Д. Д. ЕФРЮШИН, А. А. БЕУШЕВ

АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТМАСС И РЕЗИН

Барнаул 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»
Институт биотехнологии, пищевой и химической инженерии
Кафедра «Химическая технология»

Д. Д. Ефрюшин, А. А. Беушев

Анализ физико-механических свойств пластмасс и резин

Учебное пособие

по дисциплинам «Структура и свойства полимерных материалов», «Химия и физика полимеров», «Приборы и методы определения химического состава веществ и материалов» для студентов направлений: 18.03.01 и 18.04.01 «Химическая технология»

ISBN 978-5-7568-1539-9

АлтГТУ

Барнаул 2025

Об издании – 1, 2

УДК 620.17

Ефрюшин Д. Д. Анализ физико-механических свойств пластмасс и резин : учебное пособие/ Д. Д. Ефрюшин, А. А. Беушев; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : АлтГТУ, 2025. – 178 с. – URL : http://elib.altstu.ru/uploads/open_mat/2025/Efryushin_AFMSPiR_up.pdf. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-7568-1539-9

В пособии рассмотрены основные виды механических испытаний (растяжение, сжатие, удар, твердость), методы исследования теплофизических, реологических, эксплуатационных и специальных свойств. Особое внимание уделено стандартизированным подходам, регламентированным ГОСТ, ISO и ASTM, что обеспечивает воспроизводимость результатов и их корректную интерпретацию.

Материал изложен с акцентом на практическое применение: описаны методики подготовки образцов, принципы работы оборудования, обработка данных и анализ полученных характеристик. Пособие может быть использовано при выполнении лабораторных работ, курсовом проектировании, подготовке выпускных квалификационных работ, а также в научно-исследовательской деятельности, связанной с разработкой и модификацией полимерных материалов. Его цель – систематизировать знания о ключевых методах анализа физико-механических свойств пластмасс и резин, составляющих основу для оценки качества, прогнозирования поведения и выбора полимерных материалов в различных условиях эксплуатации.

Рекомендовано Алтайским государственным техническим университетом им. И. И. Ползунова в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по направлениям 18.03.01 и 18.04.01 «Химическая технология», и может быть использовано в качестве дополнительной учебной литературы по дисциплинам «Структура и свойства полимерных материалов», «Химия и физика полимеров», «Приборы и методы определения химического состава веществ и материалов» (протокол № 5 от 17.12.2025).

Рецензент:

Ширяев Д. В., к.т.н., руководитель испытательной лаборатории композиционных материалов ООО «Тукан Колорс»

Учебное пособие

Минимальные системные требования: Yandex (20.12.1) или Google Chrome (87.0.4280.141) и т.п., скорость подключения - не менее 5 Мб/с, Adobe Reader и т.п.

Дата подписания к использованию 16.01.2026 Объем издания – 5 Мб.
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46, https://www.altstu.ru.

ISBN 978-5-7568-1539-9

Вперед (к оглавлению)

Оглавление

1 МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Механические свойства являются ключевыми характеристиками полимерных материалов, определяющими их способность сопротивляться воздействию внешних сил и деформироваться без разрушения. Данный раздел посвящен изучению основных видов механических испытаний пластмасс и эластомеров, которые позволяют количественно оценить их прочность, жесткость, эластичность и устойчивость к динамическим нагрузкам.

В разделе подробно рассмотрены методики определения прочности при растяжении и сжатии, ударной вязкости и твердости. Для каждого метода представлены теоретические основы, стандартизированные процедуры проведения испытаний, используемое оборудование и правила интерпретации результатов. Особое внимание уделено различиям в поведении жестких пластмасс и высокоэластичных резин при механическом нагружении, что обуславливает специфику подходов к их испытанию.

Получаемые данные необходимы для контроля качества продукции, сравнительного анализа материалов, проектирования изделий и прогнозирования их работоспособности в реальных условиях эксплуатации.

1.1 Прочность на растяжение

Это фундаментальный метод механических испытаний, который позволяет определить, как материал ведет себя под действием растягивающей нагрузки. Для пластмасс и эластомеров это измерение особенно важно по следующим причинам:

- Прочность на растяжение помогает предсказать, как материал будет вести себя в реальных условиях эксплуатации: выдержит ли он механические нагрузки, не деформируется и не разрушится ли при растяжении;

- Измерения позволяют сравнивать разные партии материала, выявлять дефекты производства и обеспечивать соответствие стандартам;
- Подбор материалов для конкретных задач;
- Данные о прочности на растяжение используются при создании композитов, модификации полимеров и улучшении их свойств (например, добавлением наполнителей или армированием);
- Для изделий, работающих под нагрузкой (например, ремни, шланги, упаковка), прочность на растяжение гарантирует безопасность и продлевает срок службы.

1.1.1 Исследование прочности на растяжение для пластмасс

Испытание на растяжение заключается в том, что стандартный образец пластмассы фиксируется в захватах разрывной машины и растягивается с постоянной скоростью до момента его разрыва. При этом система датчиков непрерывно измеряет два ключевых параметра:

1 Прикладываемая нагрузка (сила, F) – в Ньютонах (Н) или килоньютонах (кН);

2 Удлинение образца (ΔL) – в миллиметрах (мм).

Эти данные автоматически записываются и преобразуются в диаграмму растяжения (диаграмму напряжение-деформация).

Поскольку пластмассы имеют разную толщину и форму, для объективного сравнения материалов нагрузку и удлинение переводят в напряжение и деформацию.

Напряжение (σ) – это нагрузка, отнесенная к первоначальной площади поперечного сечения образца. Измеряется в мегапаскалях (МПа) или Н/мм² (1 МПа = 1 Н/мм²):

$$\sigma = F / A_0, \quad (1)$$

где A_0 – начальная площадь поперечного сечения (мм²).

Деформация (ε) – это относительное удлинение образца. Измеряется в процентах (%) или в безразмерных единицах:

$$\varepsilon = (L - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0, \quad (2)$$

где L_0 – начальная расчетная длина образца (мм).

На основе диаграммы «напряжение-деформация» определяются ключевые характеристики пластмасс:

1. Модуль упругости (Модуль Юнга, E) – показатель жесткости материала. Характеризует сопротивление материала упругой деформации.

Определяется как тангенс угла наклона начального линейного (упругого) участка диаграммы.

$$E = \sigma / \varepsilon \text{ (в упругой зоне)} \quad (3)$$

Чем выше модуль, тем материал «жестче». Например, поликарбонат имеет высокий модуль, а полиэтилен низкой плотности – очень низкий.

2. Предел прочности при растяжении (σ_{pm}) – это максимальное напряжение, которое материал выдерживает в процессе испытания. Для хрупких пластмасс это напряжение совпадает с напряжением в момент разрыва. Для пластичных материалов это напряжение часто соответствует началу образования «шейки» (локализованного сужения).

Определяется как максимальная точка на кривой напряжения-деформации.

3. Предел текучести (σ_{pt}) – это напряжение, при котором материал начинает деформироваться пластически (необратимо) без значительного увеличения нагрузки. Является критической точкой для конструкционных материалов, после которой деформация становится необратимой.

На диаграмме это проявляется как «плато текучести». Если плато текучести выражено, берут напряжение в его начале. Если нет – используют метод отрезка – откладывают деформацию 0,2 % и проводят прямую, параллельную упругому участку. Точка пересечения этой прямой с кривой и дает условный предел текучести.

4. Относительное удлинение при разрыве ($\varepsilon_{рр}$) – это деформация в момент разрыва образца, выраженная в процентах от начальной расчетной длины.

Является показателем пластичности или хрупкости материала: хрупкие пластики (например, полистирол) имеют малое удлинение (< 10 %), а очень пластичные (например, полиэтилен и полипропилен) – могут достигать сотен процентов.

Диаграммы растяжения пластмасс сильно различаются. Условно их можно разделить на пять типов:

1. Жесткие и хрупкие (например, ПС, ПММА): высокий модуль, четкий предел прочности, низкое удлинение при разрыве;

2. Жесткие и прочные (например, ПА-6): высокий модуль и предел прочности, умеренное удлинение;

3. Пластичные с плато текучести (например, ПП): четкий предел текучести, образование шейки и большое удлинение;

4. Мягкие и вязкие (например, ПЭНД): низкий модуль, нет четкого предела текучести, очень большое удлинение;

5. Эластомеры: очень низкий модуль, огромное обратимое и необратимое удлинение.

Описание процесса испытания

1. Подготовка образцов. Чаще всего используются «гантелеобразные» образцы (лопатки). Такая форма концентрирует напряжение в центральной, более узкой части, обеспечивая разрыв в нужном месте, а не в захватах.

Образцы либо вырубают штампом из листового материала, либо отливают по стандартам ГОСТ 11262, ГОСТ 14236, ГОСТ 32656 в зависимости от испытуемого материала. Тип 1А по ГОСТ 34370-2017 (ISO 527-1:2012) является самым распространенным.

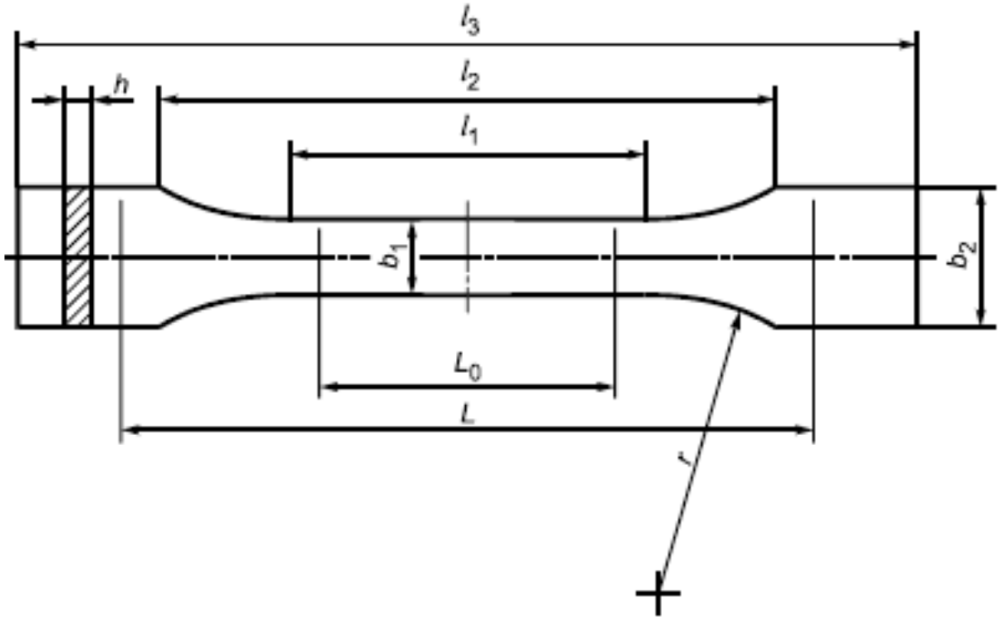


Рисунок 1 – Образец типа 1A, 1B и 2

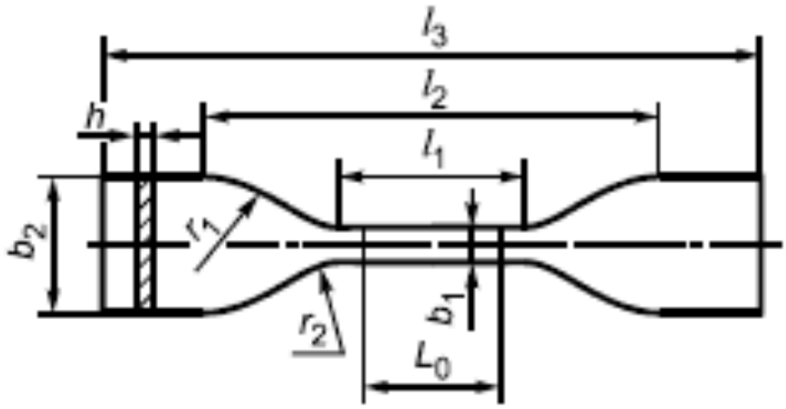


Рисунок 2 – Образец типа 1

Образцы выдерживают в стандартных атмосферных условиях (например, 23±2 °C и 50±10 % относительной влажности) не менее 16 часов для стабилизации свойств.

2. Измерение образца. Точно измеряются ширина и толщина рабочей части образца для расчета начальной площади поперечного сечения A_0.

Измеряется расчетная длина (L_0) – расстояние между метками на образце или между захватами, которое используется для расчета деформации.

3. Установка образца в машину. Образец симметрично закрепляется в захватах испытательной машины. Захваты должны надежно удерживать образец без его проскальзывания и повреждения краев.

4. Настройка и проведение испытания. Устанавливается скорость перемещения траверсы (скорость деформации). Она строго регламентирована стандартами и сильно влияет на результат (чем выше скорость, тем более «хрупким» кажется материал). Для пластмасс обычно используются скорости от 1 до 50 мм/мин для модуля упругости и до 500 мм/мин для определения прочности.

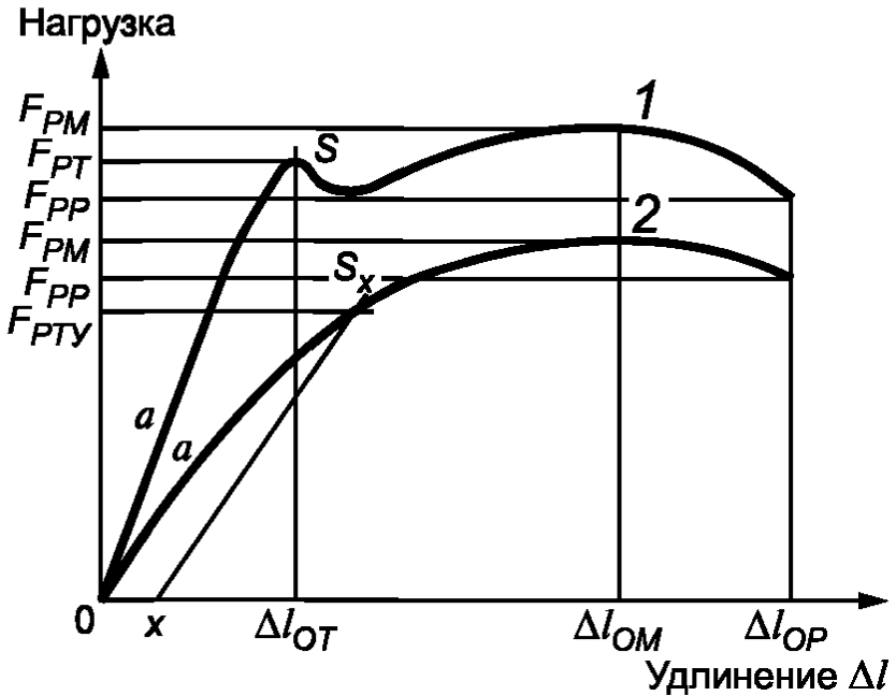
Во время испытания машина начинает раздвигать захваты с заданной скоростью.

Современные машины используют:

- Тензодатчик для точного измерения прикладываемой силы.
- Экстензометр – высокоточный прибор, который крепится непосредственно к рабочей части образца и измеряет его удлинение. Это самый точный способ определения деформации, особенно для расчета модуля упругости. Без него данные берутся с перемещения траверсы, что менее точно из-за возможных люфтов в системе.

5. Завершение испытания и анализ данных. Испытание продолжается до разрыва образца. Программное обеспечение машины автоматически строит кривые «напряжение-деформация», «нагрузка-удлинение» и рассчитывает все ключевые параметры: модуль упругости (E), предел текучести (σ_{pt}), предел прочности при растяжении (σ_{pm}), относительное удлинение при разрыве (ε_{pp}).

Результаты усредняются по нескольким образцам (обычно 5-10).



F_{pm} - максимальная растягивающая нагрузка, Н; F_{pp} - растягивающая нагрузка, при которой образец разрушился, Н; F_{pt} - растягивающая нагрузка при достижении предела текучести, Н; F_{pty} - растягивающая нагрузка при достижении условного предела текучести, Н;

1 - материал имеет предел текучести; 2 - материал не имеет предела текучести; а - участки прямолинейного направления кривой в начале кривой «нагрузка-удлинение»; S - предел текучести; х - отрезок на оси удлинения для определения условного предела текучести; S_x - условный предел текучести

Рисунок 3 – Типичные кривые «нагрузка-удлинение»

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 34370-2017 (ISO 527-1:2012) Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1: Общие принципы.
- ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Поправкой) / ГОСТ № 11262-2017.

- ASTM D638-14 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

Таким образом, измерение прочности на растяжение для пластмасс – это комплексная характеристика, которая раскрывает поведение пластмассы под нагрузкой: ее жесткость, прочность, пластичность и способность к деформации. Эти данные незаменимы для:

- Контроля качества сырья и готовой продукции;
- Сравнения разных материалов;
- Проектирования пластиковых деталей и конструкций;
- Прогнозирования поведения изделия в реальных условиях эксплуатации.

1.1.2 Исследование прочности на растяжение для эластомеров

Принцип испытания похож на тестирование пластмасс, однако особенности резин, как высокоэластичных материалов, требуют особого подхода, другой интерпретации результатов и своих стандартов.

Резины – это сшитые (вулканизированные) полимеры, главное свойство которых – способность к высоким, обратимым (упругим) деформациям. Это накладывает влияет на условия испытаний:

- Не линейная упругость: у них нет четко выраженного линейного участка на диаграмме, как у металлов или жестких пластиков.
- Зависимость от скорости деформации: резины вязкоупруги, их свойства сильно зависят от скорости, с которой их растягивают.
- Эффект Маллинза и гистерезис: механическая история материала (предыдущие деформации) сильно влияет на результат. Первое нагружение всегда дает другие результаты, чем последующие.
- Высокие значения удлинений: резины могут растягиваться на сотни процентов, поэтому требования к оборудованию и методикам другие.

Ключевые понятия и параметры, которые определяются

1. Напряжение при заданной деформации – это напряжение, необходимое для растяжения образца на определенную величину (например, на 100 %, 200 %, 300 %). Это ключевой показатель для резин, так как он характеризует их «жесткость» или модуль в рабочем диапазоне деформаций. Например, S100 (напряжение при 100 % удлинении), S300 и т.д.

Данный параметр позволяет сравнивать разные резиновые смеси по их сопротивлению деформации в условиях, близких к эксплуатационным.

2. Предельное напряжение при растяжении – это максимальное напряжение, которое образец выдерживает в процессе растяжения до разрыва. Это напряжение достигается не обязательно в момент разрыва, а часто в точке, близкой к нему. Показывает максимальную нагрузку, которую материал может выдержать, но для многих резиновых изделий этот параметр менее важен, чем напряжение при заданной деформации.

3. Относительное удлинение при разрыве – это деформация в момент разрыва образца, выраженная в процентах от начальной расчетной длины. Является показателем эластичности и способности материала к деформации без разрушения. Для резин это значение обычно очень высокое (200-800 %).

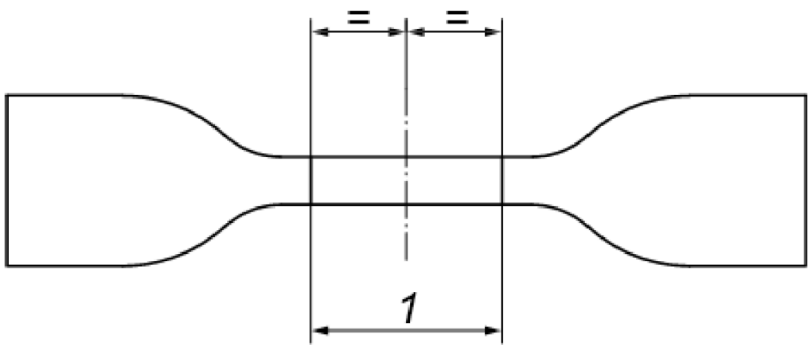
4. Модуль упругости (условный модуль) – из-за отсутствия линейного участка модуль для резин определяют именно как напряжение при заданной деформации. Говорят не о модуле Юнга, а, например, о «модуле 100 %» или «модуле 300 %».

5. Остаточное удлинение – это деформация, которая осталась в образце после его разрыва и выдерживания в свободном состоянии в течение определенного времени. Данный параметр показывает, насколько необратимой была деформация. Низкое остаточное удлинение – признак хорошей эластичности.

Описание процесса испытания

1. Подготовка образцов. Используются образцы специфической формы. Самые распространенные – «гантелеобразные» (лопатки). Стандарты строго регламентируют их геометрию.

- Типы 1, 1а, 2, 3, 4:



1 – испытательная длина образца, мм (для типа 1 и 1а 25,0±0,5; для типа 2 20,0±0,5; для типа 3 10,0±0,5; для типа 4 10,0±0,5); стандартная толщина узкой части образцов типов 1, 2, 3 и 1А должна быть (2,0±0,2) мм, образца типа 4 (1,0±0,1) мм

Рисунок 4 – Форма образца лопатки

- Кольцевые образцы также используются. Они вырубаются из листового материала. Их достоинство – отсутствие концентраторов напряжения в зоне захватов, но сложнее в точном измерении толщины.

Образцы либо вырубают стандартной фрезой (штампом) из вулканизованных листов, либо прессуют и вулканизируют непосредственно в пресс-форме нужной геометрии. Края должны быть гладкими, без надрезов и заусенцев.

Далее образцы выдерживают в стандартных атмосферных условиях (23±2 °С и 50±5 % относительной влажности) не менее 16 часов для стабилизации свойств.

2. Измерение образца. Для лопаток точно измеряется толщина и ширина в самой узкой (рабочей) части. Это критически важно для расчета площади поперечного сечения (A_0).

Измеряется начальная расчетная длина (L_0):

- Для лопаток – это расстояние между метками, нанесенными на рабочую часть. Оно обычно равно 20 мм, 25 мм или 1 дюйм (25,4 мм);
- Для кольцевых образцов – это внутренняя окружность кольца.

3. Установка образца в машину. Используются специальные захваты с рифленой или клиновой поверхностью, которые надежно удерживают эластичный образец без проскальзывания, но не вызывают его разрыва в зоне зажима. Образец может быть слегка натянут для устранения провисания, но без создания значительной деформации.

4. Настройка и проведение испытания. Скорость перемещения траверсы устанавливается в соответствии со стандартом. Для резин это обычно 500 мм/мин (±50 мм/мин). Скорость сильно влияет на результат: чем выше скорость, тем выше кажущиеся прочность и модуль.

Измерительные системы:

- Тензодатчик измеряет силу.
- Для резин используются оптические или видео-экстензометры, которые бесконтактно отслеживают движение меток на образце. Механические экстензометры сложно использовать из-за больших деформаций и риска повредить образец.

В процессе испытания машина растягивает образец с постоянной скоростью до момента его разрыва. Все данные (сила, перемещение) записываются с высокой частотой.

5. Завершение испытания и анализ данных. После разрыва образца испытание останавливается. Обрывки образца аккуратно извлекают из захватов. Две части разорванного образца складывают вместе и измеряют расстояние между метками.

Программное обеспечение строит кривую «напряжение-деформация» и автоматически рассчитывает:

- Предельное напряжение при растяжении;
- Относительное удлинение при разрыве;
- Напряжения при заданных деформациях (S100, S200, S300 и т.д.);
- Прочность при растяжении и другие параметры.

Результаты усредняются по нескольким образцам (обычно не менее 3-5).

Особенности проведения процесса:

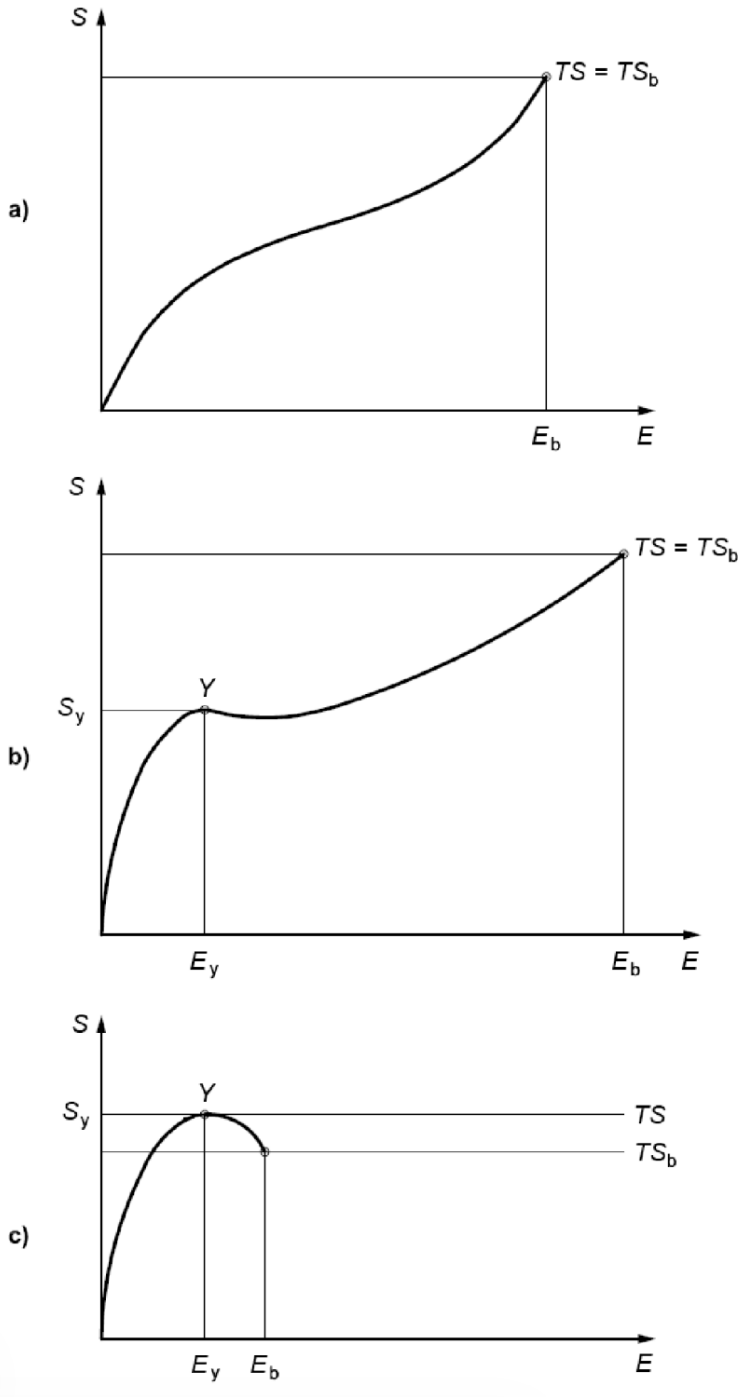
1 Эффект Маллинза – если растянуть резину, отпустить, и снова растянуть, то при втором нагружении напряжение для достижения той же деформации будет ниже. Поэтому для воспроизводимых результатов стандарты часто требуют проводить испытание на «свежих», не деформированных ранее образцах;

2 Гистерезис – кривая нагружения и кривая разгружения не совпадают. Площадь между ними – это энергия, рассеиваемая в виде тепла;

3 Резины чрезвычайно чувствительны к температуре. Повышение температуры резко снижает их модуль и прочность.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ ISO 37-2020 Резина и термоэластопласты. Определение упругопрочностных свойств при растяжении. Rubber and thermoelastoplasts. Determination of tensile stress-strain properties;
- ISO 37 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties;
- ASTM D412 Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers–Tension.



E - относительное удлинение; S_y - напряжение при текучести; E_p - относительное удлинение при разрыве; TS - прочность при растяжении; E_y - относительное удлинение при пределе текучести; T_{Sb} - прочность при разрыве; S - напряжение при растяжении; Y - предел текучести

Рисунок 5 – Иллюстрация параметров при растяжении

Таким образом, измерение прочности на растяжение для резин – это не просто поиск максимальной нагрузки на разрыв. Это комплексная оценка

упругих свойств материала в широком диапазоне деформаций. Ключевыми параметрами являются напряжения при 100 %, 200 %, 300 % удлинения, которые характеризуют жесткость резины в условиях, максимально приближенных к реальной работе (например, в уплотнениях, амортизаторах, ремнях). Эти данные критически важны для разработки рецептур резиновых смесей, контроля качества и прогнозирования поведения изделий в эксплуатации.

1.2 Прочность на сжатие

Испытания на сжатие являются фундаментальным методом оценки механических свойств полимерных материалов. Несмотря на единый принцип проведения, цели и ключевые определяемые параметры для пластмасс и эластомеров фундаментально различаются, что обусловлено разницей в их эксплуатационном назначении.

Для пластмасс основной целью является оценка сопротивления разрушению и необратимой деформации. Испытание позволяет определить:

- Прочностные характеристики при кратковременной нагрузке.
- Модуль упругости (жесткость) материала.
- Предел текучести, после которого деформация становится необратимой.

Получаемые данные критичны для проектирования несущих элементов, деталей машин и конструкций, работающих под сжимающей нагрузкой.

Для эластомеров (резин) основной целью является оценка упругодемпфирующих свойств и способности сохранять форму при длительном нагружении. Испытание направлено на определение:

- Напряжения при заданной деформации, характеризующего жесткость резины в рабочем диапазоне.
- Показателя остаточной деформации, который напрямую характеризует долговечность и герметизирующую способность материала.

Эти параметры являются ключевыми для разработки и контроля качества уплотнений, амортизаторов и других изделий, работающих в условиях длительного сжатия.

1.2.1 Исследование прочности на сжатие для пластмасс

Испытание на сжатие заключается в том, что стандартный образец пластмассы помещается между двумя плитами (основанием и траверсой) испытательной машины и сжимается с постоянной скоростью до заданной деформации или до разрушения.

В процессе испытания пластмассы:

- Уплотняются (если материал пористый).
- Текут (эффект «бочкообразования»).
- Неограниченно деформируются без четкого момента разрушения.

Поэтому результаты испытания на сжатие для пластмасс часто описывают не «прочностью на разрыв», а напряжением при заданной деформации.

Поскольку пластмассы по-разному ведут себя при сжатии, определяют несколько ключевых параметров:

1. Прочность на сжатие:

- Для хрупких пластмасс (например, ПММА, полистирол) – это максимальное напряжение, которое материал выдерживает до разрушения. Образец раскалывается или растрескивается.
- Для пластичных и вязких пластмасс (например, ПЭ, ПП, ПА) – четкого разрушения нет, поэтому для них «прочностью на сжатие» условно считают напряжение при первой достигнутой максимальной нагрузке или напряжение при деформации 10 % (если максимум не достигнут к этому моменту).

2. Предел текучести при сжатии – это напряжение, при котором материал начинает деформироваться пластически (необратимо) без

увеличения нагрузки. На диаграмме появляется четкий максимум или «полка». Для определения находится первая точка на кривой «напряжение-деформация», в которой напряжение достигает максимума, а затем начинает снижаться или стабилизироваться.

3. Модуль упругости при сжатии – это показатель жесткости материала при сжатии. Аналог модуля Юнга при растяжении. Определяется как тангенс угла наклона начального линейного (упругого) участка диаграммы сжатия. Часто рассчитывается методом секущей между двумя точками деформации (например, 0,1 % и 0,3 %).

4. Напряжение при заданной деформации – это самый распространенный и важный параметр для пластичных пластмасс. Например, «напряжение при деформации 1 %, 2 % или 10 %». Данный параметр показывает сопротивление материала деформации в его рабочем диапазоне. Для проектирования опор, подшипников или прокладок критически важно знать, как материал поведет себя при небольшом сжатии.

Описание процесса испытания

1 Подготовка образцов. Образцы обычно имеют форму прямого цилиндра или прямоугольной призмы (бруска).

Чтобы избежать потери устойчивости (продольного изгиба), отношение высоты образца к его наименьшему поперечному размеру должно быть в пределах 2:1 до 3:1. Например, для цилиндра диаметром 10 мм высота должна быть от 20 до 30 мм.

Торцы образца должны быть строго параллельны друг другу и перпендикулярны его оси. Любой перекос приводит к изгибу и некорректным результатам.

Образцы вытачивают на станке, отливают по стандарту ГОСТ 12015 и ГОСТ 12019 или вырезают из листов по ГОСТ 26277.

Далее образцы выдерживают в стандартных атмосферных условиях (например, 23±2 °C и 50±10 % относительной влажности) не менее 16-40 часов (в зависимости от стандарта) для стабилизации свойств.

2 Измерение образца. С точностью не менее 0,01 мм измеряются размеры, необходимые для расчета начальной площади поперечного сечения (A_0):

- Для цилиндра:

$$A_0 = \pi \cdot (d/2)^2, \quad (4)$$

где d – диаметр.

- Для призмы:

$$A_0 = \text{ширина} \cdot \text{толщина} \quad (5)$$

Также измеряется начальная высота образца (h_0).

3. Установка образца в машину. Образец помещается точно в центр нижней опорной плиты испытательной машины. Верхняя плита (траверса) опускается до легкого касания образца. Важно обеспечить равномерное прилегание плит к образцу по всей его поверхности.

Для компенсации возможного непараллелизма плит и образца используется сферическая опора. Она самоустанавливается, обеспечивая равномерное распределение нагрузки по всей площади образца.

4. Настройка и проведение испытания. Устанавливается скорость перемещения траверсы. Она зависит от материала и стандарта. Типичные скорости: 1-5 мм/мин для определения модуля упругости и 5-10 мм/мин для определения прочности/текучести.

Запускается испытание. Машина начинает сжимать образец с постоянной скоростью.

Измерительные системы:

- Тензодатчик измеряет прикладываемую силу (F).
- Система измерения деформации: для точного измерения деформации используется экстензометр, устанавливаемый непосредственно на образец или на плиты машины. Он измеряет абсолютное сжатие образца

(Δh). Без экстензометра данные берутся с перемещения траверсы, что менее точно.

5. Завершение испытания и анализ данных. Испытание продолжается до достижения заданной деформации (например, 10 %, 25 % или 50 %) или до разрушения образца.

Программное обеспечение машины автоматически строит кривую «напряжение-деформация» и рассчитывает ключевые параметры:

- Напряжение: $\sigma = F / A_0$ (6)
- Деформация: $\varepsilon = \Delta h / h_0$ (7)
- Модуль упругости при сжатии (расчет по секущей между точками, например, $\varepsilon_1 = 0{,}0005$ и $\varepsilon_2 = 0{,}0025$).
- Предел текучести (если есть).
- Прочность на сжатие или напряжение при деформации X %.

