

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра углехимии, пластмасс и инженерной защиты  
окружающей среды

## **ИСПЫТАНИЕ ПЛАСТМАСС НА АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС**

Методические указания к лабораторным работам  
по дисциплине «Физика полимеров»  
для обучающихся направления подготовки  
18.03.01 «Химическая технология»

Составители      В. Н. Третьяков  
                              О. В. Костенко

Рекомендованы учебно-методической комиссией специальности  
18.03.01 «Химическая технология» в качестве электронного издания  
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2023

Рецензенты:

Евменов С. Д. – к.т.н., профессор каф. УПиИЗ.

Касьянова О. В. – к.т.н., доцент каф. УПиИЗ.

**Третьяков Владимир Никифорович Костенко Ольга Васильевна**

**Испытание пластмасс на абразивный износ :** методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Физика полимеров» для обучающихся направления подготовки 18.03.01 – «Химическая технология» / сост. В. Н. Третьяков О. В. Костенко ; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2023. – Текст : электронный.

Предназначены для оказания помощи обучающимся всех форм обучения при изучении курса «Физика полимеров». Методические указания к лабораторной работе направлены на закрепление у обучающихся теоретических знаний, изложенных в курсе лекций и соответствующих разделах учебников по физике полимеров, приобретение практических навыков определения эксплуатационных свойств полимеров. Данная разработка включает теоретические положения по вопросам трения и износа полимеров, порядок выполнения лабораторной работы и описание устройства и принципа действия испытательного оборудования

© Кузбасский государственный  
технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева, 2023

© В. Н. Третьяков,  
О. В. Костенко,  
составление, 2023

**Цель работы.** Исследование влияния свойств полимеров и условий испытания на их абразивный износ.

## **1. Теоретические положения**

Твердые полимерные материалы в настоящее время нашли широкое применение в машиностроении, где они используются в качестве антифрикционного материала, следовательно, для практического применения полимерных материалов необходимо знать их фрикционные свойства и износостойкость при трении. Эти свойства в значительной степени определяются характером молекулярных взаимодействий соответствующих пар трения (полимер – полимер, полимер – металл и т.д.).

Существенно на процессы трения и износа полимеров сказывается вид их физического состояния. Это объясняется тем, что процессы образования площади фактического контакта и механизмы трения и износа полимеров, находящихся в стеклообразном (пластмассы) и высокоэластическом (эластомеры) состояниях, существенно различаются.

Внешне трение обусловлено механическим сопротивлением, возникающим при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания. Сила сопротивления, направленная противоположно относительному перемещению тел, называется силой трения. Сила трения, являющаяся основной характеристикой процесса трения двух поверхностей, определяется их взаимодействием по площади истинного, или фактического, контакта. В общем случае сила трения является функцией давления, скорости скольжения, температуры, времени контакта и других параметров процесса внешнего трения.

Процесс постепенного изменения размеров детали, происходящий при трении, называется их износом. Результат износа проявляется в виде изменения размеров детали по поверхности трения. Следовательно, между явлениями трения и износа существует непосредственная связь.

На участках фактического контакта возникает удельная фактическая сила трения, которая определяет величину тангенциальных напряжений. Количественно тангенциальное напряже-

ние  $\tau'$  в условиях упругого контакта определяется соотношением:

$$\tau' = k f_{\phi} = k \mu p_{\phi}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $f_{\phi}$  – удельная фактическая сила трения;  $p_{\phi}$  – фактическое нормальное давление;  $\mu$  – коэффициент трения.

В том случае, когда напряжение  $\tau'$  превышает прочность материала  $\tau'_{np}$ , т. е. при  $\tau' \geq \tau'_{np}$ , происходит разрушение материала. При постоянном значении  $p_{\phi}$  напряжение  $\tau'$  определяется величиной коэффициента трения, следовательно, критический коэффициент трения равен

$$\mu_{кр} = \tau'_{кр} / k p_{\phi}. \quad (2)$$

Тогда при  $\mu \geq \tau'_{кр} / k p_{\phi}$  будет наблюдаться разрушение (разрывы) поверхности полимера, а при  $\mu \leq \tau'_{кр} / k p_{\phi}$  – усталостный вид износа.

Таким образом, величина коэффициента трения определяет механизм износа материала и является одной из важнейших характеристик процесса износа. Если  $\mu > \mu_{кр}$ , интенсивность износа протекторных резин возрастает на 1-2 порядка.

