

Влияние термической обработки на динамические характеристики балочных конструкций из полилактида, напечатанных на 3D-принтере FDM-методом

© М.Ю. Логуненко, Е.А. Корбут, В.Е. Куклин, А.С. Ермилов

АО «ВПК «НПО машиностроения», Реутов, 143966, Россия

Приведено общее описание технологии метода FDM и дан краткий обзор его применения в аэрокосмической отрасли. Рассмотрены основные преимущества и недостатки применения полилактида при 3D-печати. Определено влияние термической обработки на динамические характеристики балочных конструкций, напечатанных на 3D-принтере из полилактида. Резонансные вибрационные испытания образцов балок были проведены при различной плотности заполнения и разных режимах предварительной термической обработки в печи. Представлен сравнительный анализ собственных частот и коэффициентов демпфирования образцов в зависимости от предварительной температуры нагрева. Экспериментальное исследование показало, что термическая обработка балочных конструкций из полилактида приводит к увеличению их жесткости и практически не влияет на демпфирование. По результатам работы была определена оптимальная температура предварительного нагрева для полилактида.

Ключевые слова: 3D-печать, метод FDM, полилактид, модальный анализ, вибрация, термическая обработка, прототипирование

Введение. Аддитивное производство с использованием 3D-печати включает в себя технологии по созданию объектов при нанесении последовательных слоев материала, воссоздающих очертание модели на основе цифрового 3D-образца. Существует масса способов создания объектов аддитивного производства, различающихся как принципами нанесения, так и материалами формирования объектов.

Наиболее распространенной и доступной технологией 3D-печати является FDM (от англ. Fused Deposition Modeling) — моделирование послойного наплавления термопластичными материалами. Процесс создания объекта начинается с обработки цифровой 3D-модели, программа делит модель на слои и, если необходимо, генерирует поддерживающие структуры. Далее изделие формируется выдавливанием («экструзией») расплавленного термопластика или другого композитного материала из последовательных слоев, застывающих сразу после экструдирования. Пластиковая нить разматывается с катушки и подается в экструдер — устройство, оснащенное механическим приводом для подачи нити, нагревательным элементом для плавки материала и соплом, через которое осуществляется сама экструзия [1]. Нагревательный элемент повышает температуру сопла, которое плавит пластиковую нить и подает расплавленный материал

на стол, где строится модель. Как правило, верхняя часть сопла, наоборот, охлаждается вентилятором для того, чтобы создать резкий градиент температур, необходимый для обеспечения плавной подачи материала. Печатающая головка и/или стол двигаются по осям XYZ, чтобы выложить материал по заданным координатам. Схема печати методом FDM приведена на рис. 1.

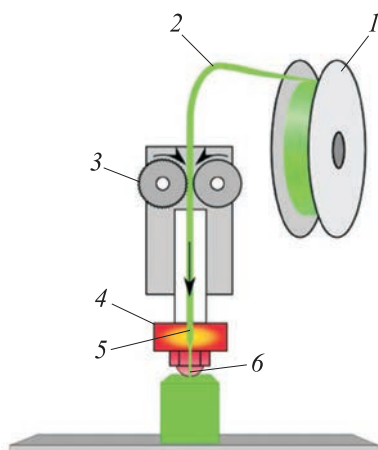


Рис. 1. Схема 3D-печати методом FDM:

1 — катушка с материалом; 2 — подводимая к экструдеру нить; 3 — используемые экструдером валики и система захвата для точной подачи/отвода материала; 4 — нагревательный блок для расплава нити до требуемой температуры; 5 — нагретый материал, проталкиваемый через сопло, которое имеет меньший диаметр; 6 — печатающая головка

Метод FDM используется в авиационно-космической промышленности пока еще крайне незначительно, хотя постепенно внедряется все активнее [2, 3]. Некоторые примеры применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли представлены на рис. 2. Активному внедрению FDM-метода печати способствуют его уникальные возможности, что позволяет формировать конструкции такой формы, которые невозможно создать традиционными способами. В мелкосерийной и высокостоимостной отрасли промышленности, а именно авиационно-космической, метод FDM имеет существенное преимущество перед традиционными способами изготовления благодаря снижению стоимости и сокращению времени производства, особенно при прототипировании. Метод FDM позволяет также воссоздавать детали устаревших конструкций в случае отсутствия на рынке оригинального производителя [4]. Разработка новых материалов с улучшенными механическими характеристиками и развитие новых способов их обработки приведут в дальнейшем к более широкому использованию метода FDM [5].

