

Химическая технология

Оригинальная статья/Original article

УДК 547.973.979

DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2017-4-157-164>

Изучение характеристик порошков полимеров для 3D-печати

Юрий Ф. Шутилин	¹	shurf7@mail.ru
Маргарита С. Щербакова	¹	schmstpp@yandex.ru
Владимир В. Хрипушин	²	hvvat@yandex.ru
Инна А. Борисова	¹	innaholiday@mail.ru

¹ Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия² ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Ст.Большевикова, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия

Реферат. Одна из самых больших проблем заключается в поиске способа восстановления дорогостоящего порошка. С этой целью необходимо было выяснить, что происходит с полиамидным порошком в камере принтера и какие процессы влияют на сырье, тем самым ухудшая его физико-механические свойства. Для того, чтобы ответить на эти вопросы, мы провели ряд исследований. Изделия из смеси с высоким соотношением сторон вторичного порошка теряют свои свойства: их поверхность грубая, повышенная хрупкость, существует вероятность деформации деталей. Нами осуществлялись исследования порошка на основе полиамида-12, применяемые ОАО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий» города Воронежа, марки PA2200, модифицированный. Материал белый порошок, непахучий. Увеличение степени кристалличности у переработанного полимера считается аномалией. Но нарушение такой тенденции обусловлено особенностями технологии селективного лазерного спекания. Таким образом, продолжительное нахождение порошка в камере при температуре, близкой к температуре плавления, а затем длительное охлаждение до комнатной температуры представляет собой идеальные условия для роста кристаллической фазы. В исследованиях удалось выявить различия, связанные с ухудшением физико-химических свойств порошка, после переработки. Наиболее значимым является укрупнение частиц вторичного порошка, по отношению к первичному. В связи с этим, у порошка, уже прошедшего стадию переработки, наблюдается увеличение температуры плавления, что вызывает дефекты изготовленных деталей: так как мощность углеродного лазера, сплавляющего частицы порошка, фиксирована, её энергии недостаточно для протекания эндотермической реакции, вызванной плавлением вторичного порошка. Таким образом, частицы порошка сплавляются лишь частично, вследствие чего у полученных изделий наблюдается увеличение хрупкости.

Ключевые слова: селективное лазерное спекание, 3D-печать, полиамид, рекуперация, аддитивное производство, дифференциальный термический анализ, динамическая вязкость, синхронный термический анализ

The study of characteristics of powders of polymers for 3D printing

Yurii F. Shutilin	¹	shurf7@mail.ru
Margarita S. Shcherbakova	¹	schmstpp@yandex.ru
Vladimir V. Khripushin	²	hvvat@yandex.ru
Inna A. Borisova	¹	innaholiday@mail.ru

¹ Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia² N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy, Bolshevikov str., 54A, Voronezh, 394064, Russia

Summary. One of the biggest challenges is to find ways of recovering the expensive powder. With this aim, we needed to find out what happens with polyamide powder in the chamber of the printer and what processes affect raw materials, thereby impairing the physico-mechanical properties. In order to answer these questions, we conducted a number of studies. Articles of mixtures with a high aspect ratio of the secondary powder lose their properties: their surface is rough, increased fragility, there is a possibility of deformation of details. We carried out studies of the powder based on polyamide-12, applied by JSC "Center of technological competence of additive technologies" of the city of Voronezh, brand PA2200 modified. Material white powder, odourless. An increase in the degree of crystallinity from recycled polymer is considered an anomaly. But the violation of this trend due to the peculiarities of the technology of selective laser sintering. Thus, prolonged exposure of the powder in the chamber at a temperature close to the melting point, followed by a long cooling to room temperature represents the ideal conditions for the growth of crystalline phase. The research was able to identify differences due to deterioration of the physico-chemical properties of the powder after processing. The most important is the agglomeration of particles of the secondary powder in relation to the primary. In this regard, powder, already passed the stage of processing, an increase in the melting temperature, which causes defects in the fabricated parts: as the capacity of the carbon laser melting powder particles is fixed, its energy is not sufficient for the occurrence of the endothermic reaction caused by melting of the secondary powder. Thus, the powder particles only partially fused, whereby the resulting products of the observed increase in fragility.