При постоянном коэффициенте трения и некотором критическом значении давления  $p_{кр}$  происходит резкое увеличение коэффициента износостойкости. Одновременно, когда  $p > p_{кр}$ , наблюдается изменение характера истирания поверхности, обусловленное увеличением размеров частиц отделяемого материала. При трении по гладким поверхностям  $\mu$  определяется адгезионным взаимодействием, поэтому смазка резко уменьшает  $\mu$ , а, следовательно, и износ.

Кроме того, экспериментально подтверждено, что при прочих равных условиях, чем ниже  $\mu$ , тем меньше износ. В общем случае увеличение коэффициента трения не может однозначно привести к возрастанию или понижению износостойкости.

В случае гладкой поверхности появление «волн отделения» приводит к износу полимера посредством скатывания его поверхностного слоя, тогда как в случае шероховатой поверхности

имеет место преимущественно абразивный износ. В случае гистерезисного механизма внешнего трения при деформации шероховатостей наблюдается усталостный износ полимеров. Следует отметить, что последний вид износа не является интенсивным как абразивный и изделие из полимера сохраняет работоспособность в течение длительного времени. Абразивный износ является весьма интенсивным, и полимер быстро теряет свою работоспособность. Когда полимер перемещается по грубой шероховатой поверхности, то адгезия и гистерезис приводят к абразивному и усталостному износу.

Усталостный механизм разрушения полимеров обусловлен дискретным характером фрикционного контакта. То есть в процессе внешнего трения происходит многократное деформирование полимера в отдельных пятнах фактического контакта, которое приводит к разрушению и последующему отделению материала.

Абразивный механизм износа является одноактным и проявляется при трении жестких пластмасс по поверхности абразивной шкурки. При этом процесс износа связан с резанием и пропахиванием поверхности зернами шкурки. Внешним проявлением абразивного износа является наличие продольных полос пропахивания на поверхности полимера.

Шалламах указал, что элементарный акт разрушения поверхности полимера определяется перенапряжениями, возникающими позади движущейся иглы. Эти перенапряжения и приводят к появлению поперечных полос. Так как механизм абразивного износа определяется характером взаимодействия на границе раздела полимер – твердое тело и зависит от свойств истираемого тела, то скольжение острой иглы по мягкому высокоэластичскому полимеру приводит в основном к фрикционному износу, а скольжение той же иглы по жесткой поверхности пластмассы – к абразивному износу.

Свойство материала оказывать сопротивление износу в определенных условиях эксплуатации или испытания называется износостойкостью. При абразивном изнашивании износостойкость ( $J$ ) твердых пластмасс пропорциональна давлению и обратно пропорциональна твердости:

$$J \sim \frac{P}{HB}, \quad (3)$$

где  $P$  – давление;  $HB$  – твердость.

Ратнер, Мельникова и Клитеник показали, что износостойкость полимеров может быть выражена зависимостью:

$$J = J_1 p, \quad (4)$$

где  $J_1$  – износ при  $P = 1 \text{ кГ/см}^2$ .

Установлено, что износ при  $P = \text{const}$  зависит от скорости скольжения, поэтому при оценке износостойкости используется критерий мощности  $Pv$ . При больших значениях  $Pv$  появляется интенсивное тепловыделение, снижающее сопротивление полимера разрушению. При достижении критических значений  $Pv$  меняется характер износа, а именно размер частичек отделяемого материала. Величина критического значения  $Pv$  тем выше, чем больше износостойкость полимера.

Скорость скольжения влияет на износ главным образом посредством изменения температуры. Для пластмасс важно влияние температуры на износ через изменение физического состояния.

В области до температуры хрупкости (рис. 1) велики твердость и прочность ( $\sigma$ ), значение коэффициента трения  $\mu$  мало. Используя качественную связь между износом и этими величинами (5), получим, что для аморфного полимера износ в области температуры до  $T_x$  мал и возрастает вследствие понижения прочности (рис. 1).

В области температур между  $T_x$  и  $T_c$  кривая износа имеет максимум. Здесь  $\mu$  и  $HB$  практически не меняются, но резко понижается прочность ( $\sigma$ ) и возрастает удлинение ( $\varepsilon_p$ ). Суперпозиция этих факторов приводит к появлению максимума на кривой износа.