Ассортимент материалов для FDM-печати — самый широкий среди возможных для других технологий. Допустимо, как правило, использовать термопластики либо композитные материалы, содержащие различные добавки. Самыми распространенными являются пластики ABS (акрилонитрил-бутадиен-стирол) и PLA (полилактид) [6, 7].

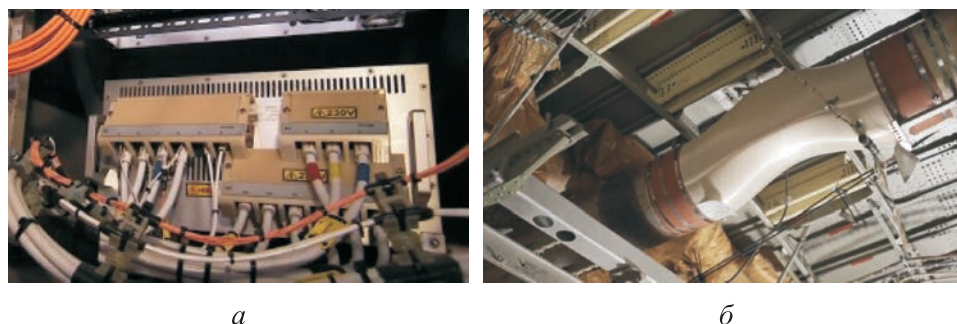


Рис. 2. Примеры использования аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли:
а — корпус электрического прибора, установленный в самолете Airbus A350;
б — воздуховод, смонтированный на самолете Orbis Flying Eye Hospital

Для проведения исследований выбран PLA-пластик, который уже широко применяется в промышленности. Из него изготавливают детали автомобилей, корпуса крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры. PLA-пластик пригоден для нанесения гальванического покрытия и даже металлизации (некоторые марки), так как не дает усадки при печати (это позволяет получать точное соответствие размеров напечатанного изделия смоделированному), нетоксичен и био-разлагаемый.

Одна из проблем при печати изделий из пластмасс на 3D-принтере — низкая жесткость конечного изделия, т. е. способность к деформированию и изменению формы под воздействием эксплуатационных нагрузок, поэтому приходится изготавливать детали из более дорогостоящих материалов. Следовательно, целесообразно внедрять технологии, повышающие жесткость и снижающие стоимость выпускаемых изделий из пластмасс [8].

В данной работе рассмотрена операция термической обработки напечатанных 3D-изделий с целью исследовать влияние температуры обработки на их динамические характеристики.

Постановка задачи. Объектами исследования выбраны три балки с разным процентным их заполнением и, следовательно, разной массой, но с одинаковыми габаритными размерами (табл. 1). Формы заполнения показаны на рис. 3. Для всех балок был применен ромбовидный тип заполнения с толщиной внутренних стенок 0,5 мм и внешних — 1 мм.

Таблица 1

Характеристики исследуемых балок

Заполнение балки, %	Высота, мм	Ширина, мм	Длина, мм	Масса, г
25	10	20	250	27,2
50				37,9
75				48,7

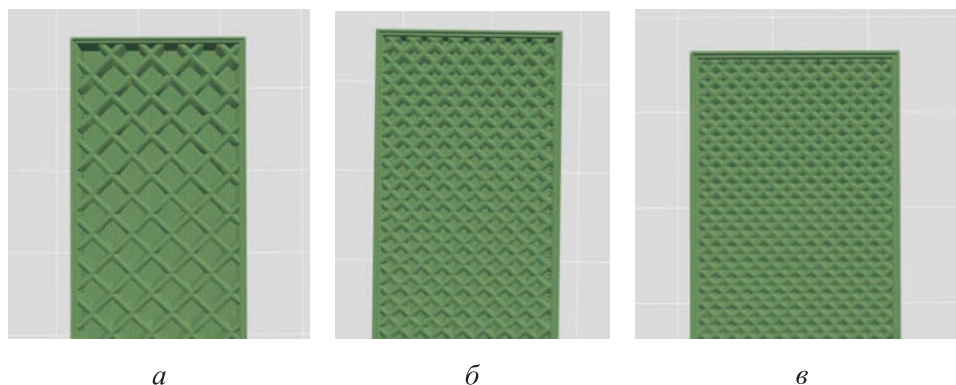


Рис. 3. Форма балок с заполнением:
a — 25%-ным; *б* — 50%-ным; *в* — 75%-ным

Образцы печатали на принтере MakerBot Replicator Z18, их термическую обработку проводили в сушильном шкафу ШС-80-01-СПУ. Фотографии используемого оборудования приведены на рис. 4.

