



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 620.18

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.036



МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ПОЛИУРЕТАНОВ С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

Максим Петрович Данилаев¹, Сергей Алексеевич Карандашов²,
Владимир Александрович Куклин³, Арсений Валерьевич Поляев⁴,
Юлия Алексеевна Тунакова⁵, Константин Владимирович Файзуллин⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

¹ danilaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7733-9200>

² seregak2005@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7608-6531>

³ iamkvova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-5837>

⁴ AVPolayev@kai.ru

⁵ YuATunakova@kai.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8826-8639>

⁶ KVFayzullin@kai.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4507-058X>

³ Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Аннотация. Выбор материала модельного пластика, используемого в технологиях формирования изделий из полимерных композиционных материалов, обусловлен, в первую очередь, требованиями к его механическим и теплофизическим характеристикам. Обеспечить выполнение этих требований возможно как за счет подбора компонентов полиуретана, так и за счет подбора типа дисперсных частиц наполнителя. В работе обоснована целесообразность использования дисперсных частиц, не обладающих влагопоглощением. Показано, что основной причиной снижения предела прочности композиции полиуретана с дисперсным наполнителем, обладающим влагопоглощением, является изменение структуры макромолекул полиуретана. Отмечено незначительное повышение твердости и коэффициента линейного температурного расширения композита при использовании таких частиц.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, дисперсные частицы наполнителя.

Благодарности: Научные исследования выполнены за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ (Приоритет-2030). Тунакова Ю.А. признательна поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения обязательств по Соглашению номер № 075-03-2024-067 от 17.01.2024 г. в части приобретения и подготовки частиц цеолита.

Для цитирования: Механические свойства оснастки на основе полимерной композиции из полиуретанов с дисперсным наполнением / М. П. Данилаев [и др.] // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 205–211. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.036. EDN: <https://elibrary.ru/RSNOMD>.

Original article

MECHANICAL PROPERTIES OF DISPERSED FILLER POLYURETHANE COMPOSITION

Maxim P. Danilaev¹, Sergey A. Karandashov², Vladimir A. Kuklin³,
Arsenii V. Polyayev⁴, Julia A. Tunakova⁵, Konstantin V. Fayzullin⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

¹ danilaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7733-9200>

² seregak2005@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7608-6531>

³ iamkvova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-5837>

⁴ AVPolayev@kai.ru

⁵ YuATunakova@kai.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8826-8639>

⁶ KVFayzullin@kai.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4507-058X>

³ Kazan Federal University, Kazan, Russia

Abstract. The mechanical and thermal characteristics are determining the model plastics components, that using for making the construction from polymer composites. The polyurethane components selection or dispersed filler selec-

© Данилаев М. П., Карандашов С. А., Куклин В. А., Поляев А. В., Тунакова Ю. А., Файзуллин К. В., 2025

tion can enforce these requirements. The using of dispersed filler that do not have moisture absorption is feasibility for these purposes. The structure of polyurethane macromolecules change is the course of tensile strength decrease in polyurethane composite with dispersed filler that have moisture absorption. A slight increase in the hardness and coefficient of linear thermal expansion of the composite is noted when using such particles.

Keywords: polymer composite materials, dispersed filler particles.

Acknowledgements: The scientific research was carried out using funds from the Strategic Academic Leadership Program of the Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI (Priority-2030). Yu.A. Tunakova is grateful for the support of the Ministry of Education and Science of Russia in the framework of the fulfillment of obligations under Agreement No. 075-03-2024-067 dated 17.01.2024 in terms of the acquisition and preparation of zeolite particles.

For citation: Danilaev, M.P., Karandashov, S.A., Kuklin, V.A., Polyayev, A.V., Tunakova, Yu.A. & Fayzullin, K.V. (2025). Mechanical properties of dispersed filler polyurethane composition. Polzunovskiy vestnik, (3), 205-211. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.036. EDN: <https://elibrary.ru/RSNOMD>.

ВВЕДЕНИЕ

Изготовление изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ), например, элементов конструкций летательных аппаратов, методом инфузии предполагает использование технологической оснастки для выкладки и их полимеризации [1–3]. При выборе материала оснастки учитывают высокую точность изготовления изделий из ПКМ, количество изделий в серии, технологические параметры (используемые смолы, температура их отверждения и пр.). Модельный пластик на основе полиуретанов с дисперсным наполнением широко применяют в качестве материала оснастки при изготовлении небольшой серии изделий из угле- или стеклопластика [2, 3]. Основными требованиями, обычно предъявляемыми к материалу модельного пластика, являются [4, 5]: закрытые ячейки (поры) с размером не более десятков микрон, малое значение коэффициента линейного температурного расширения (КЛТР), относительно низкая плотность ($0,8\div 1,2$ кг/м³), низкая абразивность при обработке, максимально возможное значение предельной прочности при малой предельной деформации. Существуют, по крайней мере, два подхода к обеспечению этих требований при выборе элементов композиции. Во-первых, выбор компонентов полиуретана при его получении. Например, в работе [6] показано, что изменение соотношения между компонентами полиуретана с увеличением доли триола приводит к повышению числа поперечных сшивок между макромолекулами, и, как следствие, к увеличению модуля упругости, предела прочности и уменьшению величины предельной деформации полимера. В работах [7–9] приведены результаты исследований технологии формирования полимеров на основе полиуретанов на их механические свойства. Показано, что технологические условия (выбор компонентов полиуретанов, температура прессформы, содержание влаги) влияют на густоту сшивок между макромолекулами и характерные размеры пор, что определяет, в том числе, КЛТР и плотность таких полимеров. Следует отметить, что пластичность ненаполненных полиуретанов при нагревании возрастает и уже при температурах около 50 °С оказывается значительной, что не позволяет обеспечить высокую точность изготовления деталей из ПКМ при горячем отверждении [8, 10].

