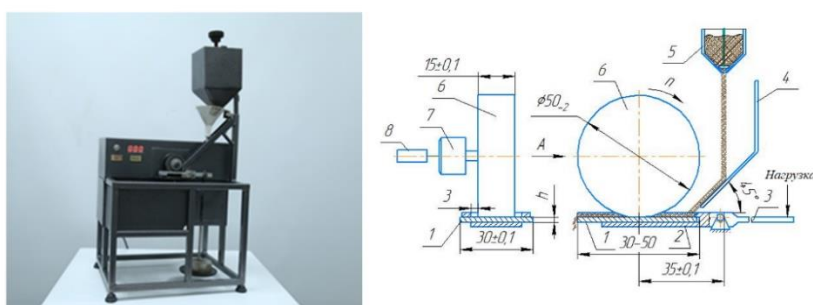


Рисунок 2 – Установка для испытания на истирание

1 – зажим; 2 – держатель; 3 – рычаг образца; 4 – направляющий лоток; 5 – механизм дозирования; 6 – ротор; 7 – привод; 8 – контроллер

Измерения твердости образцов проводились на твердомере FISCHERSCOPE HM2000S в соответствии с DIN EN ISO 14577-1 и ASTM E 2546, разработанном компанией Helmut Fischer GmbH Institut für Elektronik und Messtechnik. Время выдержки образца под нагрузкой 1 Н для полимера составляло 20 секунд. На поверхности образца было проведено не менее 10 измерений твердости в разных местах.

Шероховатость поверхности полимеров ПТФЭ до и после обработки электронным пучком измерялась с помощью профилометра модели HY2300 Anytester.

Результаты и обсуждение

На рисунке 3 представлены коэффициенты трения для исходных и обработанных электронным пучком образцов ПТФЭ на протяжении пути скольжения в 250 метров. Исходный образец ПТФЭ показывает начальный пик коэффициента трения, который быстро уменьшается и стабилизируется на более низком уровне в течение теста. Два обработанных образца, ПТФЭ-1 (облученный при дозе 400 кГр) и ПТФЭ-2 (облученный при дозе 600 кГр), демонстрируют существенно иное поведение.

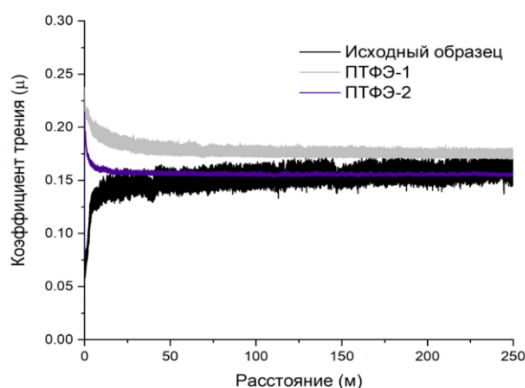


Рисунок 3 – Коэффициент трения исходного и облученного ПТФЭ при различных дозах

Из представленных данных коэффициент трения исходного образца ПТФЭ составляет 0.152, в то время как для образца ПТФЭ-1, обработанного электронным пучком при дозе облучения 400 кГр, он увеличивается до 0.178. Это увеличение может быть связано с изменением структуры поверхности и химического состава материала в результате облучения, что приводит к изменениям в адгезионных и механических взаимодействиях между ПТФЭ и контртелом в условиях трения. Увеличение коэффициента трения также может указывать на повышение шероховатости поверхности или образование новых функциональных групп, способствующих большей адгезии. Для образца ПТФЭ-2, облученного при более высокой дозе 600 кГр, коэффициент трения немного снизился до 0.156 по сравнению с ПТФЭ-1. Это может быть связано с дальнейшими изменениями структуры материала, которые могли произойти из-за более интенсивного воздействия электронного пучка. Возможно, что при более высокой дозе облучения происходит сшивание молекул на поверхности [36-37], что приводит к изменениям в энергии поверхности и снижению адгезии. В результате это может повлиять на величину коэффициента трения.