В области температур от  $T_c$  и  $T_t$  удлинение уменьшается, коэффициент трения проходит через максимум, твердость мала. Износ в этой области растет. Наименьшее значение износа  $V$  соответствует температуре стеклования  $T_c$ .

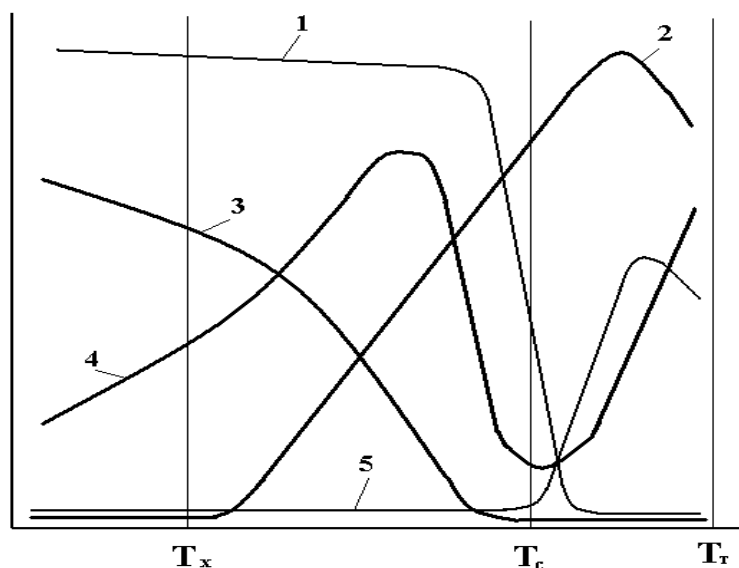


Рис. 1. Схема влияния температуры на механические свойства и износ аморфных полимеров:

1 – твердость  $HB$ ; 2 – относительное удлинение при разрыве  $\varepsilon_p$ ; 3 – предел прочности при разрыве  $\sigma$ ; 4 – износ  $V$ ; 5 – коэффициент трения  $\mu$ ;  $T_x$ ,  $T_c$ ,  $T_r$  – температуры хрупкости, стеклования, текучести.

Аморфная часть кристаллических полимеров до  $T_{пл}$  находится в высокоэластическом состоянии, поэтому картина износа другая (рис. 2).

В области до  $T_x$  износ возрастает из-за снижения прочности. С ростом температуры выше  $T_x$  износ резко понижается, так как полимер в этой области характеризуется увеличением вынужденно-эластической деформацией при практически постоянных модуле упругости  $E$  и коэффициенте трения  $\mu$ . При дальнейшем изменении температуры износ в области от  $T_x$  до  $T_{пл}$  минимален и практически не меняется.

Выше температуры плавления износ возрастает благодаря резкому падению модуля упругости и прочности. Низкое значение модуля упругости приводит к сильному увеличению площади контакта, а малое значение прочности – к слабому сопротивлению, что и вызывает значительное повышение износа.

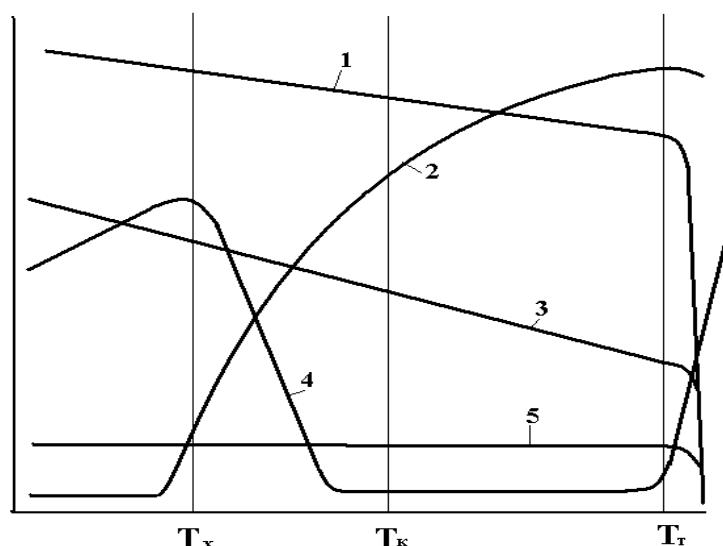


Рис. 2. Схема влияния температуры на механические свойства и износ кристаллических полимеров: 1 – твердость  $HB$ ; 2 – относительное удлинение при разрыве  $\varepsilon_p$ ; 3 – предел прочности при разрыве  $\sigma$ ; 4 – износ  $V$ ; 5 – коэффициент трения  $\mu$ ;  $T_k$ ,  $T_r$ ,  $T_{пл}$  – температуры комнатная, текучести, плавления.

