

нами / Е. Р. Шпербер [и др.]: монография. – Краснодар, 2006. – 159 с.

2. Cuthbertson J. D., Taylor R. J. K. A telescoped Route to 2,6-Disubstituted 2,3,4,5-Tetrahydropyridines and 2,6-syn-Disubstituted Piperidines: Total Synthesis of Grandisine G // *Angew. Chem. Int. Ed.* – 2013. – Vol. 52. – № 5 – P. 1490–1493.

3. Cuthbertson J. D., Godfrey A. A., Taylor R. J. K. Synthesis of isoquinuclidinones via a tandem amination/imination sequence: application to the synthesis of (-)-mearsine // *Tetrahedron Lett.* – 2011. – Vol. 52. – № 17. – P. 2024–2027.

4. Усова Е. Б., Лысенко Л. И., Крапивин Г. Д. Синтез и свойства 6-ацетил 3- и 5-фурилциклогексенонов // *Химия и технологии фурановых соединений. Ч. 1: Сб. науч. тр. / Кубан. гос. технол. ун-т.* – Краснодар. – 1997. – С. 43–49.

УДК 678.027.3:001.895

В. Г. Василевич, инж.;
О. И. Карпович, зав. кафедрой МиК, канд. техн. наук;
Г. А. Величко, студ. (БГТУ, г. Минск)

ВЯЗКОУПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3Д-ПЕЧАТИ ПО ТЕХНОЛОГИИ ЭКСТРУЗИИ МАТЕРИАЛОВ

В связи с большой ролью, которую играют в настоящее время полимеры как конструкционные материалы в промышленности, строительстве, медицине, а также в связи с проблемой переработки их в изделия, изучение механических свойств полимеров в условиях, приближенных к эксплуатационным, приобретает исключительно важное значение. С учетом того, что характеристики полимеров и композиций на их основе существенно зависят от условий внешней среды, а особенно температуры, сведения о таких зависимостях необходимы. Также надо учитывать факт, что свойства материалов в изделиях, получаемых с использованием аддитивного синтеза, как правило ниже, чем у изделий, получаемых с использованием традиционных технологий.

Вязкоупругое поведение следует принимать в расчет на стадии разработки и моделирования изделий, что позволяет предсказать реакцию полимера на различные виды нагрузок и деформаций. Производители материалов для аддитивного синтеза не приводят данные о вязкоупругих характеристиках при температурах, превышающих комнатную, а исследования в литературе отсутствуют.

Цель работы – исследование влияния температуры эксплуатации на вязкоупругие характеристики материалов, используемых для

получения изделий методом аддитивного синтеза (экструзия материала). Для исследований использовали распространенные термопластичные полимеры: ABS-пластик, PETG, PLA, PP. Изготовление образцов с помощью аддитивных технологий проводили методом экструзии материала (FDM). Образцы получали с использованием 3D-принтеров Ultimaker 2+ (для PLA, PETG, PP) и Anycubic 4MAX Pro 2.0 (для ABS). Режимы изготовления образцов принимали из диапазонов, рекомендуемых производителем [1].

Сущность исследования вязкоупругих характеристик при повышенных температурах заключается в приложении к образцу постоянной нагрузки и фиксации его деформаций в течение длительного времени при постоянной температуре [2]. Температуры испытаний для образцов из ABS и PP составляли 25°C, 40°C и 60°C, для PETG и PLA – 25°C, 40°C и 50°C, нагрузка – 30% от разрушающей при соответствующих температурах [1]. Однако в связи со значительным удлинением образцов из PETG и PLA даже при 10% от разрушающей нагрузки при 60°C и 55°C принято решение снизить температуры экспериментов на 10°C и 5°C соответственно. Таким образом определяли параметры вязкоупругости: мгновенный (H) и длительный (E) модули упругости и время релаксации (n), значения которых приведены в таблице. По полученным данным построены температурные зависимости вязкоупругих характеристик исследуемых полимерных материалов при растяжении (рисунок 1).

Для образцов из ABS длительный модуль упругости при 40°C оказался выше, чем при 25°C. Такой результат может объясняться дефектами печати и тем, что в этом полимере при данной температуре еще не происходит смещений и деформаций молекулярных цепочек.

Для более полного представления о влиянии изменения внешней температуры в интервале от 25°C до 60°C на рисунке 2 приведены данные по тепловому изменению не в абсолютных величинах механических свойств, а значения вязкоупругих характеристик при той или иной температуре T , отнесенных к их величине, определенной при стандартной $T=25^\circ\text{C}$, т.е.