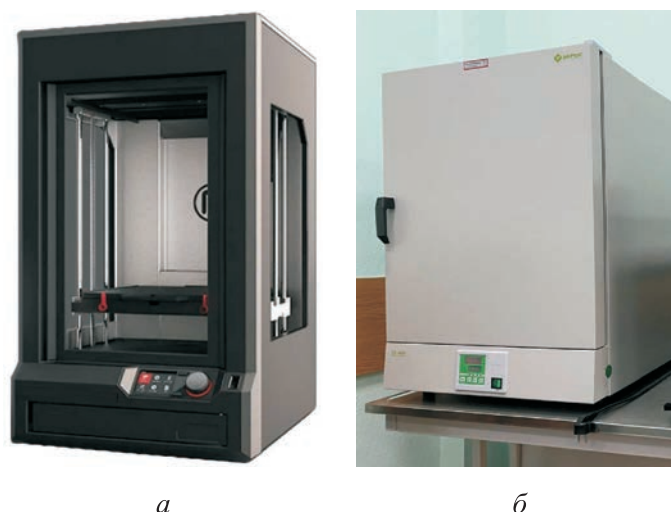


Рис. 4. Используемое в ходе исследования оборудование:
a — 3D-принтер MakerBot Replicator Z18; *б* — шкаф сушильный ШС-80-01-СПУ

Динамические испытания проходили на вибростенде Д40, образцы были консольно закреплены в продольном и поперечном положениях (рис. 5). Одноосный акселерометр был установлен на свободном конце образцов. Описание испытаний с аналогичными образцами и тем же способом крепления приведены в [9, 10]. Каждый образец подвергался воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 5 до 200 Гц, с постоянной амплитудой ускорений 0,5g. При всех испытаниях у группы образцов длину свободного конца устанавливали равной 200 мм для нивелирования эффекта усадки, происходящей при термической обработке.

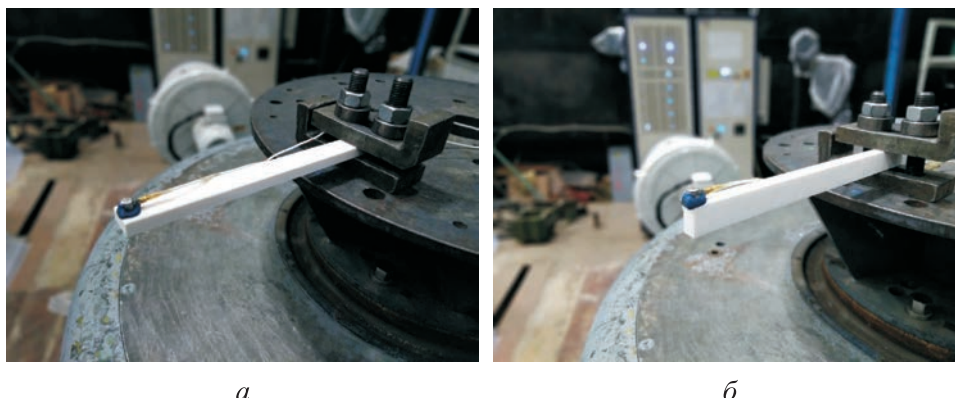


Рис. 5. Образцы, установленные на вибростенде Д40 в продольном (а) и поперечном (б) положениях

Была проведена серия из 15 динамических испытаний образцов, подвергнутых предварительной термической обработке от 70 до 140 °С с шагом 5 °С. Кроме того, группа образцов после печати и до первой термической обработки также подвергалась динамическим испытаниям.

Для исследования влияния термической обработки на печатные 3D-изделия их нагревали до определенных температур (T_H), находящихся в интервале между температурами стеклования и плавления, выдерживали в течение 1 ч и оставляли остывать на спокойном воздухе (рис. 6).

