

УДК 678.686:620.17

ВЛИЯНИЕ ТИПА И СОДЕРЖАНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ СМОЛ

Шакиров С.М.

студент кафедры автоматизации технологических процессов и производств СамГТУ

e-mail: shakirov_sm_14@gmail.com

Аннотация

Рассмотрено влияние природы дисперсного наполнителя, его содержания и межфазного взаимодействия на прочность и деформационные характеристики эпоксидных металлополимеров. На основании опубликованных экспериментальных исследований сопоставлены системы с порошками алюминия и железа, а минеральные частицы предложены в качестве контрольной неметаллической группы. Показано, почему результаты испытаний при растяжении и сжатии не следует объединять в один показатель «прочности», а массовую концентрацию наполнителя – напрямую сравнивать с объемной. Предложена воспроизводимая методика изготовления серий образцов, измерения плотности, испытаний при растяжении и сжатии, анализа разрушения и статистической обработки результатов. Количественные значения, приведенные при обсуждении, относятся к конкретным опубликованным работам; собственные лабораторные испытания не заявляются. Определены источники разброса и критерии выбора концентрации наполнителя для инженерного применения.

Ключевые слова: эпоксидная смола, металлополимер, порошок алюминия, порошок железа, дисперсный наполнитель, прочность при растяжении, прочность при сжатии, модуль упругости, статистическая обработка.

THE INFLUENCE OF THE TYPE AND CONTENT OF FILLER ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF METAL-POLYMERS BASED ON EPOXY RESINS

Shakirov S.M.

Student of the Department of Automation of Technological Processes and Productions, Samara State Technical University

e-mail: shakirov_sm_14@gmail.com

Abstract

This paper reviews how particulate filler type, loading level and interfacial adhesion affect the mechanical behavior of epoxy-based metal-polymer composites. Published studies on aluminum- and iron-filled epoxies are analyzed, while a mineral filler is proposed as a nonmetallic control. The paper distinguishes tensile and compressive responses as well as mass and volume fractions. A reproducible laboratory protocol is developed for specimen fabrication, density measurements, tensile and compression testing, fracture examination and statistical analysis. Quantitative observations are attributed to published studies and are not presented as new experimental measurements. Factors governing variability and the selection of practical filler loadings are discussed.

Keywords: epoxy resin, metal-polymer composite, aluminum powder, iron powder, particulate filler, tensile strength, compressive strength, elastic modulus, experimental design.

Введение

Эпоксидные полимеры применяют в клеевых составах, защитных покрытиях, ремонтных материалах, заливочных компаундах и технологической оснастке. Их преимущества связаны с несколькими свойствами: технологичностью отверждения, адгезией к различным основаниям и возможностью регулирования характеристик – подбором отвердителя и наполнителя. Однако ненаполненная термореактивная матрица может обладать невысокой трещиностойкостью, а ее механическое поведение зависит от температуры,

времени отверждения и скорости приложения нагрузки. Твердые частицы изменяют жесткость, распределение напряжений и характер повреждения материала.

Особую группу образуют металлополимеры, в которых полимерная матрица содержит порошок алюминия, железа, чугуна или другого металла. Такой наполнитель вводят не только ради механической прочности – он способен изменять теплопроводность, электрические характеристики, плотность и способность изделий к механической обработке. Но увеличение содержания металлических частиц не гарантирует роста предела прочности. При нарушении смачивания, образовании агломератов и пор межфазная область становится источником локальных напряжений; это, в свою очередь, способствует преждевременному разрушению.

Цель статьи – систематизировать экспериментально установленные закономерности влияния типа и концентрации металлического наполнителя на механические свойства эпоксидных композитов и предложить методику независимой лабораторной проверки. Для достижения цели рассматриваются способы задания концентрации, механизмы передачи нагрузки, опубликованные количественные данные, правила подготовки образцов и статистического сравнения серий. Исследование носит обзорно-методический характер; результаты непроведенных испытаний не приводятся.