На рисунке 4 представлены измерения объема износа для образцов ПТФЭ, включая исходный, ПТФЭ-1 и ПТФЭ-2, подвергнутых различным дозам облучения электронным пучком. Исходный образец демонстрирует наибольший объем износа, около 2,7 мм³, что указывает на наименьшую стойкость необлученного материала к абразивному воздействию при используемых условиях испытания. После облучения наблюдается значительное снижение объема износа у обоих облученных образцов. Образец ПТФЭ-1 показывает объем износа около 1,6 мм³, что свидетельствует о повышенной износостойкости благодаря процессу облучения. Это улучшение может быть связано с изменениями в структуре полимера, такими как сшивание или другие модификации на молекулярном уровне, которые усиливают его способность противостоять абразивным силам. Образец ПТФЭ-2, вероятно, получивший более высокую дозу облучения, демонстрирует более значительное уменьшение объема износа, составляющее около 0,4 мм³. Это значительное снижение указывает на то, что повышение дозы облучения электронным пучком существенно улучшает износостойкость материала, вероятно, за счет дальнейшего усиления сшивки полимерных цепей или формирования более плотной и устойчивой молекулярной структуры [38-39].

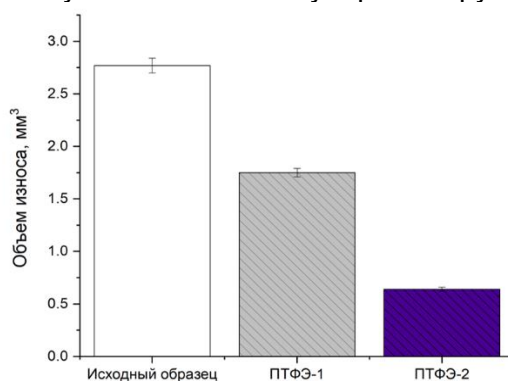


Рисунок 4 – Объем износа исходного и облученного ПТФЭ при различных дозах

На рисунке 5 представлено детальное сравнительное исследование следов износа на образцах ПТФЭ до и после облучения электронным пучком, подчеркивающее характеристики поверхностного износа и влияние облучения на износостойкость.

Исходный образец демонстрирует износ, отмеченный черной стрелкой, с неглубоким профилем, что указывает на минимальное удаление материала и равномерную стойкость к абразивному износу. В отличие от этого, образец ПТФЭ-1, подвергнутый 400 кГр облучению, отмеченный синей стрелкой, показывает более узкий и четкий след с более глубоким профилем. Эти изменения указывают на концентрацию износа и повышенную стойкость к разрушению. Наиболее значительное изменение наблюдается у ПТФЭ-2, который подвергался 600 кГр облучению: тонкий, четкий след с неглубоким профилем указывает на улучшенную твердость и износостойкость. Эта закономерность объясняется тем, что более высокие дозы облучения электронным пучком могут существенно улучшить износостойкость ПТФЭ за счет сшивания и других структурных изменений в полимерной матрице, что приводит к поверхности, более устойчивой к абразивным воздействиям.

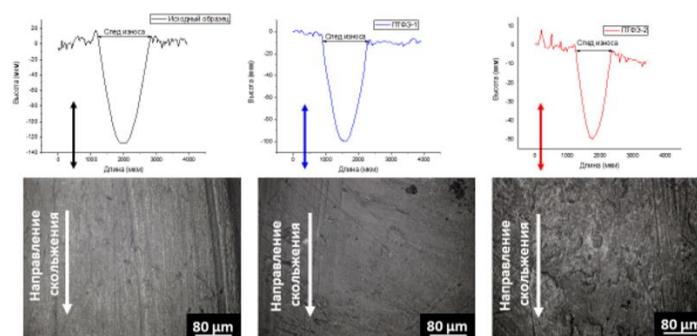


Рисунок 5 – Следы износа исходного и облученного ПТФЭ при различных дозах

Кроме того, микрофотографии следов износа показывают, что образец ПТФЭ-2 имеет неравномерную траекторию износа, что указывает на то, что контртело столкнулось с большим сопротивлением по сравнению с исходным образцом и ПТФЭ-1. Это различие в следах износа может быть связано с улучшенной структурной целостностью и однородностью, вызванной облучением, что помогает сохранять целостность поверхности полимера в условиях сухого трения.