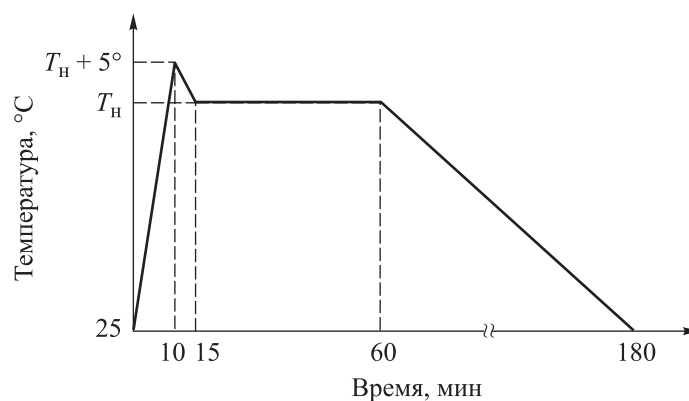


Рис. 6. Температурный режим

Основные результаты. Графики зависимости собственной частоты первого изгибного тона балок от температуры предварительного нагрева в продольном и поперечном направлениях представлены на рис. 7 и 8. На основании полученных результатов проведена аппроксимация полиномом второго порядка, вершины аппроксимированных

парабол показаны на графиках треугольниками (для испытаний балки с 25%-ным заполнением в поперечном положении приведено максимальное аппроксимированное значение).

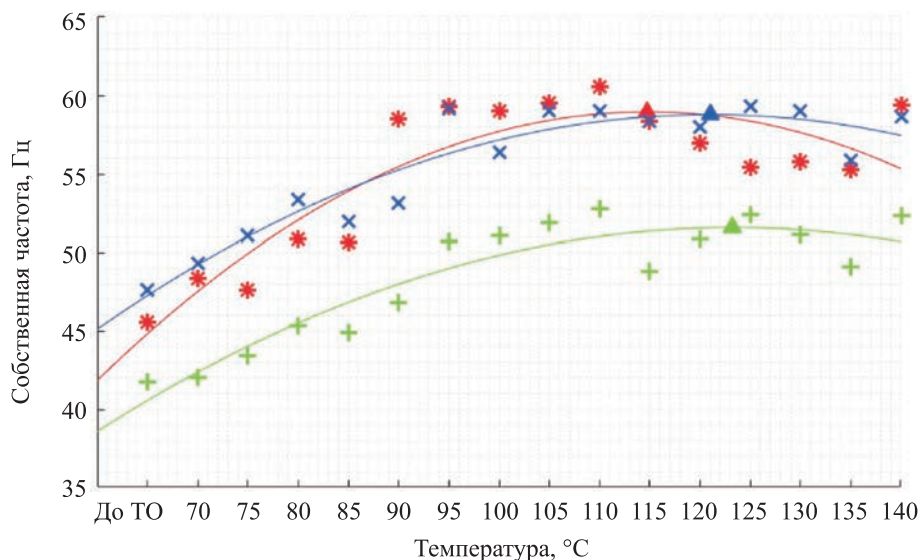


Рис. 7. Зависимость собственной частоты от предварительной температуры нагрева образцов в продольном направлении: испытания (*) и аппроксимация (—) для балки с 25%-ным заполнением; испытания (+) и аппроксимация (—) для балки с 50%-ным заполнением; испытания (x) и аппроксимация (—) для балки с 75%-ным заполнением