Второй подход к обеспечению заданных требований модельного пластика основан на выборе типа и концентрации дисперсных частиц. Так, в работе [11] показано снижение размера пор и повышения количества закрытых ячеек при концентрации дисперсных частиц наполнителя более 15 %. Механические свойства композиций полиуретана с дисперсными частицами наполнителя определяются не только механическими свойствами компонентов композиции [12–14], но и способностью дисперсных частиц поглощать влагу. Это обусловлено тем, что вода, содержащаяся в компонентах полиуретана, влияет не только на по-

рообразование полимера матрицы, но и на структуру его макромолекул [15, 16]. Пористые дисперсные частицы, способные поглощать воду (например, цеолит или кремнезем), обладают меньшей плотностью, чем такие частицы, как кальцит. Увеличение содержания частиц с большой плотностью будет приводить к увеличению плотности макетного пластика, а увеличение содержания пористых частиц – к уменьшению пористости ПКМ, и как следствие, повышению плотности за счет снижения объема CO₂, выделяемого в процессе формирования полиуретана. Таким образом, выбор компонентов композиции предполагает решение задачи определения соотношения ее компонентов, где критериями являются требования к физико-техническим свойствам макетного пластика: плотность, размер ячеек (пор), значение КЛТР, предельные прочностные характеристики.

Целью данной работы является определение соотношения между типом дисперсных частиц наполнителя, обеспечивающих наилучшие прочностные характеристики и наименьшее значение КЛТР макетного пластика, предназначенного для формирования изделий из угле- или стеклопластика при температурах не более 50 °С.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Полимерную композицию получали на основе полиуретана КАД-1000 и КАД-250, смешивая их компоненты А в соотношении 6:5 по массе (производитель АО «ХИМТРАСТ» г. Нижнекамск ТУ 20.16.56-086-27903090-2021). В качестве наполнителей использовали два типа частиц: плотные частицы кальцита фракции 5 мкм (производитель «Уральский завод строительных материалов» г. Екатеринбург) и пористые частицы природного цеолита фракции 0÷0,2 мм (производитель ОАО «Цеолиты Поволжья» ТУ 21636-001-27860096). Частицы цеолита предварительно обрабатывали для удаления оксидов, гидроксидов и карбонатов кальция, а также органических примесей. Обработку осуществляли в растворе 5М соляной кислоты в течение 10 минут с последующим прокаливанием при температуре 400 ± 10 °С в течение 2 часов. После остывания частиц цеолита до комнатной температуры была проведена повторная обработка раствором соляной кислоты в течение 10 минут с последующей промывкой. Промытые частицы высушивали при 105 ± 3 °С в течение 2 часов.

Частицы цеолита измельчали перед их введением в композицию в течение $5\pm 0,5$ минут при оборотах 500 ± 10 об/мин на лабораторной планетарной мельнице ВМ-40 с использованием размольных шаров диаметром 10 мм. Образцы полимерной композиции изготавливались с различным соотношением (по массе) между этими частицами наполнителя (табл. 1). Дополнительно в состав композиции вводили расширенные

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3 2025

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ПОЛИУРЕТАНОВ С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

полимерные сферы размером 50÷70 мкм (марка Lega Foam DET50d25) с целью уменьшения крупных пор в структуре макетного пластика. Массовая доля полимерных сфер во всех образцах ПКМ составляла 0,5±0,07 %. При нагревании, в процессе формирования

ПКМ на основе полиуретана, сферы расширяются, увеличивая свой объем, за счет чего заполняются крупные поры в объеме макетного пластика при соблюдении условия постоянного объема смеси.

Таблица 1 – Соотношение между дисперсными частицами наполнителя в ПКМ

Table 1 – Dispersed filler particles ratio in PCM

Наименование образца	Отношение по массе цеолит / кальцит, ϕ	Массовая доля кальцита в композиции, %	Массовая доля цеолита в композиции, %
Образец 1	1	3,75	3,75
Образец 2	0,6	4,69	2,81
Образец 3	0,33	5,64	1,86
Образец 4	0,14	6,58	0,92
Образец 5	0	7,5	0

Гомогенизацию компонентов композиции со смесью компонентов А проводили на лабораторном диссольвере (марка ДС-2-25) следующим образом. В емкость объемом 1±0,2 литра добавляли компоненты А, КАД-1000 и КАД-250 в массовом соотношении 6:5. Затем при вращающейся фрезе со скоростью 150±10 об/мин засыпали цеолит, который перемешивали при скорости 800÷1000 об/мин в течение 10±1 минут, после чего в полученную смесь засыпали расширенные полимерные сферы при скорости вращения фрезы 300±10 об/мин. Гомогенность смеси контролировали визуально по отсутствию неоднородных включений. В последнюю очередь в смесь вносили кальцит с последующей гомогенизацией в течение 5÷7 минут на скорости 2800±200 об/мин. Полученную смесь охлаждали до температуры 23±2 °С. После чего в смесь добавляли в расчетном количестве (по массе) компонент В для полимеризации и перемешивали ее при скорости 900÷1000 об/мин в течение 2÷3 минут.