Так как абразивный износ (3) и (4) пропорционален давлению независимо от испытуемого материала, то относительный износ материалов по шкуркам различного номера не зависит от величины абразивного зерна, а определяется свойствами полимера.

Влияние состава полимера на его износостойкость исследовалось Ратнером и Фарберовой, выражается следующей зависимостью:

$$J \sim \frac{\mu}{HB\sigma\varepsilon_p}, \quad (5)$$

Откуда наблюдается общая связь между физико-механическими свойствами и износостойкостью полимеров разного вида, независимо от типа истирающей поверхности.

Изменение состава полимеров, резин и пластмасс достигается введением ингредиентов и различными условиями получения. Так активные наполнители приводят к значительному улучшению прочностных свойств и соответствующему повышению износостойкости. Введение пластификатора в полимер увеличивает подвижность его цепей, и в этом случае действие его подобно влиянию повышения температуры: твердость и прочность полимера понижаются, разрывное удлинение возрастает, износ повы-



шается. Улучшение износостойкости пластмасс достигают также совмещением различных полимеров.

## **2. Содержание работы**

1. Изучить теоретические положения.
2. Ознакомиться с устройством и принципом действия истирающей машины.
3. Подготовить образцы нескольких марок пластмасс.
4. Провести испытание образцов и рассчитать показатели истирания.
5. Дать сравнительную оценку износа этих образцов.
6. Установить зависимость абразивного износа полимеров от их свойств и условий испытания.

## **3. Описание оборудования**

Для испытания пластмасс на абразивный износ применяют испытательную машину, общий вид которой приведен на рис. 3.

Машина устанавливается на столе. Мотор трехфазного тока, клиноременная передача и две червячные передачи. Одна червячная передача приводит в действие истирающий валок (1), в то время как другая червячная передача приводит в действие винт (2). Винт перемещает патрон (3) с прободержателем справа налево. Патрон может перемещаться также сверху вниз.

Патрон движется по штанге вплоть до крайнего правого положения. В этом положении вставляется болт в нижнюю часть патрона на планке (4), которая служит упором и препятствует опусканию держателя образца на истирающий валок.

Держатель образца (5) выполнен в виде зажимной цанги. Нажимом на выбрасыватель (6) образец может быть легко удален из держателя после эксперимента.