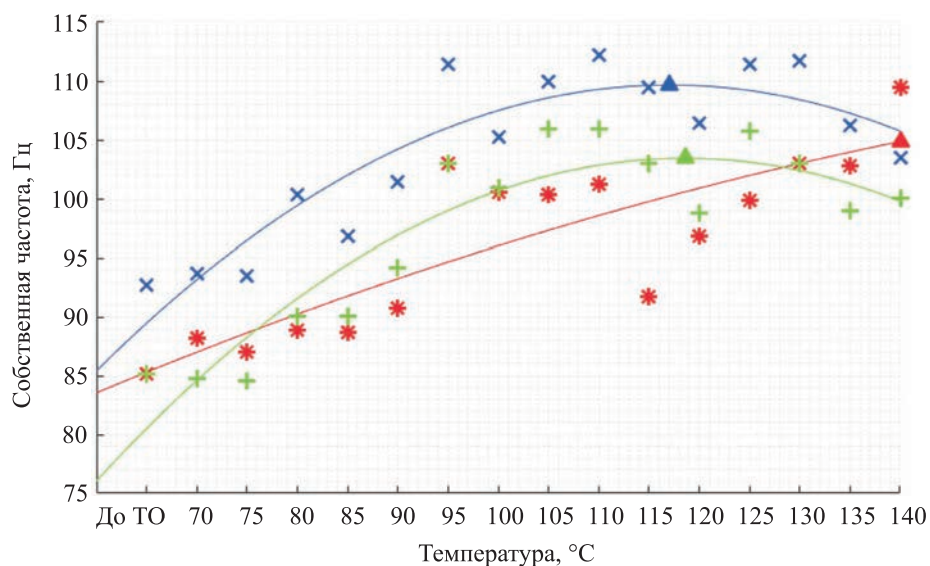


Рис. 8. Зависимость собственной частоты от предварительной температуры нагрева образцов в поперечном направлении: испытания (*) и аппроксимация (—) для балки с 25%-ным заполнением; испытания (+) и аппроксимация (—) для балки с 50%-ным заполнением; испытания (x) и аппроксимация (—) для балки с 75%-ным заполнением

Для сравнения в табл. 2 приведены первый изгибной тон колебаний до термической обработки (ТО) и его максимальное аппроксимированное увеличение после термической обработки при соответствующей температуре.

Таблица 2

Увеличение первой собственной частоты образцов

Заполнение балки, %	Собственная частота			Температура, °С
	До термической обработки, Гц	После термической обработки (максимальная), Гц	Увеличение, %	
<i>Продольное положение</i>				
25	45,56	58,95	29,39	114,77
50	41,74	51,57	23,55	123,24
75	47,60	58,78	23,49	120,98
<i>Поперечное положение</i>				
25	85,10	104,87	23,23	140
50	84,60	103,44	18,72	118,58
75	92,70	109,66	18,30	117,06

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что собственная частота увеличивается на 18,3...29,4 % при нагреве образцов в диапазоне температур 114,8...121,0 °С.

Для балки с 25%-ным заполнением при испытаниях в поперечном положении не наблюдается тех закономерностей, которые отмечаются в остальных образцах. Это может быть связано с появлением внутри образцов внутренних дефектов, полученных в ходе испытаний, которые невозможно обнаружить при внешнем визуальном осмотре.

Графики зависимости демпфирования балок от температуры предварительного нагрева в продольном и поперечном направлениях приведены на рис. 9 и 10. На основании полученных результатов выполнена аппроксимация полиномом первого порядка.

Значения относительного коэффициента демпфирования до ТО и значение его максимального аппроксимированного изменения после ТО приведены в табл. 3.

На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что начальный коэффициент относительного демпфирования находится в диапазоне значений 0,0066...0,0109 при среднеквадратичном значении 0,0092. Изменение значений относительного коэффициента демпфирования находится в диапазоне от -10,37 до +27,38 % при широком разбросе экспериментально полученных данных.

Неоднозначность результатов можно обосновать изменением внутреннего строения полилактида при термической обработке или тем, что местная контактная жесткость будет различной при регулярной переустановке образцов на оснастке в ходе испытаний.

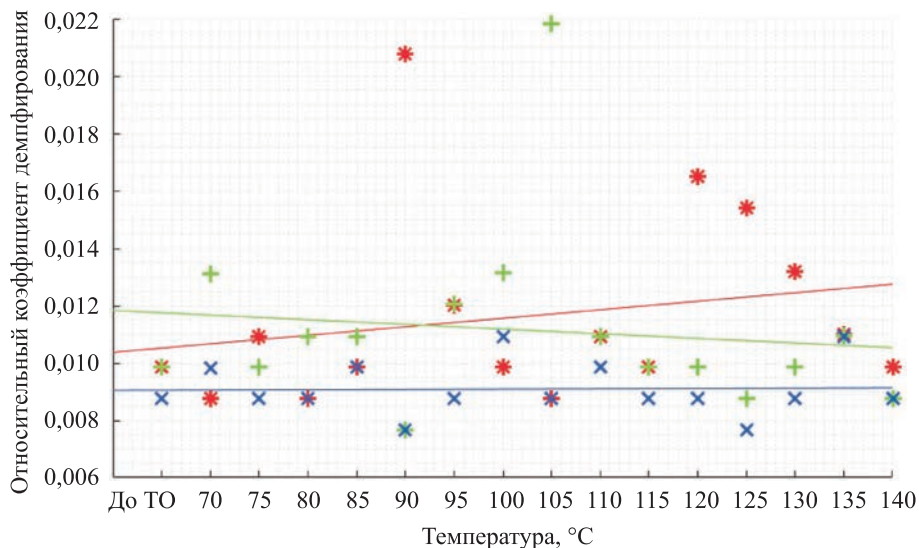


Рис. 9. Зависимость относительного коэффициента демпфирования от предварительной температуры нагрева образцов в продольном направлении: испытания (*) и аппроксимация (—) для балки с 25%-ным заполнением; испытания (+) и аппроксимация (—) для балки с 50%-ным заполнением; испытания (x) и аппроксимация (—) для балки с 75%-ным заполнением