Методы и методики

Эпоксидный металлополимер представляет собой неоднородную систему, состоящую из отвержденной связующей фазы, частиц металла и межфазных слоев. Механическое поведение определяется модулем упругости компонентов, распределением размеров частиц, их формой, объемной концентрацией, качеством смачивания и остаточными напряжениями после полимеризации. Даже одинаковый химический состав порошка не гарантирует совпадения результата при изменении способа измельчения, состояния оксидной пленки или содержания влаги на поверхности.

Порошок алюминия характеризуется меньшей плотностью, чем железный или чугунный порошок. Поэтому добавление одинаковых массовых долей разных металлов дает разные объемные количества включений, а, следовательно, разную площадь их взаимодействия с матрицей и разное расстояние между частицами. Прямое сравнение только по массовым процентам может приводить к ложному выводу, что один металлический наполнитель действует эффективнее другого. В экспериментальном протоколе необходимо сохранять обе формы представления состава.

При отсутствии заметной пористости объемную долю частиц можно оценить через массу компонентов и их истинную плотность. Для двухкомпонентной системы с массами наполнителя m_n и матрицы m_m и плотностями ρ_n и ρ_m выражение имеет вид:

$$\varphi_n = \frac{\frac{m_n}{\rho_n}}{\left[\left(\frac{m_n}{\rho_n}\right) + \left(\frac{m_m}{\rho_m}\right)\right]}, \quad (1)$$

где φ_n – расчетная объемная доля порошка до учета технологических пустот.

Обратный переход к массовой концентрации производится по тому же соотношению объемов и плотностей. В системе с высокой долей порошка необходимо дополнительно оценивать захват воздуха, поскольку фактическая плотность сформованного изделия может оказаться ниже расчетной по составу.

Механизм усиления при небольших концентрациях нередко объясняют ограничением локальной деформации полимерной матрицы жесткими включениями и перераспределением напряжений через границу фаз. Однако при растяжении включения могут инициировать, отрыв по межфазной поверхности, тогда как при сжатии условия нагружения меняются: геометрия контактов и перераспределение нагрузки становятся иными. В этих условиях частицы способны участвовать в формировании опорных цепочек – и тем самым препятствовать деформации матрицы. По этой причине тенденции прочности при растяжении и сжатии иногда расходятся, что имеет значение для применения металлополимеров в ремонтных деталях и технологических приспособлениях.

Существенный вклад в понимание поведения эпоксидных материалов с металлическими включениями внесли исследования железонаполненных композитов. В

работе P. S. Theocaris, G. C. Papanicolaou и E. A. Kontou изучалось влияние объемной доли железного порошка и скорости растяжения на модуль упругости, максимальную нагрузку, предельную деформацию и энергию разрушения [1]. Показательно, что уже сам набор показателей выявляет ограниченность анализа, опирающегося только на прочность: повышение жесткости может сопровождаться уменьшением деформационной способности – при сохранении общей логики механического отклика материала.

В исследовании E. Sideridis, P. S. Theocaris и E. Kontou для композитов железно-эпоксидная смола определяли динамические модули накопления и потерь в зависимости от содержания наполнителя, температуры и частоты нагружения [2]. Результаты указывают на необходимость фиксировать условия испытаний. Динамический модуль, полученный при заданной частоте, не равен статическому модулю при одноосном растяжении, поэтому эти измерения нельзя механически объединять в одну таблицу без разделения методов.

Для алюминиевого порошка S. Goyanes и соавторы изучали механические свойства эпоксидной матрицы в испытаниях на сжатие с учетом концентрации частиц и скорости деформирования [3]. Авторы также применили анализ позитронной аннигиляции для интерпретации микроструктурных изменений. Работа показывает, что влияние наполнителя может проявляться через изменение свободного объема и внутреннего напряженного состояния, а не только через простую линейную зависимость модуля от концентрации.

В более позднем исследовании эпоксидно-алюминиевых композитов при нескольких режимах нагружения показано, что оптимальное содержание зависит от вида испытания [4]. При квазистатическом сжатии образец с 1 об. % алюминия имел указанный авторами предел текучести 85,92 МПа против 63,8 МПа для исходной эпоксидной матрицы; увеличение составило 34,67 %. Для растяжения при том же содержании сообщена прочность 30,67 МПа, а при более высоких концентрациях тенденция усиления изменялась. Эти значения следует относить только к рецептуре, форме порошка и режимам испытаний соответствующей публикации.