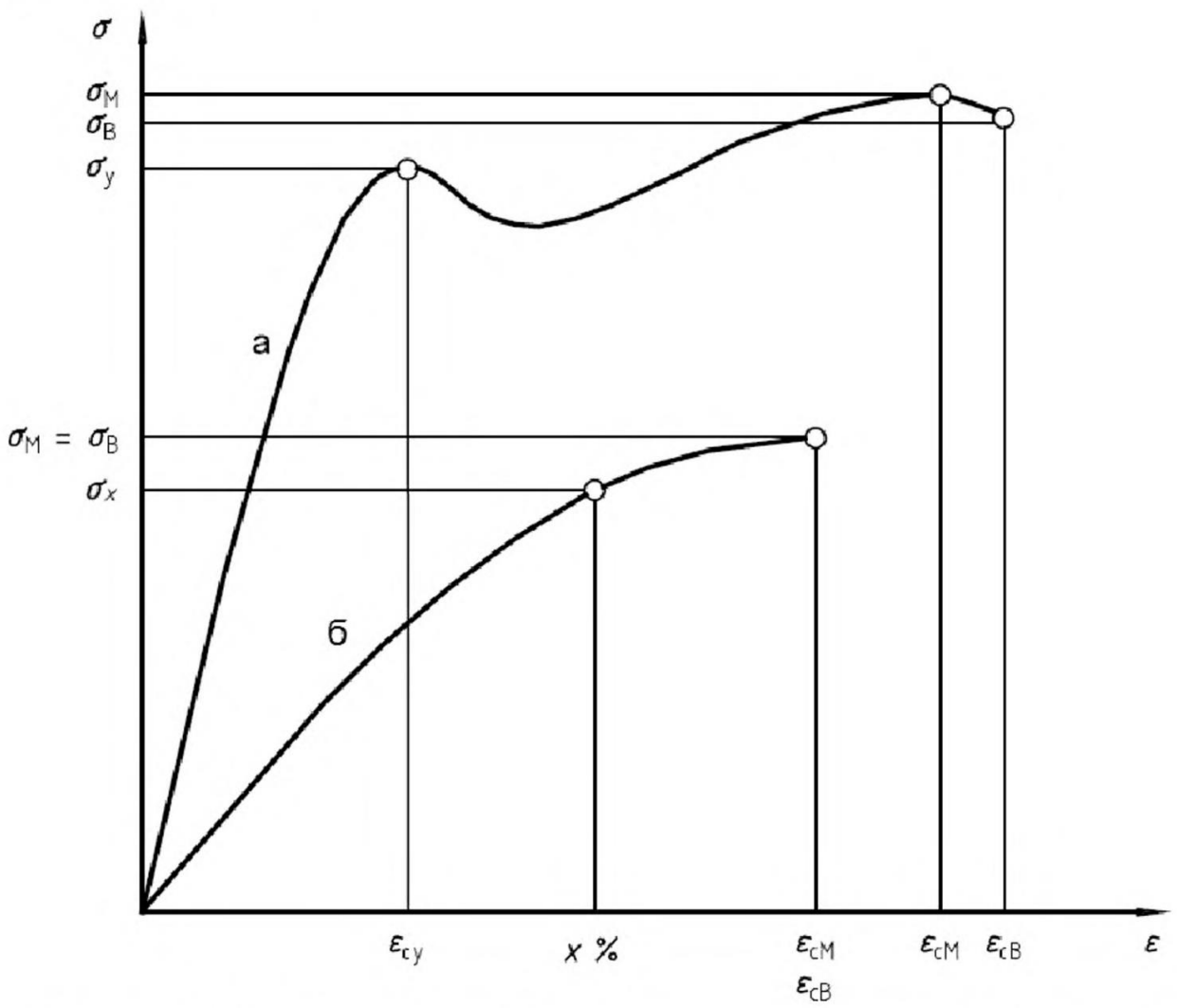
Результаты усредняются по нескольким образцам (обычно 5-10).

Особенности проведения процесса:

1. Эффект «бочкообразования» – из-за трения между торцами образца и плитами машины средняя часть образца выпирает наружу. Это приводит к неравномерному распределению напряжений и искажению результатов. Для уменьшения трения часто используют смазку на торцы образца.

2. Отсутствие разрушения – для пластичных материалов испытание часто останавливают при деформации 10-25%, так как дальнейшая деформация не несет полезной информации и лишь упрочняет материал.

3. Влияние пористости – для вспененных пластмасс кривая сжатия имеет длинное плато, соответствующее разрушению ячеек.



Напряжение при сжатии при пределе текучести σ_y ($\sigma_{ст}$); максимальное напряжение при сжатии $\sigma_м$ ($\sigma_{см}$); разрушающее напряжение при сжатии $\sigma_в$ ($\sigma_{ср}$); напряжение при сжатии при установленной относительной деформации σ_x ($\sigma_{сд}$); относительная деформация при сжатии ε; номинальная относительная деформация при сжатии ε_c; номинальная относительная деформация при сжатии при пределе текучести ε_{cy} ($\varepsilon_{ст}$); номинальная относительная деформация при сжатии, соответствующая напряжению при сжатии при пределе текучести σ_y ($\sigma_{ст}$); номинальная относительная деформация при сжатии при максимальном напряжении при сжатии $\varepsilon_{см}$; номинальная относительная деформация при сжатии при разрушении $\varepsilon_{св}$, ($\varepsilon_{ср}$); модуль упругости при сжатии E_c

Рисунок 6 – Типичные кривые «напряжение – относительная деформация»

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие.
- ISO 604 Plastics – Determination of compressive properties.
- ASTM D695 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics.

Таким образом, измерение прочности на сжатие для пластмасс – это комплексная характеристика, которая определяет не столько «прочность» в классическом смысле, сколько поведение материала под сжимающей нагрузкой. Наиболее ценными данными являются модуль упругости (жесткость) и напряжение при малых деформациях (1-10 %), так как именно эти параметры используются при расчетах на устойчивость и проектировании несущих элементов. Точность испытания критически зависит от геометрии образца, его центровки и минимизации трения на торцах.

1.2.2 Исследование прочности на сжатие для эластомеров

Резины практически не разрушаются при сжатии традиционным образом. Вместо разрыва они демонстрируют сложное вязкоупругое поведение:

- Неограниченная деформация – резину можно сжимать до очень высоких деформаций (70 % и более) без разрушения.
- Высокая сжимаемость и упругость. Основное свойство резины – способность поглощать большие деформации и затем почти полностью восстанавливать свою форму.
- На кривой «напряжение-деформация» нет плато текучести. После начального плавного подъема кривая резко уходит вверх из-за того, что молекулы полимерной сетки вытягиваются и ориентируются, а также из-за ограничения физического объема.

- Сильная зависимость от геометрии – из-за эффекта Пуассона (поперечное расширение при сжатии) результаты испытания абсолютно неотделимы от формы и размеров образца.

Следовательно, для резин понятие «прочность на сжатие» в его инженерном смысле (напряжение при разрушении) не применяется. Вместо этого измеряют напряжение при заданной деформации и остаточную деформацию (сжатый набор).

Ключевые понятия и параметры, которые определяются для эластомеров:

1. Напряжение при заданной деформации – это основной параметр жесткости резины при сжатии. Это напряжение, необходимое для сжатия образца на определенную величину. Например, CS-20 (напряжение при 20 % деформации сжатия), CS-40 и т.д.

Данный параметр характеризует сопротивление резины деформации в условиях, близких к эксплуатационным. Например, для резиновой прокладки, работающей при 15 % сжатия, критически важен параметр CS-15 или CS-20.

2. Модуль упругости при сжатии – это условный показатель жесткости, рассчитываемый как секущий модуль между двумя точками на кривой сжатия.

Это не модуль Юнга в классическом понимании, а практическая мера жесткости в рабочем диапазоне.

3. Испытание на остаточную деформацию сжатия – это не прочность, а мера необратимой деформации. Данный параметр показывает, насколько резина «просела» или потеряла свою упругость после длительного пребывания под нагрузкой. Низкое значение остаточной деформации сжатия – признак высокого качества и долговечности резины (например, для уплотнителей).

Для определения данного параметра проводят отдельное длительное испытание (часы или дни), а не кратковременное сжатие до разрушения.

Описание процесса испытания на кратковременное сжатие

Это испытание проводят для определения напряжений при заданных деформациях.

1. Подготовка образцов. Используются цилиндры стандартных размеров. Наиболее распространены цилиндры типа А диаметром 29,0 ± 0,5 мм и толщиной 12,5 ± 0,5 мм и типа В диаметром (13,0 ± 0.5) мм и толщиной (6,3 ± 0,3) мм. Такая геометрия минимизирует эффект поперечного расширения и трения о плиты, обеспечивая более-менее однородное напряженное состояние в образце. Использование образцов другого размера даст несопоставимые результаты.

Образцы вырубают пробойником из вулканизованных листов заданной толщины или формуют непосредственно.

Образцы выдерживают в стандартных атмосферных условиях (23±2 °С и 50±5 % относительной влажности) не менее 16 часов.

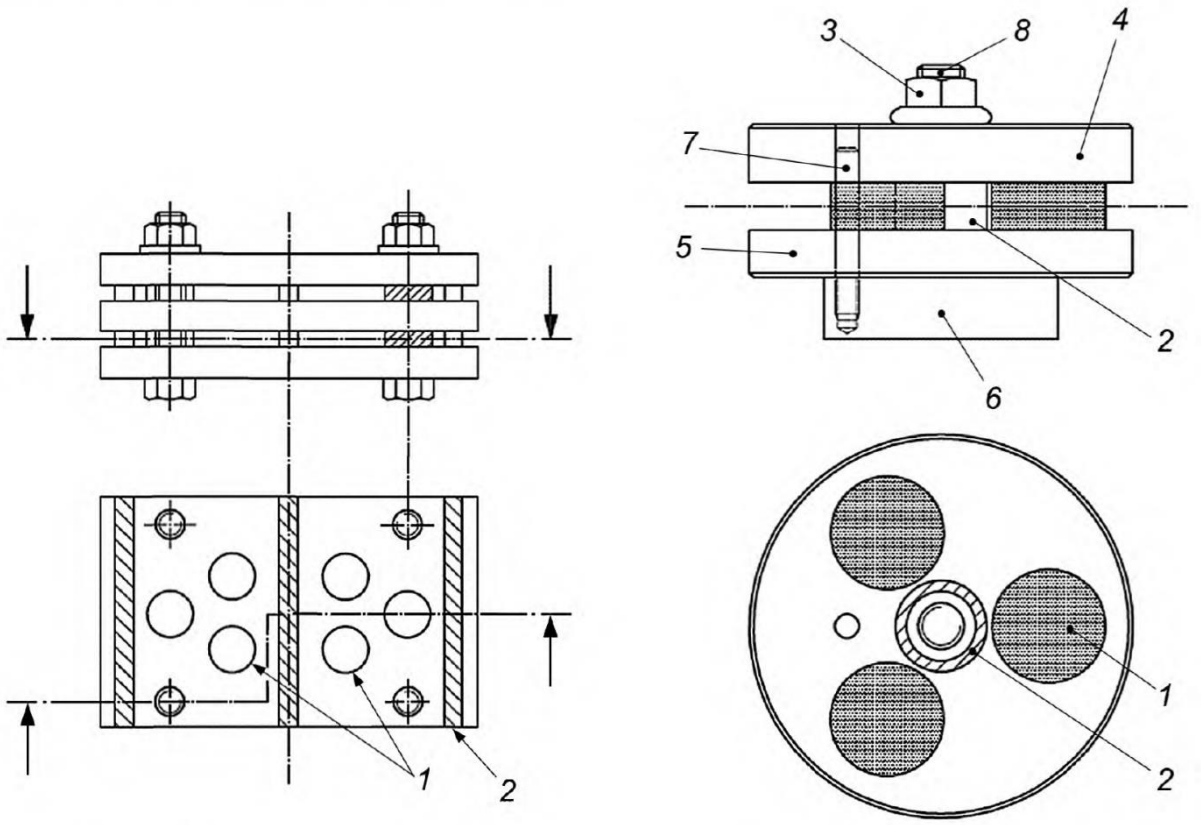
2 Измерение образца. С помощью микрометра с точностью 0,01 мм измеряют:

- Диаметр (d) в нескольких точках.
- Высоту (h_0) в нескольких точках.
- Рассчитывают начальную площадь поперечного сечения (A_0):

$$A_0 = \pi \cdot (d/2)^2 \quad (8)$$

3. Установка образца в машину. Образец помещается точно в центр нижней плиты испытательной машины. Чтобы минимизировать трение между торцами резины и плитами, которое приводит к сильному «бочкообразованию» и завышению результатов, торцы образца смазывают тонким слоем специальной смазки (например, на основе силикона).

Верхняя плита опускается до легкого касания образца. Для компенсации перекосов используется сферическое седло.



1 – испытуемый образец; 2 – проставка; 3 – гайка; 4 – верхняя пластина; 5 – нижняя пластина; 6 – часть для зажима в устройстве; 7 – направляющий штифт; 8 – болт

Рисунок 7 – Пример устройства для определения остаточной деформации при сжатии

4. Настройка и проведение испытания. Устанавливается относительно низкая скорость перемещения траверсы, обычно 5-10 мм/мин. Более высокие скорости дадут завышенные значения напряжения.

Машина сжимает образец с постоянной скоростью. Обычно испытание проводят до деформации 25 % или 30 % (для некоторых материалов до 50 %).

Измерительные системы:

- Тензодатчик измеряет силу (F).
- Экстензометр или датчик перемещения измеряет абсолютное сжатие образца (Δh).

5. Анализ данных. Программное обеспечение строит кривую «напряжение-деформация».

- Напряжение (σ) = F / A_0 (9)
- Деформация (ε) = $\Delta h / h_0$ (10)

Программа автоматически считывает значения напряжений при заданных деформациях (например, при 10 %, 20 %, 30 %). Это и есть CS-10, CS-20, CS-30.

Испытание повторяют для минимум 3 образцов и результаты усредняют.

Описание процесса испытания на остаточную деформацию сжатия

Это отдельное, длительное испытание, которое имитирует старение резины в условиях постоянной деформации.

1. Подготавливаются стандартные цилиндрические образцы (такие же, как для кратковременного испытания). Измеряется их начальная высота (h_0).

2. Образцы помещают в специальное металлическое приспособление (спейсер), которое ограничивает их высоту. Стандартной является деформация 25%. Для этого между плитами приспособления устанавливают ограничительные прокладки толщиной $h_0 \cdot 0{,}75$. Образцы смазывают и зажимают в приспособлении с помощью болтов.

3. Всю сборку помещают в термостат (печь) при заданной температуре и на заданное время. Например, 22 часа при 70 °C или 70 часов при 100 °C (зависит от стандарта и применения резины). Более жесткие условия – 1000 часов при 125 °C.

4. Через заданное время приспособление извлекают из печи и дают остыть. Образцы вынимают из приспособления и выдерживают на плоской поверхности в течение 30 минут для релаксации. Измеряют конечную высоту (h_2). Рассчитывают остаточную деформацию сжатия в процентах:

$$C = [(h_0 - h_2) / (h_0 - h_1)] \cdot 100\ \%, \quad (11)$$

де h_0 – начальная высота;

h_1 – высота образца в сжатом состоянии в приспособлении (h_0 • 0,75 для 25% сжатия);

h_2 – конечная высота после восстановления.

Если C = 0 %, резина полностью восстановила форму. Если C = 100 %, она не восстановилась вообще и осталась сжатой на 25 %. Для качественных уплотнений требуются значения сжатого набора менее 20-25 %.

На проведение процесса влияют следующие факторы:

1. Геометрия образца – разные размеры дают разные результаты. Сравнивать можно только данные, полученные на одинаковых образцах.

2. Трение (эффект «бочкообразования») – без смазки трение заклинивает края образца, препятствуя их свободному расширению, что резко увеличивает кажущееся напряжение.

3. Скорость нагружения: ↑ Скорость → ↑ Напряжение.

4. Температура: ↑ Температура → ↓ Напряжение при сжатии и ↑ остаточной деформации сжатия.

5. Состав резины:

- Активные наполнители (например, технический углерод): увеличивают жесткость при сжатии.
- Пластификаторы: снижают жесткость и могут увеличить остаточную деформацию сжатия.
- Качество вулканизации: хорошая сшивка полимерной сетки обеспечивает низкий сжатый набор.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ Р ИСО 815-1-2017 Резина и термоэластопласты. Определение остаточной деформации при сжатии. Часть 1. Испытания при стандартной или повышенной температурах.
- ASTM D395 Standard Test Methods for Rubber Property – Compression Set.

- ISO 815-1 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of compression set – Part 1: At ambient or elevated temperatures.

Таким образом, измерение «прочности» эластомеров на сжатие – это комплексная оценка их упругих и релаксационных свойств. Кратковременное испытание дает данные о жесткости (напряжение при деформации 20 %, 40 %), необходимые для конструкторских расчетов. Испытание на сжатый набор определяет долговечность и способность сохранять упругость под длительной нагрузкой, что является ключевым показателем для большинства резинотехнических изделий (уплотнений, амортизаторов, прокладок). Оба испытания незаменимы для контроля качества и прогнозирования срока службы продукции.

1.3 Ударная вязкость

Ударная вязкость – это способность материала поглощать механическую энергию в процессе деформации и разрушения при ударном воздействии. В отличие от статических испытаний (растяжение, сжатие), ударное нагружение характеризуется высокой скоростью приложения нагрузки, что для пластмасс, чьи свойства сильно зависят от скорости деформации, является критически важным.

Испытание показывает, насколько материал «вязкий» или «хрупкий» при ударе. Сломается ли деталь от легкого удара или поглотит энергию и останется целой.

Существует два принципиально разных метода, которые дают различную информацию о поведении материала.

- Метод 1. Испытание по Шарпи: образец свободно лежит на двух опорах, как балка. Удар наносится по его середине со стороны, противоположной надрезу. Тип нагружения: изгиб. Образец опирается с двух сторон.

- Метод 2. Испытание по Изоду: образец закреплен вертикально в виде консоли. Удар наносится по свободному концу образца на уровне надреза. Тип нагружения: изгиб с растяжением. Образец закреплен с одного конца.

Из-за консольного закрепления в испытании по Изоду в зоне надреза возникают более сложные напряжения (растягивающие), что часто делает этот метод более жестким.

Ключевые понятия и параметры, которые определяются при анализе ударной вязкости:

- Работа удара (A_k, Дж) – это энергия, затраченная на разрушение образца. Она считывается со шкалы маятникового копра или определяется автоматически;
- Поперечное сечение образца ($b \times h$, м²) – ширина (b) и толщина (h) образца в месте надреза;
- Ударная вязкость (a_k кДж/м²) – это основной расчетный параметр. Он представляет собой работу удара, отнесенную к площади поперечного сечения образца в месте надреза:

$$a_k = A_k / (b \times h) \quad (12)$$

Описание процесса испытания (на примере метода Шарпи)

1. Подготовка образцов. Стандартные образцы – прямоугольные бруски. Наиболее распространенный размер по ГОСТ 4647-2015: 80 мм × 10 мм × 4 мм, надрез В.

Надрез (концентратор напряжения) – это критически важный элемент. Надрез имитирует технологические дефекты, царапины или острые углы, присутствующие в реальных изделиях. Без надреза многие пластмассы не проявляли бы хрупкости.

Типы надрезов:

- Тип А – более жесткий надрез:

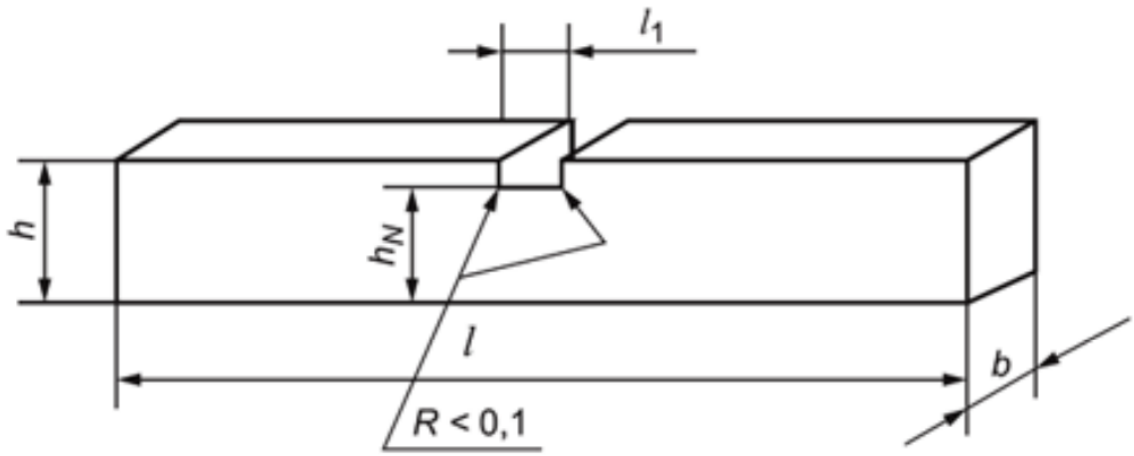


Рисунок 8 – Надрез типа А

- Тип В (U-образный) – более мягкий надрез:

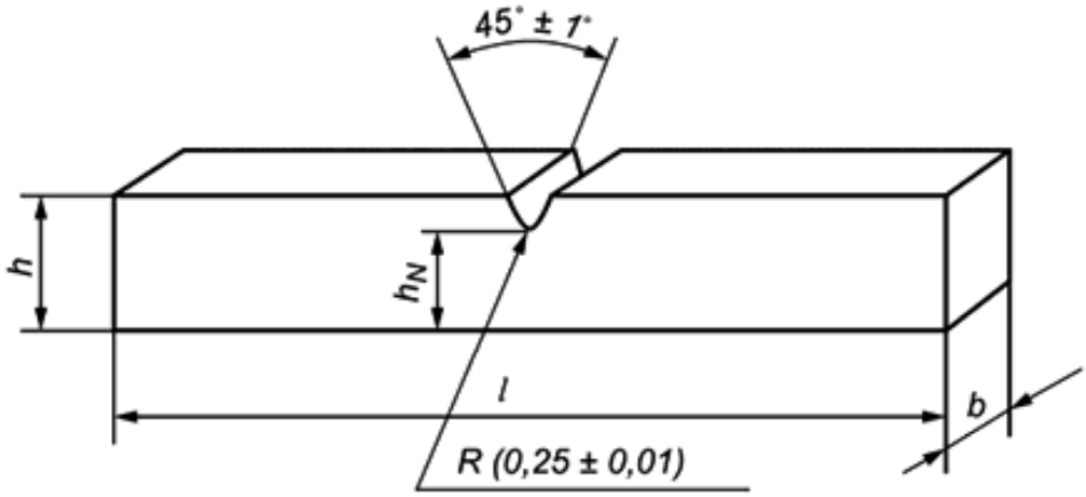
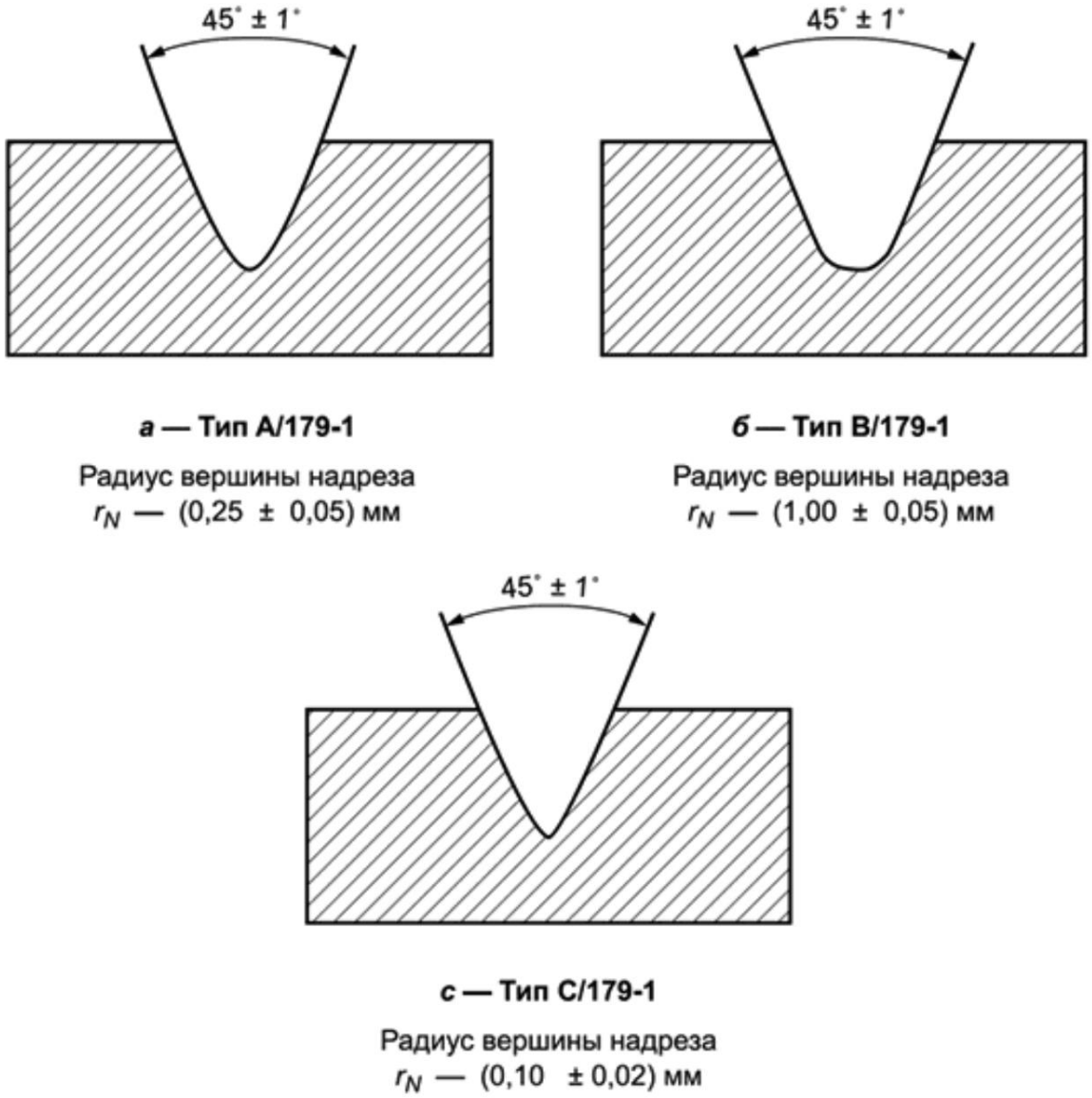


Рисунок 9 – Надрез типа В

Надрез наносится на специальном станке (фрезерованием или резцом) для обеспечения идеальной геометрии и остроты.

Образцы с надрезами, полученными при формовании образца, можно использовать, если это допускается для испытуемого материала.

Образцы с отформованными надрезами дают результаты, несопоставимые с результатами, полученными на образцах с надрезами, нанесенными механическим способом.



***а* — Тип A/179-1**

Радиус вершины надреза
r_N — (0,25 ± 0,05) мм

***б* — Тип B/179-1**

Радиус вершины надреза
r_N — (1,00 ± 0,05) мм

***с* — Тип C/179-1**

Радиус вершины надреза
r_N — (0,10 ± 0,02) мм

Рисунок 10 – Типы отформованных надрезов

Далее образцы выдерживают в стандартных атмосферных условиях (23±2 °C и 50±10 % относительной влажности) не менее 16 часов. Испытания также часто проводят при пониженных и повышенных температурах для оценки хладостойкости.

2. Предварительный замер образца. С помощью микрометра с точностью не менее 0,02 мм измеряют:

- Ширину (b) образца;
- Толщину (h) образца;

- Остаточную толщину под надрезом.

Эти данные необходимы для точного расчета площади сечения.

3. Установка образца в маятниковый копер.

Маятниковый копер – это основной прибор для испытаний. Представляет собой массивную станину, на которой установлен маятник с молотом известной массы.

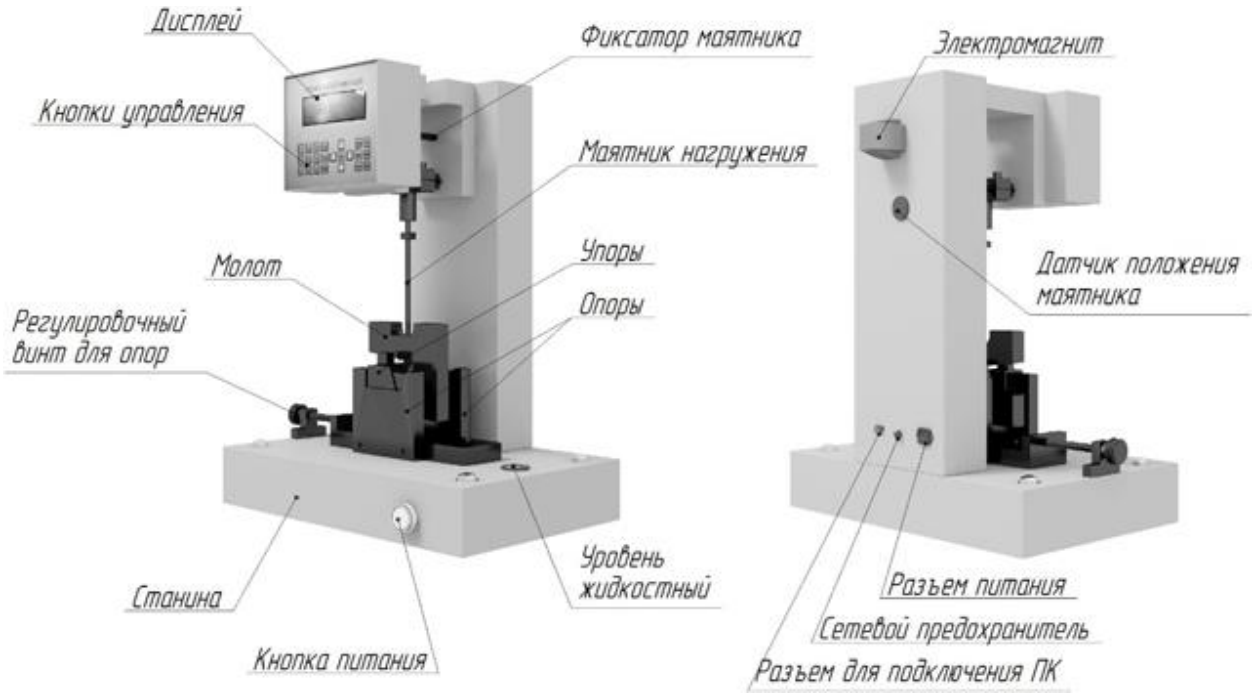


Рисунок 11 – Копер маятниковый малогабаритный КММ-5-А

Образец укладывается на опоры копра так, чтобы надрез был обращен в сторону, противоположную удару (для метода Шарпи). Расстояние между опорами стандартное (например, 62 мм для образца длиной 80 мм).

Образец должен плотно и без перекоса прилегать к опорам.

4. Проведение испытания. Маятник поднимается на определенный угол (обычно 150 °), запасая потенциальную энергию. Фиксирующее устройство отпускает маятник. Маятник свободно падает, проходит нижнюю точку и наносит удар по образцу, разрушая его. Пройдя по инерции, маятник поднимается на противоположной стороне на некоторую высоту.

5 Считывание и расчет результатов. Работа удара (A_k) рассчитывается как разность между потенциальной энергией маятника в начальном и конечном (после разрушения образца) положениях:

$$A_k = m \cdot g \cdot (h_{start} - h_{end}) \quad (13)$$

На современных коперах это значение вычисляется автоматически и отображается на дисплее.

Ударная вязкость (a_k) рассчитывается по формуле:

$$a_k\ [кДж/м^2] = (A_k / (b \cdot h)) \cdot 1000 \quad (14)$$

Множитель 1000 появляется из-за перевода Дж/мм² в кДж/м² (1 кДж/м² = 1000 Дж / (1000 • 1000 мм²) = 0,001 Дж/мм²).

6 Анализ вида разрушения – это качественная, но очень важная часть анализа. Результаты маркируются специальными индексами:

- (C) Полное разрушение (хрупкое);
- (P) Частичное разрушение;
- (N) Неразрушенный образец;
- (H) Разрушение по типу «шарнира» (вязкое).

Например, запись a_k = 15 кДж/м² (C) означает, что материал показал вязкость 15 кДж/м² и разрушился хрупко.

7. Статистическая обработка. Испытание проводят для минимум 5-10 образцов. Из результатов отбрасывают явные промахи (например, образец, разрушившийся не по надрезу).

Рассчитывают среднее арифметическое значение ударной вязкости.

На результат испытаний могут повлиять следующие факторы:

- Температура – самое сильное влияние. При понижении температуры ударная вязкость резко падает, материал становится хрупким;
- Острота надреза – чем острее надрез (меньше радиус), тем ниже измеряемая ударная вязкость;
- Скорость удара (начальная скорость маятника) стандартизирована, но ее изменение влияет на результат;

- Направление литья/экструзии – в направлении течения полимера механические свойства обычно выше, чем в поперечном (явление анизотропии свойств);
- Наличие упрочняющих наполнителей (стекловолокно), ударных модификаторов (каучук) кардинально повышает ударную вязкость.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 4647-2015 Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарпи.
- ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000) Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду.
- ISO 179-1 Plastics – Determination of Charpy impact properties.
- ISO 180 Plastics – Determination of Izod impact strength.
- ASTM D6110 Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics.

Таким образом, измерение ударной вязкости – это не просто определение энергии разрушения. Это комплексная оценка способности материала сопротивляться распространению трещины в условиях динамического нагружения. Данные этого испытания незаменимы для:

- Выбора материалов для деталей, подверженных ударам и вибрации;
- Оценки морозостойкости полимеров;
- Контроля эффективности ударных модификаторов в рецептуре;
- Прогнозирования поведения изделия в реальных условиях эксплуатации.

Следует также отметить, что эластомеры принципиально иначе ведут себя при ударном воздействии из-за своих высокоэластичных свойств:

- Резины не разрушаются хрупко. Они поглощают энергию удара за счет вязкоупругой деформации, преобразуя ее в тепло;

- Понятие «ударная вязкость» в классическом понимании (энергия на образование и распространение трещины) для резин не всегда применимо. Чаще говорят об сопротивлении удару или энергопоглощении;
- Благодаря высокой эластичности, резина может быстро перераспределять напряжения, предотвращая концентрацию у края надреза.

Как следствие, прямое использование методов Шарпи или Изода для резин часто бессмысленно, так как маятник может просто отскочить от образца, не вызвав разрушения, или образец будет не ломаться, а лишь деформироваться.

1.4 Твердость

Твердость – это сопротивление материала местной упругой и пластической деформации при внедрении в него более твердого тела (индентора).

Для пластмасс измеряется сопротивление как упругой, так и преимущественно пластической (необратимой) деформации.

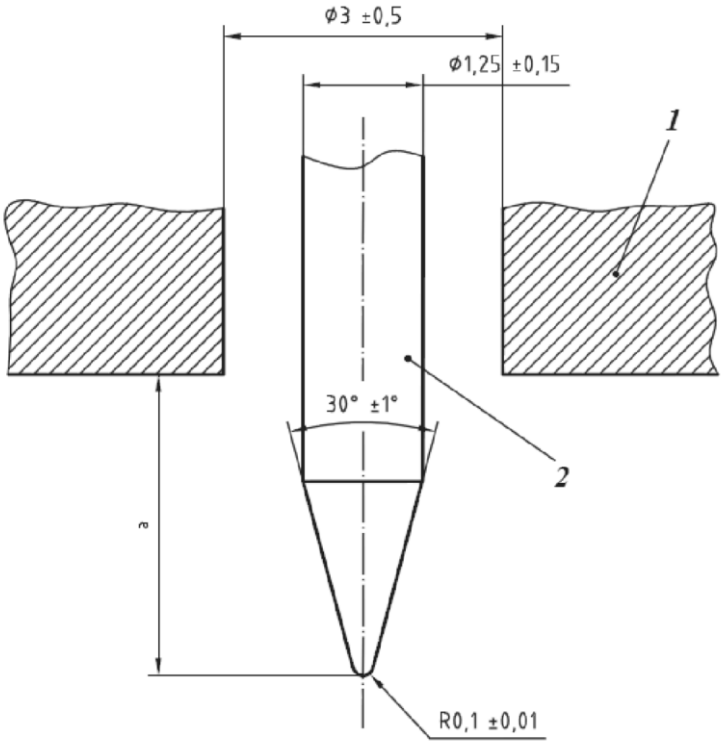
Для резин измеряется сопротивление практически чисто упругой (обратимой) деформации. Резина не должна получать остаточную деформацию при корректном испытании.