Замешенную смесь заливали в металлическую (дюралюминий Д-16) форму с размером 135х135х40 мм, внутреннюю часть стенок и крышки которой обрабатывали антиадгезионной смазкой АС-5 (производитель АО «ХИМТРАСТ» г. Нижнекамск). Температура формы при заливке составляла $T_0 = 35 \pm 1^\circ \text{C}$. После заливки смеси форму закрывали крышкой и ставили под пресс для предотвращения выхода расширенного материала из формы и достижения условия постоянного объема смеси. Образец выдерживали под прессом 30±2 минуты при давлении 3±0,2 атм. Для исследования механических свойств из каждого образца изготавливали (методом фрезерования) пластинки с размерами 120х25х2,5 мм с погрешностью не более ±0,5 мм.

Добавление цеолита в композицию полиуретана должно приводить к снижению влагосодержания [17], и, следовательно, к снижению пористости образцов ПКМ. Измерение пористости образцов ПКМ (табл. 1) проводили косвенно методом набухания [18, 19]. Образцы ПКМ помещали в дистиллированную воду при температуре 23±2 °С, предварительно высушив их в вакуумной камере при давлении ~100 Па в течение 24 часов. Взвешивание образцов проводили с погрешностью не хуже 10^{-5} г, до (масса m_1) и после (масса m_2) выдержки образцов в дистиллированной воде в течение 4 часов. Следует отметить, что набухание образцов происходит за счет наполнения водой, как пор полимера, так и частиц цеолита. Для того чтобы разделить эти процессы и определить изменение массы образцов только в результате наполнения водой пор полимера, дополнительно определяли водопоглощение частиц цеолита после их измельчения [20]. Водопо-

глощение частиц цеолита составило 0,449±0,03. Массу частиц цеолита $m_{ц}$ в исследуемых образцах определяли с учетом массовой доли содержания цеолита в образцах массы m_1 . Таким образом, набухание (Δ) образцов ПКМ (табл. 1) с учетом только пористости полимера матрицы осуществляли по формуле:

$$\Delta = \frac{m_2 - m_1 - m_{ц} \cdot 0,449}{m_1} \quad (1)$$

Структуру поверхности образцов исследовали методом оптической микроскопии на микроскопе Axio Imager.Z2m (Carl Zeiss, Германия).

Определение среднего значения КЛТР проводили в диапазоне температур $[21 \div 45] \pm 0,5^\circ \text{C}$ по схеме, приведенной на рисунке 1.

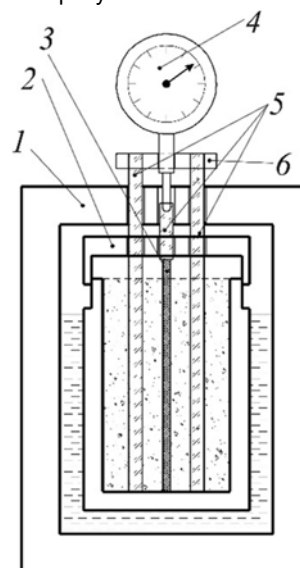


Рисунок 1 – Схема установки измерения коэффициента линейного температурного расширения образцов модельного пластика

Figure 1 – The device scheme of coefficient of linear thermal expansion measurement of PCM samples

Для определения КЛТР образцов (табл. 1) изготавливали образцы 3 цилиндрической формы, диаметром 25±1 мм и высотой цилиндров 120±1 мм. Образец 3 помещался в стакан 2. Стакан помещался в термостат 1, заполненный жидкостью. Температура жидкости контролировалась ртутным термометром с погрешностью 0,5 °С. Индикаторные часы 4 устанавливались на пластине 6, которая через кварцевые стрелки 5 фиксировала их положение относительно нижнего конца образ-

ца 3. Изменение положения верхнего конца образца 3 при увеличении температуры через кварцевый стержень контролировалось индикаторными часами. При этом смещение нижнего конца образца за счет деформации дна стакана при нагревании приводило к соответствующему смещению индикаторных часов, что устраняло влияние этого процесса на результат измерения КЛТР. Следует отметить, что КЛТР кварца в диапазоне температур измерений составляет $\sim 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [21], что, по крайней мере, на порядок меньше типового значения КЛТР для ненаполненного полиуретана [22]. Калибровка устройства измерения КЛТР проводилась с использованием кварца в качестве образца 3. Погрешность измерения при калибровке не превышала 5 мкм.