Результаты испытаний, представленные в таблице 2 и таблице 3, показывают значительное различие в устойчивости к абразивному износу среди образцов, испытанных в идентичных условиях. Исходный образец, не подвергавшийся предварительной обработке облучением, показал наименьший износ, потеряв всего 0,1 г. Это говорит о том, что исходный ПТФЭ обладает более высокой стойкостью к удалению материала в условиях абразивного воздействия, что, вероятно, связано с его неизменной молекулярной структурой и целостностью поверхности. В отличие от этого, образцы ПТФЭ-1 и ПТФЭ-2, которые подвергались облучению продемонстрировали более значительную потерю материала: ПТФЭ-1 потерял 0,24 г, а ПТФЭ-2 – 0,56 г. Примечательно, что ПТФЭ-2 показал наиболее выраженный износ, что указывает на значительное снижение его стойкости к абразивному износу. Это можно объяснить изменениями в микроструктуре полимера или свойствами поверхности, вызванными облучением, которые, возможно, ослабили способность материала противостоять механическим нагрузкам, характерным для абразивного износа.

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов на абразивный износ

№	Образец	Время испытания, мин	Вес до испытания, г	Вес после испытания, г	Абразивный износ (по потере веса), г
1	Исходный образец	5	3,70	3,60	0,1
2	ПТФЭ-1	5	3,65	3,41	0,24
3	ПТФЭ-2	5	4,03	3,47	0,56

Таблица 3 – Результаты расчетов относительной износостойкости (K_w) полимеров ПТФЭ для абразивного износа

№	Образец	Потеря массы, г	Плотность ρ , кг/м ³	Относительная износостойкость K_w
1	ПТФЭ-1	0,24	2200	0,416
2	ПТФЭ-2	0,56	2200	0,178

Рассчитанные значения относительной износостойкости (K_w) еще больше подчеркивают эти различия. Образец ПТФЭ-1 показывает значение K_w 0,416, что указывает на умеренную стойкость к абразивному износу, в то время как ПТФЭ-2 с значением K_w 0,178 подтверждает значительно меньшую устойчивость по сравнению как с исходным образцом, так и с ПТФЭ-1.

На рисунке 6 показано увеличение твердости образцов, коррелирующее с ростом доз радиации. Значительное улучшение микротвердости было зафиксировано у облученных образцов, что объясняется сшиванием, вызванным радиацией, которое повышает сопротивляемость деформациям поверхности. Наименьшая твердость среди облученных образцов была зафиксирована при дозе облучения 400 кГр. При дозе 600 кГр и энергии пучка 2,7 МэВ микротвердость оказалась в 1,5 раза выше по сравнению с необлученным образцом. Исследования других авторов также подтверждают, что механические свойства ПТФЭ значительно зависят от параметров облучения. Так, результаты показывают, что увеличение дозы электронного облучения способствует повышению микротвердости материала за счет

формирования более плотной структуры. Это может быть связано с усиленной дисперсией полимерных частиц и увеличением сшивки полимерных цепей, что вносит вклад в улучшение механических характеристик. Также следует отметить, что некоторые авторы указывают на изменения в кристалличности поверхностного слоя ПТФЭ после обработки, что оказывает дополнительное влияние на микротвердость и прочность материала [40-41].

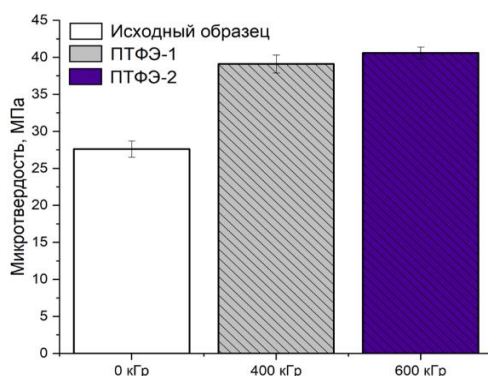


Рисунок 6 – Микротвердость образцов полимера ПТФЭ до и после облучения электронным пучком

Измерения шероховатости поверхности ПТФЭ выявили значительные изменения после облучения электронным пучком. Профилограммы как исходных, так и облученных образцов, представленные на рисунке 7, показывают почти линейное увеличение параметров шероховатости R_a , R_{max} и R_z для образцов ПТФЭ-1 и ПТФЭ-2, как указано в таблице 4. Значительное увеличение шероховатости облученных поверхностей ПТФЭ можно объяснить взаимодействием электронного облучения с поверхностью полимеров, включающим как физическое воздействие электронов, так и нагревание поверхности, что привело к изменениям в морфологии поверхности и, как следствие, повлияло на значения шероховатости [42-43].