1.4.1 Измерение твердости пластмасс

Для пластмасс наиболее распространены методы, основанные на вдавливании индентора под действием статической нагрузки.

1. Твердость по Шору (Шор D, Шор A). Измеряется сопротивление вдавливания заостренного индентора под действием пружины. В качестве индентора выступает закаленный стальной стержень с конусом на конце:

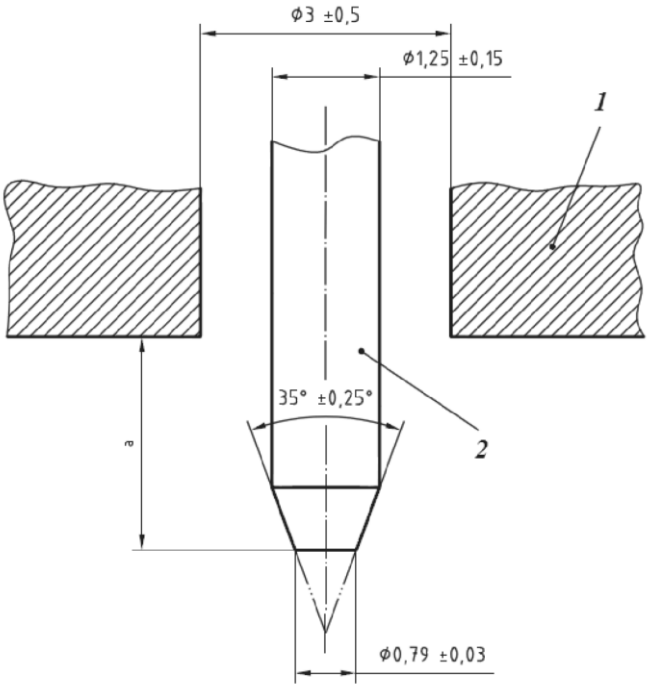
- Шор D: для жестких пластмасс (например, поликарбонат, ABS-пластик, полиамид-6);



1 – опорная поверхность; 2 – индентор

Рисунок 12 – Индентор для дюрометра типа D

- Шор А: для более мягких и гибких пластиков (ПВХ, ТПЭ, некоторые полиолефины).



1 – опорная поверхность; 2 – индентор

Рисунок 13 – Индентор для дюрометра типа А

2. Твердость по Роквеллу – разность глубины проникновения индентора под действием малой предварительной и большой основной нагрузок. В качестве индентора выступает стальной шарик диаметром 1/4", 1/2" и др.

Различают шкалы: R, L, M, E (например, Шкала R использует индентор 1/2" и основную нагрузку 60 кгс).

3 Твердость по Бринеллю – вдавливание стального шарика под определенной нагрузкой в течение заданного времени. Измеряется площадь отпечатка:

$$H = F / (\pi \cdot D \cdot h), \quad (15)$$

где F — нагрузка;

D — диаметр шарика;

h — глубина вдавливания.

Метод позволяет определить напряжение, при котором материал переходит от упругой к пластической деформации.

Описание процесса измерения твердости по Шору D

1 Подготовка образца. Образец должен быть толщиной не менее 6 мм. Более тонкие образцы можно складывать в стопку. Поверхность должна быть гладкой, ровной и параллельной.

Образцы выдерживают при стандартных условиях (23±2 °C, 50±10 % влажности) не менее 16 часов.

2 Проведение измерения. Твердомер устанавливают вертикально к поверхности образца. Прикладывают давление таким образом, чтобы индентор плотно и без удара контактировал с поверхностью. Нагрузку прикладывают немедленно после контакта. Время выдержки под нагрузкой строго регламентировано (обычно 15 секунд). Из-за вязкоупругости пластмасс показания будут меняться со временем. Считывают показание со шкалы прибора в момент окончания выдержки.

Проводят не менее 5 измерений в разных точках образца, отстоящих друг от друга не менее чем на 6 мм.

3. Рассчитывают среднее арифметическое значение.

1.4.2 Измерение твердости эластомеров

Для резин доминирует метод измерения сопротивления упругому внедрению.

1. Твердость по Шору (Шор А) – это основной метод. Аналогичен методу для пластмасс, но калиброван для измерения в диапазоне упругих деформаций.

В качестве индентора выступает усеченный конус.

Шкала Шор А от 0 (абсолютно мягкий гель) до 100 (жесткий материал). Среднестатистическая резина имеет твердость 50-80 по Шору А.

Для очень мягких резин существует шкала Шор ОО. Для очень жестких резин (например, эбонит и некоторые полиуретаны) используется Шор D.

2. Твердость по международной степени жесткости (IRHD). Более точный и научный аналог метода Шора. Измеряет разность глубины проникновения индентора под действием малой и большой нагрузок. В качестве индентора выступает сферический шарик диаметром 2,5 мм.

Шкала от 0 до 100 IRHD, которая практически совпадает со шкалой Шор А.

Описание процесса измерения твердости по Шору А

1. Подготовка образца. Толщина образца должна быть не менее 6 мм. Для точности рекомендуется не менее 10 мм. Тонкие образцы показывают завышенную твердость из-за влияния опорной поверхности.

Поверхность должна быть гладкой. Не допускаются поры, пузыри и загрязнения.

Образец выдерживают строго при 23±2 °С. Температура сильно влияет на твердость резины. Выдержка не менее 16 часов.

2. Проведение измерения. Прибор должен располагаться строго вертикально. Индентор подводят к поверхности и прикладывают давление плавно и без удара. Полный и плотный контакт опорной поверхности твердомера с образцом должен быть достигнут до момента считывания показаний. Опорная поверхность должна лежать на образце, не оказывая на него дополнительного давления. Время выдержки под нагрузкой строго стандартизировано (3 секунды). Резина релаксирует, и показания будут изменяться. Считывают значение сразу по истечении 3 секунд.

Испытания проводят не менее 3 измерений в разных точках. Расстояние между точками и от края образца должно быть не менее 12 мм.

3. Рассчитывают среднее значение.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 24621-91 (ИСО 868-85) Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору).
- ISO 868 Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness).
- ISO 2039-1 Plastics – Determination of hardness – Part 1: Ball indentation method.
- ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property–Durometer Hardness.
- ГОСТ 263-75 Резина. Метод определения твердости по Шору.
- ISO 48-4 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of hardness – Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness).
- ASTM D2240 Standard Test Method for Rubber Property–Durometer Hardness.

Таким образом, измерение твердости – это быстрый и неразрушающий метод контроля качества и классификации материалов.

Для пластмасс оно характеризует сопротивление вдавливанию и пластической деформации и тесно связано с модулем упругости.

Для резин оно характеризует жесткость при малых деформациях и является одним из ключевых параметров рецептуры, напрямую завися от количества активного наполнителя и типа полимера.

Несмотря на кажущуюся простоту, для получения воспроизводимых результатов необходимо строгое соблюдение стандартов, особенно в части времени, толщины образца и температуры.

2 ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Теплофизические свойства характеризуют поведение полимерных материалов под воздействием температурных факторов и определяют границы их практического применения. Данный раздел посвящен ключевым методам исследования термических характеристик пластмасс и эластомеров, которые позволяют оценить их стабильность и функциональность в условиях нагрева или охлаждения.

В разделе подробно рассмотрены такие параметры, как температура размягчения по Вика, температура тепловой деформации под нагрузкой, коэффициент линейного теплового расширения и теплопроводность. Для каждого параметра описаны физическая сущность, методики измерения в соответствии с международными и национальными стандартами, используемое оборудование и практическая значимость получаемых данных.

Изучение теплофизических свойств необходимо для определения термостойкости материалов, расчета тепловых зазоров в конструкциях, выбора режимов переработки и прогнозирования долговечности изделий, эксплуатирующихся в условиях переменных температурных воздействий.

2.1 Температура размягчения по Вика

Температура размягчения по Вика (Vicat Softening Temperature, VST) – это температура, при которой плоский индентор с заданной нагрузкой и площадью поперечного сечения внедряется в образец пластмассы на глубину 1 мм при равномерном повышении температуры с заданной скоростью. Это одно из ключевых испытаний для термопластов, характеризующее их поведение при повышенных температурах.

То есть это температура, при которой материал теряет жесткость и начинает размягчаться под небольшой нагрузкой. Это не температура плавления, а показатель термостойкости материала.

Метод Вика определяется тремя переменными, которые всегда указываются вместе с результатом:

1. Нагрузка (A или B):

- Нагрузка A: 10 Н (≈ 1 кгс);
- Нагрузка B: 50 Н (≈ 5 кгс). Нагрузка B является более распространенной и жесткой.

2. Скорость нагрева (ɦ или Ø):

- Скорость ɦ (50°C/ч): 50 °C в час;
- Скорость Ø (120°C/ч): 120 °C в час. Скорость 120°C/ч используется чаще, так как испытание занимает меньше времени, и результаты хорошо коррелируют с практикой.

3. Тип жидкости для передачи тепла:

- Силиконовое масло;
- Минеральное масло;
- Нагрев воздухом (для материалов, взаимодействующих с маслом).

Пример обозначения: VST/B/120 означает: «Температура размягчения по Вика с нагрузкой 50 Н и скоростью нагрева 120 °C/ч».

Описание процесса испытания

1. Подготовка образцов. Используются плоские квадратные или круглые пластины толщиной от 3 до 6,5 мм. Предпочтительно использовать толщину, указанную в стандарте материала. Длина и ширина не менее 10 х 10 мм.

Поверхности образца должны быть параллельными и гладкими. Не допускаются пузыри, наплывы и внутренние напряжения.

Образцы получают литьем под давлением или прессованием в строгом соответствии со стандартом (ГОСТ 15088-2014, ISO 306 или ASTM D1525).

Образцы (и при необходимости прокладки) должны быть выдержаны при стандартных атмосферных условиях (23±2°C и 50±10% относительной влажности) не менее 16 часов.

2. Подготовка прибора. Прибор Вика состоит из:

- Термостатируемая жидкостная баня или печь с программируемым нагревом;
- Индентор – стальной стержень круглого сечения с площадью конца 1,000 ± 0,015 мм². Обычно это цилиндр диаметром 1,128 мм;
- Грузы, создающие суммарную силу 10 Н или 50 Н;
- Измеритель перемещения (индикатор часового типа) с точностью не менее 0,01 мм для фиксации глубины внедрения;
- Опорные стержни для установки образца.

Перед испытанием проверяют вертикальность индентора, чистоту его поверхности и калибровку измерительной системы.

3. Установка образца. Образец помещается на опорные стержни. Индентор устанавливается на образец таким образом, что он должен касаться образца, и на него должна действовать только сила его собственного веса (предварительная нагрузка). Измерительный индикатор при этом устанавливается на ноль.

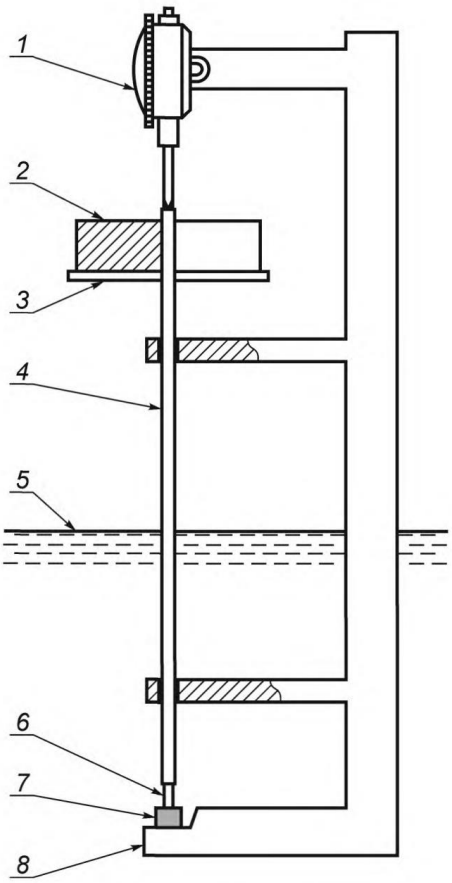
Вся сборка (индентор + грузы) аккуратно опускается, чтобы основная нагрузка легла на образец. Устройство погружается в термостат, который заполнен теплоносителем (маслом) так, чтобы образец был покрыт жидкостью с запасом.

4. Проведение испытания: термостат устанавливается на температуру на 20-23 °C ниже ожидаемой температуры размягчения, но не ниже 20 °C. Включается нагрев с заданной стандартной скоростью (50 °C/ч или 120 °C/ч).

Прибор непрерывно регистрирует температуру и соответствующее ей перемещение индентора. Испытание ведется до тех пор, пока индентор не внедрится в образец на 1 мм.

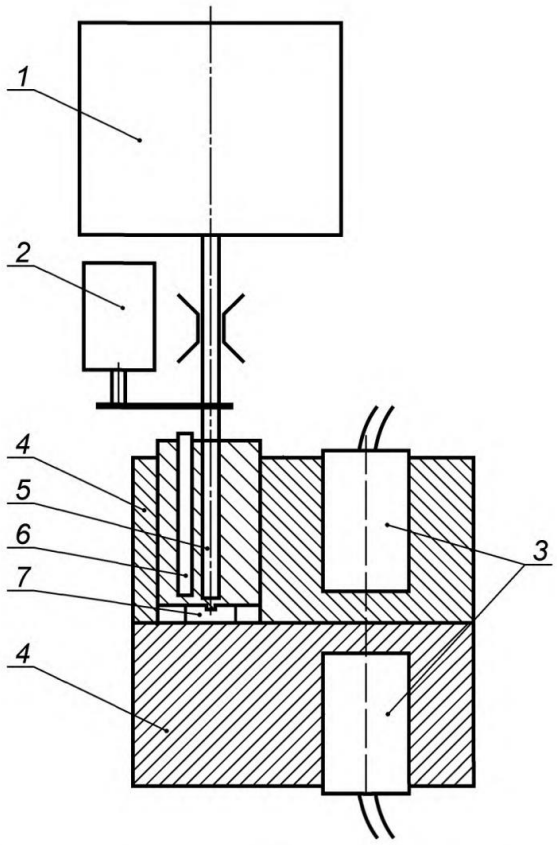
5. Фиксация результата: температура размягчения по Вика – это температура, при которой индикатор перемещения показывает погружение индентора на 1,000 мм относительно его начального положения (нуля). В современных приборах это значение фиксируется автоматически.

6. Статистическая обработка. Испытание проводят на минимум двух образцах. Если результаты для двух образцов различаются более чем на 2 °C, тест повторяют. За окончательный результат принимают среднее арифметическое измеренных температур.



1 – микрометр с круговой шкалой; 2 – сменный груз; 3 – пластина для расположения груза; 4 – стержень с индентором; 5 – приблизительный уровень жидкости; 6 – индентор; 7 – образец для испытания; 8 – опора для испытуемого образца

Рисунок 14 – Пример прибора с нагревательной баней, заполненной жидкостью, для определения температуры размягчения по Вика в жидкой среде (VST)



1 – груз; 2 – устройство измерения перемещения; 3 – нагреватель; 4 – нагревающий блок; 5 – стержень с индентором; 6 – устройство измерения температуры; 7 – образец для испытания

Рисунок 15 – Пример устройства с непосредственным нагревом для определения температуры размягчения по Вика в воздушной среде (VST)

На точность результатов влияют следующие факторы:

- Скорость нагрева: более высокая скорость (120 °C/ч) дает более высокий результат VST, чем низкая (50 °C/ч), так как у материала меньше времени на релаксацию.
- Увеличение нагрузки с 10 Н до 50 Н снижает измеренную температуру размягчения.
- Более тонкие образцы могут показать заниженную температуру размягчения.
- Наличие остаточных напряжений в образце (например, от литья) может значительно занизить результат, так как материал легче деформируется.

- Вертикальность и чистота индентора – перекос или загрязнение индентора искажают результаты.

Рассматриваемый метод характеризует переход материала из жесткого в высокоэластичное состояние. Для аморфных пластиков (например, ПС, ПММА, ПК) это температура близка к температуре стеклования (T_c). Для кристаллизующихся пластиков (например, ПЭ, ПП, ПА) это температура начала размягчения кристаллической фазы.

Метод исследования температуры размягчения по Вика используется для:

- Контроля качества и однородности партий материала.
- Сравнительной оценки термостойкости разных термопластов.
- Предварительной оценки максимальной температуры эксплуатации для ненагруженных или слабонагруженных деталей.

Важно отметить, что VST не является максимальной температурой эксплуатации для деталей, несущих нагрузку. Рабочая температура должна быть существенно ниже.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 15088-2014 Пластмассы. Метод определения температуры размягчения по Вика.
- ISO 306 Plastics – Thermoplastic materials – Determination of Vicat softening temperature (VST).
- ASTM D1525 Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics.

Таким образом, измерение температуры размягчения по Вика – это стандартизированный, воспроизводимый и относительно быстрый метод оценки термостойкости пластмасс. Он является незаменимым инструментом в арсенале технологов и инженеров для сортировки материалов, входного контроля и быстрой оценки способности пластиковой детали сохранять форму при кратковременном воздействии повышенных температур. Однако всегда

следует помнить, что это сравнительный, а не абсолютный показатель, и его интерпретация должна проводиться с учетом реальных условий эксплуатации изделия.

2.2 Температура тепловой деформации

Температура тепловой деформации (Heat Deflection Temperature, HDT) – это температура, при которой стандартный образец пластмассы под действием заданной изгибающей нагрузки и при равномерном повышении температуры прогибается на величину 0,25 мм (для метода с напряжением 1,80 МПа) или 0,32 мм (для метода с напряжением 0,45 МПа). Это одно из ключевых испытаний для оценки термостойкости полимерных материалов.

То есть это температура, при которой пластиковая балка под нагрузкой начинает заметно «провисать» при нагреве. Это не температура плавления и не температура эксплуатации, а сравнительный показатель термостойкости при изгибе.

Метод HDT определяется двумя основными переменными, которые всегда указываются с результатом:

1. Прикладываемое напряжение изгиба (нагрузка):

- Метод A (1,80 МПа) – это наиболее жесткий и распространенный метод. Используется для сравнения широкого спектра материалов.
- Метод B (0,45 МПа) – это более мягкий метод. Используется для оценки поведения материалов при меньших нагрузках.
- Метод C (8,00 МПа) – это очень высокое напряжение. Используется редко, для специальных применений.

2 Скорость нагрева: стандартное значение – 120 °C/ч (2 °C/мин).

Пример обозначения: HDT @ 1,80 MPa означает: «Температура тепловой деформации при напряжении 1,80 МПа».

Описание процесса испытания

1. Подготовка образцов. Используются прямоугольные бруски рекомендуемого размера 80 × 10 × 4.

Поверхности образцов должны быть гладкими, параллельными и без внутренних напряжений, наплывов, пузырей.

Образцы получают литьем под давлением или прессованием в строгом соответствии со стандартом (ГОСТ 34371-2017, ГОСТ 12021-2017, ISO 75 или ASTM D648).

Образцы должны быть выдержаны при стандартных атмосферных условиях (23±2 °C и 50±10 % относительной влажности) и, при необходимости, отожжены для снятия внутренних напряжений;

2. Расчет и приложение нагрузки. Необходимо рассчитать силу (в Ньютонах), которая создаст в образце требуемое напряжение изгиба (например, 1,80 МПа). Расчет ведется по формуле для балки на двух опорах:

$$F = (2 \cdot \sigma \cdot I) / (L \cdot d), \quad (16)$$

где F – прикладываемая сила [Н];

σ – требуемое напряжение изгиба (1,80 или 0,45 МПа);

I – момент инерции поперечного сечения образца $I = (b \cdot h^3) / 12$ [мм⁴];

b – ширина образца [мм];

h – толщина образца [мм];

L – расстояние между опорами (100 мм) [мм];

d – расстояние от нейтральной оси до крайнего волокна (h/2) [мм];

На современных приборах расчет производится автоматически после ввода размеров образца.

Через систему рычагов или напрямую на образец, установленный на опорах, прикладывается рассчитанная сила.

3. Установка образца в прибор.

Прибор HDT состоит из:

- Термостатируемая жидкостная баня (силиконовое или минеральное масло);
- Две опоры с расстоянием между ними 100 мм;
- Нагружающее устройство – система грузов и рычагов;
- Индентор и датчик прогиба контактирует с образцом посередине пролета (в 50 мм от каждой опоры) и соединен с индикатором прогиба;
- Точный термометр или термопара вблизи образца.

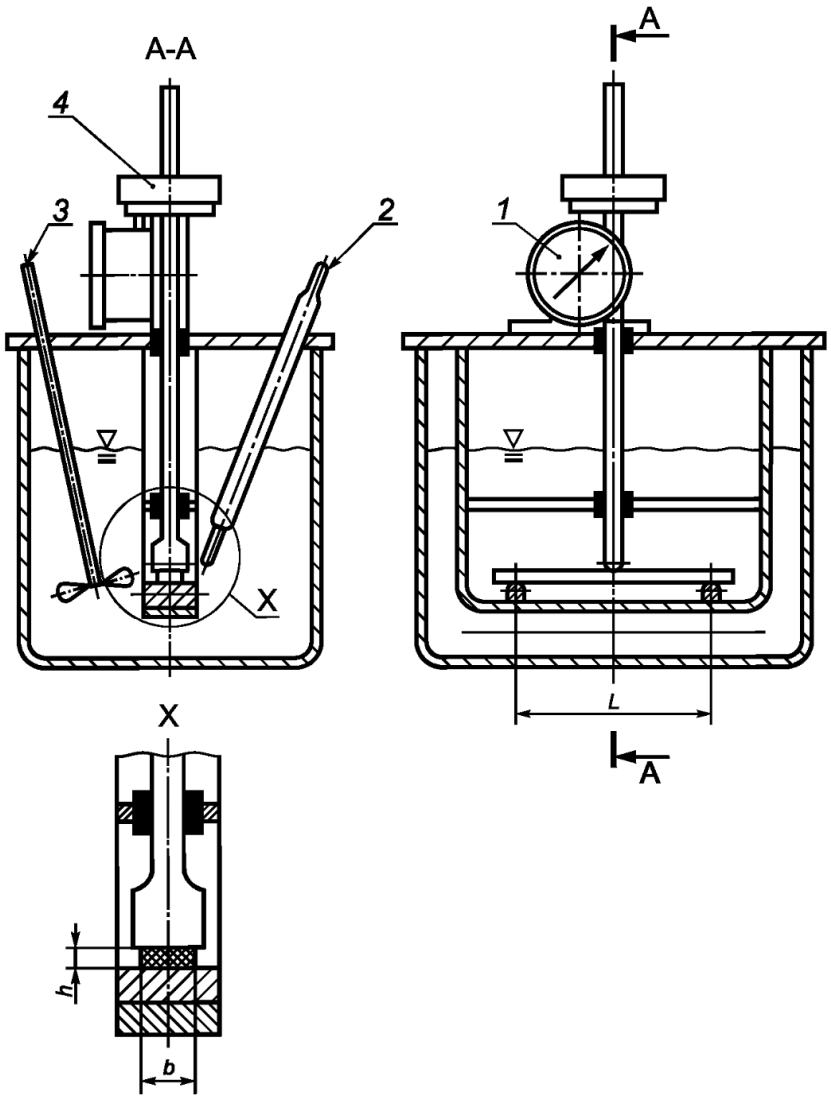
Образец устанавливается на опоры. Индентор опускается на середину образца, и измерительная система устанавливается на ноль.

4. Проведение испытания. Теплоноситель должен иметь начальную температуру на 20-23 °C ниже ожидаемой HDT, но не ниже 20 °C. Включается нагрев с постоянной скоростью 120 °C/ч (2 °C/мин). Прибор непрерывно регистрирует температуру и соответствующую величину прогиба образца.

Испытание останавливается, когда прогиб образца достигает 0,25 мм (для 1,80 МПа) или 0,32 мм (для 0,45 МПа).

5. Фиксация результата. Температура тепловой деформации (HDT) – это температура, при которой прогиб образца достиг заданной величины (0,25 мм или 0,32 мм). В современных приборах это значение фиксируется автоматически.

Испытание проводят на минимум двух образцах. Если результаты для двух образцов различаются более чем на 2°C, тест повторяют. За окончательный результат принимают среднее арифметическое измеренных температур.



1 – измерительный прибор с круговой шкалой; 2 – термометр; 3 – мешалка; 4 – груз; b – ширина образца для испытаний; h – толщина образца для испытаний; L – расстояние между опорами

Рисунок 16 – Схема типового прибора для определения температуры изгиба под нагрузкой

На точность результатов процесса влияют следующие факторы:

- Наличие остаточных напряжений в образце — главный источник ошибки. Они значительно занижают значение HDT. Для их снятия проводят отжиг образцов.

- Напряжение изгиба: чем выше нагрузка (1,80 МПа против 0,45 МПа), тем ниже измеренная температура HDT. Сравнивать можно только результаты, полученные при одинаковом напряжении.
- Скорость нагрева стандартизирована, но ее изменение повлияет на результат из-за релаксационных процессов в полимере.
- Неровности, пузыри и отклонения в размерах искажают распределение напряжений.
- Охлаждение / нагрев в предыдущих циклах – необходимо использовать новые образцы для каждого испытания, так как предыдущий термический цикл меняет структуру полимера.

Метод HDT характеризует кратковременную термостойкость материала под нагрузкой в условиях изгиба. Он показывает температуру, при которой модуль упругости материала снижается до значения, недостаточного для противодействия приложенной нагрузке. Результаты измерений используются для:

- Сравнительной оценки термостойкости разных пластиков между собой.
- Контроля качества и однородности разных партий одного материала.
- Предварительного отбора материала для изделий, работающих при повышенных температурах.

Важно отметить, что HDT не является максимальной температурой эксплуатации. HDT измеряется при кратковременном нагреве, а реальные детали работают под нагрузкой долговременно. Нагружение в реальности может быть иным (растяжение, сжатие, удар). Поэтому максимальная рекомендуемая температура эксплуатации обычно на 15-30 °C ниже, чем HDT @ 1,80 MPa.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 34371-2017 (ISO 75-1:2013) Пластмассы. Определение температуры прогиба под нагрузкой. Часть 1. Общий метод испытания.

- ГОСТ 12021-2017 (ISO 75-2:2013) Пластмассы и эбонит. Метод определения температуры изгиба под нагрузкой.
- ISO 75-1, -2 Plastics – Determination of temperature of deflection under load.
- ASTM D648 Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load.

Таким образом, измерение температуры тепловой деформации – это стандартизированный и воспроизводимый метод, который служит мощным инструментом для сравнительного анализа и сортировки пластиков по термостойкости. Он незаменим на этапе предварительного выбора материала и для входного контроля.

2.3 Коэффициент линейного теплового расширения

Коэффициент линейного теплового расширения (КЛТР) – это физическая величина, характеризующая относительное изменение длины образца материала при изменении его температуры на 1 градус.

$$\alpha = (\Delta L / L_0) / \Delta T , \quad (17)$$

где α – коэффициент линейного теплового расширения [1/°C] или [1/K];

ΔL – изменение длины образца [м];

L_0 – начальная длина образца [м];

ΔT — изменение температуры [°C] или [K].

Основным методом измерения является дилатометрия. Используется прибор – дилатометр, который точно измеряет изменение длины образца в функции от температуры.

Типы дилатометров:

- Механический (толкательный) дилатометр – изменение длины передается на индикатор (например, LVDT-преобразователь) через толкатель.

- Оптический дилатометр – изменение длины измеряется бесконтактно с помощью лазерного интерферометра или оптического компаратора. Более точен, исключает влияние трения.

Описание процесса испытания

1. Подготовка образцов. Для пластмасс и резин обычно используются цилиндрические или прямоугольные стержни: длина (L_0) от 10 до 50 мм, диаметр/толщина от 4 до 10 мм. Важно соблюдать параллельность и плоскостность торцов. Любой перекос приведет к огромной погрешности.

Образцы должны быть тщательно высушены (для гигроскопичных пластиков, таких как ПА, PET) и выдержаны при стандартных условиях (23±2 °C) для стабилизации.

2. Установка образца в дилатометр. С помощью микрометра с высокой точностью (±0,001 мм) измеряется начальная длина образца L_0. Образец помещается в кварцевой или керамической трубке дилатометра.

Один торец образца упирается в неподвижный торец трубки, а второй контактирует с подвижным толкателем, соединенным с датчиком перемещения (LVDT). Прикладывается очень небольшая осевая нагрузка (обычно 0,1-0,5 Н), чтобы обеспечить постоянный контакт, но не деформировать образец. Для мягких эластомеров это особенно критично.

Измерительная ячейка помещается в программируемую печь, обеспечивающую равномерный нагрев и точный контроль температуры.

3. Калибровка и компенсация собственного расширения прибора – это ключевой этап для обеспечения точности.

При нагреве расширяется не только образец, но и сама измерительная система (толкатель, трубка). Чтобы избежать погрешности, проводится холостое испытание без образца в том же температурном диапазоне. Полученная кривая – это сигнал от расширения самого прибора. Программное обеспечение прибора автоматически вычитает этот "холостой" сигнал из

сигнала, полученного при измерении с образцом. В результате остается чистое расширение образца.

4. Проведение испытания начинается с задания температурной программы:

- Начальная температура – обычно начинают с комнатной температуры или ниже.
- Конечная температура задается исходя из термостойкости материала (для пластмасс — ниже температуры стеклования или размягчения).

Используется медленная скорость нагрева, обычно 1-3 °С/мин. Медленный нагрев необходим для выравнивания температуры по всему объему образца и минимизации термических градиентов.

Прибор автоматически записывает пары значений «Температура (Т) – Изменение длины (ΔL)» с высокой частотой.

5. Обработка данных и расчет КЛТР. Строится график зависимости относительного удлинения ($\Delta L / L_0$) от температуры (Т). Для пластмасс и резин эта зависимость часто не является линейной во всем диапазоне температур.

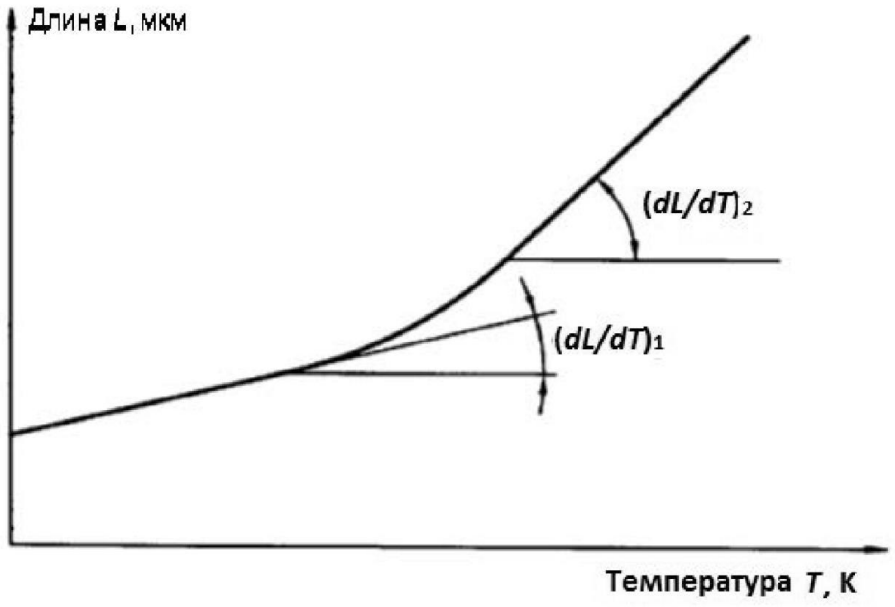


Рисунок 17 – Определение коэффициента линейного теплового расширения

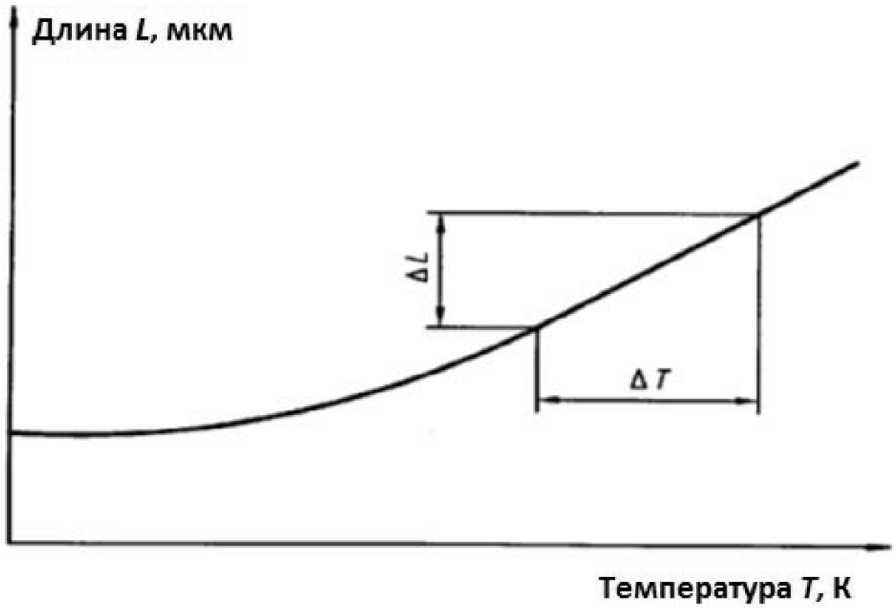


Рисунок 18 – Определение среднего коэффициента линейного теплового расширения

- Расчет среднего КЛТР в интервале температур ($\alpha_{ср}$) – на кривой выбирается линейный участок (например, от T_1 до T_2). По формуле рассчитывается средний коэффициент:

$$\alpha_{ср}\ [1/°C] = ((\Delta L_{T_2} / L_0) - (\Delta L_{T_1} / L_0)) / (T_2 - T_1) \qquad (18)$$

Результат представляется как $\alpha_{ср} = X \cdot 10^{-5}$ 1/°C (или $X \cdot 10^{-6}$ 1/°C).

- Мгновенный КЛТР – современное ПО может рассчитывать и мгновенный (дифференциальный) КЛТР как первую производную от кривой расширения.

6. Статистическая обработка – испытание проводят на минимум двух образцах. Результаты усредняют.

При измерении КЛТР для пластмасс и эластомеров имеются ряд особенностей:

1. Для пластмасс:

- При переходе через T_c аморфные пластики резко меняют КЛТР. Выше T_c коэффициент расширения в 2-3 раза выше, чем ниже T_g. Это связано с переходом в высокоэластичное состояние.

- Кристаллические пластики имеют более сложную картину из-за наличия аморфной и кристаллической фаз.
- Стекловолокно, минеральные наполнители резко снижают КЛТР, приближая его к значениям для металлов.