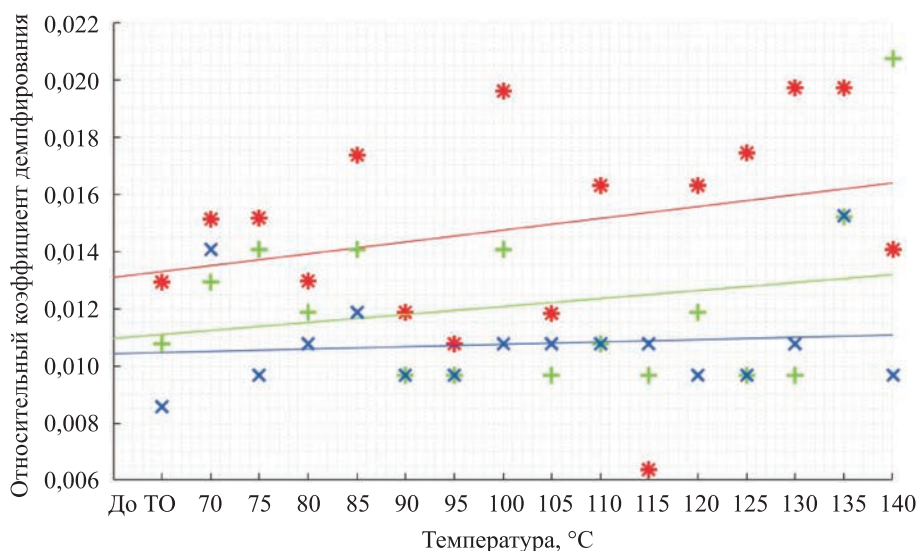
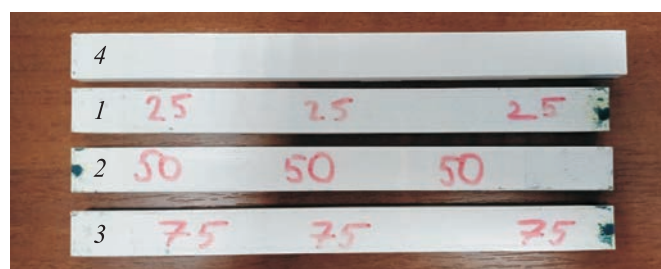


Рис. 10. Зависимость относительного коэффициента демпфирования от предварительной температуры нагрева образцов в поперечном направлении: испытания (*) и аппроксимация (—) для балки с 25%-ным заполнением; испытания (+) и аппроксимация (—) для балки с 50%-ным заполнением; испытания (x) и аппроксимация (—) для балки с 75%-ным заполнением

Коэффициент демпфирования на образцах различных балок

Заполнение балки, %	Коэффициент демпфирования до термической обработки	Максимальное аппроксимированное изменение коэффициента демпфирования после термической обработки, %
<i>Продольное положение</i>		
25	0,0099	21,18
50	0,0099	-10,37
75	0,0087	4,43
<i>Поперечное положение</i>		
25	0,0109	27,38
50	0,0087	23,01
75	0,0066	3,71

Несмотря на увеличение жесткостных характеристик исследуемых образцов, выявлен недостаток, который заключается в их термической усадке. Для сравнения на рис. 11 приведены фотографии образцов после испытаний (1–3) и балка 4, не подвергнутая термической обработке. Фактические габаритные размеры образцов даны в табл. 4.



а



б

Рис. 11. Фотография образцов балок с различным заполнением после испытаний в продольном (*а*) и поперечном (*б*) положениях:
 1 — с 25%-ным; 2 — с 50%-ным; 3 — с 75%-ным; 4 — не подвергнутая термической обработке балка

Реальные габаритные размеры образцов до и после испытаний

Характеристика	Заполнение балки, %		
	25	50	75
Высота, мм:			
до испытаний	10,4	10,2	10,3
после испытаний	10,8	10,5	10,7
Изменение, %	3,9	2,9	3,9
Ширина, мм:			
до	20,1	20,0	20,0
после	19,9	19,9	19,7
Изменение, %	-1,0	-0,5	-1,5
Длина, мм:			
до	247,9	248,1	248,2
после	239,9	241,0	241,1
Изменение, %	-3,2	-2,9	-2,9
Относительная объемная усадка, %	0,5	0,5	0,6

Результаты измерений показали, что относительное линейное изменение размеров образцов может как увеличиваться — по высоте до 3,9 %, так и уменьшаться — по длине до 3,2 %, по ширине до 1,5 %. Относительная объемная усадка образцов не превышала 0,6 %. При внешнем осмотре изменений формы и возникновения дефектов образцов не было обнаружено.