$$\Psi_{\sigma} = \frac{\sigma_{p(T)}}{\sigma_{p(T=25^\circ\text{C})}}.$$

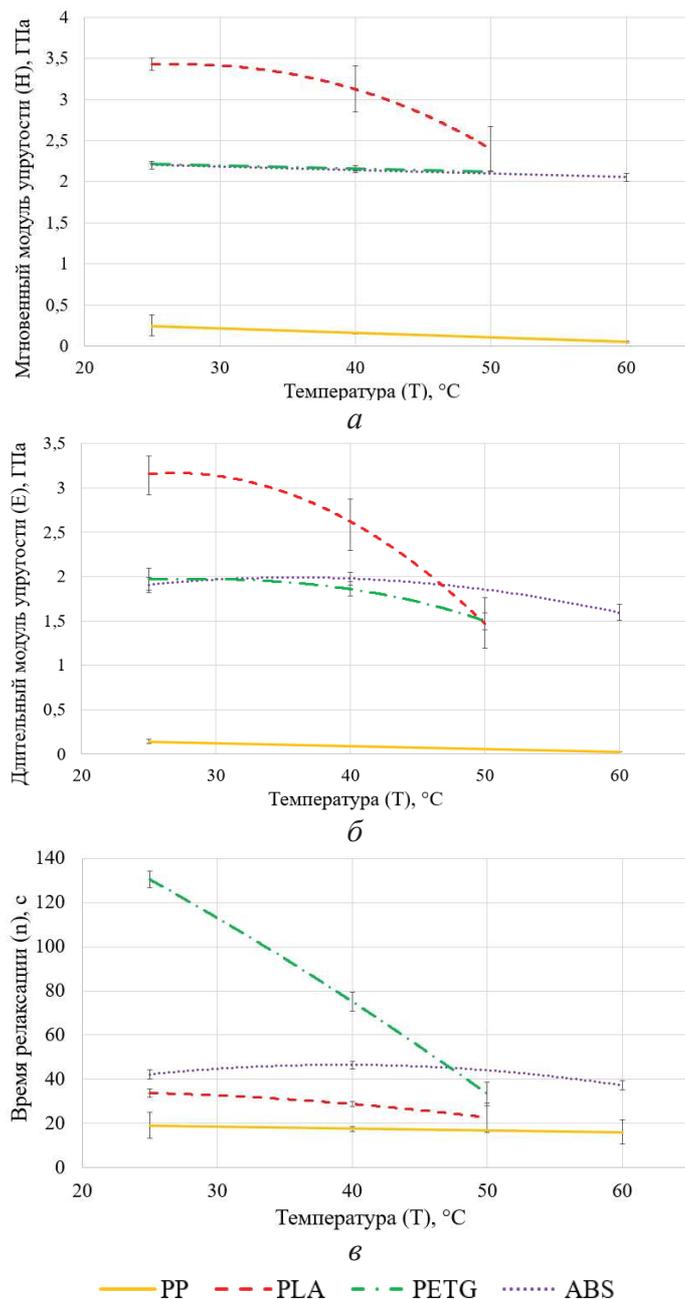


Рисунок 1 – Температурные зависимости параметров вязкоупругости при растяжении: мгновенного (а) и длительного (б) модулей упругости, времени релаксации (в)

Таблица – Значения вязкоупругих параметров при растяжении

Материал	25°C			40°C			60°C (50°C)		
	H, ГПа	E, ГПа	n, с	H, ГПа	E, ГПа	n, с	H, ГПа	E, ГПа	n, с
ABS	2,20	1,91	42,21	2,15	1,98	46,56	2,05	1,59	37,24
PETG	2,23	1,97	130,5	2,14	1,86	75,17	2,13	1,50	33,32
PLA	3,43	3,14	33,77	3,12	2,58	28,78	2,40	1,48	22,69
PP	0,248	0,141	19,27	0,159	0,083	17,53	0,054	0,026	16,17

Наиболее существенные изменения мгновенного и длительного модулей упругости выявлены у PP; значительные изменения наблюдались при 50°C у PLA; а PETG демонстрировал полную потерю упругих свойств свыше 55°C.

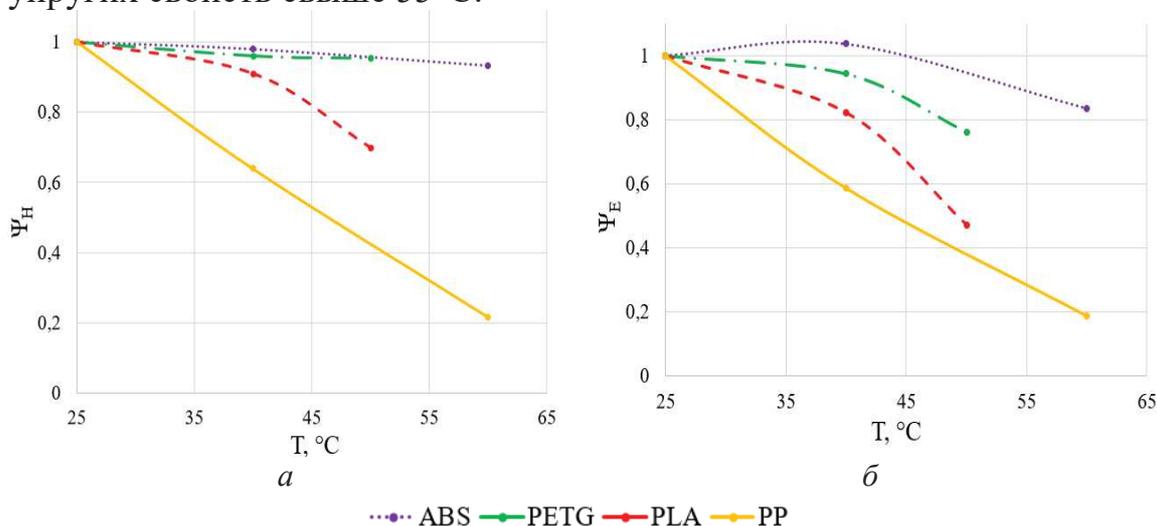


Рисунок 2 – Зависимость относительных модулей упругости при растяжении от температуры: *a* – мгновенного, *б* – длительного

Полученные данные можно использовать при проектировании изделий, изготавливаемых с использованием аддитивных технологий и эксплуатирующихся при повышенных температурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василевич В. Г., Карпович О. И. Температурные зависимости эксплуатационных характеристик материалов аддитивного синтеза // Технология органических веществ: материалы 87-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов, Минск 31 января – 17 февраля 2023 г. – Минск: БГТУ, 2023. – С. 150–153.

2. Ставров В. П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие для студентов специальностей «Конструирование и производство изделий из композиционных материалов» / В. П. Ставров. – Минск: БГТУ, 2008. – 262 с.