2. Для эластомеров (резин):

- Резины имеют очень высокий коэффициент теплового расширения (примерно 150-300 · 10^{-6} 1/°C), что в 5-10 раз выше, чем у неармированных пластмасс.
- Из-за мягкости и высокой сжимаемости критически важно правильно подобрать контактное усилие толкателя, чтобы не деформировать образец.
- Активные наполнители (например, технический углерод) снижают КЛТР, а пластификаторы могут его увеличивать.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 15173-70 Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения.
- ГОСТ 32618.2-2014 Пластмассы. Термомеханический анализ (ТМА). Часть 2. Определение коэффициента линейного теплового расширения и температуры стеклования.
- ISO 11359-1, -2 – Plastics – Thermomechanical analysis (TMA) – Part 1: General principles. Part 2: Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature.
- ASTM E831 Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis.
- ASTM D696 Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30°C and 30°C with a Vitreous Silica Dilatometer.

2.4 Теплопроводность

Теплопроводность (λ) – это физическая величина, характеризующая способность материала передавать тепловую энергию от более нагретых частей к менее нагретым в результате теплового движения и взаимодействия микрочастиц.

Закон Фурье:

$$q = -\lambda \cdot (dT/dx), \quad (19)$$

где q – плотность теплового потока [Вт/м²];

λ – коэффициент теплопроводности [Вт/(м·К)];

dT/dx — градиент температуры [К/м].

При исследовании теплопроводности пластмасс и эластомеров имеется ряд особенностей:

- Пластмассы и эластомеры являются теплоизоляторами. Их коэффициент теплопроводности обычно лежит в диапазоне 0,1-0,5 Вт/(м·К). Для сравнения у меди ~ 400 Вт/(м·К).
- Теплопроводность аморфных пластмасс ниже, чем кристаллических.
- Наличие наполнителей (стекловолокно, технический углерод, металлическая пудра, керамика) может значительно увеличить λ.
- Теплопроводность пластмасс растет с увеличением температуры.
- Теплопроводность резин обычно слабо растет с увеличением температуры.

Для пластмасс и эластомеров, являющихся плохими проводниками тепла, применяются в основном стационарные методы, так как они обеспечивают высокую точность для таких материалов.

1. Стационарный метод с горячей охранной зоной (GHP, Guarded Hot Plate) – считается одним из самых точных и является эталонным по многим стандартам. В процессе анализа происходит создание стационарного

(неизменного во времени) одномерного теплового потока через плоский образец известной толщины и измерение перепада температуры на нем.

Образец помещается между двумя плитами: нагревательной и охлаждающей. Основной нагреватель создает основной тепловой поток через образец. Защитный нагреватель окружает основной и поддерживается при той же температуре. Это предотвращает боковые потери тепла, направляя весь поток строго через образец к холодной плите. На холодной плите поддерживается постоянная температура.

Когда система достигает теплового равновесия (температуры на горячей и холодной сторонах образца перестают меняться), измеряют:

$$\lambda = (Q \cdot d) / (A \cdot \Delta T), \quad (20)$$

где ΔT – разность температур между горячей и холодной поверхностями образца [К];

d – толщина образца [м];

Q – мощность, подаваемая на основной нагреватель [Вт];

A – площадь поперечного сечения образца [м²].

2. Метод теплового потока (Heat Flow Meter) – практический и широко распространенный метод, основанный на том же принципе, но более быстрый.

Принцип анализа аналогичен методу с горячей охранной зоной, но для измерения плотности теплового потока используется калиброванный датчик теплового потока (Heat Flux Sensor), который устанавливается между образцом и плитами. После установления стационарного режима датчик измеряет плотность теплового потока q.

$$\lambda = (q \cdot d) / \Delta T \quad (21)$$

3. Нестационарные методы (например, метод горячего диска) – более современные и быстрые методы.

В образец помещается датчик в виде тонкого металлического диска или проволоки, который выполняет роль источника тепла и датчика температуры. На датчик подается короткий электрический импульс, и он начинает нагреваться. Анализируя скорость роста температуры самого датчика,

который зависит от тепловых свойств окружающего его материала, вычисляют теплопроводность.

Преимущества:

- Высокая скорость измерения (несколько секунд);
- Измеряет теплопроводность и температуропроводность одновременно;
- Меньшая требовательность к подготовке поверхности образца.

Недостатки:

- Сложнее теоретическая база и обработка данных;
- Обычно требует более дорогого оборудования.

Описание процесса испытания на примере стационарного метода с горячей охранной зоной

1. Подготовка образцов. Используются плоские, параллельные пластины, которые должны полностью перекрывать площадь основной и защитной плит. Часто используются квадратные образцы со стороной 300х300 мм или более. Стандартная толщина обычно составляет 10-30 мм. Точность измерения толщины критична.

Обычно используются два идентичных образца, размещаемые по обе стороны от горячей плиты (симметричная схема). Это удваивает измерительную площадь и компенсирует возможную асимметрию.

Поверхности должны быть гладкими и параллельными для обеспечения равномерного и плотного контакта с плитами.

Образцы должны быть тщательно высушены (гигроскопичные пластики) и выдержаны при стандартных условиях (23±2 °C) для стабилизации.

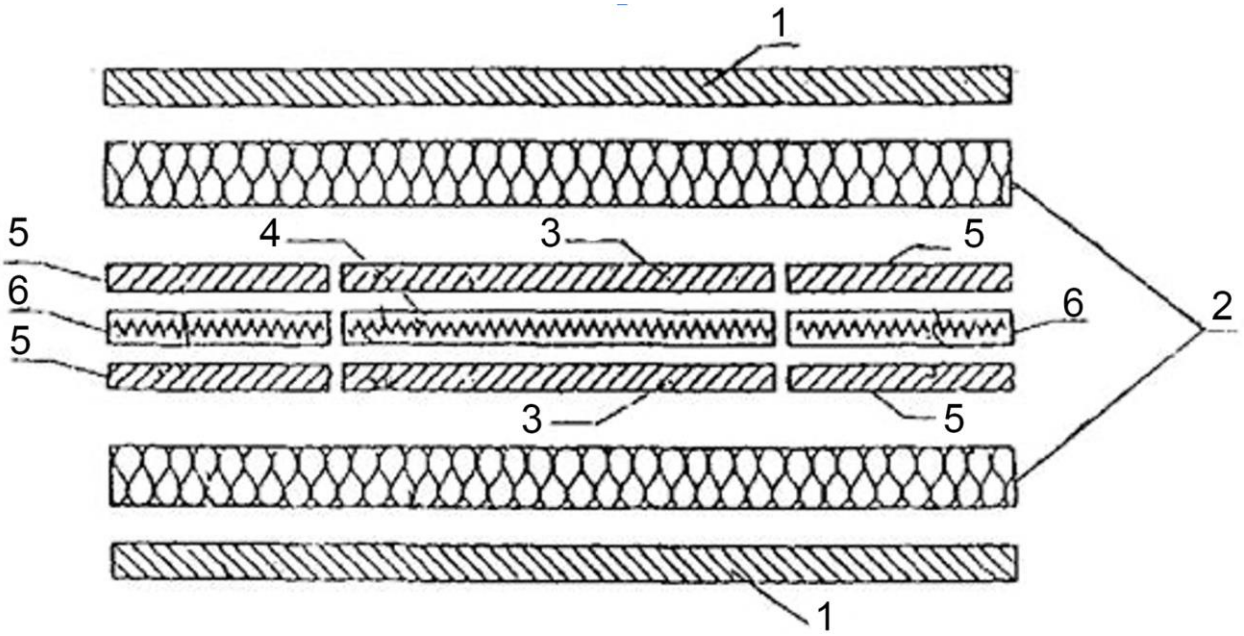
2. Установка образцов в прибор. С высокой точностью измеряются толщина и площадь образцов. Для улучшения теплового контакта на

поверхности образцов может наноситься тонкий слой теплопроводной пасты или размещаться мягкая металлическая фольга.

Сборка «сэндвича»:

- Холодная плита;
- Первый образец;
- Горячая плита (основной и защитный нагреватели);
- Второй образец;
- Вторая холодная плита.

Вся сборка помещается под пресс для обеспечения равномерного и плотного контакта между всеми поверхностями.



1 – холодильник; 2 – испытываемые образцы; 3 – плиты нагревателя зоны измерения; 4 – обмотка нагревателя зоны измерения; 5 – плиты нагревателя охранной зоны; 6 – обмотка нагревателя охранной зоны

Рисунок 19 – Схема прибора с горячей охранной зоной

3. Настройка и проведение испытания. Задаются температуры горячей (T_{hot}) и холодной (T_{cold}) плит. Средняя температура испытания будет:

$$(T_{hot} + T_{cold})/2$$

Часто ее устанавливают равной 23°C, 50°C или др.

Прибор включается, и система начинает медленно выходить на стационарный режим. Этот процесс может занимать несколько часов.

Система считается вышедшей в стационарный режим, когда мощность, подаваемая на нагреватель, и перепад температур на образцах (ΔT) остаются постоянными (в пределах заданной погрешности) в течение продолжительного времени (например, 30 минут).

В стационарном режиме регистрируются:

Q – средняя мощность, подаваемая на основной нагреватель;

T_{hot} – температура горячей плиты;

T_{cold} – температура холодной плиты;

$$\Delta T = T_{hot} - T_{cold} \quad (22)$$

4. Расчет и проверка. По формуле (20) рассчитывается коэффициент теплопроводности для каждого образца (или усредненное значение для двух).

Сравнивается мощность основного и защитного нагревателей. Если система идеально отстроена, их температуры должны быть равны, и мощность на защитном нагревателе будет стремиться к нулю. Это подтверждает, что все тепло ушло через образец, а не рассеялось в стороны.

Испытание может повторяться при разных средних температурах для построения зависимости λ(T). Результаты усредняются по нескольким циклам измерений.

На точность измерений могут повлиять следующие факторы:

- Любые зазоры между образцом и плитами создают дополнительное термическое сопротивление, что приводит к занижению измеряемой теплопроводности.
- Боковые потери тепла – несовершенство работы защитного нагревателя является главным источником ошибки в стационарных методах.
- Точность измерения толщины – погрешность в 1 % в измерении толщины d дает прямую погрешность в 1 % в значении λ.

- Влажность образца – вода имеет теплопроводность ~0,6 Вт/(м·К), что выше, чем у большинства пластиков и эластомеров. Наличие влаги завысит результат.
- Температурный дрейф – неполный выход на стационарный режим приводит к некорректным данным.

Испытания проводятся в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.
- ISO 8302 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus.
- ISO 8301 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus.
- ASTM C177 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
- ASTM E1530 Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique.
- ISO 22007-2 Plastics – Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method.
- ASTM E1530 Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique.

3 РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Реологические свойства характеризуют поведение полимерных материалов в условиях течения и деформации, определяя их технологичность при переработке и эксплуатационные качества готовых изделий. Данный раздел посвящен изучению вязкостных и деформационных характеристик расплавов и концентрированных растворов полимеров.

В разделе подробно рассмотрены такие ключевые параметры, как показатель текучести расплава (ПТР) и вязкость расплава, а также методы их определения с помощью экструзионных пластометров, капиллярных и ротационных реометров. Особое внимание уделено зависимости реологических свойств от скорости сдвига, температуры и давления, что позволяет прогнозировать поведение материала в реальных процессах переработки, таких как литье под давлением и экструзия.

Исследование реологических свойств является основой для оптимизации технологических режимов, разработки новых рецептур полимерных композиций и обеспечения стабильного качества готовой продукции.

3.1 Показатель текучести расплава

Показатель текучести расплава (ПТР, Melt Flow Rate, MFR) или индекс расплава (Melt Flow Index, MFI) – это масса полимера в граммах, выдавливаемая через капилляр заданного диаметра и длины за 10 минут под действием заданной нагрузки при определенной температуре.

Единицы измерения: г/10 мин.

ПТР является обратной мерой вязкости расплава и прямой мерой его текучести. Чем выше ПТР, тем менее вязок расплав и тем легче он течет.

Анализ ПТР необходим для пластмасс по следующим причинам:

- Контроль качества – быстрая проверка постоянства свойств от партии к партии;
- Маркировка материалов (например, ПЭ 80-02 означает ПЭ с ПТР 2 г/10 мин при 190 °C и 2,16 кг);
- Прогнозирование поведения при переработке – связь с технологическими параметрами литья под давлением, экструзии.

Метод анализа ПТР основан на измерении объема ньютоновской жидкости, вытекающей из капилляра под действием давления. Хотя расплавы полимеров являются неньютоновскими жидкостями, метод стандартизирован и дает воспроизводимые сравнительные результаты.

Ключевые параметры, которые должны быть указаны в результате:

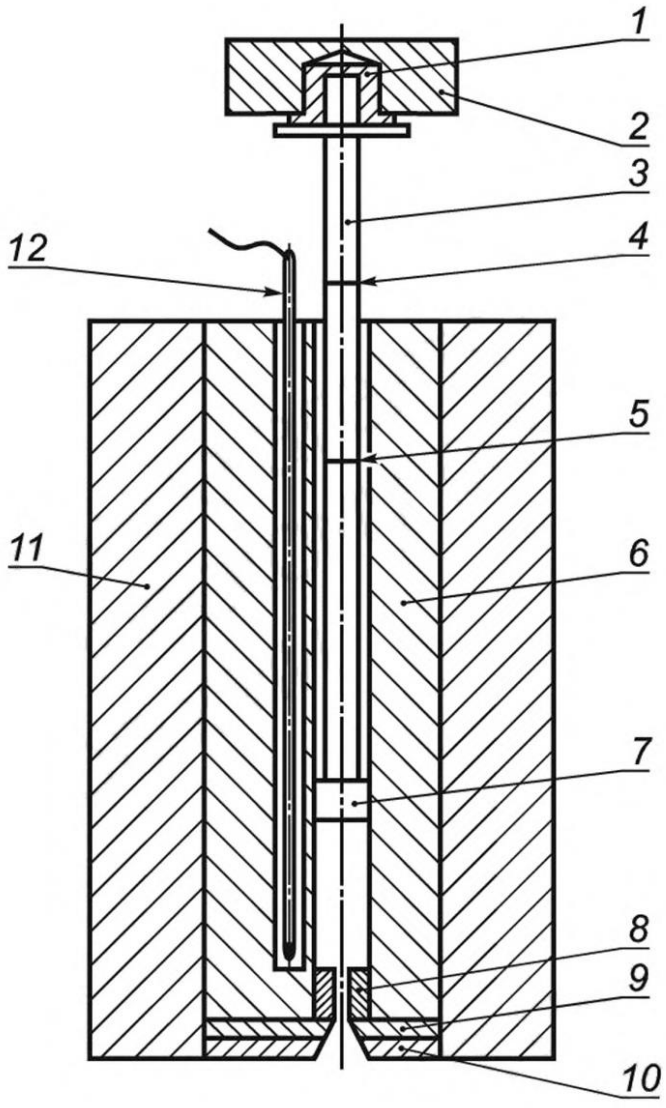
- Температура (T) нагревательного цилиндра [°C] (например, 190 °C, 230°C);
- Нагрузка (m) – масса груза [кг] или [Н] (например, 2,16 кг, 5 кг);
- Положение поршня (только для ПВР) – для измерения объемного показателя текучести расплава (ПВР).

Обозначение результата: ПТР (190 °C / 2,16 кг) = 3,5 г/10 мин.

Стандартный прибор для измерения ПТР (пластометр) состоит из:

- Цилиндр (барабан) – вертикальная стальная гильза с высокоточной внутренней полировкой.
- Капилляр – сменная втулка с точно калиброванным отверстием длиной 8,000 ± 0,025 мм, диаметром 2,095 ± 0,005 мм.
- Поршень – стальной стержень, который перемещается внутри цилиндра. На его конце часто есть кольцевые метки.
- Нагрузка – набор съемных грузов, которые устанавливаются на поршень (1,2 кг, 2,16 кг, 5 кг, 10 кг, 21,6 кг).
- Нагревательная система – термостатируемая печь с точностью контроля температуры ±0,1 °C – ±0,2 °C.

- Система измерения – линейка или автоматический датчик для измерения хода поршня, таймер.



1 – теплоизоляция; 2 – съемный груз; 3 – поршень; 4 – верхняя контрольная метка; 5 – нижняя контрольная метка; 6 – эструзионная камера; 7 – направляющая головка поршня; 8 – капилляр; 9 – пластина, удерживающая капилляр; 10 – изолирующая пластина; 11 – теплоизоляция; 12 – датчик температуры

Рисунок 20 – Пример схемы экструзионного пластометра

Описание процесса измерения

1. Подготовка прибора. Капилляр вставляется в нижнюю часть цилиндра. Прибор включается и нагревается до заданной температуры. Температура контролируется калиброванным термометром или термопарой, установленной вблизи капилляра. Прогрев пустого прибора обязателен в течение заданного времени.

Цилиндр и поршень тщательно очищаются и протираются латунным скребком и ветошью.

2. Подготовка материала. Материал используется в виде гранул или порошка.

Многие пластики (например, ПЭТ, ПК, ПА) гигроскопичны. Наличие влаги приводит к гидролитической деструкции в цилиндре и сильному занижению ПТР. Сушку проводят в вакуумном сушильном шкафу согласно рекомендациям производителя материала (например, 4 часа при 80 °C для ПК).

3. Загрузка материала. Поршень извлекается из цилиндра. В цилиндр засыпается ~4-5 г материала (точное количество не важно, важно чтобы цилиндр был заполнен). Поршень сразу же возвращается в цилиндр. Это предотвращает окисление материала и способствует быстрому расплавлению. После загрузки включается таймер.

4. Предварительная выдержка. Материалу дают расплавиться и достичь температурного равновесия. Стандартное время выдержки: 4-7 минут (точно регламентировано в стандарте для каждого материала). В это время на поршень может быть установлен небольшой предварительный груз для удаления пузырьков воздуха.

5. Основное испытание. По истечении времени предварительной выдержки на поршень быстро, но аккуратно устанавливается основная нагрузка (например, 2,16 кг). Под действием груза расплав начинает выдавливаться через капилляр.

Первые порции экструдата (содержащие возможные пузырьки воздуха) срезаются и выбрасываются.

В момент, когда поршень достигает одной из меток, запускается таймер. Через заданные интервалы времени (или при прохождении поршнем определенных расстояний) экструдат аккуратно срезается острым ножом. Срезают не менее 5 отрезков. Отрезки должны быть без пузырей и дефектов.

Каждый отрезок взвешивается на аналитических весах с точностью до 0,001 г.

6 Расчет ПТР. Рассчитывается средняя масса одного отрезка ($m_{среднее}$), г. Измеряется временной интервал между срезами (t), секунды. ПТР рассчитывается по формуле, которая приводит выход ко времени 10 минут (600 секунд):

$$ПТР\ [г/10\ мин] = (m_{среднее}\ [г] / t\ [с]) \cdot 600\ [с] \quad (23)$$

Например, если отрезок массой 0,12 г отрезался каждые 30 секунд, то ПТР = (0.12 / 30) • 600 = 2,4 г/10 мин.

Современные приборы автоматически измеряют скорость перемещения поршня с помощью датчика. Зная диаметр цилиндра и скорость, программное обеспечение автоматически рассчитывает объемный показатель текучести расплава (ПВР, MVR).

$$ПТР\ [г/10\ мин] = ПВР\ [см^3/10\ мин] \cdot \rho\ [г/см^3], \quad (24)$$

где ρ – плотность расплава при температуре измерения.

На точность измерения ПТР влияют следующие факторы:

- Влажность материала – главный источник ошибки. Приводит к занижению ПТР.
- Температура – отклонение на 1 °С может привести к изменению ПТР на 5-15 %.
- Время предварительной выдержки: слишком короткое – материал не расплавился. Слишком длинное – термическая деструкция полимера.
- История материала – предыдущие переработки, деструкция, ориентация.

- Чистота цилиндра и капилляра – остатки старого материала влияют на результат.
- Вертикальность поршня – перекос увеличивает трение.

Измерение ПТР проводится в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ 11645-2021 Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов.
- ISO 1133-1 Plastics - Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics - Part 1: Standard method.
- ASTM D1238 Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer.

3.2 Вязкость расплава

Вязкость расплава полимера (η) – это мера сопротивления течению расплавленного полимера. В отличие от ПТР, измерение вязкости позволяет построить полную реологическую кривую – зависимость вязкости от скорости сдвига.

Результаты исследования вязкости расплава полимеров необходимы для:

- Прогнозирования поведения при переработке (литье, экструзия, выдувное формование);
- Оптимизации рецептуры и содержания добавок;
- Исследования деструкции и сшивания полимера;
- Расчета параметров оборудования.

Для измерения вязкости расплава полимеров используют следующие методы:

1. Капиллярная вискозиметрия – наиболее распространенный метод, имитирующий реальные процессы переработки. Принцип метода заключается

в измерении перепада давления и расхода при продавливании расплава через капилляр известной геометрии;

2. Ротационная вискозиметрия – используется для изучения тиксотропии, релаксационных свойств. Принцип метода заключается в измерении момента сопротивления между двумя соосными телами (конус-плита, плита-плита), одно из которых вращается.

Описание процесса измерения на примере капиллярной вискозиметрии

Этот метод наиболее близок к реальным условиям переработки (экструзия, литье под давлением).

Для проведения анализа используется специализированное оборудование – капиллярный реометр.

Составные части современного капиллярного реометра:

- Цилиндр (баррель) – термостатируемый цилиндр для расплава полимера;
- Поршень – приводится в движение сервоприводом с точным контролем скорости;
- Тензодатчик для измерения давления у входа в капилляр;
- Сменные капилляры разной геометрии;
- Компьютер для задания программы и сбора данных.

1. Подготовка образца. Используются гранулы, порошок или предварительно отформованные цилиндры.

Для гигроскопичных материалов (например, ПЭТ, ПК, ПА) обязательна сушка.

Для удаления пузырьков воздуха проводится вакуумирование.

2. Калибровка и настройка. Устанавливается капилляр с известной геометрией. Цилиндр прогревается до рабочей температуры. Производится калибровка датчика давления.

3. Загрузка материала в цилиндр, уплотнение поршнем для удаления воздуха. Материал выдерживается для температурной стабилизации (5-15 минут).

4. Проведение измерений:

- Задание программы скоростей поршня;
- Регистрация установившегося давления для каждой скорости;
- Измерение при нескольких скоростях сдвига.

5. Обработка данных. Производится расчет основных параметров:

- Сдвиговое напряжение (τ_w)

$$\tau_w = (\Delta P \bullet R) / (2 \bullet L), \quad (25)$$

где ΔP – перепад давления;

R – радиус капилляра;

L – длина капилляра.

- Скорость сдвига (γ'_w):

$$\gamma'_w = (4 \bullet Q) / (\pi \bullet R^3), \quad (26)$$

где Q — объемный расход.

- Вязкость расплава (η):

$$\eta = \tau_w / \gamma'_w \quad (27)$$

Описание процесса измерения на примере ротационной вискозиметрии

Ротационная вискозиметрия — это метод определения вязкости, основанный на измерении момента сопротивления, возникающего между двумя соосными телами при их относительном вращении. Один из элементов (ротор) вращается, а другой (статор) остается неподвижным, либо оба вращаются с разными скоростями.

Метод основан на законе вязкого трения Ньютона, который устанавливает прямую пропорциональность между напряжением сдвига (τ) и скоростью сдвига ($\dot{\gamma}$) через коэффициент динамической вязкости (η):

$$\tau = \eta \bullet \dot{\gamma} \quad (28)$$

Для полимеров, которые являются неньютоновскими жидкостями, эта зависимость нелинейна, и именно ротационная вискозиметрия позволяет исследовать этот сложный характер течения.

Выбор измерительной системы (геометрии) критически важен и зависит от свойств полимерного расплава.

1. Система «конус-плита» (Cone-Plate). Нижняя плита плоская, верхний ротор имеет форму усеченного конуса с очень малым углом (обычно 0,5° - 4°). Образец помещается в зазор между конусом и плитой.

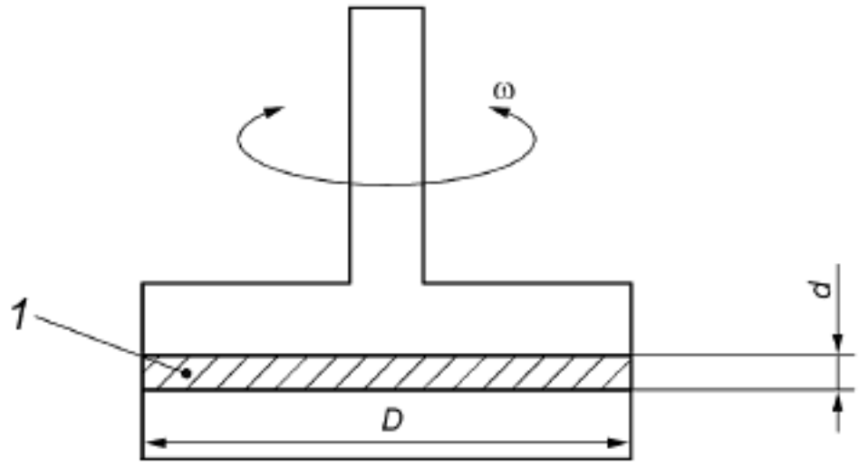
Преимущества метода:

- Однородное поле скоростей сдвига во всем объеме образца;
- Требуется очень небольшое количество материала (0,5 - 2 мл);
- Идеально для определения абсолютных значений вязкости;
- Легкая очистка.

Недостатки:

- Риск «выдавливания» образца из зазора при высоких скоростях сдвига;
- Чувствительность к наличию частиц и загрязнений (может привести к повреждению геометрии);
- Не подходит для материалов с очень высокой вязкостью.

2. Система «плита-плита» (Plate-Plate или Parallel Plate). Две параллельные плиты с зазором h между ними. Диаметр плит обычно 25-50 мм. Образец помещается между плитами.



1 – образец; ω – угловая частота; d – толщина образца; D – диаметр пластины

Рисунок 21 – Схема измерительной системы реометра с параллельными пластинами

Преимущества метода:

- Простота подготовки образца (можно использовать предварительно отформованные диски или просто поместить материал между плитами);
- Легко варьировать зазор, что полезно для исследования материалов с крупными частицами;
- Подходит для материалов с очень высокой вязкостью и модулем;
- Позволяет проводить измерения в условиях неоднородного сдвига, что полезно для изучения нормальных напряжений.

Недостатки:

- Неоднородное поле скоростей сдвига. Скорость сдвига линейно возрастает от центра (0) к краю (максимум). Это требует специальных расчетов;
- Более сложная интерпретация данных по сравнению с системой «конус-плита».

3. Система «цилиндр-цилиндр» (Cup and Bob или Couette). Два коаксиальных цилиндра. Внешний цилиндр (статор) и внутренний ротор (боб). Образец находится в кольцевом зазоре между ними.

Преимущества метода:

- Большая площадь сдвига, что обеспечивает высокую чувствительность для низковязких материалов;
- Хорошо подходит для жидкостей.

Недостатки:

- Требуется относительно большой объем образца;
- Сложность очистки;
- Менее распространена для полимерных расплавов, больше для растворов и суспензий.

Рассмотрим процесс на примере системы «плита-плита», которая наиболее универсальна для расплавов.

1. Подготовка прибора и образца. Полимер в виде гранул или порошка должен быть тщательно высушен для удаления влаги, которая вызывает пузырение и гидролитическую деструкцию. Для некоторых материалов изготавливают предварительно отформованные диски на гидравлическом прессе.

Устанавливаются две параллельные плиты. Прибор прогревается до заданной температуры испытания (например, 200 °C для ПП, 300 °C для ПК). Контроль температуры должен быть с точностью ±0,1 °C. Калибруется нулевой зазор, когда плиты соприкасаются.

2. Загрузка образца. Плиты разводятся на расстояние 1,5 - 3 мм. Подготовленный материал вручную или с помощью дозатора помещается на центр нижней плиты. Плиты смыкаются до рабочего зазора (обычно 0,5 – 1,5 мм).

Образец выдерживается в течение 5-15 минут для полного плавления, релаксации внутренних напряжений и выравнивания температуры. Для ускорения процесса и предотвращения окисления сверху может создаваться инертная атмосфера (азот).

3. Проведение реометрических тестов. Современные реометры позволяют проводить несколько типов тестов в одной сессии.

- Тест с контролем скорости сдвига. Задается программа вращения верхней плиты с определенной угловой скоростью (Ω), а прибор измеряет возникающий крутящий момент (M).

Напряжение сдвига (τ) на краю плиты:

$$\tau_R = (2 \bullet M) / (\pi \bullet R^3) \quad (29)$$

Скорость сдвига ($\dot{\gamma}$) на краю плиты:

$$\dot{\gamma}_R = (\Omega \bullet R) / h \quad (30)$$

Кажущаяся вязкость (η):

$$\eta = \tau_R / \dot{\gamma}_R \quad (31)$$

где R — радиус плиты, h — зазор, Ω — угловая скорость.

- Тест с контролем напряжения сдвига. Задается программа крутящего момента (M), а прибор измеряет результирующую угловую скорость (Ω). Метод позволяет напрямую определять предел текучести – минимальное напряжение, необходимое для начала течения материала.
- Осцилляционный (динамический) тест. На образец подается не постоянное, а синусоидальное деформирующее воздействие. Это самый мощный метод для изучения структурных свойств.

Измеряются комплексный модуль сдвига (G*) – общая мера сопротивления материала деформации; накопительный модуль (G') – мера упругой (обратимой) энергии. Характеризует «твердость» или структуру расплава; модуль потерь (G") – мера вязкой (необратимой) энергии; комплексная вязкость:

$$(\eta^*): \eta^* = G^* / \omega, \quad (32)$$

где ω — угловая частота.

4. Анализ и интерпретация данных. Строятся реологические кривые:

- Кривая течения – зависимость вязкости (η) от скорости сдвига ($\dot{\gamma}$). Показывает, как материал разжижается при сдвиге.
- Вязкоупругий спектр – зависимости G' и G" от частоты (ω). Показывает структуру материала и его поведение при разных временах воздействия.

Данные подгоняются под модели (например, степенной закон Оствальда-де Вилле, модель Кросса-Вильяма) для математического описания поведения материала.

5. Очистка прибора. После измерения плиты разводятся, и расплавленный полимер быстро и аккуратно удаляется латунным скребком и салфеткой. Плиты очищаются растворителем при повышенной температуре.

Критически важные факторы, влияющие на точность измерения:

- Термическая стабильность – полимеры могут подвергаться деструкции при длительном нагреве, что искажает результаты;
- При высоких напряжениях сдвига полимер может проскальзывать относительно поверхности плит, что приводит к занижению вязкости;
- Упругая турбулентность – при очень высоких скоростях сдвига течение становится нестабильным;
- Может происходить выдавливание образца или образование «мениска» по краям;
- Неполная сушка приводит к пузырькам и химической деструкции.

Измерение вязкости расплава полимеров проводится в строгом соответствии с международными или национальными стандартами, которые регламентируют все параметры:

- ГОСТ Р 57950-2017 (ИСО 6721-10:2015). Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 10. Комплексная вязкость при сдвиге с использованием колебательного реометра с параллельными пластинами.
- ISO 6721-10:2015 Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 10: Complex shear viscosity using a parallel-plate oscillatory rheometer, MOD.
- ISO 11443-2005 Plastics - Determination of the Fluidity of Plastics Using Capillary and Slit-Die Rheometers (Пластмассы. Определение текучести на вискозиметре с капиллярной или щелевой фильерой).
- ASTM D3835 Standard Test Method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer.

4 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Эксплуатационные и специальные свойства полимерных материалов определяют их долговечность, надежность и безопасность в реальных условиях применения. Данный раздел посвящен изучению комплексных характеристик, которые проявляются под воздействием совокупности факторов внешней среды и механических нагрузок.

В разделе подробно рассмотрены такие ключевые аспекты, как сопротивление старению (термическому, климатическому, озоновому, гидролитическому, в жидкостях, биологическому и радиационному), износостойкость, горючесть, плотность и морозостойкость. Для каждого свойства описаны механизмы деградации, стандартизированные методы испытаний и факторы, влияющие на результаты.

Исследование этих свойств позволяет прогнозировать срок службы материалов, разрабатывать эффективные стабилизирующие системы, оценивать пожарную опасность и выбирать оптимальные области применения для различных типов пластмасс и эластомеров в промышленности и быту.

4.1 Сопротивление старению

Старение полимеров и эластомеров – это необратимое изменение их химической структуры, физических свойств и внешнего вида под воздействием различных факторов окружающей среды и эксплуатационных нагрузок с течением времени.

Процесс старения приводит к:

- Потере механической прочности.
- Ухудшению эластичности.
- Изменению внешнего вида (например, выцветание, пожелтение, появление трещин, меление).

- Потере функциональных свойств (например, электрической изоляции, герметичности).

Рисунок 22 – Старение (деструкция) емкости из полиэтилена в почве

Ключевая причина старения – реакционная способность полимеров и их функциональных групп. Макромолекулы под действием внешней энергии (тепло, свет) вступают в химические реакции (окисление, гидролиз), что приводит к разрыву цепей (деструкции) или, наоборот, к образованию поперечных связей (сшиванию).

Старение почти всегда вызывается комбинацией нескольких факторов, но для удобства исследования и тестирования его делят на следующие основные виды.

1. Термическое и термоокислительное старение – воздействие повышенной температуры в присутствии кислорода воздуха.

Тепло активирует молекулы полимера, делая их уязвимыми для атаки кислорода. Запускается цепная реакция окисления, приводящая к разрыву молекулярных цепей (падение прочности) или их сшиванию (потеря эластичности).

2 Фотостарение (световое старение) – разрушение под действием ультрафиолета.

Энергии УФ-квантов достаточно для разрыва химических связей в полимерной цепи и в молекулах стабилизаторов. Это также запускает реакцию фотоокисления.

3. Озоновое старение – атака молекул озона (O_3), сильного окислителя.

Озон особенно агрессивно атакует двойные связи (C=C) в полимерах (в частности, в эластомерах), вызывая разрыв цепей. Самый характерный признак – появление трещин, направленных перпендикулярно направлению растягивающего напряжения.

4. Гидролитическое старение – разрушение под действием воды или водяного пара.

Вода вызывает химический разрыв определенных связей в полимерной цепи. Наиболее уязвимы сложноэфирные (ПЭТ, ПЛА) и амидные (ПА) связи.

5. Старение в жидкостях (химическая стойкость) – взаимодействие с агрессивными жидкостями: маслами, топливами, растворителями, кислотами, щелочами.

Старение в жидкостях может проходить по ряду механизмов:

- Физический – набухание (поглощение жидкости) и экстракция (вымывание пластификаторов и добавок);
- Химический – необратимое разрушение цепи (деструкция);
- Растрескивание под напряжением – совместное действие жидкости и механического напряжения, приводящее к хрупкому разрушению.

6. Климатическое старение (комбинированное) – совместное воздействие целого комплекса факторов: УФ-излучения, температуры, влажности, осадков, кислорода.

Наблюдается синергетический эффект, когда факторы многократно усиливают разрушающее действие друг друга (например, влажность ускоряет фотоокисление).

7. Биологическое старение – разрушение под действием микроорганизмов (бактерий, грибков, плесени). Микроорганизмы используют полимер или его добавки (пластификаторы) в качестве источника пищи.

8. Радиационное старение – воздействие ионизирующего излучения (гамма-лучи, электронные пучки).

Высокая энергия излучения вызывает разрыв химических связей, приводя преимущественно к сшиванию (для эластомеров) или деструкции (для некоторых пластиков).

Старение полимеров и эластомеров – это сложный, многофакторный процесс. На практике материал почти никогда не стареет под действием одного фактора. Например, автомобильная шина одновременно подвергается озоновому старению, термоокислительному (от нагрева при качении), механическому (деформация), гидролитическому (от влаги на дороге) и фотостарению.