Рисунок 7 – Профилограммы поверхности образцов ПТФЭ

Данные, представленные в таблице 4, еще раз подтверждают эти выводы. Например, после облучения средняя шероховатость (R_a) ПТФЭ увеличилась с 0.86 ± 0.03 мкм до 1.49 ± 0.04 мкм при дозе 400 кГр, а при 600 кГр средняя шероховатость ПТФЭ-2 достигла 2.03 ± 0.05 мкм. Такое значительное увеличение шероховатости поверхности указывает на то, что облучение электронным пучком существенно модифицирует поверхность этих полимеров. Параметры R_z и R_{max} также показывают аналогичную тенденцию. Например, максимальная глубина шероховатости (R_{max}) для ПТФЭ-1 после облучения увеличилась с 11.01 ± 0.20 мкм до 11.14 ± 0.28 мкм, а для ПТФЭ-2 до 16.50 ± 0.34 мкм. Эти изменения еще раз подтверждают влияние электронного облучения на поверхность полимера.

Таблица 4 – Параметры шероховатости поверхности исходных и облученных электронным пучком образцов ПТФЭ

Образец полимера	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм
Исходный образец	$0,86 \pm 0,03$	$8,13 \pm 0,15$	$10,23 \pm 0,44$
ПТФЭ-1	$1,49 \pm 0,04$	$11,01 \pm 0,20$	$11,14 \pm 0,28$
ПТФЭ-2	$2,03 \pm 0,05$	$12,37 \pm 0,31$	$16,50 \pm 0,34$

В целом изменения параметров шероховатости поверхности указывают на то, что облучение электронным пучком оказывает значительное влияние на свойства поверхности ПТФЭ. Этот эффект, вероятно, обусловлен сочетанием факторов, включая нагрев поверхности и взаимодействие электронов со структурой полимера, что приводит к более шероховатой морфологии поверхности.

Заключение

Исследование демонстрирует значительное влияние облучения электронным пучком на трибологические и механические свойства ПТФЭ. Результаты показывают, что облучение электронным пучком значительно улучшает износостойкость и микротвердость материала, делая его более пригодным для применения в условиях, где требуется долговечность в экстремальных условиях.

Исследование тщательно описывает изменения в следах износа и объеме после облучения. Изначально ПТФЭ демонстрирует минимальный износ, сохраняя большую часть своей массы и структуры. Однако после облучения наблюдается явное различие в объеме износа между обработанными и необработанными образцами. Облученные образцы ПТФЭ (ПТФЭ-1 и ПТФЭ-2) показывают значительное снижение объема износа, что указывает на улучшенную стойкость к абразивным воздействиям. Эти изменения, вероятно, являются результатом способности электронного пучка модифицировать поверхностные и подповерхностные области полимера, улучшая его структурную целостность.

Более того, детальный анализ следов износа соответствует количественным измерениям износа. Облученные образцы демонстрируют более узкие и мелкие следы износа по сравнению с исходным образцом, что свидетельствует о меньшей деградации материала и лучшей сохранности поверхности во время испытаний. Этот вывод имеет важное значение, так как он напрямую коррелирует с увеличением износостойкости, наблюдаемой в результатах тестов на объемный износ.

Измерения шероховатости поверхности также подтверждают улучшенные трибологические свойства, показывая, что характеристики поверхности ПТФЭ значительно улучшаются после облучения. Эта модификация текстуры поверхности не только способствует снижению износа, но и потенциально улучшает взаимодействие материала с контактными поверхностями в рабочих условиях.

В целом, исследование заключает, что облучение электронным пучком является действенным методом для значительного улучшения износостойкости и механических свойств ПТФЭ, расширяя его применимость в более требовательных инженерных областях. Это достижение открывает новые возможности для использования ПТФЭ в областях, где требуется повышенная производительность, укрепляя его роль в различных промышленных приложениях.