Определение механических характеристик производили по ГОСТ 4648-2014 на универсальной настольной испытательной машине для физико-механических испытаний различных материалов Shimadzu AG-X 50 kN. При проведении испытаний скорость нагружения на изгиб составляла 0,1 мм/мин (с погрешностью не более 10 %); температура окружающей среды – 23 ± 2 °С. Измерение твердости по Либбу производилось с использованием твердомера ТЭМП-4 при температуре 23 ± 2 °С. Проводилось 25 независимых измерений в разных областях каждого исследуемого образца с последующим усреднением полученных значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставительный анализ поверхностей образцов (рис. 2) показывает снижение удельного количества пор с ростом содержания частиц цеолита в образцах.

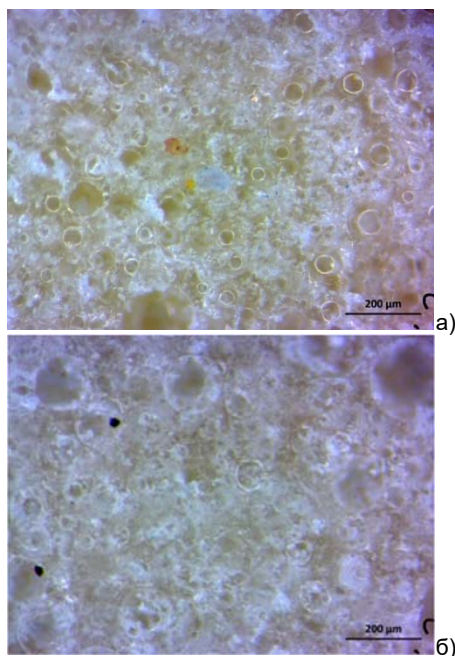


Рисунок 2 – Изображение поверхностей образцов:
а – образец 5; б – образец 1

Figure 2 – The samples surfaces image:
а – sample 5; б – sample 1

Следует отметить, что при этом увеличивается средний размер пор. Статистический анализ среднего размера пор проводился обработкой изображений в программном комплексе Image J. Количество пор для каждого из образцов составляло не менее 800–1000 штук, что

обеспечивало достоверность статистических результатов [23]. Удельное количество пор в Образце 5 составило $\sim 300 \div 400$ пор/см², в образце 1 – $80 \div 170$ пор/см²; средний размер пор соответственно 40 мкм и ~ 90 мкм.

Уменьшение удельного количества пор с ростом содержания частиц цеолита, по всей видимости, обусловлено уменьшением влаги в компоненте А за счет ее поглощения этими частицами. Изоционат (компонент В) вступает в реакцию полимеризации как с компонентом А, с образованием полиуретана, так и с водой, с образованием углекислого газа и полимочевины [16]. Молекулы полимочевины сополимеризуются с молекулами полиуретана, за счет чего структура молекул полимера изменяется. Углекислый газ, выделяемый в процессе формирования полиуретана, способствует порообразованию. Кроме того, в результате реакции изоционата с водой выделяется теплота. Поэтому повышение содержания частиц цеолита обуславливает снижение температуры модельного пластика при его формировании (рис. 3).

В процессе формирования образцов ПКМ модельного пластика измеряли изменение температуры (ΔT) на поверхности формы (рис. 3): $\Delta T = T_{\text{max}} - T_0$, где T_{max} – наибольшее значение температуры при полимеризации ПКМ на основе полиуретана:

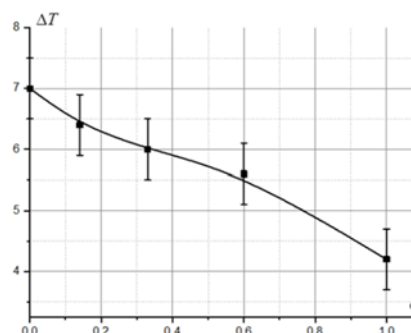


Рисунок 3 – Зависимость изменения температуры на поверхности формы от соотношения φ дисперсных частиц наполнителя

Figure 3 – Mold surface temperature depending of ratio of dispersed filler particles φ

Уменьшение температуры и удельного количества пор с ростом содержания частиц цеолита в ПКМ соответствует результатам по набуханию образцов (рис. 4) и свидетельствует об уменьшении содержания влаги в исходных компонентах композиции в результате ее поглощения этими частицами.

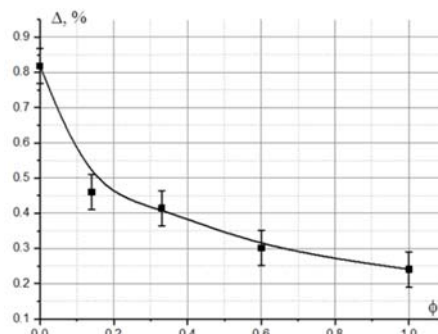


Рисунок 4 – Зависимость набухания образцов ПКМ на основе полиуретанов от соотношения φ дисперсных частиц наполнителя

Figure 4 – PCM samples swelling depending of dispersed filler particles ratio φ

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ПОЛИУРЕТАНОВ С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

Поэтому можно предположить изменение структуры макромолекул полиуретана за счет снижения содержания мочевины при формировании ПКМ [16], что должно приводить к изменению его механических характеристик.