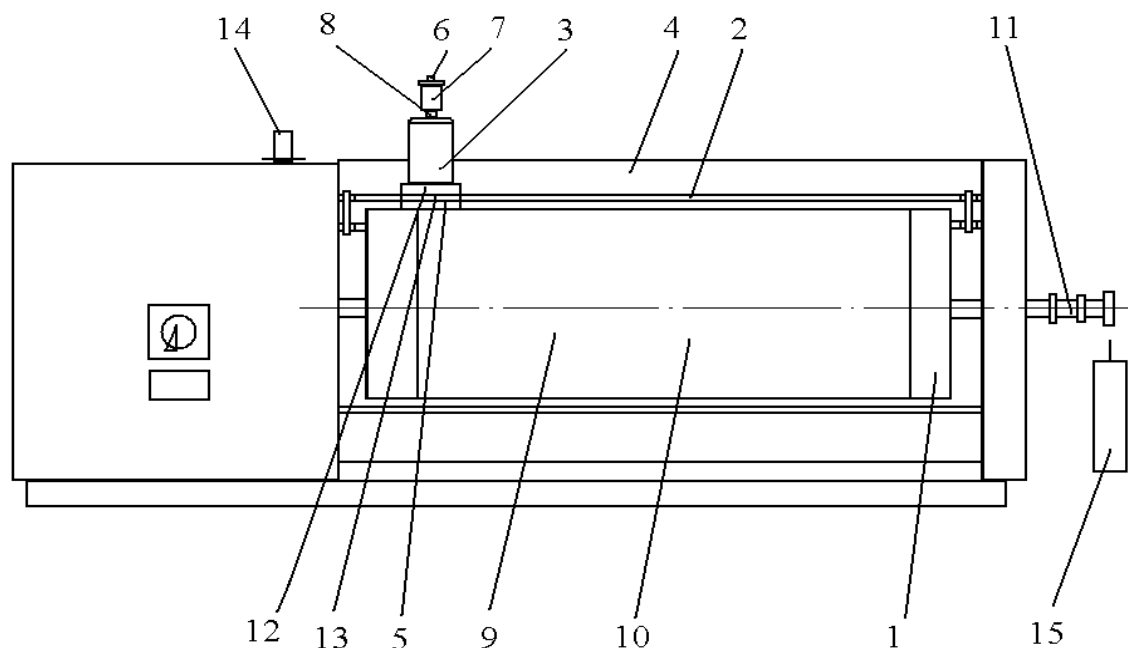


Рис. 3. Общий вид истирающей машины: 1 – истирающий валок;  
2 – винт; 3 – патрон; 4 – планка;  
5 – держатель образца; 6 – выбрасыватель;  
7 – барабан; 8 – корпус; 9 – клейкая лента; 10 – наждачный лист;  
11 – устройство для вырезывания; 12 – большой рефленный ролик;  
13 – маленький ролик; 14 – крышка; 15 - грузовая подвеска.

Чтобы постоянно обеспечивать прочное положение прободержателя (5) для разнотолщинных образцов, опорная поверхность держателя, по которой истирается образец, регулируется по высоте.

На барабане (7) и на корпусе (8) имеется шкала, с помощью которой устанавливают высоту, чтобы образец при правильной установке выступал на 2 мм от нижнего края держателя. Необходимо обратить внимание на то, чтобы держатель образца был прочно закреплен.

С правой стороны машины находится приспособление (11) для вырезания проб из резины. Оно состоит из подвески, нажимного устройства и резца с выбрасывателем. Резец вращается с осью барабана, так что пока протекает опыт, может быть вырезан образец для последующего опыта.

После включения приводного двигателя шпиндель (2) держателя образца при каждом обороте валка (1) перемещается на

определенную величину так, чтобы образец не соприкасался с валком. Только когда держатель достигнет определенного места, образец опускается на валок и истирается о наждачное полотно, натянутое на нем.

При каждом обороте валка истирающий путь составляет 479 мм, всего после 84 оборотов – 40 м. После того как этот путь пройден, образец автоматически поднимается, так что он не может соприкасаться с валком.

Опыт на этом закончен. Образец может быть удален из держателя нажимом на выбрасыватель.

#### 4. Приготовление образца

Вырезка образца из резины происходит с помощью устройства для вырезания (11), расположенного с правой стороны машины (см. рис. 1). Лист резины кладется на нажимную плиту и легонько прижимается к вращающемуся резцу. При этом целесообразно подавать на резец немного мыльной воды. После того как проба вырезана, необходимо вынуть ее из резца нажимом на выбрасыватель. После очистки образца его нужно взвесить.

Образцы жестких пластмасс выпиливаются из брусочков, они должны иметь вид, изображенный на рис. 4.

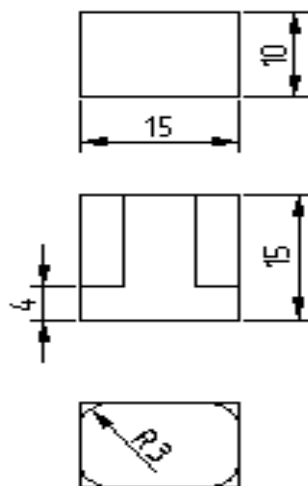


Рис. 4. Образец для испытания.

## **5. Нагрузка на образец**

Нагрузка на образец обычно составляет 10 Н. На этот вес рассчитан прободержатель. В случае необходимости незначительных нагрузок используется грузовая подвеска (15), которая приделана к машине. Она позволяет уменьшить силу истирания на 5 Н. Подвеска состоит из рукоятки (планки) и четырех опор (стоек), на которых поднят груз, каждый в 1 Н истирающей силы. Грузовая подвеска подвешена на петлю, которая расположена на задней стороне патрона (3), и действует как противовес. Чтобы облегчить подвеску делают отверстие в задней стенке.

## **6. Вставка образца**

Образец вставить в цангу (5), установить высоту большим рифленным роликом (12), образец затянуть маленьким рифленным роликом (13).

## **7. Порядок проведения работы**

Испытание образца включает следующее:

- определение плотности с точностью до  $0,01 \text{ г/см}^3$ ;
- притирка к истирающей поверхности;
- истирание на определенном пути;
- определение потери веса при истирании.