Keywords: selective laser sintering, SLS; 3-dimensional printing, polyamide, recovery, additive production, differential thermal analysis, dynamic viscosity, simultaneous thermal analysis

Для цитирования

Шутилин Ю.Ф., Щербакова М.С., Хрипушин В.В., Борисова И.А. Изучение характеристик порошков полимеров для 3D-печати // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 4. С. 157–164. doi:10.20914/2310-1202-2017-4-157-164

For citation

Shutilin Ju.F., Shcherbakova M.S., Hripushin V.V., Borisova I.A. The study of characteristics of powders of polymers for 3D printing. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 4. pp. 157–164. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-4-157-164

Введение

Аддитивные технологии предполагают собой компьютерное моделирование трехмерных деталей любой сложности и их послойное воссоздание с помощью автоматических систем. 3D-печать может осуществляться разными способами и с использованием различных материалов, но в основе любого из них лежит принцип послойного создания (выращивания) твердого объекта [1].

Для создания слоев применяют технологии:

1. Лазерная стереолитография – ультрафиолетовый лазер постепенно, пиксель за пикселем, засвечивает жидкий фотополимер. При этом жидкий полимер затвердевает и превращается в достаточно прочный пластик.

2. Селективное лазерное спекание (англ. *Melting*) – при этом лазер сплавляет порошок из металла или пластика, слой за слоем, в контур будущей детали.

3. Ламинирование – деталь создается из большого количества слоев рабочего материала, которые постепенно накладываются друг на друга и склеиваются, при этом лазер вырезает в каждом контуре сечения будущей детали.

4. Застывание материала при охлаждении – технология заключается в том, что раздаточная головка выдавливает на охлаждаемую платформу основу капли разогретого термопластика. Капли быстро застывают и слипаются друг с другом, формируя слои будущего объекта.

5. Полимеризация фотополимерного пластика под действием ультрафиолетовой лампы – способ похож на предыдущий, но пластик твердеет под действием ультрафиолета.

6. Склеивание или спекание порошкообразного материала – похоже на лазерное спекание, только порошковая основа (подчас на основе измельченной бумаги или целлюлозы) склеивается жидким (иногда клеящим) веществом, поступающим из струйной головки. При этом можно воспроизвести окраску детали, используя вещества различных цветов. Существуют образцы 3D-принтеров, использующих головки струйных принтеров [2, 3].

7. Биопринтеры – ранние экспериментальные установки, в которых печать 3D-структуры будущего объекта (органа для пересадки) производится каплями, содержащими живые клетки. Далее происходит деление, рост и модификации клеток, обеспечивающие окончательное формирование объекта [4].

Селективное лазерное спекание (SLS) – метод аддитивного производства, используемый для создания функциональных прототипов и мелких партий готовых изделий. Принцип создания моделей в SLS принтере отличается тем, что в качестве исходного сырья используется порошкообразный термопластичный материал, который послойно спекается с помощью луча лазера.

Среди преимуществ данного метода следует отметить использование огромного количества нетоксичных и недорогих материалов, возможность одновременного создания нескольких моделей, а также низкие напряжения и деформации. Недостатком технологии является то, что полученные модели имеют довольно пористую и шероховатую структуру [4]. Технология послойного построения предполагает использование лазерного излучения с высокой мощностью (например, лазер на диоксиде углерода) для того, чтобы плавить небольшие частицы порошков в массу, имеющую желаемую трехмерную форму [5].

Спекание производится за счет вычерчивания контуров, заложенных в цифровой модели с помощью одного или нескольких лазеров. Порошок в рабочей камере разогревается до температуры, близкой к плавлению, разравнивается, и лучом лазера на нём прорисовывается необходимый контур. В месте контакта луча и порошка частицы плавятся и спекаются друг с другом и с предыдущим слоем. Затем платформа опускается на толщину одного слоя, в камеру насыпается новый слой порошка, разравнивается, и процесс повторяется. В итоге получается готовая модель с пористой шероховатой поверхностью. После изъятия модели камера полностью очищается от порошка (особенно это важно при смене материала) и может вновь приступить к работе.