Прочностные характеристики ПКМ модельного пластика имеют монотонную зависимость (рис. 5) от параметра ϕ .

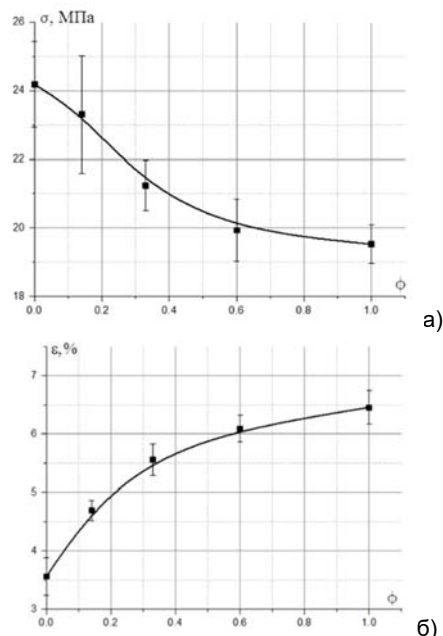


Рисунок 5 – Зависимость прочностных характеристик ПКМ модельного пластика от соотношения ϕ дисперсных частиц наполнителя:

а – предел прочности; б – предельная деформация

Figure 5 – Model plastic PCM strength characteristics depending of dispersed filler particle ratio ϕ

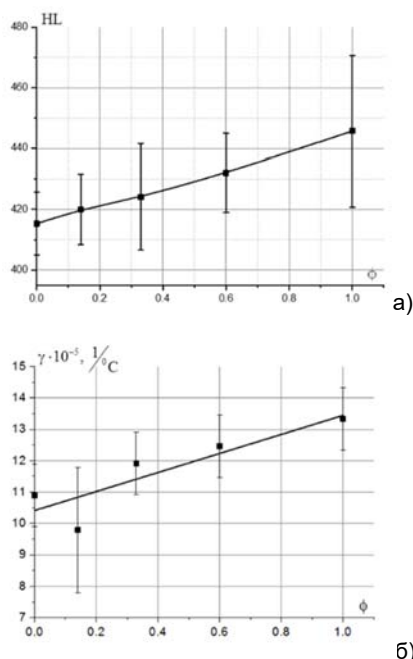


Рисунок 6 – Зависимость твердости по Леббу (HL) и КЛТР (γ) от соотношения ϕ дисперсных частиц наполнителя

Figure 6 – Lebb hardness (HL) and CLTR (γ) depending of dispersed filler particles ratio ϕ

Известно, что увеличение пористости полимеров приводит к снижению их предела прочности [24, 25]. Это связано, в том числе с ростом напряженно-деформированного состояния полимера матрицы на границе с порой [25]. Результаты эксперимента по набуханию образцов и микроскопический анализ их поверхностей свидетельствуют о снижении пористости ПКМ модельного пластика с увеличением доли ϕ частиц цеолита. С другой стороны, дисперсные частицы в композиции полимера приводят к увеличению предела прочности за счет уменьшения подвижности макромолекул полимера [26] вследствие взаимодействия частиц с полимерной матрицей. Следует отметить, что частицы цеолита взаимодействуют с полиуретаном [27] лучше частиц кальцита [28]. Это должно приводить к увеличению предела прочности с ростом показателя ϕ . Поэтому, уменьшение предела прочности (рис. 3, а), по всей видимости, вызвано, в первую очередь, изменениями в структуре макромолекул полимера.

Незначительное повышение твердости (HL) по Леббу и КЛТР (γ) ПКМ макетного пластика (рис. 6) связано, по всей видимости, как с уменьшением его пористости [29], так и с изменением в структуре макромолекул.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показывают, что использование пористых частиц, способных к влагопоглощению при их введении в компонент А полиуретана до инициирования реакции полимеризации, приводит к существенному снижению предела прочности и незначительному повышению КЛТР. Так, при массовом содержании частиц кальцита и частиц цеолита 3,75 % соответственно в образцах ПКМ на основе полиуретана предел прочности снижается на 20 % по сравнению с образцами без частиц цеолита. Основной причиной этого является изменение структуры макромолекул полиуретана в результате снижения влагосодержания в его исходных компонентах. Следует отметить, что повысить предельные характеристики композита возможно за счет повышения взаимодействия частиц кальцита с полимером матрицы, путем, например, их капсулирования [30]. Незначительное повышение твердости с ростом частиц цеолита в образцах обусловлено снижением пористости ПКМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В.А., Куркин Е.И., Кузнецов А.С. Исследование и модификация оснастки и формообразующей поверхности с целью повышения точности изготовления деталей методом вакуумной инфузии // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6–3. С. 710–717.
2. Методика выбора материала оснастки для изготовления элементов конструкции летательных аппаратов / Файзуллин К.В. [и др.] // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. Т. 24. № 3. С. 605–612. doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-605-612.
3. Янович А. Современные композитные материалы для производства оснастки // Композитный мир. 2016. № 6. С. 36–40.
4. Thermal, mechanical and morphological properties of polyurethane–zirconia loading / Salman A.J. [и др.] // International Journal of Low-Carbon Technologies. 2021. Т. 16. № 2. С. 454–462. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa078>.
5. Gama N.V., Ferreira A., Barros-Timmons A. Polyurethane foams: Past, present, and future // Materials. 2018. Т. 11. № 10. С. 1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>.
6. Chiou B.-S., Schoen P.E. Effects of crosslinking on thermal and mechanical properties of polyurethanes // Journal of Applied Polymer Science. 2002. Т. 83. № 1. С. 212–223. <https://doi.org/10.1002/app.10056>.
7. Possart W., Zimmer B. Water in polyurethane networks:

physical and chemical ageing effects and mechanical parameters // *Continuum Mech. Thermodyn.* 2024. Т. 36. № 2. С. 261–287. <https://doi.org/10.1007/s00161-022-01082-y>.

8. A Review of Research on the Effect of Temperature on the Properties of Polyurethane Foams / Wang J. [и др.] // *Polymers. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.* 2022. Т. 14. № 21. С. 4586. <https://doi.org/10.3390/polym14214586>.

9. Polyurethane foam materials and their industrial applications / Ates M. [и др.] // *Polymer International.* 2022. Т. 71. № 10. С. 1157–1163. <https://doi.org/10.1002/pi.6441>.

10. Ashrafizadeh H., Mertiny P., McDonald A. Evaluation of the effect of temperature on mechanical properties and wear resistance of polyurethane elastomers // *Wear.* 2016. Т. 368. С. 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.08.008>.

11. Comparison of flexible polyurethane foams properties from different polymer polyether polyols / Izarra I. [и др.] // *Polymer Testing.* 2021. Т. 100. С. 107268. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2021.107268>.

12. Investigating Physio-Thermo-Mechanical Properties of Polyurethane and Thermoplastics Nanocomposite in Various Applications / Allami T. [и др.] // *Polymers.* 2021. Т. 13. № 15. С. 2467. <https://doi.org/10.3390/polym13152467>.

13. Influence of the filler content on the thermal expansion behavior of an epoxy matrix particulate composite / Tognana S. [и др.] // *Materials Science and Engineering: B.* 2009. Т. 157. № 1. С. 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.12.003>.

14. Веттерген В.И., Башкарев А.Я., Суслов М.А. Влияние формы и концентрации частиц наполнителей на тепловое расширение полимерных композитов // *Журнал технической физики.* 2007. Т. 77. № 10. С. 135–138.

15. Афанасьев А.В., Дудченко А.А., Рабинский Л.Н. Влияние структуры полимерного композиционного материала на остаточное напряженно-деформированное состояние // *Инженерная Физика.* 2010. № 7. С. 13–20.

16. Polyurethane types, synthesis and applications – a review / Akindoyo J.O. [и др.] // *RSC Advances.* 2016. Т. 6. № 115. С. 114453–114482. <https://doi.org/10.1039/C6RA14525F>.

17. Galadari M. Robust polyurethane-zeolite composites with diverse applications. University of California, Los Angeles, 2023.

18. Влияние свойств полимеров на условия их набухания в воде и в водных растворах / Феропонтов Н.Б. [и др.] // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2014. Т. 14. № 5. С. 795–812.

19. Зуев В.В., Успенская М.В., Олехнович А.О. Физика и химия полимеров : учеб. пособие. 2010. 45 с.

20. Determination of swelling operation parameters to improve the hierarchy of natural zeolite Lampung after synthesis / Intang A. [и др.] // *South African Journal of Chemical Engineering.* 2024. Т. 50. С. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.08.004>.

21. Oikawa N., Maesono A., Tye R.P. Thermal expansion measurements of quartz glass by laser interferometry // *Thermal conductivity.* 1999. Т. 24. С. 405–416.

22. Hurley M.F. Advances in polyurethane RRIM for automotive exteriors // *API Polyurethanes Expo 2001.* 9 с.

23. Analysis of aluminum oxides submicron particle agglomeration in polymethyl methacrylate composites / Kuklin V. [и др.] // *International journal of molecular sciences.* 2023. Т. 24. № 3. С. 1–9. <https://doi.org/10.3390/ijms24032515>.

24. Impact of surface porosity and topography on the mechanical behavior of high strength biomedical polymers / Evans N.T. [и др.] // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials.* 2016. Т. 59. С. 459–473. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.02.033>.

25. The influence of porosity on stress and strain state of porous polymer materials / Zeleniakienė D. [и др.] // *Materials science.* 2003. Т. 9. № 4. С. 358–362.

26. Механические свойства полимерной композиции на основе эпоксидной смолы при вариации толщины оболочки полилактида на поверхностях дисперсных частиц оксида меди (II) / Бобина Е.А. [и др.] // *Пластические массы.* 2024. № 11–12. С. 31–34. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-31-34>.

