

ВЛИЯНИЕ ТИПА ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ МАТРИЦЫ НА ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПТИМАЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ФОРМОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ганиева Э.Н., Ермоченков М.Г.

*Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Мытищи,
Россия*

INFLUENCE OF POLYETHYLENE MATRIX TYPE ON THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS AND OPTIMAL MOLDING TEMPERATURES OF WOOD COMPOSITES

Ganieva E.N., Ermochenkov M.G.

*Mytishchi branch of N.E. Bauman Moscow State Technical University, Mytishchi,
Russia*

Аннотация: В работе проведён анализ термической стабильности и механических свойств древесно-полимерных композитов на основе полиэтилена при различных температурах. Полученные данные свидетельствуют о необходимости учёта термомеханических параметров ДПК при разработке и совершенствовании технологий формовки изделий из этих материалов.

Abstract: The paper analyzes the thermal stability and mechanical properties of wood-polymer composites based on polyethylene at different temperatures. The obtained data indicate the need to take into account the thermomechanical parameters of WPC in the development and improvement of molding technologies for products made of these materials.

Ключевые слова: динамический термомеханический анализ (ДТМА), коэффициент температурного линейного расширения (КТЛР), древесно-полимерный композит (ДПК), полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП).

Keywords: dynamic thermomechanical analysis (DTMA), coefficient of linear thermal expansion (CTLE), wood-polymer composite (WPC), low-density polyethylene (LDPE), and high-density polyethylene (HDPE).

Древесно-полимерные композиты на основе полиэтилена низкой плотности и полиэтилена высокой плотности всё чаще применяются в строительстве, мебельной и автомобильной промышленности благодаря сочетанию прочности, устойчивости к атмосферным воздействиям и возможности вторичной переработки. Однако для успешного формования изделий необходимо точно определить допустимый температурный диапазон, обеспечивающий достаточную пластичность материала, при этом важно учитывать влияние свойств матрицы, обусловленных различной молекулярной массой полиэтилена [1,2].

Целью работы является определение оптимальных температурных условий формования древесно-полиэтиленовых композитов с использованием комплексного анализа их термомеханических характеристик методами ДТМА и КТЛР.

Методы и материалы.

Проведены исследования ДПК на основе полиэтиленовой матрицы разной плотности методом ДТМА для оценки вязкоупругих свойств при испытании на трехточечный изгиб образцов по ГОСТ 57916-2017 ч. 5 (ISO 6721-5:1996), а также определением КТЛР материалов в соответствии с требованиями ГОСТ 32618.1-2014 (ISO 11359-1:1999) и ГОСТ 32618.2-2014 (ISO 11359-2:1999) на термомеханическом анализаторе серии ТМА модификации ТМА Q400 производства компании TA Instruments. Материал первого вида на основе полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) содержит 45 % древесной муки и 15 % карбоната кальция. Второй вид материала состоит из 52 % древесной муки на основе полиэтилена высокой плотности (ПЭВП). Для измерения теплового расширения изготовили образцы (3шт.) размерами 6,0×6,0×6,0 мм на отрезном станке. Для испытания на изгиб по методу ДТМА аналогичным образом изготовили образцы (3шт.) размерами 2,5×0,5×15,0 мм. К образцу автоматически прикладывалась предварительная нагрузка заранее установленной величины. При исследовании теплового расширения измерительная нагрузка составляла 0,005 Н, а темп нагрева 1 °С/мин. Во время испытаний на изгиб была установлена постоянная составляющая нагрузка в 0,020 Н, а переменная нагрузка составила 0,015 Н. Нагрев производили со скоростью 1,5 °С/мин. После этого прибор измерил длину образца и сохранил полученное значение. В эксперименте получали кривые изменения размеров и вязкоупругих свойств материалов с ростом температуры. Управление прибором и обработка экспериментальных данных осуществляется с помощью программного обеспечения Universal Analysis. Результаты исследований методом КТЛР отображены на рис. 1, а показатели ДТМА на рис. 2.

На основе полученных данных предложен подход к определению максимально допустимого температурного диапазона поверхностного формования для материалов на основе ПЭНП и ПЭВП.

Поверхностное формование ДПК требует температурного воздействия, достаточного для размягчения поверхностного слоя без деструкции материала. Ниже температуры стеклования T_g молекулярная подвижность ограничена: высокий модуль упругости E' и низкий модуль потерь E'' определяют коэффициент механических потерь $\tan \delta < 0,1$, что делает материал непригодным для формования из-за все еще высокой жесткости.