Список литературы

1. Mukhtar N.Z.F. A Study on Commercial Polytetrafluoroethylene as a High Potential Polymer / N.Z.F. Mukhtar, M. Rusop, S. Abdullah // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 832. – P. 543-546.
2. Kameda T. Polytetrafluoroethylene (PTFE): A resin material for possible use in dental prostheses and devices / T. Kameda, K. Ohkuma, S. Oka // *Dental Materials Journal*. – 2019. – Vol. 38, № 1. – P. 136-142.
3. Jones M. PTFE plain bearings / M. Jones // *Industrial Lubrication and Tribology*. – 1996. – Vol. 48, № 6. – P. 10-12. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000004131>.
4. Chemical structure and physical properties of radiation-induced crosslinking of polytetrafluoroethylene / A. Oshima et al // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2001. – Vol. 62, № 1. – P. 39-45.
5. Blanchet T.A. Wear resistant irradiated FEP/unirradiated PTFE composites / T.A. Blanchet, Y.L. Peng // *Wear*. – 1998. – Vol. 214, № 2. – P. 186-191.
6. Oshima A. Application of radiation-crosslinked polytetrafluoroethylene to fiber-reinforced composite materials / A. Oshima, A. Udagawa, Y. Morita // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2001. – Vol. 60, № 4-5. – P. 467-471.
7. Tribological properties of radiation cross-linked polytetrafluoroethylene sheets / Z. Tang et al // *Wear*. – 2010. – Vol. 269, № 5-6. – P. 485-490.
8. Lappan U. Electron beam irradiation of polytetrafluoroethylene in vacuum at elevated temperature: an infrared spectroscopic study / U. Lappan, U. Geißler, K. Lunkwitz // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1999. – Vol. 74, № 6. – P. 1571-1576.

9. Dhanumalayan E. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review / E. Dhanumalayan, G.M. Joshi // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2018. – Vol. 1. – P. 247-268.
10. Puts G.J. Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer / G.J. Puts, P. Crouse, B.M. Ameduri // *Chemical Reviews*. – 2019. – Vol. 119, № 3. – P. 1763-1805.
11. Perfluoropolyether–tetrafluoroethylene (PFPE–TFE) block copolymers: An innovative family of fluorinated materials / M. Avataneo et al // *Journal of Fluorine Chemistry*. – 2011. – Vol. 132, № 11. – P. 885-891.
12. Teng H. Overview of the development of the fluoropolymer industry / H. Teng // *Applied Sciences*. – 2012. – Vol. 2, № 2. – P. 496-512.
13. High temperature ion beam erosion of polytetrafluoroethylene / M. Adami et al // *Thin Solid Films*. – 2004. – Vol. 459, № 1-2. – P. 318-322.
14. Pinkerton D.M. Polytetrafluoroethylene: Effects of γ -radiation on fine structure / D.M. Pinkerton, K.R.L. Thompson // *Journal of Polymer Science Part A-2: Polymer Physics*. – 1972. – Vol. 10, № 3. – P. 473-488.
15. Improved thermal stability of crosslinked PTFE using fluorine gas treatment / J.H. Kim et al // *Journal of Fluorine Chemistry*. – 2008. – Vol. 129, № 7. – P. 654-657.
16. Plasma immersion ion implantation of poly (tetrafluoroethylene) / T.L. Schiller et al // *Surface and Coatings Technology*. – 2004. – Vol. 177. – P. 483-488.
17. Effects of the fraction of PTFE and film thickness on wear and friction in an ePTFE and epoxy composite solid lubricant coating / N.L. McCook et al // *World Tribology Congress*. – 2005. – Vol. 42029. – P. 929-930.
18. Wear properties of PTFE polymer coated carbon steel using atmospheric and RF low pressure plasma / H.V. Ozkavak et al // *IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS)*. – 2013. – P. 1-1.
19. Formation of protective composite coatings with the use of SPTFE suspensions / K.V. Nadaraia et al // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1874.
20. Huang C.Y. The effect of interface modification between POM and PTFE on the properties of POM/PTFE composites / C.Y. Huang, C.I. Tseng // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2000. – Vol. 78, № 4. – P. 800-807.
21. Markova, M.A. Development of wear-resistant materials based on polytetrafluoroethylene and carbon fibers of UVIS-AK-P brand / M.A. Markova, P.N. Petrova // *In Materials Science Forum*. – 2019. – Vol. 945. – P. 327-332.
22. Gangal S.V. Perfluorinated polymers. / S.V. Gangal // *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. – 2000.
23. Manufacturing technology of composite materials—principles of modification of polymer composite materials technology based on polytetrafluoroethylene / A. Panda et al // *Materials*. – 2017. – № 10(4). – P. 377.
24. Puts G.J. Polytetrafluoroethylene: synthesis and characterization of the original extreme polymer / G.J. Puts, P. Crouse, B.M. Ameduri // *Chemical reviews*. – 2019. – № 119(3). – P. 1763-1805.
25. Comparative Study on the Frequency and Wear of Thermoplastic Polymeric Materials Based on PTFE / I.C. Petre et al // *Mater.* – 2021. – Plast 58(2).
26. Khan M.S. PTFE-based rubber composites for tribological applications / M.S. Khan, G. Heinrich // *Advanced Rubber Composites*. – 2011. – P. 249-310.
27. The effect of irradiation on mechanical and thermal properties of selected types of polymers / D. Manas et al // *Polymers*. – 2018. – № 10(2). – P. 158.
28. Effects of Electron Beam Irradiation on Mechanical and Tribological Properties of PEEK / B. Kurbanova et al // *Polymers*. – 2023. – № 15(6). – P. 1340.
29. Novel organic material induced by electron beam irradiation for medical application / A. Barylski et al // *Polymers*. – 2020. – № 12(2). – P. 306.
30. Nakamura S. Influence of electron beam irradiation on the mechanical and thermal properties of polypropylene/polyamide6 blends / S. Nakamura, K. Tokumitsu, T. Yamaguchi // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2013. – № 130(6). – P. 4318-4326.
31. The effect of high-energy ionizing radiation on the mechanical properties of a melamine resin, phenol-formaldehyde resin, and nitrile rubber blend / I. Kopal et al // *Materials*. – 2018. – № 11(12). – P. 2405.