Цель исследований старения – предсказать срок службы материала, разработать стабилизированные составы и обеспечить надежность и безопасность изделий в течение всего заявленного периода эксплуатации.

4.1.1 Термическое старение

Термическое старение – это необратимое изменение свойств полимера (прочности, эластичности, цвета и т.д.) под воздействием повышенной температуры в течение времени. Это частный случай более общего явления – термоокислительного старения, так как в присутствии кислорода процессы идут гораздо интенсивнее.

Исследование термического и термоокислительного старения необходимо для:

- Прогноза срока службы материала при рабочих температурах;
- Контроля качества;

- Разработки новых материалов – оценить эффективность стабилизаторов (антиоксидантов, антиозонантов) и подобрать оптимальный состав;
- Понимания механизмов деградации – выяснить, какие химические реакции протекают (окисление, деструкция, сшивание), чтобы бороться с ними целенаправленно.

Поскольку реальное старение при рабочих температурах может длиться годы, используют ускоренные испытания при повышенных температурах. Ключевой принцип – использование моделей, экстраполирующих данные с высоких температур на низкие.

1. Термостарение в воздушных термостатах (печи старения) – это самый распространенный и стандартизированный метод (ГОСТ ISO 188-2013 Резина и термоэластопласты. Испытания на ускоренное старение и теплостойкость; ASTM D3045-1992 (R 2003) Standard Practice for Heat Aging of Plastics without Load; ASTM D573-2004 (R 2015) Standard Test Method for Rubber-Deterioration in an Air Oven).

Образцы помещаются в циркуляционные воздушные термостаты (печи) с принудительной вентиляцией для поддержания однородной температуры и доступа кислорода.

Ключевые параметры исследования:

- Температура – выбирается несколько температур (обычно 3-4), превышающих рабочую. Например, 70°C, 85°C, 100°C, 125°C. Температуры не должны вызывать плавление или немедленное разложение.
- Время – образцы извлекают через определенные промежутки времени (например, 24, 48, 96, 168 часов и далее) для анализа.
- Атмосфера – обычно воздух. Иногда используют чистый кислород для еще большего ускорения.

Преимущества метода:

- Простота и воспроизводимость;
- Одновременно можно тестировать множество образцов;

- Хорошо стандартизирован.

Недостатки:

- Температурный градиент в печи может привести к неравномерному старению;
- Испарение пластификаторов и летучих добавок может исказить результаты.

После каждого интервала времени в печи образцы извлекают и анализируют. Проводят следующие испытания:

- Механические испытания – наиболее информативные методы, так как они напрямую характеризуют работоспособность материала: прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве; твердость; модуль упругости; упруго-эластические свойства.
- Физико-химические исследования: ИК-Фурье спектроскопия (появление карбонильных групп C=O ~1700-1750 $см^{-1}$ и гидроксильных групп O-H ~3200-3600 $см^{-1}$ – прямой признак окисления. Исчезновение двойных связей и др.); термогравиметрический анализ (показывает температуру начала разложения, содержание наполнителей, летучесть пластификаторов. Состаренные образцы часто имеют более низкую температуру термической стабильности); дифференциальная сканирующая калориметрия; анализ степени набухания (для эластомеров).

2. Кислородная бомба (ASTM D572 Standard Test Method for Rubber-Deterioration by Heat and Oxygen) – ускоренный специализированный метод. Образцы старятся в среде чистого кислорода под давлением (обычно 2,1 МПа). Резко ускоряет процесс окисления. Более агрессивный метод, чем старение в воздушной печи, требует осторожности при экстраполяции результатов.

3. Метод Парижер-Парра (повышенное давление кислорода) – аналогичен кислородной бомбе, но с лучшим контролем параметров.

Данные, полученные по вышеуказанным методам при высоких температурах, нужно перенести на реальные условия.

Предполагается, что скорость химической реакции старения (k) зависит от температуры по закону Аррениуса:

$$k = A \cdot e^{(-Ea/RT)}, \quad (33)$$

где k – константа скорости старения (например, скорость изменения прочности за единицу времени);

A – предэкспоненциальный множитель;

Ea – энергия активации процесса старения;

R – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура (в Кельвинах).

Процедура прогнозирования старения:

- Проводят испытания при, как минимум, 3-4 повышенных температурах (T1, T2, T3...).
- Для каждой температуры находят время, за которое ключевое свойство (например, относительное удлинение) достигает определенного критического уровня (например, падает на 50%). Это время называют "время до отказа" (t_f).
- Строят график в координатах $\ln(t_f)$ от 1/T.
- Полученную прямую экстраполируют на область реальных рабочих температур. Точка пересечения с уровнем рабочей температуры даст логарифм прогнозируемого времени жизни.

Например, если при 100 °C время до падения удлинения на 50 % составило 1000 часов, а при 120 °C – 100 часов, то, построив график Аррениуса, можно предсказать, что при 80°C это время составит, например, 10 000 часов.

Вышеуказанные методы анализа имеют ряд ограничений:

- При очень высоких температурах могут активироваться механизмы деградации, которых нет при низких.
- Пластификаторы, антиоксиданты могут испаряться при высоких температурах, чего не происходит в реальных условиях, что искажает кинетику.

- При высоких скоростях окисления кислород не успевает диффундировать в толщу образца, и старение становится поверхностным, в то время как в реальности оно может быть объемным.
- Нельзя превышать температуру фазовых переходов (плавления, стеклования), иначе физика процесса изменится кардинально.

Таким образом, исследование термического старения – это не один тест, а комплекс взаимодополняющих методик. Стандартный испытание включает:

- Ускоренное старение в воздушной печи при нескольких температурах.
- Регулярный отбор образцов и измерение механических свойств (удлинение, прочность, твердость).
- Углубленный химический анализ для понимания механизмов.
- Построение модели Аррениуса для экстраполяции данных и прогноза срока службы.

Такой комплексный подход позволяет с достаточной точностью предсказать, как поведет себя пластик или эластомер в условиях длительного теплового воздействия, что критически важно для эксплуатации изделий.

4.1.2 Климатическое старение

Климатическое старение – это деградация полимерных материалов под совместным воздействием факторов окружающей среды, главными из которых являются:

- Ультрафиолетовое излучение (УФ) – основной фактор;
- Температура и ее циклические изменения;
- Влажность (осадки, роса) и ее циклирование;
- Кислород воздуха;
- Атмосферные загрязнители (озон, кислотные дожди, солевой туман).

Рисунок 23 – Разрушение полипропиленового изделия под воздействием климатических факторов

Синергетический эффект этих факторов приводит к гораздо более быстрому и сложному разрушению, чем каждый из них по отдельности (например, фотоокисление ускоряется при повышенной температуре и влажности).

Методы исследования климатического старения можно разделить на три основные группы:

- Натурные (полевые) испытания;
- Лабораторные ускоренные испытания;
- Методы анализа свойств.

Натурные (полевые) испытания

Это наиболее достоверный метод, так как материал подвергается воздействию реальных условий эксплуатации.

Образцы размещают на открытых стендах под определенным углом к горизонту (часто 45°) в географических регионах с экстремальными климатическими условиями.

Ключевые полигоны для испытаний:

- Жаркий влажный климат – высокая УФ-радиация, температура, влажность и обильные осадки;
- Жаркий сухой климат (пустыня) – высокая УФ-радиация и температура, большие суточные перепады температур, низкая влажность, абразивное воздействие песка;
- Холодный климат – низкие температуры, циклы замораживания-оттаивания;
- Промышленный / приморский климат – повышенное содержание озона, сернистых соединений, солей.

Преимущества натурных испытаний:

- Высокая достоверность – реальные условия, включая все синергетические эффекты;
- Прямая экстраполяция результатов на конкретный регион.

Недостатки метода:

- Очень длительные сроки (годы, иногда десятилетия);
- Непредсказуемость и изменчивость погодных условий от года к году;
- Высокая стоимость обслуживания полигонов и логистики;
- Невозможность быстро получить данные для разработки новых материалов.

Натурные испытания можно проводить разными методами:

- Открытая экспозиция – образцы подвергаются всем факторам;
- Экспозиция под стеклом – ультрафиолетовый спектр фильтруется, что позволяет изучать влияние в основном температуры и влажности;

- Экспозиция в «черном ящике» – образцы помещают в закрытую со всех сторон темную коробку, которая сильно нагревается на солнце. Моделирует тепловую нагрузку в закрытых пространствах.

Лабораторные (ускоренные) испытания

Это основная группа методов, позволяющая в сжатые сроки оценить стойкость материалов. Все они пытаются смоделировать и усилить природные факторы.

1. Камеры климатического старения с ксеноновыми лампами – это сложные установки, в которых точно контролируются параметры (SN NS-EN ISO 4892-2:2013 Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 2: Xenon-arc lamps (ISO 4892-2:2013) Пластмассы - Методы воздействия лабораторных источников света - Часть 2: дуговые лампы ксенона (4892-2:2013 ISO); ASTM D2565-16 Standard Practice for Xenon-Arc Exposure of Plastics Intended for Outdoor Applications; ASTM G155-21 Standard Practice for Operating Xenon Arc Lamp Apparatus for Exposure of Materials).

Ксеноновые лампы со специальными фильтрами максимально приближают свой спектр к солнечному свету, включая УФ, видимую и ИК-область.

Контролируемые параметры: интенсивность излучения (обычно на длине волны 340 нм для УФ-старения или 420 нм для выцветания); температура образца и камеры; влажность.

Стандартные тесты включают чередование света/темноты, распыление воды (имитация дождя и росы).

Преимущества метода:

- Наиболее точная имитация солнечного спектра.
- Подходит для широкого круга материалов: пластиков, эластомеров, покрытий, текстиля.

Недостатки метода:

- Высокая стоимость оборудования и эксплуатации (лампа имеет ограниченный ресурс);
- Сложность калибровки и поддержания стабильности параметров.

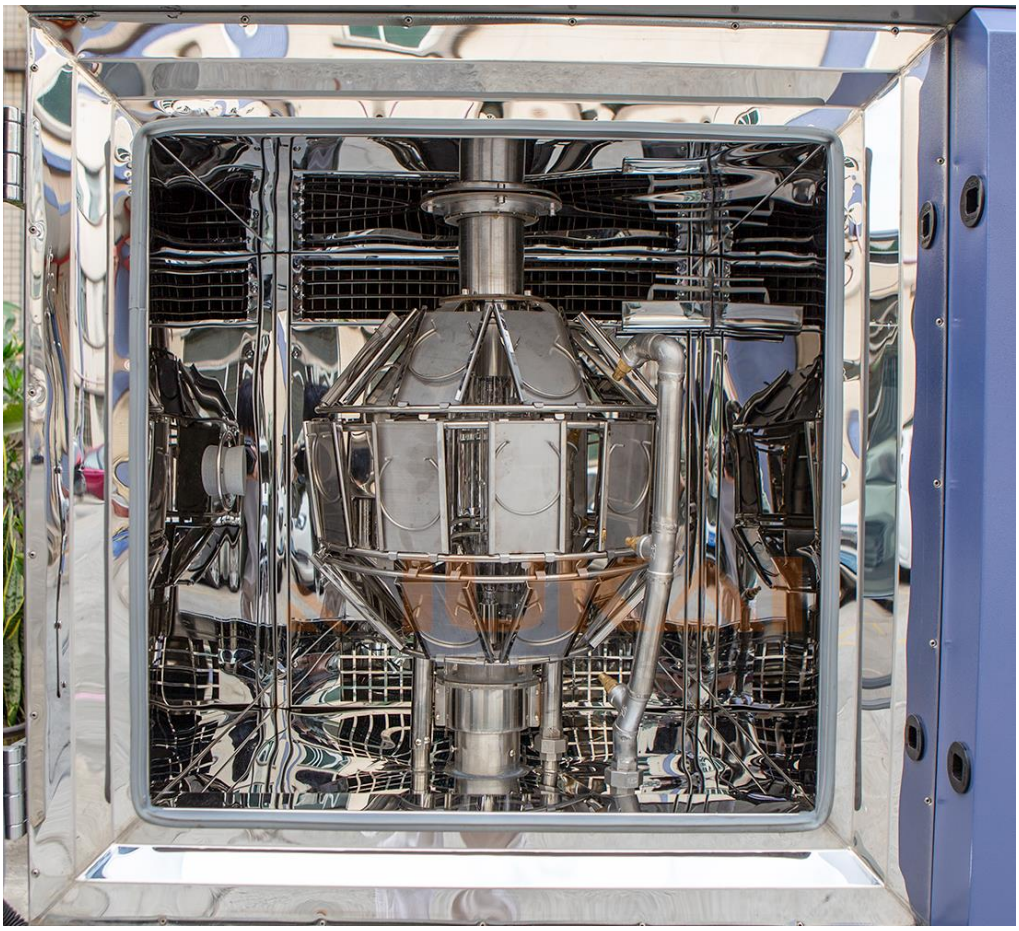


Рисунок 24 – Рабочие органы климатической камеры ускоренного старения с ксеноновой дуговой лампой

2. Климатические камеры с лампами УФ-излучения с флуоресцентными трубками (ГОСТ 9.708-83 Единая система защиты от коррозии и старения. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов; ISO 4892-3-2016 Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 3: Fluorescent UV lamps. Пластмассы. Методы экспонирования под лабораторными источниками света. Часть 3. Люминесцентные лампы ультрафиолетового излучения; ASTM G154-23

Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Materials; ASTM D4329-21 Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics).

Используются флуоресцентные лампы с пиком излучения в УФ-области. Чаще всего используются лампы UVA-340 (пик ~340 нм, хорошо имитирует солнечный УФ до 360 нм) и UVB-313 (более жесткое излучение, ускоряет испытания, но может давать артефакты).

Контролируемые параметры аналогичны ксеноновым камерам, но обычно проще и дешевле.

Преимущества метода:

- Высокая скорость старения (особенно с UVB-лампами);
- Низкая стоимость эксплуатации по сравнению с ксеноновыми лампами;
- Простота и надежность.

Недостатки:

- Спектр не полностью соответствует солнечному (особенно UVB);
- Риск несоответствия механизмов деградации натурным условиям.

3. Специализированные климатические камеры:

- Камеры тепла-холода-влаги – циклически изменяют температуру и влажность без УФ-излучения (например, от -40 °С до +85 °С с влажностью 95 %). Показывают влияние внутренних напряжений, набухания/усушки.
- Солевой туман (ГОСТ 33362-2015 (ISO 4611:2010) Пластмассы. Методы испытаний на стойкость к воздействию влажного тепла, водяной пыли и соляного тумана) – оценивает коррозию и старение полимеров в морской атмосфере.
- Озоновые камеры (ГОСТ ISO 7326-2015. Межгосударственный стандарт. Рукава резиновые и пластиковые. Определение озоностойкости в статических условиях) – эластомеры, особенно ненасыщенные (натуральный каучук, СКД), крайне чувствительны к озону, который вызывает растрескивание под напряжением.

После каждого интервала экспозиции (как в натурных, так и в лабораторных условиях) образцы анализируют.

- Визуальный и макроскопический анализ: выцветание/изменение цвета; появление трещин; меление; измерение глянца; биоповреждения.
- Механические испытания: прочность при растяжении, ударная вязкость, твердость.
- Физико-химические и аналитические методы: ИК-Фурье спектроскопия, оптическая и электронная микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия.

Вышеуказанные методы анализа имеют ряд ограничений:

- Несоответствие спектра – спектр лампы не полностью совпадает с солнечным, что может запускать иные фотохимические реакции;
- Синергетические эффекты – очень сложно в лаборатории точно воспроизвести естественное чередование дождя, росы, солнечного света и темноты.
- Слишком высокая интенсивность УФ-излучения или температура может привести к неестественным механизмам деградации (например, исключительно поверхностному, в то время как в реальности деградация идет в объеме).
- Корреляция с натурными испытаниями: Самая большая проблема. Не существует универсального "коэффициента ускорения". Для каждого материала и каждого свойства (выцветание, растрескивание, потеря прочности) корреляция будет своей. Идеальный подход – валидация лабораторных данных натурными испытаниями в течение 1-2 лет.

Таким образом, исследование климатического старения – это всегда компромисс между скоростью и достоверностью. Стратегия современного исследования выглядит так:

- Скрининг и разработка – быстрое тестирование множества составов в УФ-камерах (UVA-340) для отбора наиболее перспективных кандидатов.

- Длительные испытания отобранных материалов в ксеноновых камерах по стандартизированным циклам, максимально приближенным к реальности.
- Параллельное проведение натурных испытаний в целевых климатических зонах для проверки и корректировки данных, полученных в лаборатории.
- Использование всего арсенала аналитических методов (от визуального осмотра до физико-химических и аналитических методов) для понимания не только как меняются свойства, но и почему это происходит.

Только такой системный подход позволяет с достаточной уверенностью прогнозировать долговечность пластиков и эластомеров в условиях реальной эксплуатации.

4.1.3 Озоновое старение

Озон (O_3) – это аллотропная модификация кислорода, сильный окислитель. Его молекула очень нестабильна и легко вступает в реакции.

Основная мишень для озона – двойные углерод-углеродные связи в основной цепи эластомеров. Озон атакует двойную связь, образуя первичный озонид (1,2,3-триоксолан), который крайне нестабилен. Он быстро распадается на карбонильные соединения (альдегиды, кетоны) и полярные группы (C=O, O-OH). Распад первичного озонида приводит к разрыву полимерной цепи. Молекула полимера разделяется на две части, что снижает механическую прочность.

Озон атакует не равномерно, а избирательно. Молекулы на поверхности растянутого эластомера находятся в состоянии повышенной энергии, их связи легче разрываются. Это приводит к самому характерному проявлению озонового старения – образованию трещин, перпендикулярных направлению растягивающего напряжения.

Рисунок 25 – Озонное старение резины

Основные эластомеры, находящиеся в группе риска:

- Высокий риск – натуральный каучук, бутадиеновый каучук, бутадиен-стирольный каучук, нитрильный каучук.
- Стойкие – эластомеры без двойных связей или с защитными добавками: хлоропреновый каучук, силиконы, фторэластомеры, этилен-пропилен-диеновый каучук, полностью насыщенные эластомеры.

Поскольку концентрация озона в атмосфере невелика, для испытаний используют ускоренные методы в специальных камерах (ГОСТ Р ИСО 1431-1-2019 Резина и термоэластопласты. Озоностойкость. Часть 1. Испытания при статической и динамической деформации растяжения; ASTM D1149-2016 Standard Test Methods for Rubber Deterioration-Cracking in an Ozone Controlled Environment).

1. Камеры озонового старения (озоновые шкафы) – это основной и наиболее стандартизированный метод.

Образцы помещаются в герметичную камеру, где создается и поддерживается заданная концентрация озона в воздушной атмосфере при контролируемой температуре.

Принцип генерации озона:

- Ультрафиолетовые лампы – излучение с длиной волны ~185 нм расщепляет молекулы кислорода (O_2), которые затем образуют озон (O_3). Это наиболее распространенный и простой метод;
- Тихий электрический разряд (коронный разряд) – пропускание воздуха или кислорода через поле высокого напряжения. Этот метод позволяет получать более высокие и стабильные концентрации озона.

Ключевые контролируемые параметры в камере:

- Концентрация озона – измеряется в частях на сотню миллионов (pphm) или частях на миллиард (ppb). 1 pphm = 50 ppb (при нормальных условиях).

Стандартные концентрации для испытаний: 25, 50, 100, 200 pphm (т.е. 1250, 2500, 5000, 10000 ppb). Для сравнения городской воздух имеет ~5-30 ppb, в жаркие дни у поверхности земли может достигать 100-200 ppb. Концентрация постоянно мониторится с помощью озоновых анализаторов (например, на основе УФ-поглощения).

- Температура: стандартные температуры 40°C (чаще всего) или 50°C. Повышенная температура ускоряет химические реакции, но может вызывать испарение защитных восков.
- Относительная влажность обычно устанавливается на уровне 50% или 55%. Влажность влияет на миграцию антиозонантов к поверхности и может ускорять другие процессы окисления.
- Время экспозиции – испытания проводятся циклически или непрерывно. Общая продолжительность может составлять от нескольких часов до нескольких сотен часов. Образцы извлекают через заданные интервалы (например, 24, 48, 72, 96 часов) для оценки.

Критически важный этапом проведения процесса являются подготовка образцов и приложение напряжения, так как озон проявляет себя именно на напряженных участках.

- Постоянное растяжение: образец (стандартная «лопатка» или полоска) растягивается и фиксируется в специальной рамке на определенную степень деформации: 10 %, 20 %, 25 %, 50 % и т.д.
- Метод "зажимных колец": образец в виде кольца растягивается на стержнях до заданного удлинения. Позволяет количественно оценить критическую деформацию, при которой начинается растрескивание.
- Динамическое (циклическое) деформирование: образцы подвергаются повторяющимся циклам растяжения-сжатия или изгиба. Более жесткий тест, так как он не только создает новые поверхности для атаки озона, но и механически разрушает защитный слой антиозонантов и ускоряет рост трещин. Моделирует реальные условия эксплуатации (например, резиновые уплотнители, шины, виброизоляторы).
- Изгиб (петлей, скрепкой): простой метод, при котором образец изгибается и фиксируется в таком состоянии. Создает градиент напряжений от внешнего растянутого волокна к внутреннему сжатому.
- Испытания без напряжения проводятся для оценки общего изменения внешнего вида, липкости, изменения цвета (например, для защитных восков).

После экспозиции образцы извлекают и анализируют:

- Визуальная оценка (основной метод) – это самый прямой и информативный способ.
- Время до появления первых трещин – фиксируется момент, когда на поверхности образца под увеличением (обычно 2х-10х) видны первые микротрещины.
- Плотность трещин – оценивается количество трещин на единицу длины (например, на 1 см).
- Длина и глубина трещин – измеряются с помощью микроскопа или калиброванной шкалы.

- Характер трещин – всегда оценивается, что трещины направлены перпендикулярно вектору приложенного напряжения – это отличительный признак озонового повреждения.

Используются для стандартизации оценки используются стандартные рейтинговый шкалы. Например, оценка от 0 до 5:

0: Отсутствие трещин;

1: Единичные, едва заметные трещины;

2: Несколько хорошо заметных трещин;

3: Многочисленные трещины, некоторые из них глубокие;

4: Бесчисленные трещины, возможное отслоение материала;

5: Полное разрушение образца.

Образцы, прошедшие озоновое старение (в том числе и не напряженные), испытывают на:

- Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве. Разрыв цепи озоном приводит к резкому падению этих показателей.
- Модуль упругости. Может меняться из-за поверхностного сшивания или деструкции.

Образцы, прошедшие озоновое старение, также анализируют физико-химическими методами:

- ИК-Фурье спектроскопия (FTIR) в режиме ATR – позволяет обнаружить образование карбонильных групп (C=O) и гидропероксидов (O-OH) на поверхности образца, которые являются продуктами распада озонидов.
- Сканирующая электронная микроскопия дает детальную картину морфологии трещин, их глубины и характера распространения.
- Измерение степени набухания – появление поверхностного сшитого слоя (образовавшегося в результате вторичных реакций) может снизить способность материала к набуханию в растворителе.

Испытания на озоностойкость часто проводят для оценки эффективности защитных систем:

- Антиозонанты (химическая защита) – это специальные химические вещества (например, N-изопропил-N'-фенил-п-фенилендиамин), которые мигрируют к поверхности и реагируют с озоном быстрее, чем сам полимер.
- Воски (физическая защита) – парафиновые или микрокристаллические воски мигрируют на поверхность и образуют непроницаемую для озона пленку.
- Смешивание со стойкими полимерами.

Таким образом, исследование озонового старения – это четко регламентированный процесс, сфокусированный в первую очередь на ненасыщенных эластомерах.

Стандартный протокол выглядит следующим образом:

- Подготовка образцов;
- Приложение напряжения – растяжение образцов на рамках до заданной деформации (например, 20 %);
- Экспозиция в камере – помещение образцов в озоновую камеру с строго контролируемыми параметрами (концентрация озона 50-100 pphm, температура 40 °C, влажность 50 %);
- Регулярный осмотр образцов под увеличением для фиксации времени появления и развития трещин;
- После окончания испытаний — оценка по стандартной шкале и, при необходимости, проведение механических и физико-химических тестов для понимания глубины деградации.

Эти испытания незаменимы для разработки составов резин для автомобильной промышленности (уплотнители, шланги, ремни), шин, строительных герметиков и любых других изделий, работающих на открытом воздухе под нагрузкой.

4.1.4 Гидролитическое старение

Гидролитическое старение – это химическое разрушение полимерной цепи под действием воды или водяного пара. Реакция гидролиза приводит к разрыву химических связей в основной цепи полимера, что вызывает необратимое снижение молекулярной массы и, как следствие, потерю механических свойств.

Механизм процесса заключается в нуклеофильной атаке молекулы воды на химически чувствительные связи в полимере.

Ключевые «слабые звенья» в полимерах, подверженные гидролизу:

- Сложноэфирная связь (-COO-);
- Амидная связь (-NH-CO-);
- Силоксановая связь (Si-O).

Ускоряют процесс гидролиза следующие факторы:

- Температура;
- pH среды – кислоты и щелочи катализируют гидролиз. Щелочной гидролиз для полиэфиров часто протекает особенно быстро;
- Напряженное состояние цепи облегчает доступ воды и делает связь более уязвимой.

Поскольку гидролиз при комнатной температуре может длиться годы, используют ускоренные испытания в жестких условиях.

1. Погружение в жидкость. Образцы полностью погружаются в жидкость при повышенной температуре.

Вариации среды погружения:

- Дистиллированная вода – базовый вариант, моделирует контакт с чистой водой.
- Водные растворы солей, например, физиологический раствор (0,9% NaCl) для медицинских имплантатов.

- Кислотные и щелочные растворы, например, pH=3 (имитация кислотных дождей, пищевых сред) и pH=10 (имитация моющих средств, цементных растворов). Концентрация и pH тщательно контролируются.

В качестве оборудования используются стандартные лабораторные автоклавы или термостатируемые сосуды. Автоклавы позволяют работать при температурах выше 100 °C (до 121 °C и более), создавая давление пара.

Ключевые параметры процесса:

- Температура – 40 °C, 60 °C, 70 °C, 85 °C, 100 °C, 121 °C. Выбор температуры зависит от стойкости полимера.
- Время – образцы извлекают через заданные интервалы (1 день, 3 дня, 1 неделя, 2 недели, и т.д.).

2. Старение в условиях повышенной влажности (паровое старение) – образцы выдерживаются в атмосфере с относительной влажностью (ОВ) > 95 % при повышенной температуре (ГОСТ 9.507-88 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы герметизирующие. Методы испытания).

В качестве оборудования используются климатические камеры с точным контролем температуры и влажности.

Паровое старение лучше моделирует условия, когда материал не находится в прямом контакте с жидкостью, но подвержен воздействию влажного воздуха (например, электронные компоненты, автомобильные детали).

После каждого интервала старения образцы извлекают, промокают насухо и всесторонне анализируют.

1. Анализ изменения массы и геометрии

- Влагопоглощение – изменение массы образца после погружения в воду.

$$\text{Влагопоглощение (\%)} = [(m_{\text{влажный}} - m_{\text{сухой}}) / m_{\text{сухой}}] \cdot 100\ \% \qquad (34)$$

Пиковое влагопоглощение говорит о гидрофильности материала. Последующее снижение массы после пика означает, что продукты гидролиза

(олигомеры, мономеры) начали вымываться из материала, что свидетельствует о глубокой деградации.

- Изменение геометрии (набухание в воде) – измерение размеров штангенциркулем. Показывает, насколько полимер набухает в воде, что связано с его сродством к воде и сшитостью.

2. Механические испытания. Снижение механических свойств – это прямое следствие разрыва цепей.

- Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве. Гидролиз приводит к падению молекулярной массы, что проявляется в резком снижении как прочности, так и удлинения. Материал из пластичного становится хрупким. Строятся графики сохранения свойств (%) в зависимости от времени старения.

- Ударная вязкость (Изод, Шарпи) – даже незначительное снижение молекулярной массы сильно сказывается на ударной прочности. Материал начинает хрупко разрушаться.

- Твердость – может как снижаться (из-за разрыва цепей и пластификации водой), так и временно повышаться (если вода выступает как пластификатор).

3. Термоаналитические методы испытаний:

- Дифференциальная сканирующая калориметрия – при гидролизе T_c обычно снижается, так как короткие обломки цепей более подвижны. Вода, оставшаяся в материале, также пластифицирует его и снижает T_c.

Следует отметить, что гидролиз часто происходит в аморфных областях. Разрыв цепей в этих областях позволяет кристаллическим участкам реорганизоваться, что может привести к росту степени кристалличности на начальных стадиях, а затем к ее падению.

- Термогравиметрический анализ – показывает изменение температуры начала термического разложения. Состаренный материал часто имеет более низкую термостабильность. Помогает определить содержание влаги в образце после старения.

4. Химический анализ:

- ИК-Фурье спектроскопия в режиме ATR;
- Гель-проникающая хроматография – показывает молекулярно-массовое распределение (среднечисловую M_n и среднемассовую M_v молекулярные массы). Разрыв цепей приводит к систематическому снижению средней молекулярной массы и сужению молекулярно-массового распределения.
- Измерение кислотного числа – для полиэфиров и полиуретанов гидролиз приводит к образованию карбоксильных концевых групп (-COOH). Их концентрацию можно определить титрованием. Рост кислотного числа – прямое свидетельство протекания гидролиза.

Для прогнозирования процесса гидролиза, который является чисто химической реакцией, отлично подходит модель Аррениуса.

- Проводят испытания при 3-4 повышенных температурах (например, 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C).
- В качестве критерия «отказа» выбирают, например, падение прочности на 50 % или падение молекулярной массы M_n до критического уровня (например, 20 000 г/моль).
- Для гидролиза, который часто является реакцией первого порядка, константу скорости можно рассчитать из уравнения:

$$\ln(M_{nt}) = \ln(M_{n0}) - kt, \quad (35)$$

где M_{nt} – молекулярная масса в момент времени t,

M_{n0} – начальная молекулярная масса.

- Строят график ln(k) от 1/T. Полученную прямую экстраполируют на область реальных рабочих температур (например, 23 °C или 40 °C) и рассчитывают константу скорости k для этих условий. Затем по уравнению вычисляют время, за которое M_n достигнет критического значения.

Этот метод хорошо работает, если механизм гидролиза не меняется с температурой. Однако при очень высоких температурах (>100 °C) могут активироваться иные процессы, что приведет к ошибке прогноза.

Таким образом, исследование гидролитического старения критически важно для применения пластиков и эластомеров в изделиях, где контакт с влагой или паром неизбежен.

4.1.5 Старение в жидкостях

Старение в жидкостях – это комплексный процесс изменения свойств полимерного материала в результате его физического и/или химического взаимодействия с жидкой средой.

Процессы, происходящие с полимером при контакте с жидкостью, можно разделить на две основные группы:

1. Физические процессы (обратимые / частично обратимые):

- Набухание – проникновение молекул жидкости в свободный объем между макромолекулами полимера, приводящий к увеличению объема и массы. Это наиболее распространенный эффект.
- Экстракция (вымывание) – растворение и удаление из материала низкомолекулярных компонентов: пластификаторов, стабилизаторов, антипиренов, непрореагировавших мономеров.
- Пластификация – жидкость, проникшая в полимер, действует как внутренний пластификатор, снижая температуру стеклования и делая материал более мягким и гибким.

2. Химические процессы (необратимые):

- Гидролиз – разрыв химических связей в основной цепи под действием воды, катализируемый кислотой или щелочью (подробно рассмотрен в п. 4.2.4).
- Окисление – жидкость может выступать переносчиком кислорода или сама быть окислителем, запуская цепные реакции окисления, особенно при повышенных температурах.
- Деструкция под напряжением – совместное действие жидкости и механического напряжения приводит к образованию микротрещин и

хрупкому разрушению при нагрузках, значительно ниже предела прочности материала.

Рисунок 26 – Процесс старения полимерного материала в жидкости

Методы испытаний можно разделить по цели и условиям проведения.

1. Стандартные испытания на стойкость – эти тесты регламентированы и позволяют сравнивать разные материалы между собой.

- Испытание на стойкость к жидким средам (ГОСТ ISO 1817-2016 Резина и термоэластопласты. Определение стойкости к воздействию жидкостей).
- ASTM D471-16a (2021) Standard Test Method for Rubber Property-Effect of Liquids.
- ГОСТ 12020-2018 (ISO 175:2010) Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред.
- ASTM D543-21 Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents).

Образцы стандартного размера полностью погружаются в тестовую жидкость на определенное время при заданной температуре. Испытательные

жидкости выбираются в зависимости от применения (топлива и масла – эталонное топливо (изооктан), толуол, моторное масло, трансмиссионная жидкость, дизельное топливо; рабочие жидкости – тормозная жидкость (DOT3, DOT4), антифриз, гидравлические жидкости; водные растворы кислот и щелочей; спирты).

Температура процесса 23 °C, 70 °C, 100 °C, 125 °C, 150 °C. Температура ускоряет как диффузию жидкости, так и химические реакции.

Время процесса 24 ч, 70 ч, 168 ч, 1000 ч. Образцы извлекают через заданные интервалы для анализа.

- Испытание на стойкость к растрескиванию под напряжением (ИСО 22088-1:2006 Пластмассы. Определение сопротивления растрескиванию под воздействием окружающей среды (ESC). Часть 1. Общее руководство).

Образцу придается определенная деформация (напряжение), и он помещается в контакт с агрессивной средой. Фиксируется время до появления трещин и/или количество разрушенных образцов из статистической выборки после определенного времени.

После каждого интервала старения образцы извлекают и всесторонне анализируют.

2. Анализ изменения массы и объема.

- Изменение массы (Δm) измеряют на аналитических весах до и после старения:

$$\Delta m\ (\%) = [(m_{после} - m_{до}) / m_{до}] \cdot 100\% \qquad (36)$$

$\Delta m > 0$ – набухание. Поглощение жидкости преобладает над экстракцией;

$\Delta m < 0$ – экстракция. Вымывание добавок и продуктов деградации преобладает над поглощением;

$\Delta m \sim 0$ – может идти одновременное набухание и экстракция.

- Изменение объема (ΔV) измеряют по объему вытесненной жидкости (например, с помощью пикнометра) или по изменению геометрических размеров. Прямо указывает на степень набухания.

3. Измерение изменения механических свойств – образцы испытывают сразу после извлечения и просушки (для оценки обратимых эффектов) и после полного высушивания (для оценки необратимых повреждений).

- Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве – набухание часто увеличивает удлинение, но снижает прочность. Химическая деградация резко снижает оба показателя;
- Твердость, как правило, резко снижается из-за пластифицирующего эффекта жидкости;
- Модуль упругости снижается при набухании/пластификации.

4. Анализ изменения внешнего вида и структуры:

- Визуальный осмотр – оценка изменения цвета, блеска, прозрачности, появления липкости, пузырей, трещин или полного разрушения;
- Тактильная оценка – оценка липкости, жесткости;
- Измерение геометрических размеров штангенциркулем для количественной оценки набухания/усадки.