В отличие от таких методов аддитивного производства, как стереолитография (SLA) или моделирования методом послойного наплавления (FDM), SLS не требует построения опорных структур. Навесные части модели поддерживаются неизрасходованным материалом. Такой подход позволяет добиться практически неограниченной геометрической сложности изготавливаемых моделей [5].

Физический процесс может быть представлен в виде полного, частичного плавления, или жидкофазного спекания. В зависимости от материала, при изготовлении деталей может быть достигнуто до 100 % плотности, что соответствует монолитному выплавлению деталей традиционными способами.

Материалы и методы

Одной из важнейших задач является поиск способа рекуперации дорогостоящего порошка. Преследуя эту цель, нам было необходимо выяснить, что происходит с полиамидным порошком в камере принтера? Какие процессы оказали влияние на исходное сырье, тем самым ухудшив его физико-механические свойства? Для ответа на поставленные вопросы нам был проведен комплекс исследований.

Изделия, изготовленные из смеси с большим соотношением вторичного порошка теряют свои свойства: их поверхность становится шероховатой (такое явление принято считать появлением апельсиновой корки), повышается хрупкость, появляется вероятность деформации (скручивания) деталей.

Нами осуществлялись исследования порошка на основе полиамида-12, применяемого АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий» города Воронежа, марки PA2200, модифицированный. Материал представляет собой порошок белого цвета, без запаха.

Нами были проведены такие исследования, как: дифференциальный термический анализ проводили с помощью установки для дифференциального термического анализа (ДТА). Были проведены приближенные испытания, в которых оценивали разницу тепловых эффектов при плавлении первичного и вторичного порошков; определение динамической вязкости. Для того, чтобы выяснить, каким образом изменилась температура плавления образцов, нами были проведены исследования изменения показателя текучести расплава (ПТР); синхронный термический анализ. Для более точного термохимического анализа были проведены исследования на приборе синхронного термического анализа модели STA 449 F3 Jupiter в лаборатории центра коллективного пользования «Контроль и управление энергоэффективных проектов» ФГБОУ ВО «Воронежского государственного университета инженерных технологий».

Результаты и обсуждение

В ходе литературного поиска, нами был найден патент [6], в котором причиной ухудшения физико-механических свойств полиамидных порошков предполагается возможное увеличение размера частиц. Учитывая необходимость оценки фракционного состава порошков, нами был разработан метод морфологического анализа частиц полиамида 12, применяемого в 3D-технологиях.

В результате исследований были получены фотографии микрочастиц порошков.

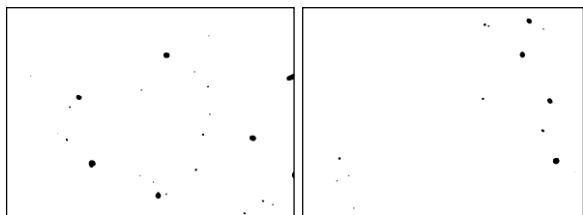


Рисунок 1. Микрофотографии частиц первичного порошка на основе полиамида-12, марки PA2200

Figure 1. Photomicrographs of the h-particles of the primary powder based on poly-amide-12, brand PA2200

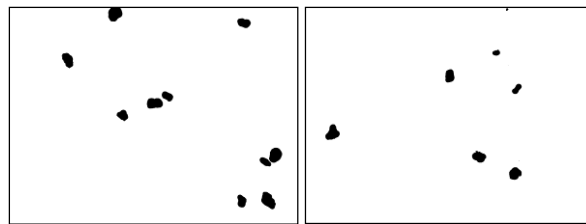


Рисунок 2. Микрофотографии частиц вторичного порошка на основе полиамида-12, марки PA2200

Figure 2. Photomicrographs of the h-particles of the secondary powder based on poly-amide-12, brand PA2200

На рисунках 1, 2 видно, что частицы первичного порошка имеют форму, более приближенную к сферической, в то время, как частицы вторичного порошка укрупнились и приобрели асимметричную форму. Это обусловлено процессами, происходящими при термическом окислении полиамидов: одной из особенностей технологии селективного лазерного спекания является переработка полимера в среде азота при температуре, близкой к температуре плавления порошка. В атмосфере инертного газа имеются следы кислорода и при высоких температурах происходят окисление и термодеструкция полиамидов, при которых выделяются вода, двуокись углерода и небольшие количества аммиака. Мы предполагаем, что после разрыва связей и присоединения кислорода, молекулы полиамида не удастся вернуться к шарообразному состоянию, частично слипаются и визуально это представляется появлением «наростов» и шероховатости на поверхности [7].