32. Effects of electron beam irradiation on mechanical properties and nanostructural–morphology of montmorillonite added polyvinyl alcohol composite / S.T. Bee et al // Composites Part B: Engineering. – 2014. – № 63. – P. 141-153.
33. Electron beam induced surface modifications of PET film / A.A. El-Saftawy et al // Radiation Physics and Chemistry. – 2014. – № 102. – P. 96-102.
34. Study of structural, surface energies, and tribomechanical properties of thermoplastics irradiated by electron beam / B. Rakhadilov et al // Materials Research Express. – 2024. – № 11(8). – P. 085307.
35. Effect of electron irradiation on mechanical, tribological and thermal properties of polytetrafluoroethylene / K.D. Ormanbekov et al // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2023. – № 7(4). – P. 221-231.
36. Influence of the gamma irradiation dose on tribological property of polytetrafluoroethylene / L. Chai et al // Tribology International. – 2020. – T. 144. – C. 106094.
37. Abdou S.M. Characterization of structural modifications in poly-tetra-fluoroethylene induced by electron beam irradiation / S.M. Abdou, R.I. Mohamed // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2002. – T. 63, № 3. – P. 393-398.
38. Mechano-chemical properties of electron beam irradiated polyetheretherketone / N. Almas et al // Polymers. – 2022. – T. 14, № 15. – P. 3067.
39. The impact of non-vacuum electron beam treatment on the structure and properties of ultra-high molecular weight polyethylene / Z.B. Sagdoldina et al // Bulletin of the Karaganda University «Physics Series» – 2020. – T. 97, № 1. – P. 35-41.
40. Mechanical properties and the evolution of matrix molecules in PTFE upon irradiation with MeV alpha particles / G.L. Fisher et al // Applied Surface Science. – 2006. – T. 253, № 3. – P. 1330-1342.
41. Comparative study on microstructure, mechanical, and tribological property of gamma-irradiated polytetrafluoroethylene, polyetheretherketone, and polyimide polymers / L. Chai et al // Surface and Interface Analysis. – 2022. – № 54(1). – P. 13-24.
42. Effect of electron beam treatment in air on surface properties of ultra-high-molecular-weight polyethylene / I.Y. Grubova et al // Journal of Medical and Biological Engineering. – 2016. – T. 36. – P. 440-448.
43. McRae M.A. Infrared spectroscopic studies on polyethylene, 4. The examination of drawn specimens of varying stress crack resistance / M.A. McRae, W.F. Maddams // Die Makromolekulare Chemie: Macromolecular Chemistry and Physics. – 1976. – T. 177, № 2. – P. 473-484.

Информация о финансировании

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Комитета науки МНУВО РК АР13068529 «Разработка технологии электронно-лучевого модифицирования полимерных материалов, применяемых в машиностроении».