5 Физико-химические методы анализа:

- ИК-Фурье спектроскопия (FTIR) в режиме ATR;
- Гель-проникающая хроматография;
- Дифференциальная сканирующая калориметрия;
- Термогравиметрический анализ;
- Анализ экстрактов – испытательную жидкость после старения можно проанализировать методами хроматографии (ВЭЖХ, ГХ) или спектроскопии, чтобы определить, что именно вымылось из полимера.

Таким образом, исследование старения в жидкостях – это комплексный процесс, направленный на моделирование реальных условий эксплуатации.

Эти испытания незаменимы для подбора материалов для автомобильной промышленности (уплотнители, шланги, баки), химической аппаратуры, медицинских изделий, упаковки и бытовой техники, где контакт с агрессивными жидкостями неизбежен.

4.1.6 Биологическое старение

Биологическое старение (или биоповреждение) – это процесс изменения свойств полимерного материала в результате жизнедеятельности живых организмов.

К основным биодеструкторам относятся:

1. Микроорганизмы:

- Грибы (плесень, дрожжи) – наиболее распространенные и визуально заметные вредители. Вызывают окрашивание, появление слизи, пятен и глубокую деградацию.
- Бактерии – менее заметны визуально, но могут вызывать глубокое разрушение, особенно в анаэробных условиях.

2. Насекомые (тараканы, термиты, личинки жуков).

3. Грызуны.

4. Водоросли и лишайники.

Механизмы биоповреждений можно выделить в 2 группы:

- Прямая деградация (биодеструкция) – микроорганизмы используют полимер или его компоненты в качестве источника углерода и энергии. Они выделяют внеклеточные ферменты (например, липазы, протеазы, целлюлазы, эстеразы), которые расщепляют макромолекулы на мелкие фрагменты, способные усваиваться клеткой.
- Непрямая деградация (биоповреждение) – микроорганизмы потребляют не сам полимер, а низкомолекулярные добавки (пластификаторы, стабилизаторы, смазки). Их вымывание приводит к резкому ухудшению свойств материала (например, потеря эластичности из-за поедания пластификатора). Продукты метаболизма микроорганизмов (кислоты, щелочи, красители) вызывают химическую коррозию, окрашивание и растрескивание.

Рисунок 27 – Процесс биологической деструкции в почве бутылки из полилактида (PLA)

Высокий риск к биоповреждениям у натуральных полимеров (целлюлоза, крахмал, каучук), полиэфиров (ПЛА, ПБАТ, ПЭТ), полиуретанов, поливинилацетата (ПВА), поликапролактона (PCL). А также любые материалы с различными добавками (например, ПВХ с эфирами фталевой кислоты в качестве пластификатора).

Низкий риск биоповреждений у большинства синтетических полиолефинов (ПЭ, ПП), полистирола, фторполимеров, силикона. Они служат лишь субстратом для поверхностного роста, но не пищей.

Методы исследований биоповреждений делятся на полевые (натурные) и лабораторные (ускоренные).

Полевые (натурные) испытания

Это наиболее достоверные методы, так как материал подвергается воздействию естественного сообщества микроорганизмов в реальных условиях.

1. Почвенное захоронение (ГОСТ 9.060-75 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Ткани. Метод лабораторных испытаний на устойчивость к микробиологическому разрушению; ASTM G160-12(2019) Standard Practice for Evaluating Microbial Susceptibility of Nonmetallic Materials By Laboratory Soil Burial; ISO 846-1997 Plastics - Evaluation of the Action of Microorganisms. Пластмассы. Оценка воздействия микроорганизмов).

Образцы закапываются в активную почву (например, с сельскохозяйственных полей, компоста, лесопарковых зон) на определенную глубину (обычно 10-30 см), где поддерживается высокая микробиологическая активность, влажность и доступ кислорода.

Ключевые параметры процесса:

- Тип почвы, состав, pH, микробная численность;
- Глубина захоронения;
- Температура и влажность почвы (контролируются, но не регулируются).
- Время экспозиции от 1 месяца до нескольких лет.

Через заданные интервалы образцы откапывают, очищают от почвы и анализируют.

Преимуществами метода являются высокая достоверность и воздействие широкого спектра микроорганизмов в реальных условиях.

Недостатками процесса являются очень длительные сроки, невозможность контроля условий (температура, влажность, состав микрофлоры), низкая воспроизводимость.

2. Экспозиция в водоемах – образцы погружаются в природные водоемы (реки, озера, моря) с высокой биологической активностью.

Оценивается образование биообрастания (бактериальные пленки, водоросли, моллюски), которое может приводить к механическим повреждениям и создавать локальные очаги биокоррозии.

Лабораторные (ускоренные) испытания

Эти методы позволяют получить результаты за недели или месяцы в контролируемых условиях.

1. Испытания с использованием чистых культур микроорганизмов – это самые точные и воспроизводимые лабораторные методы (ГОСТ Р 57859-2017 Композиты полимерные. Методы испытаний на воздействие плесневых грибов; ISO 846-1997 Plastics - Evaluation of the Action of Microorganisms. Пластмассы. Оценка воздействия микроорганизмов; ASTM G21-15(2021) e1 Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi; ASTM G22-76(1996) Standard Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria).

- Испытание на устойчивость к грибам – образцы заражают суспензией спор грибов и выдерживают в оптимальных для их роста условиях. Используют стандартный набор из ~10 штаммов грибов, которые обладают высокой целлюлолитической и протеолитической активностью и не являются токсичными для человека.

Питательной средой выступает минеральная среда, которая содержит все необходимые для роста микроэлементы (азот, фосфор, калий), но не содержит углерода. Таким образом, грибы могут расти только за счет углерода, полученного из материала образца.

- Испытание на устойчивость к бактериям – аналогично испытанию с грибами, но с использованием бактериальных культур.

Визуальная оценка результатов испытаний с чистыми культурами:

0 баллов: рост микроорганизмов отсутствует;

1 балл: рост до 10% поверхности образца;

2 балла: рост от 10% до 30%;

3 балла: рост от 30% до 60%;

4 балла: рост более 60% поверхности.

Также происходит измерение изменения свойств:

- Механические свойства – прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, ударная вязкость. Сравнивают инфицированные и стерильные (контрольные) образцы.
- Измеряют потерю массы после аккуратного удаления биопленки.
- Для электроизоляционных материалов измеряют сопротивление.

2. Специализированные виды испытаний:

- Испытания на биоразлагаемость – проводятся для материалов, которые должны разрушаться в окружающей среде (ГОСТ Р ИСО 14855-2-2024 Пластмассы. Определение способности к полному аэробному биологическому разложению и распаду в контролируемых условиях компостирования; ГОСТ Р 57224—2016. (ИСО 14855-1.2012). MOD. ISO 14855-1—2012 Определение способности к полному аэробному биологическому разложению и распаду в контролируемых условиях компостирования).

Измеряют количество выделившегося CO_2 в результате микробного дыхания. Высокий выход CO_2 свидетельствует о том, что микроорганизмы активно потребляют материал.

Материал считается компостируемым, если за 180 дней не менее 90% его массы превратилось в CO_2.

- Испытания на устойчивость к грызунам и насекомым.

Таким образом, исследование биологического старения полимеров – это междисциплинарная область на стыке науки о полимерах и микробиологии.

Понимание биологической стойкости критически важно для применения материалов в строительстве (например, кровельные мембраны, герметики), автомобилестроении (салонные материалы), медицине, упаковке, сельском хозяйстве и при создании электроизоляции.

4.1.7 Радиационное старение

Радиационное старение – это процесс необратимого изменения химической структуры и, как следствие, физико-механических свойств полимерных материалов под воздействием ионизирующих излучений.

Основные виды ионизирующих излучений, используемых в испытаниях:

- Гамма-излучение (γ-излучение) – высокоэнергетическое электромагнитное излучение. Обладает высокой проникающей способностью. Источники: Кобальт-60 (^{160}Co), Цезий-137 (^{137}Cs).
- Электронное излучение (поток бета-частиц) – поток ускоренных электронов. Меньшая проникающая способность по сравнению с γ-излучением.
- Рентгеновское излучение – похоже на гамма-излучение, но с меньшей энергией.
- Протонное и нейтронное излучение – наиболее актуально для космических применений и ядерных реакторов. Нейтроны вызывают особенно серьезные повреждения.

Ключевые механизмы радиационного старения:

- Сшивание – образование поперечных химических связей между соседними полимерными цепями. Делает материал более жестким, хрупким, повышает его температуру стеклования и снижает растворимость.
- Деструкция – разрыв основных цепей макромолекул. Приводит к снижению молекулярной массы, прочности, появлению липкости и, в конечном итоге, к разложению.
- Образование ненасыщенных связей и газовыделение (водород, метан и др.).
- В присутствии кислорода радиация инициирует цепные реакции окисления, аналогичные термоокислению, но гораздо более интенсивные.

Какой процесс будет преобладать, зависит от:

- Структуры полимера – полимеры с четвертичными атомами углерода в цепи (полиизобутилен, полиметилметакрилат) склонны к деструкции. Полиолефины (ПЭ, ПП), полистирол, эластомеры склонны к сшиванию.
- Наличия кислорода – на воздухе преобладает окислительная деструкция. В инертной атмосфере или вакууме – сшивание.

Для проведения испытаний необходимо строго контролировать несколько параметров.

1. Поглощенная доза – это количество энергии ионизирующего излучения, поглощенное единицей массы вещества. Единицы измерения Грей (Gy): 1 Грей = 1 Джоуль / 1 кг.

2. Мощность дозы – поглощенная доза в единицу времени. Единицы измерения Грей в секунду (Gy/s), кГрей в час (kGy/h).

Высокая мощность дозы (как в ускорителях электронов) может привести к разогреву образца и «эффекту запекания» радикалов, что меняет кинетику процесса. Низкая мощность дозы (как у источников γ-излучения) позволяет кислороду диффундировать в материал, усиливая окисление.

3. Атмосфера во время облучения. На воздухе протекает интенсивное окисление, ведущее к деструкции. В инертном газе подавляется окисление, протекают «чистые» процессы сшивания или деструкции. В вакууме исключается окисление, что позволяет изучать газовыделение.

После проведения испытаний образцы выдерживают для завершения послерадиационных процессов (распада неустойчивых радикалов) и проводят всесторонний анализ.

1. Анализ механических свойств:

- Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве – для эластомеров и пластиков доминирование сшивания приводит к резкому падению удлинения и повышению модуля упругости. Деструкция приводит к падению и прочности, и удлинения.

- Твердость, как правило, увеличивается из-за сшивания.
- Ударная вязкость сильно снижается из-за роста хрупкости.

2. Физико-химические методы анализа:

- Гель-проникающая хроматография позволяет количественно оценить долю сшивок или разрывов на единицу дозы.
- Измерение степени набухания – чем выше плотность сшивки, тем меньше равновесная степень набухания в растворителе.
- ИК-Фурье спектроскопия – позволяет обнаружить образование новых химических групп.
- Электронный парамагнитный резонанс – прямой метод детекции свободных радикалов, образующихся при облучении. Позволяет изучать их природу, концентрацию и кинетику распада.
- Дифференциальная сканирующая калориметрия – при сшивании T_c повышается из-за ограничения подвижности цепей. Радиация также может вызывать деструкцию в аморфных областях, приводя к перекристаллизации и росту степени кристалличности на начальных стадиях.
- Термогравиметрический анализ – облученные образцы часто имеют более низкую температуру начала разложения.
- Анализ газовыделения – с помощью масс-спектрометрии определяют, какие газы (H_2, CH_4, CO, CO_2) выделяются при облучении, что помогает понять механизм радиолиза.

Таким образом, исследование радиационного старения – это комплексный процесс, требующий специального дорогостоящего оборудования и строгих мер безопасности. Эти исследования незаменимы для обеспечения безопасности и надежности работы атомных электростанций, космических аппаратов, медицинского оборудования и любой другой техники, работающей в условиях ионизирующего излучения.

4.2 Износостойкость

Износ – это процесс постепенного разрушения и отделения материала с поверхности твёрдого тела под действием внешних сил, проявляющийся в прогрессирующем изменении массы и геометрии тела.

При изучении износа полимеров и эластомеров следует учитывать ряд их особенностей:

- Вязкоупругость – их механические свойства зависят от времени, температуры и скорости нагружения. Они не чисто упруги, как металлы.
- Низкая теплопроводность – тепло, выделяющееся при трении, не отводится быстро, что приводит к локальному разогреву и изменению свойств материала (размягчение, плавление).
- Сложные механизмы износа – помимо абразивного, для них характерны адгезионный износ, усталостный износ и износ, вызванный термическим и окислительным разрушением.

Методы исследования износостойкости можно разделить на несколько категорий: стандартизированные лабораторные испытания, моделирующие стенды, инструментальные методы анализа и трибологические модели.

1. Стандартизированные лабораторные испытания – эти методы предназначены для сравнительной оценки материалов в воспроизводимых условиях. Они не всегда точно предсказывают поведение в реальном узле, но идеальны для скрининга и контроля качества.

1.1 Методы для пластиков (и некоторых эластомеров):

- Абразивный износ по Таберу (ГОСТ 11012-2017 Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ; DIN ISO 9352-2018 Plastics - Determination of resistance to wear by abrasive wheels (ISO 9352:2012). Пластмассы. Определение износостойкости с помощью абразивного шлифовального круга; ASTM D4060-2019 Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser. Стандартный метод испытания

стойкости органических покрытий к истиранию абразивным устройством Табера).

Образец в виде диска вращается под двумя абразивными кругами с определенной нагрузкой. Круги вращаются в направлении, противоположном вращению образца, создавая истирающее движение по кольцевой траектории. Используются разные типы абразивных кругов.

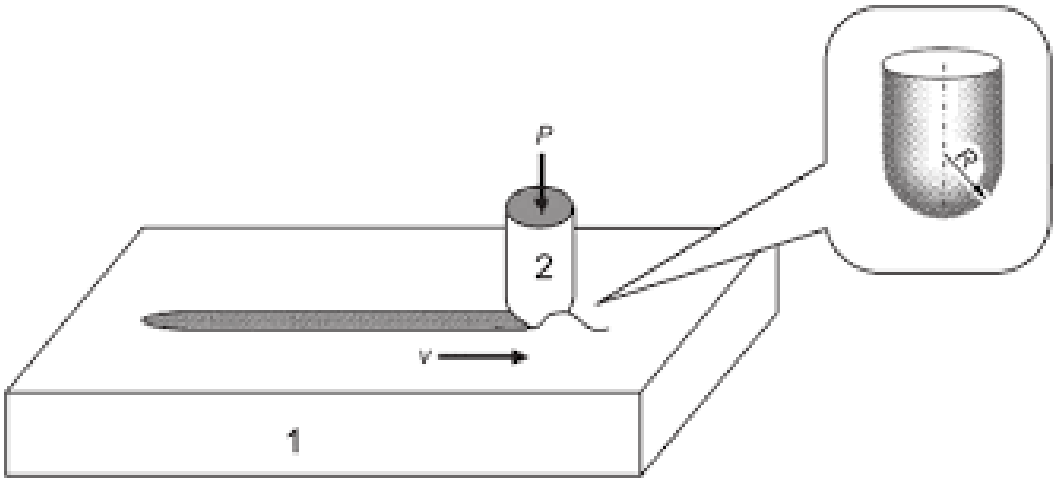
Рисунок 28 – Внешний вид устройства Табера

Измеряется потеря массы (в мг) или объема (в мм³) после определенного количества циклов (обычно 1000). Результат часто выражают как индекс износостойкости или удельный износ.

Метод хорошо подходит для жестких пластиков (нейлон, поликарбонат, полипропилен) и покрытий.

- Испытание на устойчивость к царапинам (ISO 19252:2008 - Determination of scratch properties; ASTM D7027-2013 Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine).

Индентор (обычно алмазный конус с закругленным наконечником) с постоянной или прогрессирующей нагрузкой протягивается по поверхности образца с заданной скоростью.



1 – испытываемая поверхность; 2 – конус индентора;

P – приложенное давление; v – скорость сдвига

Рисунок 29 – Схема проведения испытания на устойчивость к царапинам

Измеряется сила трения, глубина проникновения, ширина царапины. Визуально оценивают тип повреждения: упругое восстановление, пластическая деформация, образование трещин, отслаивание.

Метод критически важен для оценки устойчивости к микроповреждениям, например, для деталей интерьера автомобиля или корпусов электроники.

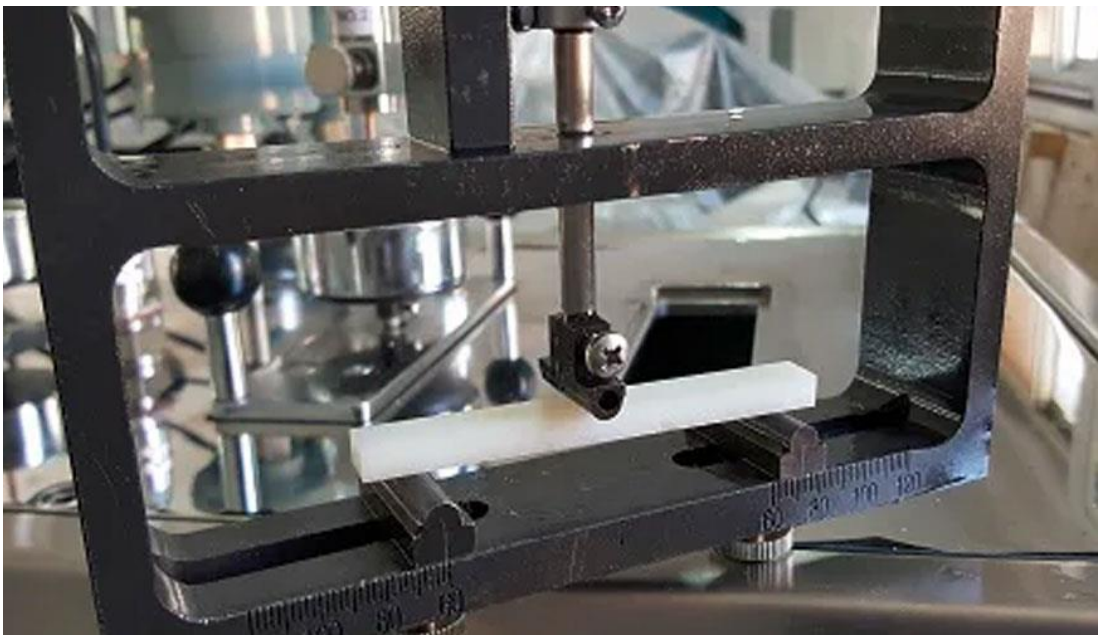


Рисунок 30 – Проведение испытания на устойчивость к царапинам

- Тест на трение качения – образец прижимается к вращающемуся абразивному барабану (например, покрытому наждачной бумагой) и перемещается вдоль него, обеспечивая равномерный износ по всей поверхности.

Измеряется потеря объема после определенного пути трения.

1.2 Методы для эластомеров:

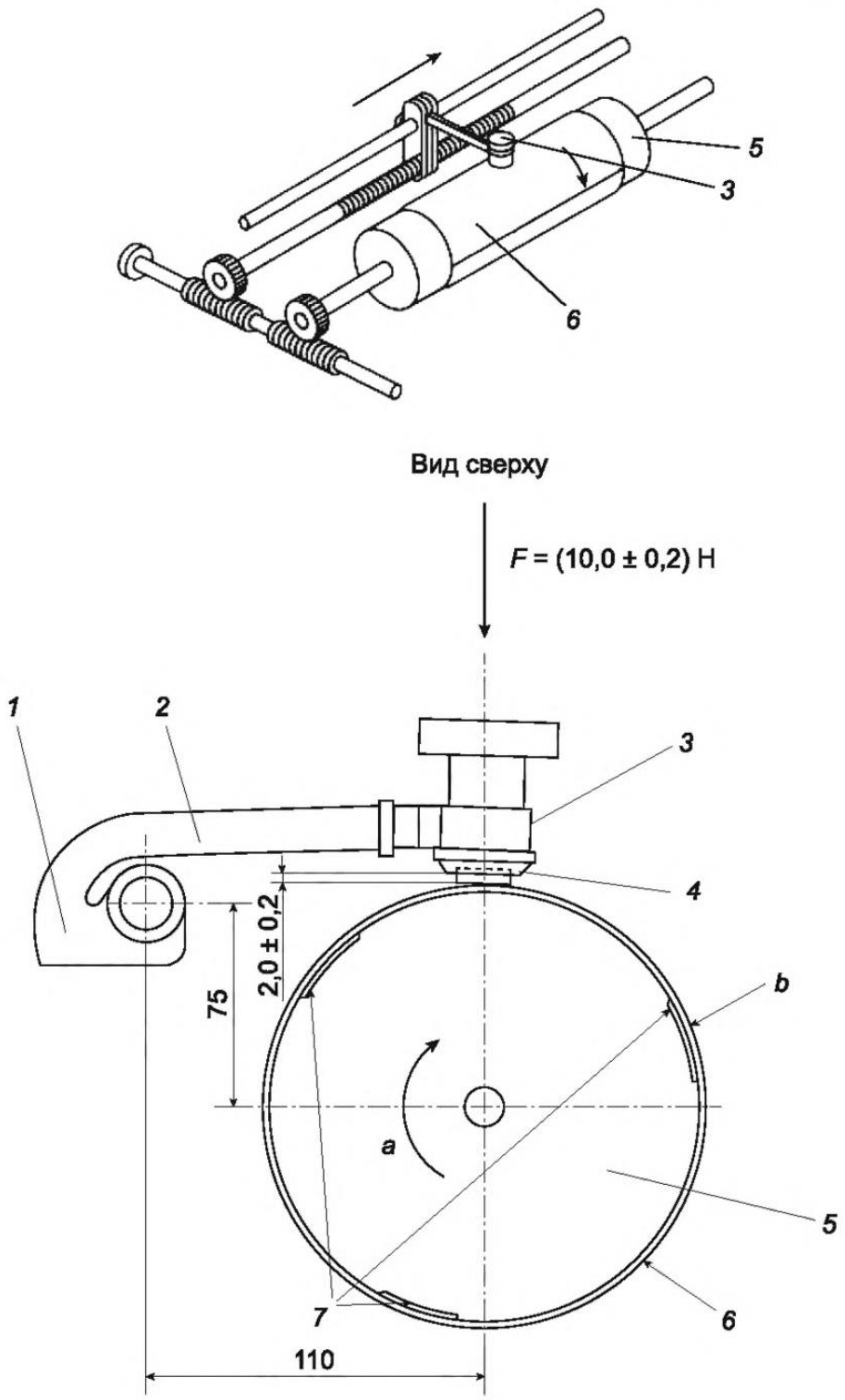
- Тест на абразивный износ на цилиндрическом барабане (ГОСТ ISO 4649-2024 Резина и термоэластопласты. Определение сопротивления истиранию с использованием вращающегося цилиндрического барабанного устройства; DIN ISO 4649-2014. Каучук вулканизированный и термопластичный. Определение сопротивления истиранию с применением вращающегося цилиндрического барабана).

Рисунок 31 – Внешний вид испытательного устройства с цилиндрическим барабаном

Кольцевой образец резины надевается на цилиндр (барабан) и прижимается под углом к вращающемуся абразивному диску. Образец вращается и скользит по диску.

Измеряется потеря объема (в мм³). Результаты часто выражают как относительный износ по сравнению со стандартным образцом.

Метод является классическим для оценки износостойкости автомобильных шин и других резинотехнических изделий.



1 – направляющие; 2 – поворотный рычаг; 3 – держатель образца;
4 – образец; 5 – цилиндр диаметром (150,0 ± 0,2) мм,
длиной 500 мм; 6 – абразивный лист; 7 – двусторонняя клейкая лента;
F – вертикальное усилие; a – частота вращения
(40 ± 1) об/мин; b – ширина зазора размером < 2 мм

Рисунок 32 – Схема устройства с цилиндрическим барабаном

- Тест на абразивный износ по методу Мартиндейла (ГОСТ ISO 12947-2-2021 Материалы текстильные. Определение стойкости текстильных материалов к истиранию по методу Мартиндейла. Часть 2; ASTM D4966-22 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Textile Fabrics (Martindale Abrasion Tester Method).

Образец ткани или мягкого материала (например, искусственной кожи) трется об абразивную поверхность по сложной траектории под заданной нагрузкой.

Рисунок 33 – Прибор для испытания на абразивный износ по методу Мартиндейла

Измеряется количество циклов до появления отверстий или потерю массы.

Метод широко используется для текстиля, ковровых покрытий и мягких полиуретанов.

- Тест на износ при скольжении (ASTM D2228-04(2019) Standard Test Method for Rubber Property-Relative Abrasion Resistance by Pico Abrader Method).

Образец эластомера прижимается к движущейся абразивной ленте (наждачной бумаге) с постоянной нагрузкой и скоростью.

Измеряется потеря толщины или массы за определенный путь скольжения.

2. Моделирующие испытательные стенды – эти установки позволяют воспроизводить сложные условия, близкие к реальным: различные виды движения, нагрузки, скорости, температуры и среды.

- Установка «Штифт на Диске» (Pin-on-Disk) (ASTM G99-2017 Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus).

Неподвижный «штифт» (из исследуемого материала или контртела) с определенной нагрузкой прижимается к вращающемуся диску.

Рисунок 34 – Pin-on-disk трибометр TRB³

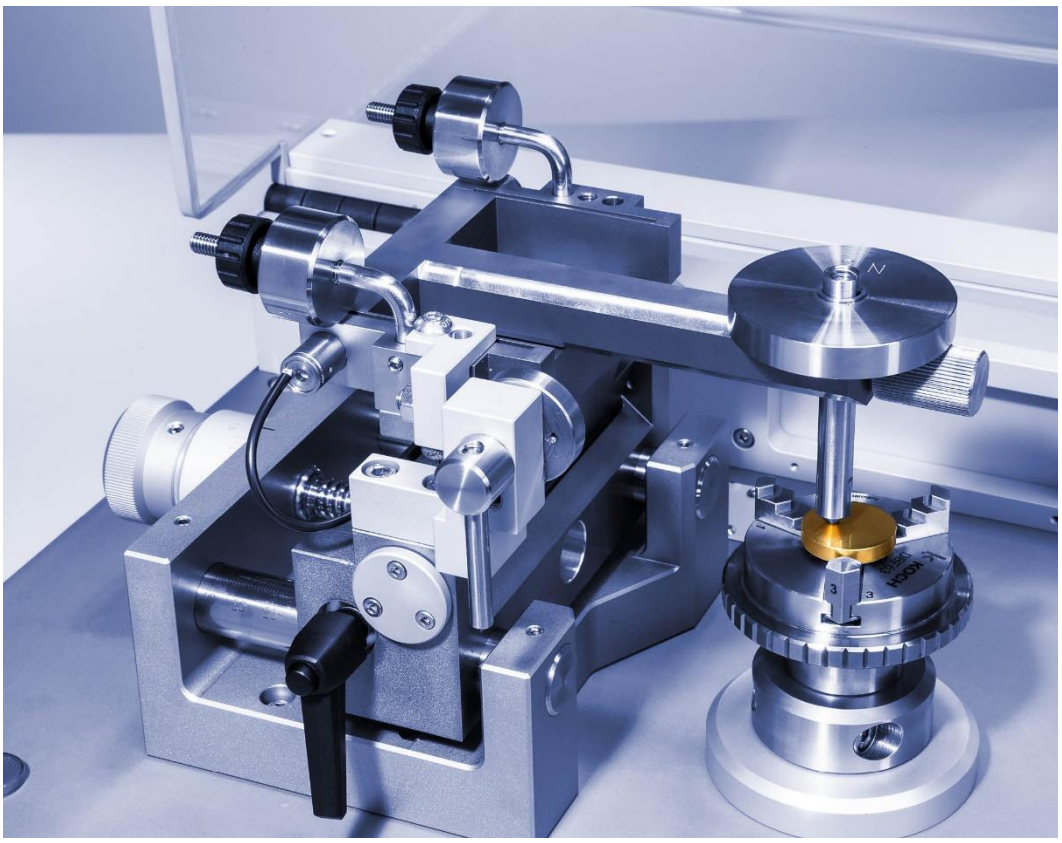


Рисунок 35 – Рабочие органы трибометра TRB³

Измеряется коэффициент трения в реальном времени, износ (по потере объема штифта и/или по профилю на диске).

Очень гибкий метод. Можно тестировать пары «пластик-металл», «пластик-пластик», «эластомер-металл». Позволяет изучать влияние скорости, нагрузки, температуры.

- Установка «блок на кольце» (Block-on-Ring) (ASTM G77-17 Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test).

Прямоугольный образец (блок) прижимается к вращающемуся кольцу.

Измеряется коэффициент трения, износ блока и кольца. Метод хорошо моделирует условия подшипников скольжения.

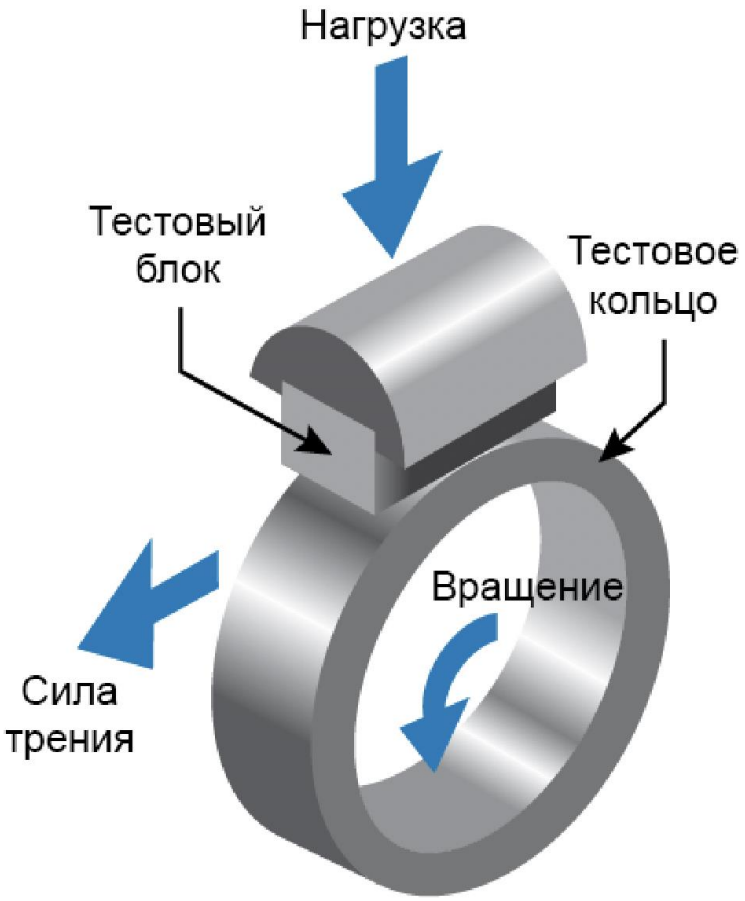


Рисунок 36 – Схема проведения процесса с помощью установки «Блок на Кольце» (Block-on-Ring)

- Установка «Два Диска» (Two-Disk / Roller-on-Roller).

Два диска (ролика) вращаются, создавая комбинацию качения и скольжения.

Измеряется износ и трение в условиях, близких к зубчатым передачам или колесам.

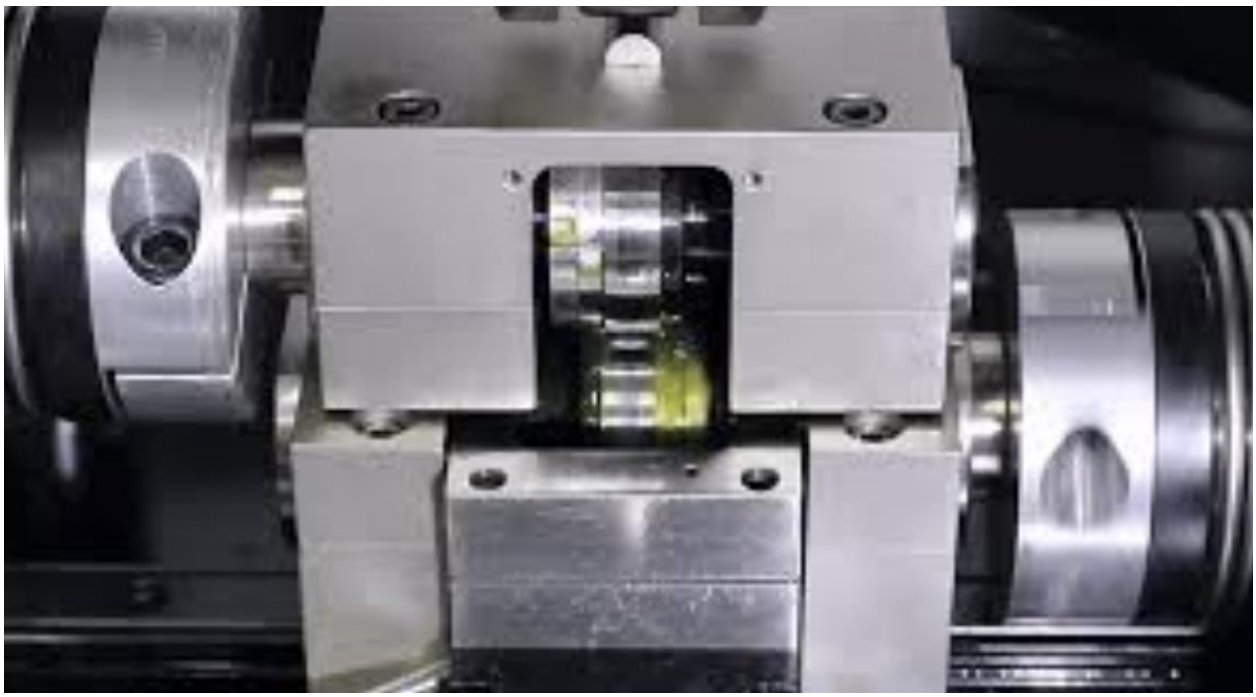


Рисунок 37 – Рабочие органы прибора Twin Disk - Roller on Roller Tribometer

3. Инструментальные методы анализа поверхностей и механизмов износа. Само по себе измерение потери массы недостаточно. Чтобы понять почему материал изнашивается, используют сложные аналитические методы.

- Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) – изучение морфологии изношенной поверхности с высоким разрешением.

Можно изучить микротрещины, признаки усталости, вырывание частиц, плавление, образование абразивных борозд. Позволяет визуально идентифицировать механизм износа;

- Атомно-силовая микроскопия (АСМ) – трехмерное картирование поверхности с нанометровым разрешением.

Можно провести измерение глубины и формы царапин, оценку шероховатости, изучить локальные механические свойства.

- Инфракрасная спектроскопия с Фурье-преобразованием (FTIR), в частности, ATR-FTIR – анализ химического состава на поверхности износа.

Изучается окисление материала, термическая деградация, миграция добавок (например, смазок) на поверхность, наличие перенесенного материала с контртела.

- Термогравиметрический анализ (ТГА) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) – изучение термической стабильности и температур фазовых переходов.

Помогают понять, не происходит ли размягчение или разложение материала в зоне трения из-за локального перегрева.

- Профилометрия (механическая и оптическая) – точное измерение геометрии следа износа.

Можно исследовать глубину, ширину, объем удаленного материала. Позволяет рассчитать объемный износ с высокой точностью.

4. Комплексный подход, подразумевающий совместное использование вышеуказанных методик.