27. Patel D.K., Biswas A., Maiti P. Nanoparticle-induced phenomena in polyurethanes // *Advances in polyurethane biomaterials.* 2016. С. 171–194. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100614-6.00006-8>.

28. Structural and mechanical characterization of polyurethane-CaCO₃ composites synthesized at high calcium carbonate loading: An experimental and theoretical study / de Moura A. P. [и др.] // *Journal of Composite Materials.* 2021. Т. 55. № 21. С. 2857–2866. <https://doi.org/10.1177/00219983219964>.

29. Prasad A., Fotou G., Li S. The effect of polymer hardness, pore size, and porosity on the performance of thermoplastic polyurethane-based chemical mechanical polishing pads // *Journal of Materials Research.* 2013. Т. 28. № 17. С. 2380–2393. <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.173>.

30. Influence of the thickness of a polymer shell applied to surfaces of submicron filler particles on the properties of polymer compositions / Akhmedeev A.A. [и др.] // *Mech Compos Mater.* 2020. Т. 56. № 2. С. 241–248. <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09876-4>.

Информация об авторах

М. П. Данилаев – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронных и квантовых средств передачи информации» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

С. А. Карандашов – инженер-исследователь междисциплинарной межвузовской лаборатории Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

В. А. Куклин – кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь междисциплинарной межвузовской лаборатории Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

А. В. Поляев – аспирант, начальник НИЛ «СЦК «Технологии композитов» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

Ю. А. Тунакова – доктор химических наук, профессор, заведующая кафедрой общей химии и экологии Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

К. В. Файзуллин – кандидат технических наук, заместитель начальника управления научно-исследовательской работы (УНИР) Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ.

REFERENCES

1. Komarov, V.A., Kurkin, E.I., Kuznetsov, A.S. (2013). Research and modification of tooling and forming surface in order to improve accuracy of parts manufacturing by vacuum infusion method. *Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 15, (6-3), 710-717. [In Russian].
2. Faizullin, K.V., Danilaev, M.P., Polyayev, A.V., Semin, S. A., Rakipov, T. I. (2023). Rigging material selection methodology for aircraft elements design. *Siberian Aerospace Journal*, 24(3), 605-612. [In Russian]. doi: 10.31772/2712-8970-2023-24-3-605-612.
3. Yanovich, A. (2016). Modern composite materials for tooling production. *Composite World*, (6), 36-40. [In Russian].
4. Salman, A.J., Al-Obaidi, A.A., Al-Mamoori, D.H., Shaker, L.M., Al-Amiery, A.A. (2021). Thermal, mechanical and morphological properties of polyurethane-zirconia loading. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16 (2), 454-462. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctaa078>.
5. Gama, N.V., Ferreira, A., Barros-Timmons, A. (2018). Polyurethane foams: Past, present, and future. *Materials*, 11(10), 1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>.
6. Chiou, B.-S. & Schoen, P.E. (2002). Effects of crosslinking on thermal and mechanical properties of polyurethanes. *Journal of Applied Polymer Science*, 83(1), 212–223. <https://doi.org/10.1002/app.10056>.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНАСТКИ НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИИ ИЗ ПОЛИУРЕТАНОВ С ДИСПЕРСНЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