К. Орманбеков^{1*}, А. Жасұлан¹, З. Сатбаева^{1,2}, Г. Андыбаева^{2,3}, Т. Жаңабай⁴

¹Инжиниринг орталығы «Қатайту технологиялары және жабындар»,
Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,
071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Физкультурная к-сі, 4 в

²ЖШС «Plasma Science»,
070018, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Гоголя к-сі, 7 Г

³ЖШС «Иннотехмаш» Инжиниринг Орталығы,
070010, Қазақстан Республикасы, Өскемен қ., Серікбаева 37 к-сі

⁴Сакарья Университеті,
54050, Түркия, Сакарья қ., Академиолу к-сі, 5-20

*e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com

ИНЖЕНЕРЛІК ҚОЛДАНУ ҮШІН ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕННІҢ ТРИБОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЭЛЕКТРОНДЫ СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ӘСЕРІ

Зерттеу политетрафторэтиленнің (ПТФЭ) трибологиялық және механикалық қасиеттеріне электронды сәулеленудің айтарлықтай әсерін көрсетеді. Материалдың қасиеттерін өзгерту үшін жоғары жылдамдықты электрондарды қолданатын электронды сәулелену әдісі ПТФЭ-ге оның тозуға төзімділігі мен механикалық қаттылығын жақсарту мақсатында қолданылды, бұл әсіресе тозу жағдайында қолдану үшін өте маңызды. Эксперименттер барысында ПТФЭ үлгілері әртүрлі дозаларда сәулелендіріліп, олардың тозуға төзімділігі, микроқаттылығы және сәулеленуден кейінгі бетінің кедір-бұдырлығы бағаланды. Трибологиялық сынақтардың нәтижелері сәулелену

дозаларының жоғарылауымен тозуға төзімділік пен микроқаттылықтың айтарлықтай жақсарғанын көрсетті. Атап айтқанда, Сәулеленген үлгілер сәулеленбеген үлгіге қарағанда тозу көлемінің төмендеуін және бетінің жақсарғанын көрсетті. Сәулеленген үлгі (ПТФЭ-2) абразивті тозуға ең жоғары төзімділікті және бетінің қаттылығының айтарлықтай жоғарылауын көрсетті, бұл электронды сәулелену материалды тиімді нығайтады, полимер матрицасында айқаспалы байланыс пен басқа құрылымдық өзгерістерді тудырады. Сонымен қатар, зерттеу бетінің кедір-бұдырының өзгеруін атап өтті: Сәулеленген үлгілер тозуға төзімділікті жақсартуға ықпал ететін кедір-бұдыр параметрлерін өзгертті. Бұл өзгерістер полимердің беткі және жер асты аймақтарын өзгертетін электронды сәулеленің әсерінен болатын физика-химиялық түрлендірулермен түсіндіріледі. Бұл зерттеу электронды сәулелену ПТФЭ механикалық және трибологиялық қасиеттерін жақсартудың тиімді әдісі екенін растайды, бұл оны жоғары беріктік пен экстремалды жағдайларға төзімділік қажет болатын жоғары технологиялық инженерлік қосымшаларға қолайлы етеді. Нәтижелер ПТФЭ-ді жоғары өнімділікті қажет ететін секторларда қолданудың жаңа перспективаларын ашады, оны дәстүрлі салалардан тыс кеңейтеді.

Түйін сөздер: Политетрафторэтилен (PTFE), электронды сәулелену, үйкеліс коэффициенті, тозу, микроқаттылық.

K. Ormanbekov^{*}, A. Zhassulan¹, Z. Satbayeva^{1,2}, G. Andybayeva^{2,3}, T. Zhanabay⁴

¹Engineering Center «Hardening technologies and coatings»,
Shakarim Semey University

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, Fizkulturnaya str., 4b

²TOO «Plasma Science»,

070018, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Gogol str. 7G

³TOO «Innotechmash Engineering Center»,

070010, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, Serikbayeva str., 37

⁴Sakarya University,

54050, Turkey, Sakarya, Akademiyolu str., 5-20

*e-mail: kuanyshe.dauletson@gmail.com

THE INFLUENCE OF ELECTRON BEAM IRRADIATION ON THE TRIBOLOGICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE (PTFE) FOR ENGINEERING APPLICATIONS