Таким образом, исследование износостойкости пластиков и эластомеров – это междисциплинарная область, требующая:

- Правильного выбора стандартного или моделирующего метода.
- Точного контроля всех параметров испытания (нагрузка, скорость, температура, влажность).
- Комплексного анализа последствий износа с помощью современных инструментальных методов.
- Понимания химии и физики материала для интерпретации результатов и разработки более износостойких композиций.

Только такой всесторонний подход позволяет не просто ранжировать материалы, а понять механизмы их разрушения и спрогнозировать поведение в реальных условиях эксплуатации.

4.3 Горючесть

Методы исследования горючести пластиков и эластомеров делятся на небольшие лабораторные (для сравнительного анализа и контроля качества) и крупномасштабные (имитирующие реальные условия).

Группа 1: Испытания на воспламеняемость и распространение пламени

1 Испытание на горючесть по UL 94 – это, пожалуй, самый распространенный и важный метод для классификации пластиков.

Рисунок 38 – Прибор для испытания на воспламеняемость пластмасс для деталей приборов и устройств UL 94

Образец материала определенного размера фиксируется вертикально, горизонтально или под углом, и на него воздействуют стандартным пламенем газовой горелки в течение двух кратковременных импульсов (обычно 10 секунд каждый).

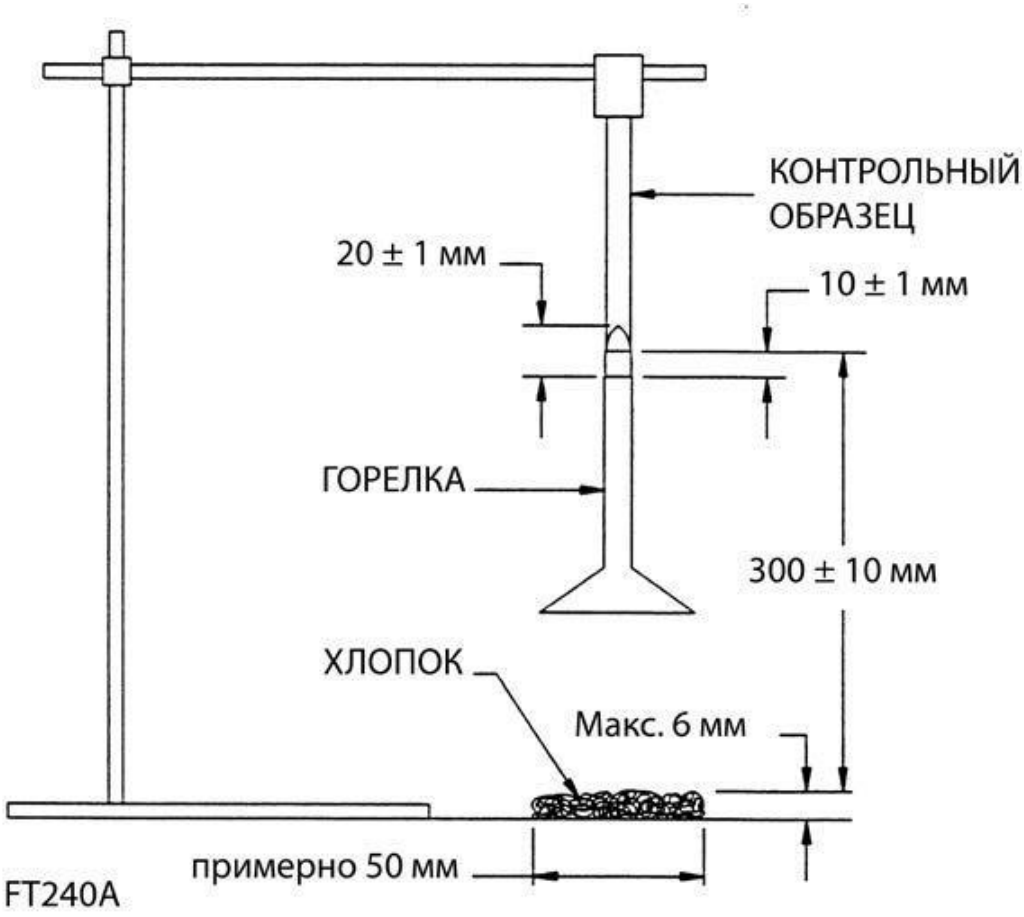


Рисунок 39 – Испытания на воспламеняемость материалов для классификации по классам V-0, V-1, V-2, которые проводятся компанией UL

Оцениваются следующие параметры:

- Время самостоятельного горения после удаления пламени;
- Время тления;
- Доходит ли пламя до зажима, удерживающего образец;
- Отпадают ли горящие капли, способные поджечь расположенную ниже вату.

Ключевые классификации:

- HB (Horizontal Burning) – материал горит медленно в горизонтальном положении;
- V-0, V-1, V-2 (Vertical Burning) – разные степени стойкости при вертикальном испытании. V-0 — наилучший результат (горение прекращается в течение 10 секунд после второго воздействия пламени, без горящих капель);

- 5VA, 5VB – более строгий тест, где образец подвергается воздействию пламени 5 раз по 5 секунд. 5VA означает, что образец не прогорает насквозь.

2 Предел кислородного индекса (LOI - Limiting Oxygen Index) – образец помещается в вертикальную колонну, через которую снизу вверх проходит смесь кислорода и азота. Определяется минимальная концентрация кислорода в этой смеси, при которой материал самостоятельно горит не менее 3 минут или на длине 5 см.

Рисунок 40 – Тестер предельного кислородного индекса

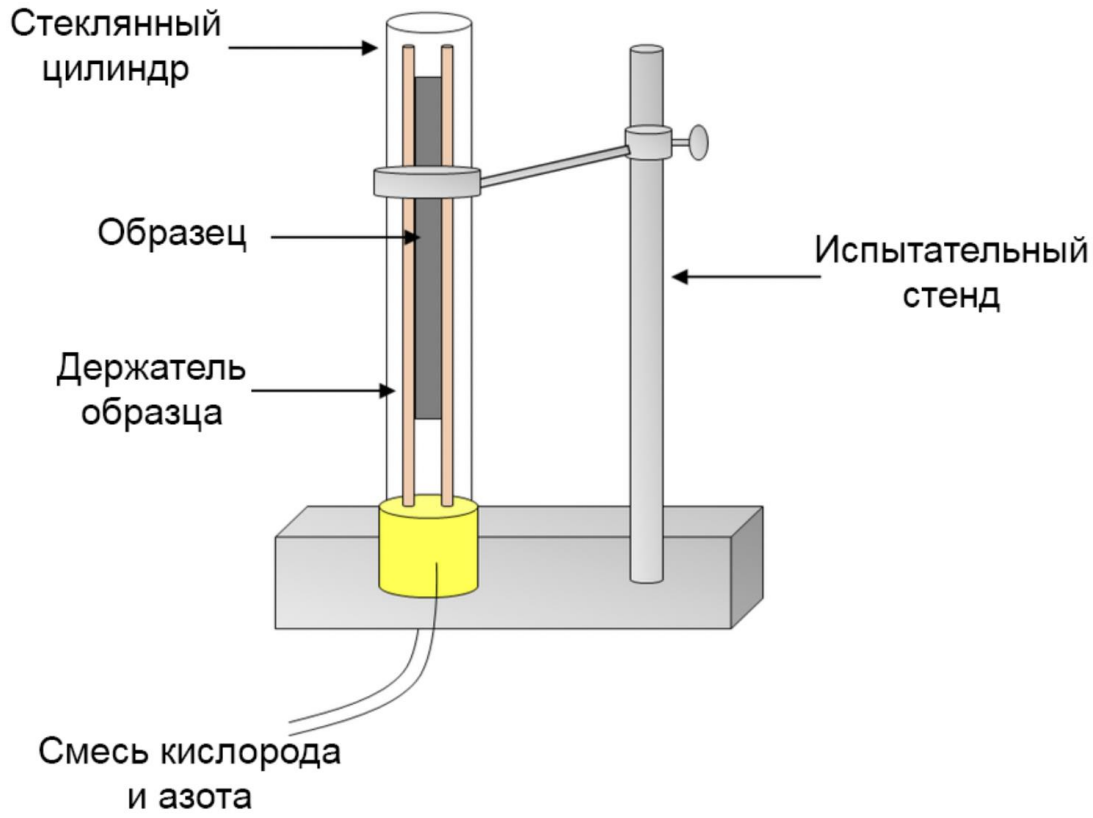


Рисунок 41 – Принципиальная схема оборудования для измерения предельного кислородного индекса LOI

Интерпретация результатов исследования:

- LOI < 21 % – материал легко горит на воздухе (кислорода в воздухе ~21 %);
- LOI > 21 % – материал трудногорючий, для его горения нужна обогащенная кислородом атмосфера;
- LOI > 27-28 % – материал классифицируется как самозатухающий.

Метод очень точен и воспроизводим, идеален для сравнения материалов и оценки эффективности антипиренов.

3 Испытание на распространение пламени (например, ASTM E84 / UL 723 «Туннельный тест»).

Образец материала длиной около 7,5 м устанавливается на потолке горизонтальной трубы. С одного конца создается мощная газовая горелка, имитирующая пожар в коридоре. Измеряется скорость распространения

пламени по сравнению с эталонными материалами (красный дуб и негорючий цементный лист).

Рисунок 42 – Испытательный стенд ASTM E84 / UL 723

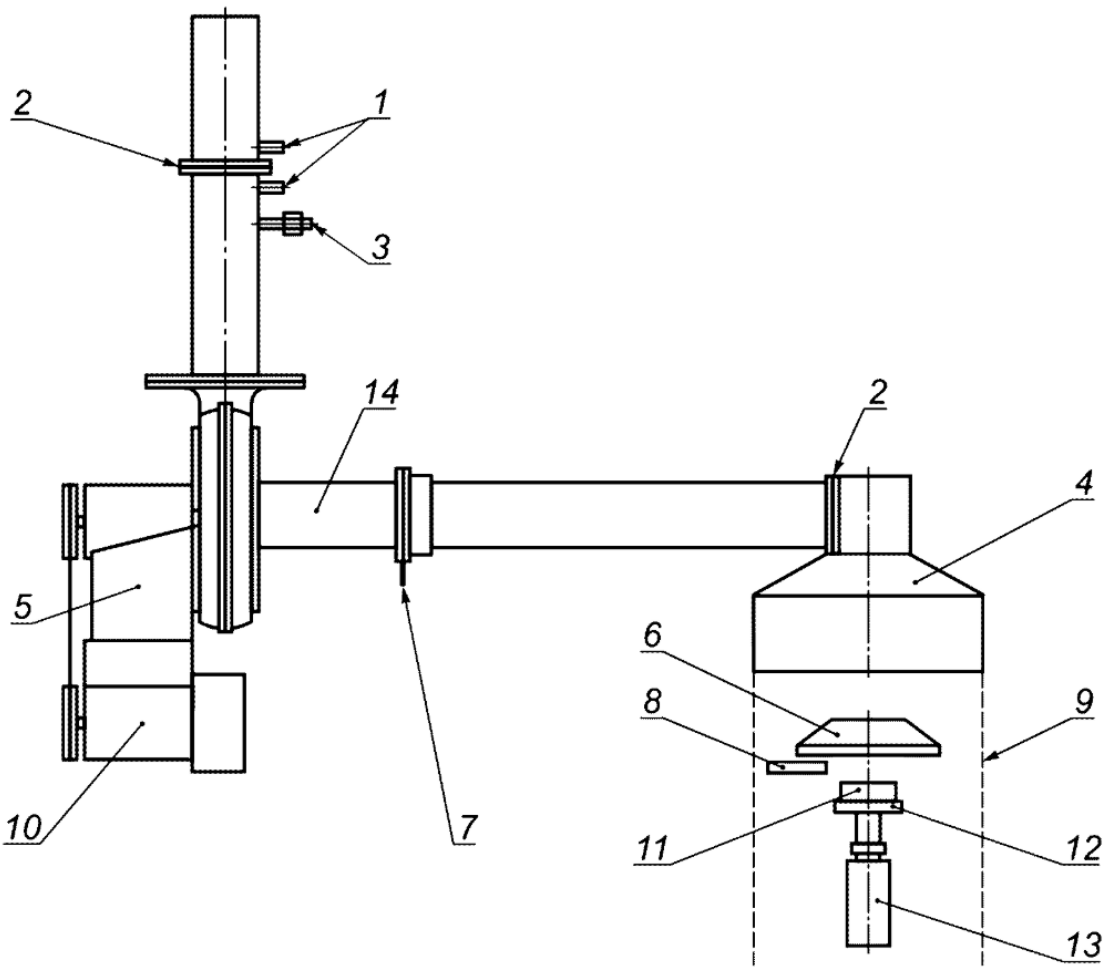
В результате исследования анализируются следующие показатели:

- Индекс распространения пламени (Flame Spread Index - FSI);
- Индекс дымообразования (Smoke Developed Index - SDI).

Группа 2: Испытания на тепловыделение и дымообразование

1. Калориметр конусный (Cone Calorimeter) – это самый современный и информативный лабораторный метод, данные которого можно использовать для моделирования реальных пожаров (ГОСТ Р ИСО 5660-1-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Испытания по определению реакции на огонь. Интенсивности тепловыделения, дымообразования и потери массы. Часть 1. Определение интенсивности тепловыделения методом конического калориметра и интенсивности дымообразования измерениями в динамическом режиме).

Образец площадью 100 х 100 мм помещается на специальные весы и облучается коническим нагревателем с заданным тепловым потоком (например, 25, 35, 50 кВт/м², что имитирует разные стадии пожара). Для инициирования горения используется электрическая искра. Прибор оснащен множеством датчиков.



1 – отверстия для измерения давления; 2 – диафрагма; 3 – термопара (расположена на оси трубы); 4 – зонт; 5 – вентилятор; 6 – нагреватель; 7 – кольцевой зонд для отбора проб газа; 8 – свеча зажигания; 9 – дополнительные боковые экраны; 10 – мотор вентилятора; 11 – фиксирующая рамка и образец; 12 – держатель образца; 13 – взвешивающее устройство; 14 – секция для измерения задымленности

Рисунок 43 – Аппаратура для проведения анализа

В процессе анализа измеряются критически важные показатели:

- Скорость тепловыделения (Heat Release Rate - HRR) – основной параметр, определяющий опасность пожара. Пиковое значение HRR (pHRR) и общее выделенное тепло (THR) – ключевые показатели.
- Скорость потери массы (Mass Loss Rate - MLR).
- Скорость выделения дыма (Smoke Production Rate - SPR).

- Параметр токсичности дыма – с помощью газоанализатора измеряются концентрации CO, CO_2 и других газов.
- Время до воспламенения (Time to Ignition - TTI) – показывает, насколько материал устойчив к возгоранию.

2. Камера дымообразования (Smoke Density Chamber). Образец помещается в закрытую камеру и подвергается воздействию пламени или теплового излучения. Луч света проходит через камеру, и фотодетектор измеряет ослабление светового потока из-за дыма.

Строится кривая плотности дыма во времени. Определяется максимальная оптическая плотность дыма и скорость ее достижения.

Рисунок 44 – Камера дымообразования

Группа 3: Испытания на токсичность продуктов горения

При данных испытаниях материал сжигается или пиролизуется в контролируемых условиях (например, в трубчатой печи), а образующиеся газы анализируются с помощью методов:

- ИК Фурье-спектроскопия (FTIR) – позволяет идентифицировать и количественно определить широкий спектр газов (CO, CO_2, HCl, HBr, HCN, NO_x и др.) в реальном времени;
- Газовая хроматография-масс-спектрометрия (GC-MS) – для точного анализа сложной смеси органических соединений в дыме.

Группа 4: Крупномасштабные испытания (натурные испытания)

Эти испытания максимально приближены к реальным условиям и проверяют поведение не просто материала, а готового изделия или конструкции.

- Испытание вертикальной перегородки (UL 1715) – для оценки огнестойкости внутренних отделочных материалов;
- Испытание мебели – диван или кресло помещается в камеру и подвергается воздействию мощного источника пламени (газовая горелка) или теплового потока. Измеряется тепловыделение, дымообразование и токсичность;
- Испытание кабелей (например, ГОСТ IEC 60332-3-21-2024. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Часть 3-21. Испытание на распространение пламени по вертикально расположенным пучкам проводов или кабелей. Категория A F/R) – пучок кабелей поджигается в вертикальной шахте, оценивается распространение пламени.

Таким образом, подробное исследование горючести пластиков и эластомеров – это многоуровневый процесс, позволяющий с высокой

степенью достоверности прогнозировать их поведение в огне и обеспечивать пожарную безопасность конечных продуктов.

4.4 Плотность

Исследование плотности пластиков и эластомеров позволяет определить ряд важных характеристик, таких как:

- Идентификация материала – разные типы пластиков имеют характерные диапазоны плотности (например, ПП ~0,90 г/см³, ПВХ ~1,4 г/см³);
- Контроль качества – отклонение плотности от нормы может говорить о нарушении рецептуры, наличии примесей, неправильной степени кристалличности или неподходящих условиях переработки;
- Расчёт стоимости – поскольку материалы часто покупают по весу, а детали имеют определённый объём, плотность напрямую влияет на стоимость готового изделия;
- Плотность часто коррелирует с механическими свойствами (например, у полиэтилена высокая плотность означает большую жёсткость и прочность).

Методы анализа плотности делятся на прямые (непосредственное измерение массы и объёма) и косвенные (измерение через другую физическую величину).

Группа 1: Методы, основанные на законе Архимеда (гидростатическое взвешивание)

Это самые распространённые и точные методы для лабораторных условий. Их суть – измерение кажущейся потери веса образца при его погружении в жидкость (ГОСТ 15139-69 (СТ СЭВ 891-78). Пластмассы. Метод определения плотности (объемной массы); DIN EN ISO 1183-1-2019 Plastics -

Methods for determining the density of non-cellular plastics - Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method (ISO 1183-1:2019, Corrected version 2019-05); German version EN ISO 1183-1:2019; ASTM D792-20 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement).

На тело, погружённое в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости (закон Архимеда). Эта сила пропорциональна объёму тела.

Существует два основных варианта:

1. Метод с использованием аналитических весов и погружного устройства – это самый точный и рекомендованный стандартами метод.

Для анализа используются аналитические весы с точностью не менее 0,1 мг с погружным устройством – специальная подставка, которая ставится на чашу весов, с сосудом для дистиллированной воды и держателем для образца. В качестве среды используется обычно дистиллированная или деионизированная вода. Для материалов с плотностью <1 г/см³ (которые плавают) используют этанол или изопропанол. Главное условие – жидкость не должна растворять или набухать образец.

Вспомогательное оборудование: тонкая проволока (например, 0,1-0,2 мм диаметром) для подвешивания образца, микрометр.

Образец должен быть без пузырей, трещин, гладким, массой 1-5 г. Его очищают от загрязнений.

Образец помещают на чашу весов и записывают массу в воздухе.

На чашу весов устанавливают погружное устройство с сосудом, заполненным жидкостью.

Образец подвешивают на тонкой проволоке к крючку держателя, так чтобы он полностью погрузился в жидкость, не касаясь стенок и дна. Записывают массу m_1. Это масса образца минус выталкивающая сила.

Проволока также вытесняет жидкость. Чтобы это учесть, измеряют «кажущуюся» массу проволоки, погружённой в жидкость на ту же глубину ($m_{пров}$).

Рисунок 45 – Аналитические весы с функцией гидростатического взвешивания

Расчёт плотности проводится по следующим формулам:

- Без учёта проволоки:

$$\rho = [m / (m - m_1)] * \rho_{жидк}, \quad (37)$$

где $\rho_{жидк}$ — плотность жидкости (для воды при 23°C ~0,9975 г/см³).

- С учётом проволоки – сначала находят массу вытесненной жидкости:

$$m_{жидк} = (m - m_1) - m_{пров} \quad (38)$$

Тогда объём образца:

$$V = m_{жидк} / \rho_{жидк} \quad (39)$$

Эластомеры могут впитывать воду, что искажает результаты. Поэтому для них:

- Используют не воду, а инертные жидкости (изопропанол).
- Проводят взвешивание очень быстро.
- Образцы часто покрывают тонким слоем парафина для гидроизоляции (при этом учитывают массу и объём парафина).

2 Метод с использованием пикнометра.

Пикнометр – это стеклянная колба строго определённого объёма с точной пришлифованной пробкой.

Рисунок 46 – Пикнометры

Для проведения анализа требуется следующее оборудование: пикнометр, аналитические весы, жидкость (часто вода), вакуумный насос (для удаления пузырьков воздуха).

Взвешивают пустой пикнометр ($m_п$).

Взвешивают пикнометр с образцом ($m_{п+обр}$), следовательно масса образца:

$$m = m_{п+обр} - m_{п} \quad (40)$$

Заполняют пикнометр с образцом жидкостью. Жидкость должна полностью покрывать образец. Пикнометр помещают в вакуумный эксикатор для удаления пузырьков, которые сильно искажают результат. Доводят жидкость до метки и взвешивают ($m_{п+обр+жидк}$).

Взвешивают пикнометр, заполненный только жидкостью ($m_{п+жидк}$).

Расчёт ведут по формулам:

- Объем пикнометра

$$V_{п} = (m_{п+жидк} - m_{п}) / \rho_{жидк} \quad (41)$$

- Объём вытесненной образцом жидкости

$$V_{обр} = V_{п} - [(m_{п+обр+жидк} - m_{п+обр}) / \rho_{жидк}] \quad (42)$$

- Плотность образца

$$\rho = m / V_{обр} \quad (43)$$

Группа 2: Градиентные колонны

Этот метод идеален для быстрой идентификации материалов и контроля качества в производственных условиях, особенно для смесей или материалов с неизвестным составом.

Метод основан на принципе создания вертикального столба жидкости, плотность которой плавно увеличивается сверху вниз. Образец помещают в колонну, он всплывает или тонет, останавливаясь на уровне, где его плотность равна плотности окружающей жидкости.

Оборудование для реализации метода:

- Высокая цилиндрическая колонна (обычно 1-2 метра).
- Две или более несмешивающихся жидкостей с разной плотностью, которые смешиваются для создания градиента (часто используют водные растворы спиртов или солей, например, хлорида кальция).

- Калибровочные стеклянные поплавки с точно известной плотностью для построения калибровочной кривой.
- Источник света для подсветки колонны.

Рисунок 47 – Система для определения плотности методом градиентной колонки

Для проведения процесса медленно заливают жидкости разной плотности так, чтобы самая плотная была внизу, а самая легкая наверху. Со временем за счёт диффузии между слоями образуется плавный градиент плотности.

В колонну помещают несколько (5-7) калибровочных поплавков. Измеряют высоту их положения. Строят график «Плотность поплавка – высота».

В колонну аккуратно помещают небольшие образцы (2-3 мм) пластика. Через несколько часов (когда образцы перестанут двигаться) измеряют их высоту.

По калибровочному графику находят плотность, соответствующую высоте нахождения образца.

Можно одновременно тестировать десятки образцов. Отлично подходит для определения неоднородности плотности в одной партии материала.

Однако, метод требует много времени на стабилизацию. Менее точен, чем гидростатическое взвешивание.

Группа 3: Метод измерения геометрических размеров

Самый простой, но и наименее точный метод.

Образцу правильной геометрической формы (куб, цилиндр) измеряют размеры и вычисляют объём. Массу измеряют на весах.

Оборудование для реализации метода: штангенциркуль, микрометр, весы.

Метод имеет ряд ограничений:

- Низкая точность из-за погрешности измерения размеров, особенно для мелких или сложных образцов.
- Неприменим для пористых материалов, так как измеряется внешний объём, а не объём самого материала.
- Не подходит для эластомеров, которые могут деформироваться при измерении.
- Используется только для грубой оценки или для массивных, плотных образцов простой формы.

Группа 4: Современные автоматические приборы (газовый пикнометр)

Это самый передовой метод для измерения истинной (скелетной) плотности, особенно пористых материалов.

Принцип измерения основан на законе Бойля-Мариотта ($P_1V_1 = P_2V_2$). Вместо жидкости используется инертный газ (обычно гелий, так как он имеет малые молекулы и хорошо проникает в мельчайшие поры).

Оборудование для реализации метода: газовый пикнометр – состоит из двух камер известного объёма, датчиков давления и системы клапанов.

Рисунок 48 – Автоматический газовый пикнометр IMC ProSurf-G1310M

Газ под давлением P_1 заполняет эталонную камеру объёмом $V_{этал}$. Затем газ выпускают в измерительную камеру, где находится образец. Объём камеры $V_{камеры}$. Регистрируют новое давление P_2. Объём, занятый материалом образца (скелетной объём), вычисляется по формуле:

$$V_{образца} = V_{камеры} - [V_{этал} / ((P_2/P_1) - 1)] \quad (44)$$

Зная массу образца, вычисляют плотность.

Преимущества метода:

- Высочайшая точность.
- Измеряет именно объём твёрдого материала, игнорируя открытые и закрытые поры.

- Скорость и автоматизация.
- Безопасен для материалов, склонных к набуханию.

Ключевой недостаток метода – высокая стоимость оборудования.

Критически важными факторы, влияющими на точность измерения плотности вне зависимости от способа измерения, являются:

- Температура – плотность жидкости и образца сильно зависит от температуры. Все стандарты требуют проведения испытаний при контролируемой температуре (обычно 23°C ± 2°C).
- Малейшие пузырьки воздуха на поверхности образца – главный источник ошибок. Необходимо использовать поверхностно-активные вещества (ПАВ) или спирт, а также применять ультразвуковую ванну или вакуум для их удаления.
- Некоторые пластики (например, нейлон, ПВА) гигроскопичны и поглощают влагу из воздуха, что увеличивает их массу. Образцы необходимо кондиционировать в стандартных условиях влажности перед испытанием.
- Наполнители (стекловолокно, тальк, минералы) влияют на плотность.

4.5 Морозостойкость

Исследование морозостойкости (или хладостойкости) пластиков и эластомеров – это комплексный процесс, направленный на определение того, как материалы ведут себя при низких температурах. Ключевой параметр – температура хрупкости, ниже которой материал теряет пластичность и становится хрупким.

На морозостойкость в общем влияют следующие факторы:

- Химическая структура полимера – гибкие связи (например, -Si-O- в силиконах) дают низкую $T_{хр}$. Жесткие ароматические кольца (в ПС) — высокую $T_{хр}$.
- Добавление пластификаторов резко снижает $T_{хр}$.

- Введение «эластичных» звеньев в цепь путем сополимеризации повышает морозостойкость.
- Молекулярная масса – как правило, с ростом ММ морозостойкость немного улучшается.
- Наполнители и армирующие материалы могут как улучшать, так и ухудшать ударную вязкость на холоде.

Методы анализа морозостойкости можно разделить на три группы:

1 Механические испытания.

2 Термоаналитические методы.

3 Физико-оптические методы.

Механические методы испытаний

Это наиболее прямые и распространенные методы, которые моделируют реальные механические нагрузки при низких температурах.

- Испытание на ударную вязкость при низких температурах – образец материала с надрезом (концентратором напряжения) зажимается в маятниковом копре. Копер охлаждается в криостате до заданной температуры. После выдержки образца при этой температуре, маятник разрушает его. Измеряется затраченная на разрушение энергия. В результате определяется способность материала поглощать энергию ударного воздействия на холоде.

Испытание по Шарпи – образец опирается на две опоры, удар приходится по середине, противоположной стороне от надреза (см. п. 1.3).

Испытание по Изоду – образец закреплен вертикально, удар приходится по свободному концу сверху (см. п. 1.3).

Для анализа серию идентичных образцов испытывают при разных температурах (например, +23 °C, 0°C, -20 °C, -40 °C и т.д.). Строится график «Ударная вязкость – температура». Резкое падение ударной вязкости указывает на температуру хрупко-вязкого перехода. Для пластиков это часто

ярко выраженный порог. Эластомеры обычно не имеют резкого перехода, их ударная вязкость плавно снижается.

- Определение температуры хрупкости по Мартенсу (ГОСТ 21341-75 Пластмассы и эбонит. Метод определения теплостойкости по Мартенсу; ГОСТ 34371-2017 (ISO 75-1:2013) Пластмассы. Определение температуры прогиба под нагрузкой. Часть 1. Общий метод испытания).

На стандартный образец (брусок) действует постоянная изгибающая нагрузка, в то время как температура в камере плавно понижается с заданной скоростью.

Определяется температура, при которой деформация образца под постоянной нагрузкой достигает критического значения (чаще всего, когда он разрушается или деформация превышает предел). Это испытание на ползучесть при низких температурах. Оно хорошо моделирует ситуации, когда материал длительно находится под напряжением (например, крепежная деталь на морозе).

- Определение температуры хрупкости при изгибе (ASTM D746-20 Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastics and Elastomers by Impact; ASTM D1790-21 Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastic Sheeting by Impact).

Это один из самых простых и наглядных методов, особенно для пластиков и пленок. Образец в виде бруска или полосы закрепляется в специальном устройстве и охлаждается в жидкости (чаще всего спирт с сухим льдом или жидким азотом). Через определенные температурные интервалы образец подвергается стандартному ударному изгибу с помощью молоточка.

Определяется температура, при которой 50% образцов разрушаются (ломаются, а не гнутся).

Метод статистический. Испытывается минимум 10 образцов на каждой температуре. Температура, при которой 50% образцов выдерживают удар без разрушения, считается температурой хрупкости.

- Испытание на сжатие при низких температурах для эластомеров (ГОСТ Р ИСО 815-1-2017 Резина и термоэластопласты. Определение остаточной деформации при сжатии).

Стандартный образец эластомера (часто цилиндр или шайба) сжимается до определенной деформации и выдерживается при низкой температуре в течение заданного времени. Определяется модуль упругости при сжатии и остаточная деформация при сжатии.

- Испытание на сопротивление отрыву при низких температурах (ISO 2921-2011 Rubber, vulcanized – Determination of low-temperature retraction (TR test); AENOR UNE-ISO 2921-2017 Rubber, vulcanized. Determination of low temperature retraction (TR test); ASTM D1329-16(2021) Standard Test Method for Evaluating Rubber Property-Retraction at Lower Temperatures (TR Test).

Специальный образец эластомера (например, в форме кольца) растягивается и охлаждается. При заданной температуре его резко разрывают.

Определяется температурный предел эластичности. Температура, при которой образец еще способен растянуться на определенную величину (например, на 100 %) перед разрывом, или температура, при которой напряжение при заданном удлинении достигает определенного значения.

Термоаналитические методы

Эти методы позволяют «заглянуть» в структуру материала и понять физико-химические причины потери морозостойкости.

- Дифференциальная сканирующая калориметрия (ГОСТ Р 55134-2012 (ИСО 11357-1:2009) Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 1. Общие принципы; ASTM D3418-2015 Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry).

Материал нагревается или охлаждается с постоянной скоростью, и измеряется разница в тепловых потоках между образцом и эталоном.

При температуре стеклования T_c аморфные фазы полимера «замерзают», сегменты молекулярных цепей теряют подвижность. Материал из гибкого и вязкого становится жестким и стеклообразным. Для большинства применений рабочая температура должна быть выше T_c.

ДСК напрямую не показывает хрупкость, но дает фундаментальное объяснение, почему материал теряет морозостойкость. Эластомер с T_c = -60 °C будет очевидно более морозостойким, чем пластик с T_c = -1 0°C.

- Динамический механический анализ (ДМА / DMA) – на образец материала подается небольшое циклическое (синусоидальное) механическое напряжение, и измеряется его отклик (деформация). Испытание проводится в широком температурном диапазоне.

Определяются такие параметры, как модуль накопления (E' – показывает упругую, «накапливающую энергию» материала. При охлаждении он растет); модуль потерь (E" – показывает вязкую, «рассеивающую энергию» материала. Пик на графике E" соответствует температуре стеклования); тангенс угла потерь ($\tan \delta = E''/E'$ – самый чувствительный показатель. Его пик – это также T_c. Ширина и высота пика говорят о природе перехода).

ДМА не только точно определяет T_c, но и показывает, как механические свойства (жесткость и демпфирование) меняются с температурой. Это прямая связь между молекулярной подвижностью и макроскопическими свойствами.

Физико-оптические и специализированные методы

- Испытание на определение жесткости гибких материалов при кручении (ISO 458-1:1985 Plastics – Determination of stiffness in torsion of flexible materialsPart 1: General method; ASTM D1043-16 Standard Test Method for Stiffness Properties of Plastics as a Function of Temperature by Means of a Torsion Test).

Пленка или стержень из материала скручивается под действием момента сил. Температура понижается, и измеряется угол скручивания.

Определяется температура, при которой модуль кручения достигает определенного, заранее заданного значения (например, 300 МПа или 1000 МПа). Метод определяет практический предел гибкости.

- Термический анализ при изгибе под нагрузкой (HDT / HDTUL) (ГОСТ 32657-2014 (ISO 75-1:2013) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение температуры изгиба под нагрузкой; ASTM D648-18 Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position).

Образец помещается в жидкостную баню, на него подается постоянная нагрузка на изгиб, и температура начинает равномерно повышаться.

Определяется температура, при которой образец прогибается на заданную величину. Хотя метод используется для оценки теплостойкости, его можно адаптировать и для низких температур, определяя температуру, при которой материал становится слишком жестким и разрушается.

Таким образом, исследование морозостойкости – это комбинация методов, дающая полную картину поведения материала в условиях низких температур.

Заключение

Настоящие учебно-методические указания представляют собой систематизированное руководство по комплексному исследованию свойств полимерных материалов. В работе рассмотрены современные методы определения механических, теплофизических, реологических и эксплуатационных характеристик пластмасс и эластомеров, составляющие основу для профессиональной деятельности в области химической технологии и материаловедения.

Представленные методики обеспечивают полный цикл испытаний – от подготовки образцов до статистической обработки результатов и составления технических заключений.

Комплексный подход к исследованию позволяет установить взаимосвязи между структурой, свойствами и поведением материалов в различных условиях эксплуатации.

Стандартизированные методы испытаний, соответствующие требованиям ГОСТ, ISO и ASTM, гарантируют воспроизводимость результатов и их сопоставимость с данными других исследований.

Методические указания успешно реализуют поставленную задачу по подготовке квалифицированных специалистов, способных решать практические задачи в области исследования, разработки и применения полимерных материалов в различных отраслях промышленности.