Результаты с алюминиевым наполнителем дополнительно подтверждают, что состав, обеспечивающий высокую прочность при сжатии, не обязан быть оптимальным по удлинению или сопротивлению разрушению при растяжении. В работе N. N. Rozik и соавторов изучены эпоксидные материалы с алюминием и гибридными частицами алюминия и никеля; наибольшая прочность при сжатии для рассмотренной серии алюминиевого порошка отмечалась при 20 мас. % [5]. Это не противоречит выводу о локальном оптимуме при 1 об. % в другой работе: сравнивались отличающиеся матрицы, содержание частиц выражено в разных единицах и могли различаться режимы изготовления.

Для материалов с порошком серого чугуна опубликованы работы о составе, механических свойствах и особенностях отверждения. В частности, для композита с 65 мас. % чугунного порошка и выбранным режимом отверждения указаны значения прочности 28,35 МПа при растяжении, 55,4 МПа при изгибе и 53,8 МПа при сжатии [6]. Данные нельзя трактовать как доказательство превосходства чугуна над алюминием: в сопоставленных публикациях отличаются содержание наполнителя, рецептура связующего, температура отверждения, форма образцов и скорость испытания (табл. 1).

Таблица 1 – Опубликованные результаты, характеризующие влияние металлического наполнителя

Система	Условие и показатель	Опубликованное наблюдение	Источник
Эпоксид/Al	1 об. %; квазистатическое сжатие	85,92 МПа против 63,8 МПа у матрицы	[4]
Эпоксид/Al	1 об. %; прочность при растяжении	30,67 МПа в указанной рецептуре	[4]
Эпоксид/Al	20 мас. %; сжатие	Максимум в исследованном ряду составов	[5]
Эпоксид/серый чугун	65 мас. %; режим отверждения 130 °С, 90 мин	28,35 МПа (раст.); 53,8 МПа (сж.)	[6]

В отдельной работе по эпоксидным композитам с переработанным чугуном порошком оценивались плотность, твердость, ударные, изгибные и растягивающие свойства [7]. Авторы отмечали разнонаправленные зависимости различных показателей от концентрации порошка. Практический вывод состоит в необходимости многокритериального выбора состава: если изделие работает преимущественно на сжатие, приоритет будет одним, а для нагруженного растяжением клеевого соединения – другим.

Данные табл. 1 принадлежат разным экспериментам и не образуют общего факторного плана. По ним нельзя строить единую регрессию «процент порошка – прочность» или выполнять межлабораторный дисперсионный анализ без исходных измерений и учета различий рецептур. Их назначение – показать диапазон инженерных постановок и необходимость отдельного контроля метода испытаний и режима отверждения.

Результаты

Для воспроизводимого сравнения следует использовать одну партию эпоксидной смолы и отвердителя. Необходимо обеспечить одинаковую историю хранения и единый температурно-временной режим полимеризации; именно это снижает влияние побочных технологических различий на сопоставление серий. В качестве основных групп выбирают алюминиевый и железный порошки, а при необходимости вводят контрольную неметаллическую серию с кварцевой мукой. Последняя не относится к металлополимерам – ее используют только для отделения эффекта металлической природы частиц от общего эффекта присутствия твердого дисперсного наполнителя.

Серии рекомендуется формировать по объемной доле наполнителя 0%, 5%, 10%, 15% и 20%. Эти значения представляют проект экспериментального плана, а не результаты подготовленных образцов; по этой причине их нельзя интерпретировать как уже достигнутые составы. При высокой вязкости смеси верхняя граница может быть снижена после предварительной оценки технологичности. Для каждой комбинации «тип × содержание» желательно изготовить не менее пяти независимых образцов на каждый вид испытания, а число повторений – уточнить, по предварительной оценке, разброса и требуемой статистической мощности.

Порошок необходимо просеять или охарактеризовать по гранулометрическому составу, затем высушить при условиях, допустимых для используемого материала. До введения в связующее его хранят в закрытой таре; это позволяет исключить неконтролируемое изменение состояния наполнителя. В протокол заносят медианный размер частиц, форму, истинную плотность и наличие поверхностной обработки. Не следует смешивать в одной серии порошки с существенно различающейся крупностью, если целью остается оценка собственно химической природы наполнителя. Иначе фактор «тип металла» окажется спутанным с размером частиц – при сохранении формального различия только по материалу.