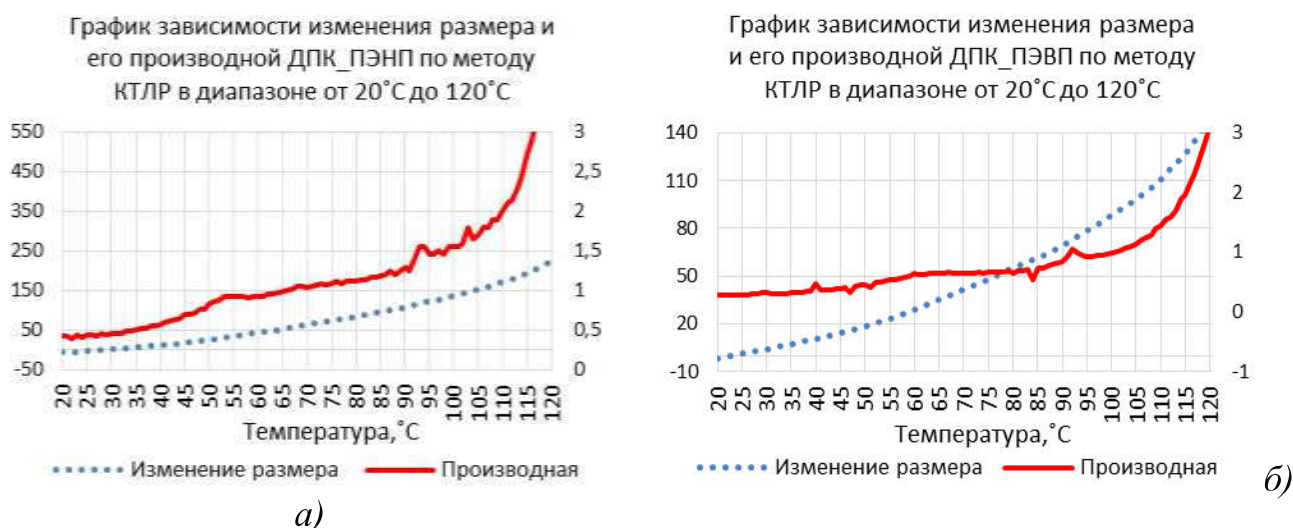


Рисунок 1 – Результаты по методу определения коэффициента термического линейного расширения в диапазоне температур от 20°С до 120°С для композита с полиэтиленом низкой плотности (а) и высокой плотности (б).

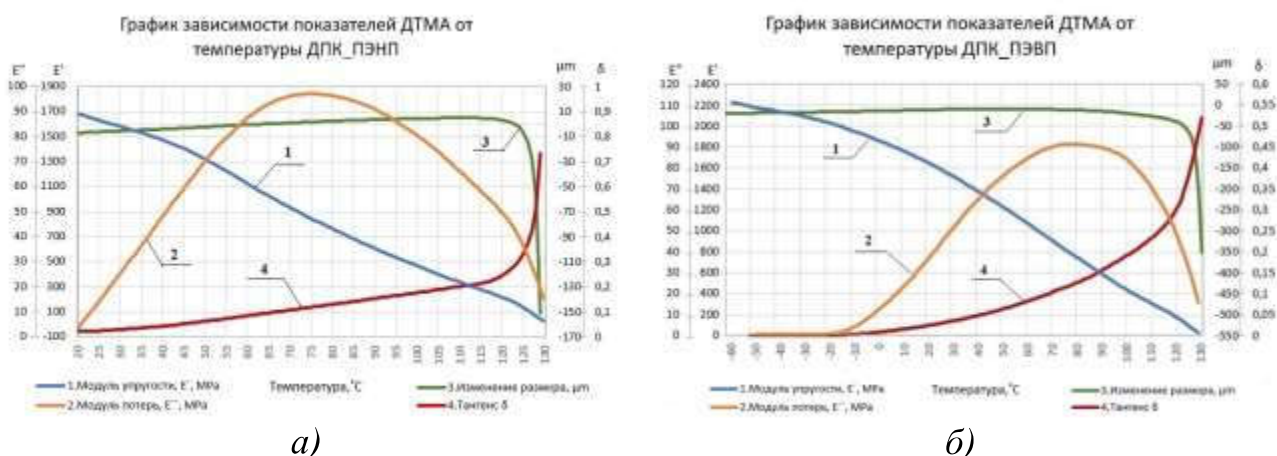


Рисунок 2 – Результаты по динамическому термомеханическому анализу для композита с полиэтиленом низкой плотности (а) и высокой плотности (б)

Превышение температуры стеклования и увеличение тангенса угла механических потерь выше порогового значения 0,1 является базовым условием для процесса формования, поскольку указывает на достижение материалом необходимого уровня пластичности и вязкоупругого состояния, обеспечивающим возможность необратимой деформации поверхностного слоя без нарушения структурной целостности. Термомеханический анализ установил критические температурные границы, релевантные для процессов формования:

а) для ДПК_ПЭНП переход к положительному изменению размеров фиксируется при 63 °С, при 67°С значение $\tan \delta > 0,1$ (ДТМА), превышение коэффициента температурного линейного расширения $\alpha > 1,0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ отмечается при 66 °С (КТЛР). При достижении 93 °С ($\alpha = 1,55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) возникает риск неконтролируемой деформации, однако технологическое окно может быть расширено до 110 °С при условии соблюдения ограничений, а именно сохранение $\tan \delta \leq 0,2$, что предотвращает доминирование вязкой составляющей над