Примерные темы рефератов

Раздел 1. Механические свойства

1. Сравнительный анализ механических свойств конструкционных и бытовых термопластов;

2. Методы определения деформационно-прочностных характеристик эластомеров: особенности и проблемы;

3. Влияние скорости деформации на механическое поведение полимерных материалов;

4. Твердость полимеров: методы измерения, интерпретация результатов и практическая значимость;

5. Особенности проведения испытаний на сжатие для жестких пластиков и эластомеров;

6. Ударная вязкость полимеров: факторы влияния и методы ее повышения;

7. Анизотропия механических свойств в изделиях из полимеров, полученных литьем под давлением;

Раздел 2. Теплофизические свойства

8. Коэффициент линейного теплового расширения полимерных композитов: теория и методы контроля;

9. Теплопроводность полимерных материалов: механизмы переноса тепла и пути ее регулирования;

10. Влияние молекулярной структуры и наполнителей на теплофизические свойства полимеров;

Раздел 3. Реологические свойства

11. Реологические свойства расплавов термопластов: от лабораторных измерений к прогнозированию поведения при переработке;

12. Показатель текучести расплава (ПТР) как ключевой параметр технологичности полимерных материалов;

13. Методы капиллярной вискозиметрии в исследовании реологического поведения полимеров;

14. Использование ротационной реометрии для анализа структуры полимерных расплавов и суспензий;

Раздел 4. Эксплуатационные и специальные свойства

15. Современные методы оценки и прогнозирования срока службы полимерных материалов;

16. Сравнительный анализ устойчивости различных типов эластомеров к тепловому старению;

17. Озоновое старение ненасыщенных каучуков: механизмы и методы защиты;

18. Гидролитическая деструкция полиэфиров: причины, последствия и пути стабилизации;

19. Биоповреждаемость полимерных материалов: объекты, механизмы и методы испытаний;

20. Влияние климатических факторов на старение полиолефинов в условиях открытой атмосферы;

21. Радиационная стойкость полимерных материалов, применяемых в медицинской технике и атомной промышленности;

22. Трибологические характеристики инженерных термопластов и пути их улучшения;

23. Методы испытаний и факторы, влияющие на износостойкость эластомеров;

24. Сравнительный анализ методов определения сопротивления абразивному износу;

25. Классификация полимерных материалов по горючести: обзор методов;

26. Стратегии снижения горючести полимеров: механизмы действия антипиренов;

27. Токсичность продуктов горения полимерных материалов и методы ее оценки;

28. Морозостойкость эластомеров: методы оценки и зависимость от химической структуры;

29. Влияние пластификаторов на комплекс эксплуатационных свойств жестких и эластичных ПВХ-композиций;

30. Комплексный анализ полимерного материала для заданных условий эксплуатации (на примере конкретного изделия, например, автомобильного бампера или уплотнительного кольца).

Вопросы для самоподготовки и контроля

Раздел 1. Механические свойства

1. Что характеризует предел прочности при растяжении?

2. Как определяется модуль упругости (модуль Юнга) по диаграмме напряжение-деформация?

3. В чем разница между пределом прочности и пределом текучести для пластичных пластмасс?

4. Что такое относительное удлинение при разрыве и о чем оно свидетельствует?

5. Почему для испытаний на растяжение используются образцы формы «лопатки»?

6. Какую роль играет экстензометр в испытании на растяжение?

7. Назовите основные типы диаграмм растяжения для пластмасс и приведите примеры материалов для каждого типа.

8. Какие стандарты регламентируют испытания пластмасс на растяжение в РФ?

9. Чем ключевые параметры при растяжении резин отличаются от параметров для пластмасс?

10. Что означают обозначения S100, S200, S300 и почему они важны для характеристики резин?

11. Объясните, что такое «эффект Маллинза» и как он влияет на результаты испытаний?

12. Почему для резин часто используют оптические экстензометры?

13. Что характеризует остаточное удлинение эластомера после разрыва?

14. Как скорость деформации влияет на результаты испытания резины на растяжение?

15. Каковы основные цели испытания пластмасс на сжатие?

16. Как определяют прочность на сжатие для хрупких и пластичных пластмасс?

17. Что такое «напряжение при заданной деформации» и почему этот параметр важен?

18. Опишите явление «бочкообразования» и методы его уменьшения;

19. Чем цели испытания эластомеров на сжатие принципиально отличаются от целей для пластмасс?

20. Что такое «остаточная деформация сжатия» (сжатый набор) и как ее определяют?

21. Как геометрия образца влияет на результаты испытания резин на сжатие?

22. В чем физический смысл ударной вязкости?

23. Чем отличаются методы Шарпи и Изода по способу нагружения образца?

24. Для чего на образце для ударных испытаний делают надрез?

25. Как тип надреза (U-образный, V-образный) влияет на результат измерения ударной вязкости?

26. Как температура влияет на ударную вязкость полимеров?

27. Почему методы Шарпи и Изода малоприменимы для оценки ударной вязкости эластомеров?

28. В чем заключается разница в измерении твердости для пластмасс и эластомеров?

29. Опишите принцип измерения твердости по Шору (Шор А и Шор D).

30. Какие факторы (толщина образца, время выдержки) критически влияют на результат измерения твердости?

31. Что характеризует твердость эластомера и от чего она преимущественно зависит?

Раздел 2. Теплофизические свойства

32. Что такое температура размягчения по Вика и чем она отличается от температуры плавления?

33. Какие параметры (нагрузка, скорость нагрева) выбирают при проведении испытания по Вика и как они влияют на результат?

34. Для каких типов полимеров значение VST близко к температуре стеклования, а для каких – к температуре плавления?

35. Почему наличие остаточных напряжений в образце сильно занижает значение HDT?

36. Что показывает коэффициент линейного теплового расширения?

37. Как ведет себя КЛТР аморфного полимера при переходе через температуру стеклования?

38. Каким образом наполнители (стекловолокно) влияют на КЛТР полимера?

39. Почему для точного измерения КЛТР необходима компенсация собственного расширения прибора?

40. Почему пластмассы и эластомеры являются хорошими теплоизоляторами?

41. Опишите принцип стационарного метода с горячей охранной зоной для измерения теплопроводности.

42. Какие факторы могут привести к занижению измеряемого значения теплопроводности?

Раздел 3. Реологические свойства

43. Что характеризует показатель текучести расплава и в каких единицах он измеряется?

44. Почему для гигроскопичных пластиков обязательна предварительная сушка перед измерением ПТР?

45. Как температура и нагрузка влияют на значение ПТР?

46. В чем разница между ПТР и объемным показателем текучести?

47. Чем измерение вязкости расплава на капиллярном реометре информативнее измерения ПТР?

48. Что такое «неньютоновское поведение» полимерных расплавов?

49. Опишите принцип работы ротационного реометра.

50. Какие измерительные геометрии используются в ротационной реометрии и в чем их отличия?

51. Что такое комплексная вязкость (η*) и как ее определяют?

52. Что показывают модуль накопления (G') и модуль потерь (G'') в осцилляционном тесте?

Раздел 4. Эксплуатационные и специальные свойства

53. Что такое старение полимеров и к каким последствиям оно приводит?

54. Назовите основные виды старения и факторы, их вызывающие.

55. В чем цель ускоренных испытаний на термическое старение?

56. Опишите методику прогнозирования срока службы с использованием модели Аррениуса.

57. Какие химические изменения в полимере можно определить с помощью ИК-спектроскопии после термостарения?

58. Какие основные факторы окружающей среды вызывают климатическое старение?

59. Чем отличаются ксеноновые лампы от УФ-ламп в климатических камерах?

60. Почему результаты лабораторных испытаний не всегда точно коррелируют с натурными?

61. Почему эластомеры с двойными связями особенно чувствительны к озону?

62. Почему озоновое растрескивание всегда направлено перпендикулярно вектору напряжения?

63. Какие методы защиты эластомеров от озонового старения вам известны?

64. Какие химические связи в полимерах наиболее уязвимы для гидролиза?

65. Как по изменению молекулярной массы (по данным ГПХ) можно судить о протекании гидролиза?

66. Почему для полиэфиров (ПЭТ, ПЛА) контроль кислотного числа является прямым признаком гидролитической деградации?

67. Какие процессы (физические и химические) происходят при старении полимера в жидкости?

68. Что такое растрескивание под напряжением и чем оно опасно?

69. Как по изменению массы образца после контакта с жидкостью можно судить о преобладающем механизме старения?

70. Какие полимеры и почему наиболее подвержены биоповреждениям?

71. Опишите методику испытания на устойчивость к грибам с использованием чистых культур.

72. По какому принципу материал считается компостируемым?

73. Какие два основных процесса происходят в полимере при облучении?

74. Как наличие кислорода влияет на механизм радиационного старения?

75. Что такое поглощенная доза и в каких единицах она измеряется?

76. Назовите основные механизмы износа полимеров.

77. Опишите принцип испытания на абразивный износ по Таберу.

78. Для чего используется установка «Штифт на диске» (Pin-on-Disk)?

79. Какие методы микроскопии применяют для анализа механизмов износа?

80. Что такое предел кислородного индекса (LOI) и как интерпретируют его значения?

81. Чем отличаются классификации горючести по UL 94: HB, V-0, V-2, 5VA?

82. Какие параметры измеряют с помощью конусного калориметра и почему они важны для оценки пожарной опасности?

83. Что такое индекс распространения пламени и как его определяют?

84. Какие методы измерения плотности, основанные на законе Архимеда, вы знаете?

85. В чем преимущества и недостатки метода градиентной колонны?

86. Почему газовый (гелиевый) пикнометр считается наиболее точным методом измерения истинной плотности?

87. Какие факторы могут исказить результаты измерения плотности гидростатическим взвешиванием?

88. Что такое температура хрупкости и как ее определяют для пластиков и эластомеров?

89. Как по данным ДСК можно определить температуру стеклования и связать ее с морозостойкостью?

90. Что показывает динамический механический анализ (ДМА) при изучении поведения полимера на холоде?

91. Чем отличается характер перехода у пластиков и эластомеров при понижении температуры?

92. Как направление литья/экструзии образца может повлиять на его механические свойства?

93. Почему при испытаниях всегда указывают, в соответствии с каким стандартом они проводились?

94. Каковы основные источники погрешности при механических испытаниях полимеров?

95. Как наличие наполнителя (например, талька, стекловолокна) влияет на комплекс свойств полимерного материала?

96. Объясните, как реологические свойства материала влияют на выбор метода его переработки.

97. Почему для одного и того же материала могут устанавливаться разные, более низкие, допустимые рабочие температуры по сравнению с HDT или VST?

98. Сформулируйте общий принцип выбора метода испытания для оценки пригодности материала для конкретного применения (например, автомобильный бампер, уплотнитель холодильника, труба для горячей воды);

99. Как взаимосвязаны реологические свойства расплава полимера и механические характеристики готового изделия? Приведите примеры для конкретных технологических процессов (литье под давлением, экструзия);

100. Проанализируйте, как введение стеклянного наполнителя (стекловолокна) повлияет на комплекс свойств полипропилена: механические (прочность, ударная вязкость, твердость), теплофизические (HDT, теплопроводность, КЛТР) и реологические (ПТР, вязкость расплава). Дайте физическое обоснование каждому изменению.

Темы комплексных практических работ

1. Комплексная характеристика механических свойств термопластов:

- Проведение испытаний на растяжение, сжатие и удар по Шарпи для полипропилена, полистирола и поликарбоната;
- Построение диаграмм деформирования и сравнительный анализ полученных характеристик.

2. Исследование реологических свойств полимерных расплавов:

- Определение ПТР полиэтилена при различных температурах и нагрузках;
- Построение реологических кривых на капиллярном вискозиметре;
- Анализ влияния температуры на вязкость расплава.

3. Оценка теплофизических характеристик конструкционных пластиков:

- Определение температур размягчения по Вика и тепловой деформации для ABS-пластика и полиамида;
- Измерение коэффициента линейного теплового расширения;
- Сравнительный анализ термостойкости материалов.

4. Исследование старения полимерных материалов:

- Проведение ускоренного термоокислительного старения полипропилена;
- Оценка изменения механических свойств после старения;
- Анализ химических изменений методом ИК-спектроскопии.

5. Определение трибологических характеристик полимеров:

- Испытание на износ по Таберу для полиамида и полиацеталя;
- Исследование коэффициента трения на установке "штифт-диск";
- Микроскопический анализ изношенных поверхностей.

6. Оценка горючести полимерных материалов:

- Определение кислородного индекса для ПВХ и полиэтилена;
- Испытания на горючесть по UL 94;

- Анализ дымообразования при термическом разложении.

7. Исследование влияния наполнителей на свойства композитов:

- Приготовление композиций полипропилена с тальком и стекловолокном;
- Оценка влияния наполнителей на механические и реологические свойства;
- Анализ структуры композитов микроскопическими методами.

8. Комплексная оценка свойств эластомеров:

- Испытание резин на растяжение с определением модуля 100 % и 300 %;
- Определение твердости по Шору и остаточной деформации;
- Оценка морозостойкости и теплостойкости.

9. Исследование химической стойкости полимеров:

- Испытание полиэтилена, полипропилена и ПВХ в агрессивных средах;
- Оценка изменения массы и механических свойств после экспозиции;
- Анализ кинетики набухания.

10. Разработка паспорта качества полимерного материала:

- Проведение полного цикла испытаний выбранного материала;
- Статистическая обработка результатов;
- Составление технического отчета с рекомендациями по применению.

Литература

1. Черникова Е.В., Ефимова А.А. и др. Спецпрактикум по физико-химическим и физико-механическим методам исследования полимеров. Часть 1 (теория). Под ред. чл.-корр РАН, проф. В.П. Шибаева – Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2013. – 112 с.

2. Козловцев, В. А. Физика полимеров: методические указания к лабораторным работам / В. А. Козловцев, В. Д. Васильева. – Волгоград: ВолгГТУ, 2011. – 20 с.

3. ГОСТ 34370-2017 (ISO 527-1:2012) Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Часть 1: Общие принципы: ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. № 52). – Москва : Стандартинформ, 2018. – 25 с.

4. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Поправкой) : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. № 52). – Москва : Стандартинформ, 2018. – 25 с.

5. ASTM D638-22 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics : дата публикации 01 июля 2022 года. – США : ASTM International, 2022. – 16 с.

6. ГОСТ ISO 37-2020 Резина и термоэластопласты. Определение упругопрочностных свойств при растяжении. Rubber and thermoelastoplasts. Determination of tensile stress-strain properties : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 сентября 2020 г. № 133-П). – Москва : Стандартинформ, 2020. – 32 с.

7. ГОСТ ИСО 37 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of tensile stress-strain properties : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 27 сентября 2013 г. № 59-П). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 32 с.

8. ASTM D412 Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers–Tension. дата публикации 01 ноября 2016 года. – США : ASTM International, 2016. – 14 с.

9. ГОСТ 4651-2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 27 февраля 2014 г. № 64-П). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 26 с.

10. ISO 604:2002 Plastics – Determination of compressive properties : дата публикации 01 марта 2002 года. – Швейцария : ISO, 2002. – 11 с.

11. ASTM D695-23 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. дата публикации 01августа 2023 года. – США : ASTM International, 2023. – 8 с.

12. ГОСТ Р ИСО 815-1-2017 Резина и термоэластопласты. Определение остаточной деформации при сжатии. Часть 1. Испытания при стандартной или повышенной температурах : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 июля 2017 г. № 703-ст. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 15 с.

13. ASTM D395-18 Standard Test Methods for Rubber Property – Compression Set : дата публикации 01 июля 2018 года. – США : ASTM International, 2018. – 8 с.

14. ГОСТР ИСО 815-1-2017 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of compression set – Part 1: At ambient or elevated temperatures : утвержден и введен в действие приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 июля 2017 г. № 703-ст. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 15 с.

15. ГОСТ 4647-2015 Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Шарли : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 12 ноября 2015 г. № 82-П). – Москва : Стандартинформ, 2017. – 23 с.

16. ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000) Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. № 52). – Москва : Стандартинформ, 2018. – 20 с.

17. ISO 179-1:2010 Plastics – Determination of Charpy impact properties: дата публикации 15 июня 2010 года. – Швейцария : ISO, 2010. – 11 с.

18. ISO 180:2023(E) Plastics – Determination of Izod impact strength: дата публикации 01 июня 2023 года. – Швейцария : ISO, 2023. – 11 с.

19. ASTM D6110-18 Standard Test Method for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics : дата публикации 01 июля 2018 года. – США : ASTM International, 2018. – 17 с.

20. ГОСТ 24621-91 (ИСО 868-85) Пластмассы и эбонит. Определение твердости при вдавливании с помощью дюрометра (твердость по Шору) : дата введения 01.01.91. – Москва: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1991. – 9 с.

21. ISO 868:2003(E) Plastics and ebonite – Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness) : дата публикации 01.03.2003. – Швейцария : ISO, 2003. – 9 с.

22. ISO 2039-1:2001(E) Plastics – Determination of hardness – Part 1: Ball indentation method : дата публикации 01.12.2001. – Швейцария : ISO, 2001. – 9 с.

23. ASTM D2240-15(2021) Standard Test Method for Rubber Property– Durometer Hardness : дата публикации 15 июня 2021 года. – США : ASTM International, 2021. – 13 с.

24. ГОСТ 263-75 (СТ СЭВ 1198—78) Резина. Метод определения твердости по Шору А: дата введения 01.01.77. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1977. – 9 с.

25. ISO 48-4:2018 Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of hardness – Part 4: Indentation hardness by durometer method (Shore hardness) : дата публикации август 2018 года. – Швейцария : ISO, 2018. – 10 с.

26. ASTM D2240-15(2021) Standard Test Method for Rubber Property– Durometer Hardness : дата публикации 15 июня 2021 года. – США : ASTM International, 2018. – 13 с.

27. ГОСТ 15088-2014 (ISO 306:2004) Пластмассы. Метод определения температуры размягчения по Вика : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 18 апреля 2014 г. No 66-П). – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

28. ISO 306:2022 Plastics – Thermoplastic materials – Determination of Vicat softening temperature (VST) : дата публикации ноябрь 2022 года. – Швейцария : ISO, 2022. – 11 с.

29. ASTM D1525 Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics : дата публикации 01 августа 2017 года. – США : ASTM International, 2017. – 11 с.

30. ГОСТ 34371-2017 (ISO 75-1:2013) Пластмассы. Определение температуры прогиба под нагрузкой. Часть 1. Общий метод испытания : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. N 52). – Москва : Стандартинформ, 2018. – 12 с.

31. ГОСТ 12021-2017 (ISO 75-2:2013) Пластмассы и эбонит. Метод определения температуры изгиба под нагрузкой : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 ноября 2017 г. N 52). – Москва : Стандартинформ, 2018. – 16 с.

32. ISO 75-1:2013(R) Plastics — Determination of temperature of deflection under load — Part 1: General test method : дата публикации 15.04.2013. – Швейцария : ISO, 2013. – 10 с.

33. ISO 75-2:2013(R) Plastics — Determination of temperature of deflection under load — Part 2: Plastics and ebonite: дата публикации 15.04.2013. – Швейцария : ISO, 2013. – 10 с.

34. ASTM D648 Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position : дата публикации 01 апреля 2018 года. – США : ASTM International, 2018. – 14 с.

35. ГОСТ 15173-70 (СТ СЭВ 2899—81) Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения : дата введения 01.07.70. – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1970. – 7 с.

36. ГОСТ 32618.2-2014 (ISO 11359-2:1999) Пластмассы. Термомеханический анализ (ТМА). Часть 2. Определение коэффициента линейного теплового расширения и температуры стеклования : ПРИНЯТ Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 27 февраля 2014 г. № 64-П) – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

37. ISO 11359-1:2023(E) Plastics – Thermomechanical analysis (TMA) – Part 1: General principles : дата публикации февраль 2023 года. – Швейцария : ISO, 2023. – 10 с.

38. ISO 11359-2:2021(E) Plastics – Thermomechanical analysis (TMA) – Part 2: Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature : дата публикации ноябрь 2021 года. – Швейцария : ISO, 2021. – 6 с.

39. ASTM E831-19 Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis : дата публикации 01 апреля 2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 5 с.

40. ASTM D696-16 Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30°C and 30°C with a Vitreous Silica Dilatometer: дата публикации 01 апреля 2016 года. – США : ASTM International, 2016. – 5 с.

41. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме: введен в действие с 1 апреля 2000 г. в

качестве государственного стандарта Российской Федерации постановлением Госстроя России от 24 декабря 1999 г. № 89. – Москва : МНТКС, 2000. – 27 с.

42. ISO 8302:1991(E) Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus : дата публикации 01.08.1991 года. – Швейцария : ISO, 1991. – 15 с.

43. ISO 8301: 1991(E) Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus: дата публикации 01.08.1991. – Швейцария : ISO, 2091. – 13 с.

44. ASTM C177-19e1 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus : дата публикации 01 января 2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 23 с.

45. ASTM E1530-19 Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique : дата публикации 01.02.2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 8 с.

46. ISO 22007-2:2022(E) Plastics – Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method: дата публикации июнь 2022 года. – Швейцария : ISO, 2022. – 11 с.

47. ГОСТ 11645-2021 Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов: введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 октября 2021 г. № 1377-ст. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 29 с.

48. ISO 1133-1:2022(E) Plastics - Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics – Part 1: Standard method: дата публикации июнь 2022 года. – Швейцария : ISO, 2022. – 12 с.

49. ASTM D1238-23 Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer : дата публикации 01 февраля 2023 года. – США : ASTM International, 2023. – 19 с.

50. ГОСТ Р 57950-2017 (ИСО 6721-10:2015). Пластмассы. Определение механических свойств при динамическом нагружении. Часть 10.

Комплексная вязкость при сдвиге с использованием колебательного реометра с параллельными пластинами: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 ноября 2017 г. N9 1749-ст .– Москва : Стандартинформ, 2017. – 28 с.

51. ISO 6721-10:2015(E) Plastics - Determination of dynamic mechanical properties - Part 10: Complex shear viscosity using a parallel-plate oscillatory rheometer, MOD: дата публикации 15.09.2015. – Швейцария : ISO, 2015. – 11 с.

52. ISO 11443:2005(E) Plastics - Determination of the Fluidity of Plastics Using Capillary and Slit-Die Rheometers (Пластмассы. Определение текучести на вискозиметре с капиллярной или щелевой фильерой): дата публикации 2005-03-01. -– Швейцария : ISO, 2005. – 13 с.

53. ASTM D3835-16 Standard Test Method for Determination of Properties of Polymeric Materials by Means of a Capillary Rheometer : дата публикации 1 мая 2016 года. – США : ASTM International, 2016. – 11 с.

54. ГОСТ ISO 188-2013 Резина и термоэластопласты. Испытания на ускоренное старение и теплостойкость: приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1851-ст введен в действие с 1 января 2015 г. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 24 с.

55. ASTM D3045-18 Standard Practice for Heat Aging of Plastics without Load : дата публикации 01 августа 2018 года. – США : ASTM International, 2018. – 6 с.

56. ASTM D573-04(2019) Standard Test Method for Rubber-Deterioration in an Air Oven : дата публикации 01 ноября 2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 6 с.

57. ASTM D572-04(2019) Standard Test Method for Rubber-Deterioration by Heat and Oxygen : дата публикации 01 ноября 2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 4 с.

58. ISO 4892-2:2013/Amd.1:2021(E) Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 2: Xenon-arc lamps (ISO 4892-2:2013) Пластмассы - Методы воздействия лабораторных источников света - Часть 2: дуговые

лампы ксенона (4892-2:2013 ISO) : дата опубликования август 2021. – Швейцария : ISO, 2021. – 10 с.

59. ASTM D2565-23 Standard Practice for Xenon-Arc Exposure of Plastics Intended for Outdoor Applications : дата публикации 01 октября 2023 года. – США : ASTM International, 2023. – 7 с.

60. ASTM G155-21 Standard Practice for Operating Xenon Arc Lamp Apparatus for Exposure of Materials : дата публикации 01 июля 2021 года. – США : ASTM International, 2021. – 12 с.

61. ГОСТ 9.708-83 (СТ СЭВ 3758-82) Единая система защиты от коррозии и старения. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов: утвержден н введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 декабря 1983 г. № 6358. – Москва : государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 12 с.

62. ISO 4892-3-2015 Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources - Part 3: Fluorescent UV lamps. Пластмассы. Методы экспонирования под лабораторными источниками света. Часть 3. Люминесцентные лампы ультрафиолетового излучения: дата публикации 2015-12-22. – Швейцария : ISO, 2015. – 10 с.

63. ASTM G154-23 Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Materials : дата публикации 01 января 2023 года. – США : ASTM International, 2023. – 12 с.

64. ASTM D4329-21 Standard Practice for Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus Exposure of Plastics : дата публикации 1 июля 2021 года. – США : ASTM International, 2021. – 6 с.

65. ГОСТ 33362-2015 (ISO 4611:2010) Пластмассы. Методы испытаний на стойкость к воздействию влажного тепла, водяной пыли и соляного тумана: приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 октября 2015 г. № 1487-ст введен в действие с 1 июля 2016 г.– Москва : Стандартинформ, 2016. – 20 с.

66. ГОСТ ISO 7326-2015. Межгосударственный стандарт. Рукава резиновые и пластиковые. Определение озоностойкости в статических условиях: приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 марта 2016 г. № 187-ст введен в действие с 1 июля 2017 г. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 12 с.

67. ГОСТ Р ИСО 1431-1-2019 Резина и термоэластопласты. Озоностойкость. Часть 1. Испытания при статической и динамической деформации растяжения: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 сентября 2019 г. N9 701-ст – Москва : Стандартинформ, 2019. – 20 с.

68. ASTM D1149-2018 Standard Test Methods for Rubber Deterioration-Cracking in an Ozone Controlled Environment : дата публикации 01 июня 2018 года. – США : ASTM International, 2018. – 14 с.

69. ГОСТ 9.507-88 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Материалы герметизирующие. Методы испытания: дата введения 01.01.89. – Москва : государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 47с.

70. ГОСТ ISO 1817-2016 Резина и термоэластопласты. Определение стойкости к воздействию жидкостей: приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 мая 2017 г. № 393-ст введен в действие с 01 июля 2018 г. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 28 с.

71. ASTM D471-16a (2021) Standard Test Method for Rubber Property-Effect of Liquids : дата публикации 01 мая 2021 года. – США : ASTM International, 2021. – 16 с.

72. ГОСТ 12020-2018 (ISO 175:2010) Пластмассы. Методы определения стойкости к действию химических сред: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 февраля 2018 г. № 108-ст введен в действие с 1 октября 2018 г. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 28 с.

73. ASTM D543-21 Standard Practices for Evaluating the Resistance of Plastics to Chemical Reagents : дата публикации 01 декабря 2021 года. – США : ASTM International, 2021. – 8 с.

74. ISO 22088-1:2006(E) Plastics — Determination of resistance to environmental stress cracking (ESC) — Part 1: General guidance: дата публикации 2006-08-15. – Швейцария : ISO, 2006. – 9 с.

75. ГОСТ 9.060-75 Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Ткани. Метод лабораторных испытаний на устойчивость к микробиологическому разрушению: Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 15.12.75 № 3899 срок действия установлен с 01.01.77. – Москва : государственный комитет стандартов совета министров СССР, 1977. – 11 с.

76. ASTM G160-12(2019) Standard Practice for Evaluating Microbial Susceptibility of Nonmetallic Materials By Laboratory Soil Burial: дата публикации 15 марта 2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 3 с.

77. ISO 846-1997 (E) Plastics - Evaluation of the Action of Microorganisms. Пластмассы. Оценка воздействия микроорганизмов: дата публикации 1997-06-15. – Швейцария : ISO, 1997. – 11 с.

78. ГОСТ Р 57859-2017 Композиты полимерные. Методы испытаний на воздействие плесневых грибов: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 октября 2017 г. N9 1567-ст. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

79. ISO 846-1997 Plastics - Evaluation of the Action of Microorganisms. Пластмассы. Оценка воздействия микроорганизмов: дата публикации 1997-06-15. – Швейцария : ISO, 20973. – 11 с.

80. ASTM G21-15(2021)e1 Standard Practice for Determining Resistance of Synthetic Polymeric Materials to Fungi: дата публикации 15 мая 2021 года. – США : ASTM International, 2021. – 6 с.

81. ASTM G22-23 Standard Practice for Determining Resistance of Plastics to Bacteria: дата публикации 01 февраля 2023 года. – США : ASTM International, 2023. – 3 с.

82. ГОСТ Р ИСО 14855-2-2024 Пластмассы. Определение способности к полному аэробному биологическому разложению и распаду в контролируемых условиях компостирования: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 мая 2024 г. № 663-ст. – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – 20 с.

83. ГОСТ Р 57224—2016. (ИСО 14855-1.2012). Определение способности к полному аэробному биологическому разложению и распаду в контролируемых условиях компостирования: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 ноября 2016 г. N 1608-ст. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 24 с.

84. ГОСТ 11012-2017 Пластмассы. Метод испытания на абразивный износ: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 9 августа 2017 г. № 848-ст введен в действие с 1 июля 2018 г. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 12 с.

85. DIN ISO 9352-2018 Plastics - Determination of resistance to wear by abrasive wheels (ISO 9352:2012). Пластмассы. Определение износостойкости с помощью абразивного шлифовального круга : дата введения в действие: 01 августа 2018 года. – Германия : German Institute for Standardisation, 2018. – 14 с.

86. ASTM D4060-2019 Standard test method for abrasion resistance of organic coatings by the taber abraser. Стандартный метод испытания стойкости органических покрытий к истиранию абразивным устройством Табера: дата публикации 01 октября 2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 6 с.

87. ISO 19252:2008 Determination of scratch properties: дата публикации 2008-12-15. – Швейцария : ISO, 2008. – 11 с.

88. ASTM D7027-20 Standard Test Method for Evaluation of Scratch Resistance of Polymeric Coatings and Plastics Using an Instrumented Scratch Machine: дата публикации 01 сентября 2020 года. – США : ASTM International, 2020. – 9 с.

89. ГОСТ ISO 4649-2024 Резина и термоэластопласты. Определение сопротивления истиранию с использованием вращающегося цилиндрического барабанного устройства: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 июня 2024 г. № 871-ст введен в действие с 1 июля 2025 г. с правом досрочного применения. – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – 28 с.

90. DIN ISO 4649-2014. Каучук вулканизированный и термопластичный. Определение сопротивления истиранию с применением вращающегося цилиндрического барабана : дата публикации 01 марта 2014 года. – Германия : German Institute for Standardisation, 2014. – 26 с.

91. ГОСТ ISO 12947-2-2021 Материалы текстильные. Определение стойкости текстильных материалов к истиранию по методу Мартиндейла. Часть 2: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 апреля 2023 г. № 269-ст введен в действие с 1 июля 2023 г.– Москва : Российский институт стандартизации, 2023. – 20 с.

92. ASTM D4966-22 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Textile Fabrics (Martindale Abrasion Tester Method) : дата публикации 1 ноября 2022 года. – США : ASTM International, 2022. – 5 с.

93. ASTM D2228-04(2019) Standard Test Method for Rubber Property-Relative Abrasion Resistance by Pico Abrader Method: дата публикации 01 ноября 2019 года. – США : ASTM International, 2019. – 9 с.

94. ASTM G77-17(2022) Standard Test Method for Ranking Resistance of Materials to Sliding Wear Using Block-on-Ring Wear Test: дата публикации 1 ноября 2022 года. – США : ASTM International, 2022. – 11 с.

95. ASTM E84 / UL 723 «Туннельный тест» : дата публикации 01 апреля 2019 года. – США : ASTM International, 2024. – 28 с.

96. ГОСТ Р ИСО 5660-1-2020. Национальный стандарт Российской Федерации. Испытания по определению реакции на огонь. Интенсивности тепловыделения, дымообразования и потери массы. Часть 1. Определение интенсивности тепловыделения методом конического калориметра и интенсивности дымообразования измерениями в динамическом режиме: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 октября 2020 г. № 923-ст. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 50 с.

97. ГОСТ IEC 60332-3-21-2024. Испытания электрических и оптических кабелей в условиях воздействия пламени. Часть 3-21. Испытание на распространение пламени по вертикально расположенным пучкам проводов или кабелей. Категория A F/R: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 октября 2024 г. № 1514-ст межгосударственный стандарт ГОСТ IEC 60332-3-21— 2024 введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2025 г. – Москва : Российский институт стандартизации, 2024. – 12 с.

98. ГОСТ 15139-69 (СТ СЭВ 891-78). Пластмассы. Метод определения плотности (объемной массы) : Постановлением Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР от 17 декабря 1969 г. № 1365 срок введения установлен с 01.07.70. – Москва : государственный комитет СССР по стандартам, 1970. – 18 с.

99. DIN EN ISO 1183-1-2019 Plastics - Methods for determining the density of non-cellular plastics - Part 1: Immersion method, liquid pycnometer method and titration method (ISO 1183-1:2019, Corrected version 2019-05); German version EN ISO 1183-1:2019 : дата публикации 01.09.2019. – Германия : German Institute for Standardisation, 2019. – 19 с.

100. ASTM D792-20 Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement: дата публикации 01.07.2020. – США : ASTM International, 2019. – 6 с.

101. ГОСТ 21341-75 Пластмассы и эбонит. Метод определения теплостойкости по Мартенсу: ПРИНЯТ Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 8 декабря 1975 г. № 3811. – Москва : государственный комитет СССР по стандартам, 1974. – 10 с.

102. ГОСТ 34371-2017 (ISO 75-1:2013) Пластмассы. Определение температуры прогиба под нагрузкой. Часть 1. Общий метод испытания: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 января 2016 г. № 26-ст введен в действие с 1 октября 2018 г. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 12 с.

103. ASTM D746-20 Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastics and Elastomers by Impact: дата публикации 06-01-2020. – США : ASTM International, 2020. – 75 с.

104. ASTM D1790-21 Standard Test Method for Brittleness Temperature of Plastic Sheeting by Impact: дата публикации 02-10-2021. – США : ASTM International, 2021. – 4 с.

105. ГОСТ Р ИСО 815-1-2017 Резина и термоэластопласты. Определение остаточной деформации при сжатии: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 июля 2017 г. Np 703-ст. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 15 с.

106. ISO 2921:2011(R) Rubber, vulcanized – Determination of low-temperature retraction (TR test) : дата публикации 2011-10-15. – Швейцария : ISO, 2011. – 10 с.

107. AENOR UNE-ISO 2921-2017 Rubber, vulcanized. Determination of low temperature retraction (TR test) : дата принятия 12.07.2017. – Испания : AENOR, 2017 – 15 с.

108. ASTM D1329-16(2021) Standard Test Method for Evaluating Rubber Property-Retraction at Lower Temperatures (TR Test) : дата публикации 01 мая 2021 года.. – США : ASTM International, 2021. – 5 с.

109. ГОСТ Р 55134-2012 (ИСО 11357-1:2009) Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Часть 1. Общие принципы: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 16 ноября 2012 г. № 923-ст. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 27 с.

110. ASTM D3418-2015 Standard Test Method for Transition Temperatures and Enthalpies of Fusion and Crystallization of Polymers by Differential Scanning Calorimetry: дата публикации 01.05.2015. – США : ASTM International, 2015. – 7 с.

111. ISO 458-1:1985 Plastics – Determination of stiffness in torsion of flexible materialsPart 1: General method: дата публикации 1985-03-15. – Швейцария : ISO, 1985. – 8 с.

112. ASTM D1043-16 Standard Test Method for Stiffness Properties of Plastics as a Function of Temperature by Means of a Torsion Test: дата публикации 01.09.2016. – США : ASTM International, 2019. – 12 с.

113. ГОСТ 32657-2014 (ISO 75-1:2013) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение температуры изгиба под нагрузкой: Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 мая 2014 г. № 471-ст межгосударственный стандарт ГОСТ 32657—2014 (ISO 75-1:2013, ISO 75-3:2004) введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 сентября 2015 г. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 20 с.

114. ASTM D648-18 Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics Under Flexural Load in the Edgewise Position: дата публикации 23 апреля 2018 года. – США : ASTM International, 2018. – 14 с.

Электронное учебное издание

Данил Дементьевич ЕФРЮШИН

Александр Анатольевич БЕУШЕВ

АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛАСТМАСС И РЕЗИН

Учебное пособие

по дисциплинам «Структура и свойства полимерных материалов», «Химия и физика полимеров», «Приборы и методы определения химического состава веществ и материалов» для студентов направлений: 18.03.01 и 18.04.01 «Химическая технология»

Технический редактор Т. А. Стопорева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.

В начало


9 785756 815399