Плотность образца определяется взвешиванием с точностью до 0,001 г и обмером с точностью до 0,01 см.

Для проведения притирки образец закрепляют в держателе, устанавливают держатель в патроне машины, дают нагрузку в 2 кгс и машину пускают в ход.

Часть образца, подлежащая истиранию, должна выступать за нижний край держателя на  $3 \pm 0,5 \text{ мм}$ .

При истирании образцов из слоистых пластмасс, если трение образца происходит параллельно слоям, высота выступающей части должна превышать толщину одного слоя наполнителя не менее чем в 10 раз и составлять не менее 2,5 мм.

Притирка образца считается законченной, если на всей по-

верхности образца, подвергаемой истиранию, появляются следы износа.

Притертый образец, не вынимая из держателя, очищают волосяной щеткой от пыли и продуктов износа. Продукты износа не отделившиеся от образца и образующие «бахрому» по краям истирающей поверхности образца, срезают.

Держатель с образцом взвешивают с точностью до 0,001 г.

Истирание образца проводят по свежей поверхности шкурки после установления взвешенного держателя с образцом и патрон машины в том же положении, как и до притирки.

При этом следует руководствоваться величиной потери веса образца, которая должна составлять не менее 0,01 и не более 0,2 г.

По окончании испытания держатель с образцом вынимают из патрона машины. Образец, не вынимая из держателя, очищают от пыли и продуктов износа, а затем взвешивают с точностью до 0,0001 г.

Испытание проводится при трех нагрузках. Результаты испытаний записываются в таблицу.

Марки пласт- масс	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Масса об- разца с дер- жателем по- сле притир- ки, г	Масса образца с держа- телем после истирания при разных нагрузках, г			$V_i$ , мм <sup>3</sup> /м		
			5 Н	7 Н	10 Н	5 Н	7 Н	10 Н

## 7. Обработка результатов испытаний

За показатель истирания образца пластмассы принимают величину уменьшения объема его в кубических миллиметрах на 1 м пути истирания.

Показатель истирания каждого образца пластмассы ( $V_i$ ) в мм<sup>3</sup>/м вычисляют по формуле:

$$V_i = \frac{K(m_1 - m_2)}{\rho L} \cdot 1000,$$

где  $K$  – коэффициент пересчета, характеризующий истирающую способность рулонной шкурки; принять равным 1;

$m_1, m_2$  – масса испытуемого образца с держателем до и после испытания, г;

$\rho$  – плотность образца, г/см<sup>3</sup>;

$L$  – длина пути истирания, равна 40 м.

## **9. Техника безопасности**

Необходимо соблюдать условия обслуживания и эксплуатации машины. Перед началом работы проверить наличие заземления и исправности шнура, вилки и розетки. В случае замеченных нарушений поставить в известность преподавателя и инженера.

## **10. Содержание отчёта**

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) рисунок общего вида истирающей машины;
- 3) расчет показателя истирания каждого образца;
- 4) расчёт твердости;
- 5) график зависимости  $V_i = f(F)$ ;
- 6) выводы.

## **11. Контрольные вопросы**

1. Что такое истирание?
2. Связь явлений трения и износа.
3. Виды износа.
4. Механизм износа (усталостный и абразивный).
5. Зависимость износа от внешних условий.
6. Связь износостойкости с другими свойствами полимеров.
7. Перспективы использования полимеров в узлах трения.

## 12. Список рекомендуемой литературы

1. Бартенов, Г. М. Трение и износ полимеров / Г. М. Бартенов, В. В. Лаврентьев. – Л. : Химия, 1972. – 240 с.
2. Бартенов, Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров / Г. М. Бартенов. – М. : Химия, 1984. – 280 с.
3. Бартенов, Г. М. Физика и механика полимеров / Г. М. Бартенов, Ю. В. Зеленов. – М. : Высш. школа, 1983. – 391 с.
4. Энциклопедия полимеров / Под ред. В. А. Коргина. – М.: Советская энциклопедия. Т. I, 1972. – 1224 с.
5. Кленин, В. И. Высокомолекулярные соединения : учебник / В. И. Кленин, И. В. Федусенко. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 512 с. — ISBN 978-5-8114-1473-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/168512> (дата обращения: 18.04.2022). — Режим доступа : для авториз. пользователей.