В дальнейшем, при выполнении термической обработки для улучшения жесткостных характеристик конструкций необходимо учитывать усадку материала.

Проведенное исследование показало, что термическая обработка может существенно увеличить жесткость на изгиб печатных 3D-изделий. Причем такую обработку можно применять не только для повышения жесткости изделий из PLA, но и для снижения стоимости производимой продукции.

Заключение. Определен диапазон температур нагрева для напечатанных из полилактида конструкций, при котором наблюдается максимальное усиление динамических характеристик для большинства образцов, — от 114,8 до 121,0 °С. В ходе исследований было выявлено увеличение собственной частоты первого тона колебаний более чем на 18 % для всех образцов, что свидетельствует о повышении жесткости данных конструкций при их постоянной массе. Был определен относительный коэффициент демпфирования для полилактида, равный 0,0092. Заметного однозначного влияния температурного нагрева на демпфирующие свойства конструкций не выявлено. Несмотря на увеличение жесткостных характеристик исследуемых образцов, отмечен такой недостаток, как их термическая усадка. Так, линейная усадка образцов находится в диапазоне от -3,2 до +3,9 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Куликов Г.Г., Кружков В.Н., Дронь Е.А., Колесников А.А., Кружков О.Н., Шарипова А.М. *Введение в информационные системы цифрового моделирования*. Москва, РИК УГАТУ, 2016, 184 с.
- [2] Dehoff R., Tallman C., Duty C., Peter W., Yamamoto Y., Chen W., Blue C. Case Study: Additive manufacturing of aerospace brackets. *Advanced Materials and Processes*, 2013, vol. 171, pp. 19–23.
- [3] Леоненков А.Д., Двирный В.В. Перспективы применения аддитивных технологий в аэрокосмической отрасли. *Решетнёвские чтения*, 2017, № 21–2, с. 632–633.
- [4] 3D Printed plastics in functional aerospace parts. *PADT Inc.* URL: <https://padtinc.com/2015/12/23/3d-printed-plastics-in-functional-aerospace-parts/> (дата обращения 20.01.2022).
- [5] Тилинин М.В., Прибытков Б.М. Аддитивные технологии в отечественном авиастроении: текущие позиции и направления развития. *Молодой ученый*, 2019, № 47 (285), с. 133–138. URL: <https://moluch.ru/archive/285/64365/> (дата обращения 29.01.2022).
- [6] Абрамова И.А., Полков Д.А. Технология послойного наплавления Fused Deposition Modeling. *Наука и военная безопасность*, 2016, № 3, с. 111–114.
- [7] Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L. Optimization of fused deposition modelling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 2015, no. 3, pp. 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- [8] Чуваев И.А., Габельченко Н.И. Термическая обработка 3D печатных изделий из пластмасс. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2019, № 6, с. 70–75.
- [9] Krishna Chaitanya S., Madhava Reddy Dr. K., Sai Naga Sri Harsha. Ch. Vibration properties of 3D printed/rapid prototype parts. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 2015, vol. 4, pp. 4602–4608.
- [10] Kannan S., Ramamoorthy M. Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D printed ABS, PC and PC-ABS materials. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7, pp. 111–123.