Смолу предварительно кондиционируют при одинаковой температуре. Наполнитель вводят порциями при регламентированной скорости перемешивания, после чего добавляют отвердитель в массовом соотношении, указанном производителем смоляной системы. Для корректного сравнения следует сохранять не только номинальные пропорции, но и последовательность операций, продолжительность перемешивания, температуру и время до заливки. При наличии вакуумного оборудования смесь дегазируют; вместе с тем чрезмерное время вакуумирования недопустимо для систем с короткой жизнеспособностью – из-за ограничения по рабочему времени состава.

Образцы формуют в одинаковых формах и отверждают по утвержденной технологической карте. Все партии маркируют слепыми идентификаторами, что снижает риск произвольного выбора «удачных» образцов; подобная процедура делает сравнение серий более нейтральным на стадии отбора. После отверждения измеряют геометрию и массу каждого образца, а также фиксируют видимые поры и усадочные дефекты. Образцы с дефектами не удаляют произвольно: заранее задают критерии браковки, отдельно публикуют

число исключений и причину каждого случая – для прозрачности экспериментальной процедуры (табл. 2).

Таблица 2 – Предлагаемый факторный план лабораторного исследования

Фактор	Уровни	Контроль
Наполнитель	Без наполнителя; Al; Fe; дополнительно SiO ₂	Одинаковая матрица и отвердитель
Объемная доля	0; 5; 10; 15; 20 %	Пересчет в мас. % по плотностям
Геометрия частиц	По результатам измерения	Отдельно фиксировать форму и размер
Метод нагружения	Растяжение; сжатие	Отдельные серии образцов
Повторность	Не менее 5 на комбинацию и испытание	Независимая подготовка и случайный порядок

План позволяет оценивать основные эффекты металла и концентрации, а также их взаимодействие при условии, что технологические параметры действительно постоянны. Статистической единицей является независимо изготовленный образец, а не многократное считывание показаний одного и того же образца. Если все пять образцов изготовлены из одной замесной партии, необходимо учитывать возможный партийный эффект, иначе точность оценки будет завышена.

Испытания при растяжении проводят на универсальной разрывной машине с поверенным датчиком силы и устройством для измерения деформации. Для пластмасс ориентиром служит стандарт ASTM D638, а при сжатии – ASTM D695 [8, 9]. Форма и размеры образца, скорость перемещения захватов, условия кондиционирования и критерий окончания испытания выбираются по применимой редакции стандарта и документируются. При смене стандарта или типоразмера образца полученные значения не следует считать автоматически сопоставимыми.

По диаграмме «сила – удлинение» определяют условное напряжение и относительную деформацию, используя исходное сечение A_0 и расчетную длину l_0 . При малых деформациях модуль Юнга оценивают по наклону линейного участка кривой «напряжение – деформация»; расчет выполняют в пределах области, где зависимость сохраняет линейный характер. При этом необходимо различать деформацию, измеренную экстензометром на рабочей части, и перемещение траверсы, поскольку последнее включает податливость испытательной машины и захватов.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon}, \quad (2)$$

Предел прочности при растяжении соответствует максимальному инженерному напряжению в установленных условиях. Для хрупкого эпоксидного материала дополнительно указывают деформацию разрушения и характер излома; эти параметры фиксируют вместе с основным прочностным показателем. Повышение модуля упругости без сохранения прочности и предельной деформации может свидетельствовать о росте жесткости ценой повышенной чувствительности к трещинообразованию – поэтому все три свойства необходимо приводить совместно.

При сжатии регистрируют усилие и изменение высоты образца. Одновременно контролируют соосность приложения нагрузки и наличие бокового выпучивания, поскольку эти факторы влияют на интерпретацию полученных значений. Для вязкопластического поведения необходимо отдельно определять предел текучести либо напряжение при заданной деформации; максимальное усилие при этом не всегда связано с разрушением. Для хрупкого разрушения, напротив, может быть установлен отчетливый пик напряжения, как характеристика предельного состояния материала. Сравнение «предела текучести при сжатии» одной серии с «пределом прочности при разрушении» другой без указания критериев методически ошибочно.