The study demonstrates the significant effects of electron beam irradiation on the tribological and mechanical properties of polytetrafluoroethylene (PTFE). Electron beam irradiation, a method using high-velocity electrons to modify material properties, was applied to PTFE to potentially enhance its wear resistance and mechanical hardness, which are critical for applications under increased wear conditions. In the experiments, PTFE samples were irradiated at varying doses, and their wear resistance, microhardness, and surface roughness were evaluated post-irradiation. Tribological test results showed a notable improvement in wear resistance and microhardness with increasing radiation doses. Specifically, irradiated samples exhibited reduced wear volume and enhanced surface characteristics compared to the unirradiated sample. The irradiated sample (PTFE-2) showed the highest resistance to abrasive wear and a significant increase in surface hardness, indicating that electron beam irradiation effectively strengthens the material by inducing cross-linking and other structural modifications within the polymer matrix. Additionally, the study highlighted changes in surface roughness: irradiated samples exhibited altered roughness parameters that contributed to improved wear resistance. These changes can be explained by the physical and chemical transformations induced by electron beam exposure, which modify the surface and subsurface regions of the polymer. This study confirms that electron beam irradiation is an effective method for enhancing the mechanical and tribological properties of PTFE, making it more suitable for advanced engineering applications where high durability and resistance to extreme conditions are required. The findings open new avenues for the use of PTFE in sectors requiring high performance, extending its application beyond traditional fields.

Key words: Polytetrafluoroethylene (PTFE), electron beam irradiation, coefficient of friction, wear, microhardness.

Сведения об авторах

Куаныш Даулетович Орманбеков^{*} – старший научный сотрудник Инжинирингового центра «Упрочняющие технологии и покрытия», докторант, г. Семей, Казахстан; e-mail: kuanyshe.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан – старший научный сотрудник Инжинирингового центра «Упрочняющие технологии и покрытия», докторант, г. Семей, Казахстан; e-mail: ainur.zhassulan.99@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Зарина Аскарбековна Сатбаева – старший научный сотрудник Инжинирингового центра «Упрочняющие технологии и покрытия», г. Семей, Казахстан; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Гаухар Маратовна Андыбаева – научный сотрудник Инжинирингового центра «ИННОТЕХМАШ» г. Усть-Каменогорск, Казахстан; e-mail: gaukhar_east@mail.ru.

Тұрар Жаңабай – магистрант, Университет Сакарья, г. Сакарья, Турция; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Куаныш Даулетович Орманбеков* – «Қатайту технологиялары және жабындар» Инжиниринг орталығының аға ғылыми қызметкері, докторант, Семей қ., Қазақстан; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Айнұр Жасұланқызы Жасұлан – «Қатайту технологиялары және жабындар» Инжиниринг орталығының аға ғылыми қызметкері, докторант, Семей қ., Қазақстан; e-mail: ainur.zhassulan.99@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Зарина Аскарбековна Сатбаева – «Қатайту технологиялары және жабындар» Инжиниринг орталығының аға ғылыми қызметкері, Семей қ., Қазақстан; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Гаухар Маратовна Андыбаева – «ИННОТЕХМАШ» инженерлік орталығының ғылыми қызметкері, Өскемен қ., Қазақстан; e-mail: gaukhar_east@mail.ru.

Тұрар Жаңабай – Сакарья университетінің магистранты, Сакарья қ., Түркия; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Information about the authors

Kuanysh Ormanbekov* – Senior Researcher at the Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings», PhD student, Semey, Kazakhstan; e-mail: kuanysh.dauletson@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6099-2812>.

Ainur Zhasullan – Senior Researcher at the Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings», PhD student, Semey, Kazakhstan; e-mail: ainur.zhassulan.99@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5887-0135>.

Zarina Satbayeva – Senior Researcher at the Engineering Center «Strengthening Technologies and Coatings», Semey, Kazakhstan; e-mail: satbaeva.z@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-2686>.

Gaukhar Andybayeva – Researcher at the Engineering Center «Innotechmash», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan; e-mail: gaukhar_east@mail.ru.

Turar Zhanabay – Master's student in Physics, Sakarya University, Sakarya, Turkey; e-mail: turarjanabay@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6202-112X>.

Поступила в редакцию 13.09.2024

Поступила после доработки 20.09.2024

Принята к публикации 23.09.2024