Статья поступила в редакцию 30.06.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Логуненко М.Ю., Корбут Е.А., Куклин В.Е., Ермилов А.С. Влияние термической обработки на динамические характеристики балочных конструкций из полилактида, напечатанных на 3D-принтере FDM-методом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2225>

Логуненко Михаил Юрьевич — инженер II категории, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: m.yu.logunenko@vpk.npomash.ru

Корбут Евгений Алексеевич — инженер-конструктор III категории, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: e.a.belanovich@vpk.npomash.ru

Куклин Василий Евгеньевич — начальник сектора, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: v.e.kuklin@vpk.npomash.ru

Ермилов Алексей Станиславович — зам. начальника отдела, АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: a.s.ermilov@vpk.npomash.ru

Heat treatment effect on dynamic characteristics of the polylactide beam structures printed on a 3D printer by the FDM method

© M.Yu. Logunenکو, E.A. Korbut, V.E. Kuklin, A.S. Ermilov

Joint Stock Company MIC Mashinostroyenia, Reutov, 143966, Russia

The paper presents general description of the FDM technology and a brief overview of its application in the aerospace industry. Main advantages and disadvantages of using polylactide in the 3D printing are considered. Influence of heat treatment on the dynamic characteristics of beam structures printed with a 3D printer from polylactide were determined. Resonance oscillation tests of the beam samples were carried out at different filling densities and various modes of preliminary thermal processing in the furnace. Comparative analysis of natural frequencies and damping coefficients of the samples depending on the preliminary heating temperature is provided. Experimental study showed that heat treatment of the beam structures made of polylactide leads to an increase in their rigidity and practically is not affecting the damping. Results of the work made it possible to determine the optimal preheating temperature for polylactide.

Keywords: 3D printing, FDM method, polylactide, modal analysis, oscillation, heat treatment, prototyping

REFERENCES

- [1] Kulikov G.G., Kruzhkov V.N., Dron E.A., Kolesnikov A.A., Kruzhkov O.N., Sharipova A.M. *Vvedenie v informatsionnye sistemy tsifrovogo modelirovaniya* [Introduction to digital modeling information systems]. Moscow, RIC USATU, 2016, 184 p.
- [2] Dehoff R., Tallman C., Duty C., Peter W., Yamamoto Y., Chen W., Blue C. Case Study: additive manufacturing of aerospace brackets. *Advanced Materials and Processes*, 2013, vol. 171, pp. 19–23.
- [3] Leonenکو A.D., Dvirny V.V. Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologiy v aerokosmicheskoy otrasli [Prospects for the use of additive technologies in the aerospace industry]. *Reshetnevskie chteniya — Reshetnev Readings*, 2017, no. 21–2, pp. 632–633.
- [4] 3D Printed plastics in functional aerospace parts. *PADT Inc.* Available at: <https://padtinc.com/2015/12/23/3d-printed-plastics-in-functional-aerospace-parts/> (accessed January 20, 2022).
- [5] Tilinin M.V., Pribytkov B.M. Additivnye tekhnologii v otechestvennom aviastroeniі: tekuschie pozitsii i napravleniya razvitiya [Additive technologies in the domestic aircraft industry: current positions and directions of development]. *Molodoy ucheny — Young scientist LLC*, 2019, no. 47 (285), pp. 133–138. Available at: <https://moluch.ru/archive/285/64365/> (accessed January 29, 2022).
- [6] Abramova I.A., Polkov D.A. Tekhnologiya posloynnogo naplavleniya [Fused deposition modeling technology]. *Nauka i voennaya bezopasnost (Science and military security)*, 2016, no. 3, pp. 111–114.
- [7] Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 2015, no. 3, pp. 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>

- [8] Chuvaev I.A., Gabelchenko N.I. Termicheskaya obrabotka 3D pechatnykh izdeliy iz plastmass [Heat treatment of 3D printed plastic products]. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skiy zhurnal — International Research Journal*, 2019, no. 6, pp. 70–75.
- [9] Krishna Chaitanya S., Madhava Reddy Dr. K., Sai Naga Sri Harsha. Ch. Vibration properties of 3D printed/rapid prototype parts. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 2015, vol. 4, pp. 4602–4608.
- [10] Kannan S., Ramamoorthy M. Mechanical characterization and experimental modal analysis of 3D printed ABS, PC and PC-ABS materials. *Materials Research Express*, 2020, vol. 7, pp. 111–123.

Logunenkov M.Yu., Engineer of the II category, Joint Stock Company MIC Mashinostroyeniya. e-mail: m.yu.logunenkov@vpk.npomash.ru

Korbut E.A., Design Engineer of the III category, Joint Stock Company MIC Mashinostroyeniya. e-mail: e.a.belanovich@vpk.npomash.ru

Kuklin V.E., Head of Sector, Joint Stock Company MIC Mashinostroyeniya. e-mail: v.e.kuklin@vpk.npomash.ru

Ermilov A.S., Deputy Head of Department, Joint Stock Company MIC Mashinostroyeniya. e-mail: a.s.ermilov@vpk.npomash.ru