Плотность сформованного образца рекомендуется определять независимо от расчетной плотности смеси. Разница между расчетной и измеренной величинами может быть индикатором пористости, однако для окончательного вывода следует учитывать усадку, неполное отверждение и погрешности измерений. Морфологию поверхности излома исследуют оптической или электронной микроскопией: характерные признаки включают, отрыв матрицы от частиц, агломераты, воздушные полости и траектории распространения трещин. Наиболее убедительная интерпретация механических результатов возникает при совместном анализе деформационных кривых и микроструктуры.

Для проверки устойчивости выводов желательно повторять испытания после заданного срока выдержки либо при одной дополнительной температуре, если предполагается эксплуатация вне обычных лабораторных условий. Изменение температуры воздействует на эпоксидную матрицу и межфазный слой, и оптимальная доля наполнителя в теплой среде может отличаться от найденной при комнатной температуре. Подобные дополнительные серии следует планировать заранее, не подбирая условия по максимально благоприятному результату.

Первичная обработка включает расчет среднего значения, стандартного отклонения и доверительного интервала для каждой комбинации факторов. Все индивидуальные результаты сохраняют в таблице данных с указанием партии, типа порошка, концентрации, фактической плотности и режима испытания. Аномальные наблюдения рассматривают по журналу испытаний; удаление точки только из-за ее удаленности от среднего недопустимо. При малом числе повторов предпочтительнее дополнительно показывать индивидуальные значения и интервалы, а не ограничиваться столбчатой диаграммой.

$$\bar{x} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n x_i, \quad s = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}\right]}, \quad (3)$$

Если имеются две разновидности металла и несколько концентраций, для каждого вида нагружения можно применить двухфакторную модель с эффектом типа наполнителя, доли и их взаимодействия. Использование дисперсионного анализа требует проверки структуры остатков, сопоставимости дисперсий и независимости повторов; при нарушении предпосылок выбирают устойчивые методы или бутстреп по независимым партиям. Значимость эффекта следует сопровождать оценкой его величины, поскольку при инженерном выборе важнее реальный прирост прочности, чем одно лишь малое p -значение.

Для анализа возможной нелинейности зависимости допускается использовать квадратичную регрессию по объемной доле наполнителя. Ее коэффициенты не обладают универсальным физическим смыслом и должны определяться отдельно для заданных матрицы, типа порошка и испытания. Если максимум функции попадает вне изученного диапазона, нельзя выдавать его за установленную оптимальную концентрацию. В отличие от монотонной линейной аппроксимации, квадратичная модель позволяет предварительно выявить возможный пик прочности, но нуждается в проверке на независимой серии.

$$\sigma_u(\varphi) = \beta_0 + \beta_1\varphi + \beta_2\varphi^2 + e, \quad \varphi \in [\varphi_{min}, \varphi_{max}], \quad (4)$$

Для инженерного сопоставления желательно приводить относительное изменение показателя относительно ненаполненного контроля, испытанного в той же партии. Такой способ уменьшает влияние межлабораторных различий в свойствах матрицы. Вместе с тем процентное улучшение нельзя рассматривать без исходного значения: прирост от 20 до 30 МПа и от 80 до 120 МПа одинаков по относительной величине, но применимость материалов различается.

$$\Delta\sigma_u = \left[\frac{\sigma_{uH} - \sigma_{u0}}{\sigma_u}, 0\right] \cdot 100 \%, \quad (5)$$

Неопределенность оценки включает разброс между образцами и систематические составляющие, связанные с измерением силы, геометрии и деформации. В отчете необходимо указывать калибровочный статус оборудования и разрешение измерительных каналов; без этих данных корректная интерпретация точности затруднена. Если установлено статистически значимое взаимодействие типа наполнителя и концентрации, недопустимо обсуждать

«средний эффект железа» без уточнения уровня содержания – различие между металлами может менять знак в зависимости от доли частиц.