7. Possart, W. & Zimmer, B. (2024). Water in polyurethane networks: physical and chemical ageing effects and mechanical parameters. *Continuum Mech. Thermodyn*, 36(2), 261-287. <https://doi.org/10.1007/s00161-022-01082-y>.
8. Wang, J., Zhang, C., Deng, Y., Zhang, P. (2022). A Review of Research on the Effect of Temperature on the Properties of Polyurethane Foams. *Polymers*, 14(21), 4586. <https://doi.org/10.3390/polym14214586>.
9. Ates, M., Karadag, S., Eker, A.A., Eker, B. (2022). Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polymer International*, 71(10), 1157-1163. <https://doi.org/10.1002/pi.6441>.
10. Ashrafizadeh, H., Mertiny, P., McDonald, A. (2016). Evaluation of the effect of temperature on mechanical properties and wear resistance of polyurethane elastomers. *Wear*, 368, 26-38. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.08.008>.
11. Izarra, I., Borreguero, A.M., Garrido, I., Rodríguez, J.F., Carmona, M. (2021). Comparison of flexible polyurethane foams properties from different polymer polyether polyols. *Polymer Testing*, 100, 107268. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107268>.
12. Allami, T., Alamiery, A., Nassir, M.H., Kadhum, A.H. (2021). Investigating Physio-Thermo-Mechanical Properties of Polyurethane and Thermoplastics Nanocomposite in Various Applications. *Polymers*, 13(15), 2467. <https://doi.org/10.3390/polym13152467>.
13. Tognana, S., Salgueiro, W., Somoza, A., Pomarico, J.A., Ranea-Sandoval, H.F. (2009). Influence of the filler content on the thermal expansion behavior of an epoxy matrix particulate composite. *Materials Science and Engineering: B*, 157(1), 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.12.003>.
14. Vettegren', V.I., Bashkarev, A.Ya., Suslov, M.A. (2007). Influence of shape and concentration of filler particles on thermal expansion of polymer composites. *Journal of Technical Physics*, 77(10), 135-138. [In Russian].
15. Afanas'ev, A.V., Dudchenko, A.A., Rabinskiy, L.N. (2010). Influence of polymer composite material structure on residual stress-strain state. *Engineering Physics*, (7), 13-20. [In Russian].
16. Akindoyo, J.O., Beg, M.D.H., Ghazali, S., Islam, M.R., Jeyaratnam, N., Yuvaraj, A.R. (2016). Polyurethane types, synthesis and applications - a review. *RSC Advances*, 6(115), 114453-114482. <https://doi.org/10.1039/C6RA14525F>.
17. Galadari, M. (2023). Robust polyurethane-zeolite composites with diverse applications. *University of California, Los Angeles*.
18. Ferapontov, N.B., Tokmachev, M.G., Gagarin, A.N., Gerasimchuk, V.V., Pushkareva, I.V. (2014). Influence of polymer properties on conditions of their swelling in water and in aqueous solutions. *Sorption and chromatographic processes*, 14(5), 795-812. [In Russian].
19. Zuev, V.V., Uspenskaya, M.V., Zuev, V.V., Olekhovich, A.O. (2010). Physics and Chemistry of Polymers. *Textbook*, 45. [In Russian].
20. Intang, A., Susmanto, P., Bustan, M.D., Haryati, S. (2024). Determination of swelling operation parameters to improve the hierarchy of natural zeolite Lampung after synthesis. *South African Journal of Chemical Engineering*, 50, 125-134. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.08.004>.
21. Oikawa, N., Maesono, A., Tye, R.P. (1999). Thermal expansion measurements of quartz glass by laser interferometry. *Thermal conductivity*, 24, 405-416.
22. Hurley, M.F. (2001). Advances in polyurethane RRIM for automotive exteriors. *API Polyurethanes Expo*, 9.
23. Kuklin, V., Karandashov, S., Bobina, E., Drobyshev, S., Smirnova, A., Morozov, O., Danilaev, M. (2023). Analysis of aluminum oxides submicron particle agglomeration in polymethyl methacrylate composites. *International journal of molecular sciences*, 24(3), 1-9. <https://doi.org/10.3390/ijms24032515>.
24. Evans, N.T., Irvin, C.W., Safranski, D.L., Gall, K. (2016). Impact of surface porosity and topography on the mechanical behavior of high strength biomedical polymers. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 59, 459-473. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.02.033>.
25. Zeleniakienė, D., Kleveckas, T., Liukaitis, J., Marazas, G. (2003). The influence of porosity on stress and strain state of porous polymer materials. *Materials science*, 9(4), 358-362.
26. Bobina, E.A., Danilaev, M.P., Deberdeev, T.R., Drobyshev, S.V., Karandashov, S.A., Klabukov, M.A., Kuklin, V.A., Faizullin, K.V. (2023). Epoxy resin mechanical properties in composition with copper (I) oxide particles, encapsulated by polylactide with variable thickness. *Plasticheskie massy*, (11-12), 31-34. [In Russian]. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2023-11-12-31-34>.
27. Patel, D.K., Biswas, A., Maiti, P. (2016). Nanoparticle-induced phenomena in polyurethanes. *Advances in polyurethane biomaterials*, 171-194. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100614-6.00006-8>.
28. de Moura, A.P., da Silva, E.H., dos Santos, V.S., Galera, M.F., Sales, F.C.P., Elizario, S., de Moura, M.R., Rigo, V.A., da Costa, R.R.C. (2021). Structural and mechanical characterization of polyurethane-CaCO₃ composites synthesized at high calcium carbonate loading: An experimental and theoretical study. *Journal of Composite Materials*, 55(21), 2857-2866. <https://doi.org/10.1177/00219983219964>.
29. Prasad, A., Fotou, G., Li, S. (2013). The effect of polymer hardness, pore size, and porosity on the performance of thermoplastic polyurethane-based chemical mechanical polishing pads. *Journal of Materials Research*, 28(17), 2380-2393. <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.173>.
30. Akhmadeev, A.A., Bogoslov, E.A., Danilaev, M.P., Klabukov, M.A., Kuklin, V.A. (2020). Influence of the Thickness of a Polymer Shell Applied to Surfaces of Submicron Filler Particles on the Properties of Polymer Composites. *Mech Compos Mater*, 56, 241-248. <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09876-4>.

Information about the authors

M.P. Danilaev - Doctor of Sciences, Professor of the Department of "Electronic and Quantum Means of Information Transmission" of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

S.A. Karandashov - research engineer, interdisciplinary interuniversity laboratory, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

V.A. Kuklin - PhD, research engineer, interdisciplinary interuniversity laboratory, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

A.V. Polyayev - postgraduate student, Head of the Research Institute "CCS Technologies of Composites" Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

Yu.A. Tunakova - doctor of science, professor, head of general chemistry and ecology department of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

K.V. Fayzullin - PhD, Deputy Head of the Research and Development Department (RDD) of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev - KAI.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 26 Sep 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.