упругой, и кратковременный нагрев (не более 20 с). Также допускается сверхкороткая выдержка до температуры плавления 126 °С без проявления термодеструкции, что подтверждается результатами термогравиметрического анализа композита [3], наблюдается значительное изменение размера КТЛР при переходе от 126 °С к 127 °С (с 327 мкм до 472 мкм), что может свидетельствовать о фазовом переходе;

б) для ДПК_ПЭВП значение $\tan \delta > 0,1$ фиксируется при 69 °С (ДТМА), превышение коэффициента линейного расширения $\alpha > 1,0 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ наблюдается с 101 °С (КТЛР), достижение $\alpha > 1,55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ происходит при 111 °С, характеризуя риск неконтролируемой деформации. Превышение $\tan \delta > 0,2$, связанное с большей вязкой составляющей над упругой, фиксируется при 103 °С. При этом кратковременное воздействие до 130 °С технологически допустимо при соблюдении тех же условий [3]. т.к. после достижения 130 °С при переходе к 132 °С наблюдается значительное увеличение изменения размеров КТЛР (с 303 мкм до 561 мкм), что может свидетельствовать о фазовом переходе.

Такие режимы обеспечивают управляемое формование без потери структурной целостности материала. Обобщенные значения приведены в табл. 1:

Таблица 1 – Обобщенная таблица значений допустимых температур при поверхностях формовании древесно-полиэтиленовых композитов.

ДПК_ПЭНП	ДПК_ПЭВП	Показатель
67	69	Превышение $\tan \delta > 0.1$ (ДТМА), °С
66	101	Превышение коэффициента линейного расширения $\alpha > 1,0 \times 10^{-4}$ (КТЛР), °С
93	111	Граничное значение $\alpha > 1,55 \times 10^{-4}$ (риск неконтролируемой деформации), °С
110	103	Превышение $\tan \delta > 0.2$ (доминирование вязкой составляющей), °С
126	130	Допустимая максимальная температура кратковременного нагрева, °С (при отсутствии термодеструкции по ТГА)

Таким образом, ДПК_ПЭВП обладает более высокой термостойкостью по сравнению с ДПК_ПЭНП. Благодаря повышенной плотности и кристалличности, ДПК_ПЭВП демонстрирует большую упругость и меньшую вязкую составляющую при нагреве ($\alpha = 1,55 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), что подтверждается более высоким порогом $\tan \delta$. Переход к неконтролируемой деформации происходит при более высокой температуре (111 °С против 93 °С у ДПК_ПЭНП). Это означает, что при повышенных температурах материал сохраняет структурную целостность дольше, прежде чем вязкие процессы начнут доминировать, что расширяет технологическое окно формования. Данные позволяют выбрать оптимальные режимы нагрева и охлаждения в широком диапазоне температур, повысить качество изделий за счёт минимизации внутренних напряжений.

Полученные результаты могут быть использованы в технологических процессах при разработке оснастки для формования, при выборе типа полимерной матрицы, позволяют определить допустимый температурный диапазон для термоформования и подтверждают, что **каждый полимерный композит обладает индивидуальными температурными и реологическими порогами, которые определяются составом.**

Список литературы

1. Friedrich D. Thermoplastic moulding of wood-polymer composites (WPC): A review and research proposal on thermo-physical and geometric design options using hot-pressing / D. Friedrich // European Journal of Wood and Wood Products. – 2022. – Vol. 80, № 1. – pp. 7–21.
2. Блазнов А.Н. Анализ методов термомеханических испытаний композитных материалов и сравнение результатов / А.Н. Блазнов, Е.В. Атясова, В.В. Самойленко // Южно-Сибирский научный вестник. – 2017. – № 1(17). – С. 54-69.
3. Ганиева Э.Н. Кинетика термического разложения древесно-полимерных композитов / Э.Н. Ганиева, М.Г. Ермоченков, М.Ю. Кладов // Системы. Методы. Технологии. – 2025. – № 2(66). – С. 143-149. – DOI 10.18324/2077-5415-2025-2-143-149.

References

1. Friedrich D. Thermoplastic moulding of wood-polymer composites (WPC): A review and research proposal on thermo-physical and geometric design options using hot-pressing / D. Friedrich // European Journal of Wood and Wood Products. – 2022. – Vol. 80, № 1. – pp. 7–21.
2. Blaznov A.N. Analysis of thermomechanical testing methods of composite materials and comparison of results / A.N. Blaznov, E.V. Atyasova, V.V. Samoylenko // South Siberian Scientific Bulletin. – 2017. – № 1(17). – pp. 54–69.
3. Ganieva E.N. Kinetics of thermal decomposition of wood-polymer composites / E.N. Ganieva, M.G. Ermochenkova, M. Kladov // Systems. Methods. Technologies. – 2025. – № 2(66). – pp. 143–149. – DOI: 10.18324/2077-5415-2025-2-143-149.