Обсуждение

С технологической точки зрения введение металлического порошка увеличивает вязкость исходной композиции. Этот эффект особенно выражен при высокой удельной поверхности и широком распределении размера частиц, поскольку структура суспензии усложняется. Возрастание вязкости затрудняет удаление пузырьков и заполнение тонкостенных форм; по этой причине реальный прирост модуля упругости может сопровождаться снижением фактической прочности из-за пористости. Желательно измерять реологические характеристики смеси – либо хотя бы фиксировать время течения и пригодность к заливке при одинаковой температуре.

Для алюминиевого порошка существенны состояние поверхности и оксидного слоя, а для железного порошка – возможное окисление во время хранения. Предварительная химическая обработка частиц может повысить адгезию, но становится дополнительным фактором эксперимента. Если цель заключается в прямом сравнении металлов, то обработку и условия хранения следует стандартизовать; если цель – получить лучший промышленный материал, сравнительному плану потребуется отдельная группа поверхностно-модифицированных порошков.

При практическом проектировании выбор наполнителя определяется не только максимальной прочностью. Высокое содержание железа увеличивает плотность изделия, что может быть допустимо для ремонтного посадочного элемента, но нежелательно для подвижной детали. Алюминий позволяет снизить массу по сравнению с железным порошком при равной объемной концентрации, хотя стоимость и технологическая доступность конкретной фракции также имеют значение. По этой причине итоговая оценка должна учитывать удельные характеристики, стоимость изготовления и стабильность свойств при эксплуатации.

Заключение

Проведенный обзор подтверждает, что тип и содержание дисперсного металлического наполнителя существенно влияют на механическое поведение эпоксидных материалов. При этом направление изменения свойств определяется режимом нагружения и характеристиками межфазного контакта; именно поэтому сопоставление результатов требует отдельного учета условий испытания. Исследования железных, алюминиевых и чугунных наполнителей демонстрируют необходимость отдельно рассматривать прочность при растяжении, прочность при сжатии, модуль упругости и деформацию разрушения. Показательно, что показатели, полученные при разном составе матрицы и разных условиях испытаний, нельзя сводить к универсальному ранжированию порошков – такая процедура методически некорректна.

Разработан план исследования с контролем типа частиц, их объемной доли и параметров изготовления. В него включены независимые образцы, измерение плотности, стандартизованные испытания и анализ изломов; тем самым фиксируются ключевые переменные, влияющие на интерпретацию результатов. Описаны методы расчета механических характеристик, оценки разброса и двухфакторного анализа влияния металла и концентрации. Особое внимание уделено переходу между массовой и объемной долями – поскольку этот выбор непосредственно влияет на корректность сравнения наполнителей с различной плотностью.

Литература

1. Theocaris P. S., Papanicolaou G. C., Kontou E. A. The effect of filler-volume fraction and strain rate on the tensile properties of iron-epoxy particulate composites // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1982. Vol. 1, № 3. PP. 206-224.

2. Sideridis E., Theocaris P. S., Kontou E. Dynamic mechanical properties of particulates: application to iron-epoxy composites // *Polymer Composites*. 1986. Vol. 7, № 1. PP. 1-8.
3. Goyanes S., Rubiolo G., Marzocca A. [et al.]. Yield and internal stresses in aluminum filled epoxy resin. A compression test and positron annihilation analysis // *Polymer*. 2003. Vol. 44, № 11. PP. 3193-3199.
4. Response characteristics and particle contributions of epoxy resin composite embedded with Al particles under different loading modes // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 34. PP. 2260-2272.
5. Rozik N. N., Asaad J. N., Mansour S. H., Gomaa E. Effect of aluminum and aluminum/nickel hybrid fillers on the properties of epoxy composites // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*.
6. Epoxy composites with post-production gray cast-iron powders // *Polymers*. 2024. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11395725/> (дата обращения: 21.10.2026).
7. The effect of metal filler on the mechanical performance of epoxy resin composites // *Engineering Proceedings*. URL: <https://www.mdpi.com/2673-4591/59/1/200> (дата обращения: 21.10.2026).
8. ASTM D638. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. URL: <https://www.astm.org/d0638.html> (дата обращения: 21.10.2026).
9. ASTM D695-26. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. ASTM International, 2026.