Таким образом, была получена выборка, которая насчитывала более тысячи объектов. Затем данные подвергались статистической обработке. Результаты представлены в виде гистограмм (рисунок 3), где по оси абсцисс отложены интервалы площади частиц, а по оси ординат – количество объектов с параметрами в данном интервале.

Для более наглядного сравнения были выведены интегральные кривые зависимости процентов количества частиц от заданных интервалов площади для первичного и вторичного порошков, которые представлены на рисунке 4.

Интегральные зависимости позволяют нагляднее оценить изменения во фракционном составе образцов: если у первичного порошка более 80% приходится на частицы заявленного производителем размера, то у вторичного, после каких-либо превращений, вызванных нахождением в рабочей камере принтера, это количество снижается до 30%.

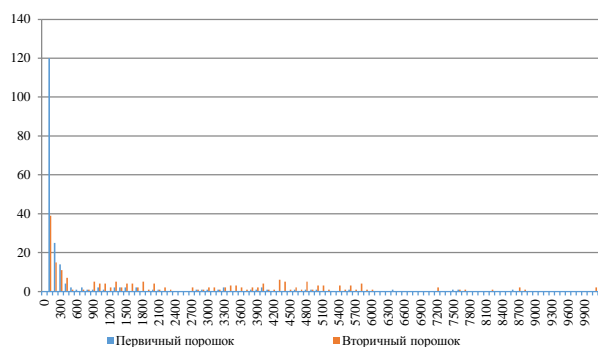


Рисунок 3. Гистограмма распределения частиц по значениям площади первичного и вторичного порошков

Figure 3. Histogram of particle distribution according to the area values of primary and secondary powders

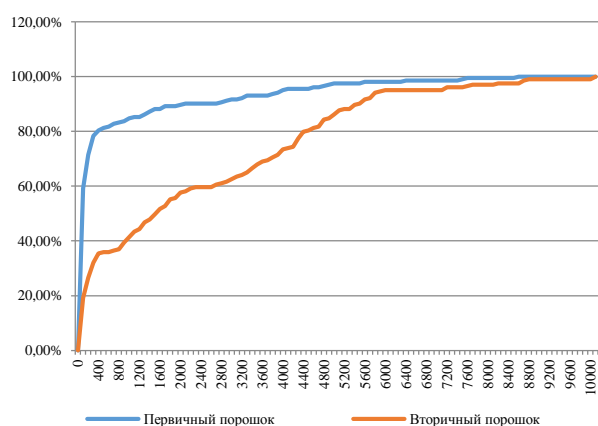


Рисунок 4. Интегральные кривые зависимости количества частиц от заданных интервалов площади

Figure 4. Integral curves of the number of particles from a given interval square

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о фиксируемых различиях в геометрии исследуемых материалов: у вторичного порошка снизилось количество частиц мелкой фракции и появилось большое количество крупных частиц, что свидетельствует об их агломерации. Учитывая, что оптимальный размер

частиц порошка, заявленный производителем, варьируется от 25 до 60 мкм (1 μm = 0,22 мкм; судя по гистограммам, тенденция у первичного порошка составляет от 100 до 300 μm , что соответствует 22–66 мкм), это может оказывать большое влияние на качество производимой продукции.

Исследования изменения структуры. Для выяснений связи различий между образцами порошков, были проведены исследования, которые помогли более полноценно представить природу и характер изменений.

Дифференциальный термический анализ (ДТА). Различия геометрических и фракционных характеристик, увеличение степени деструкции вторичного порошка неминуемо окажет влияние и на степени его кристалличности или агрегации макромолекул. Это дает право предположить об изменении термохимических свойств исследуемых материалов.

В результате, были обнаружены пики на дифференциальной кривой в области температур плавления. Это свидетельствует о том, что при плавлении образцы полиамидных порошков ведут себя по-разному.

Гравиметрический анализ. Известно, что некоторые полиамиды обладают высоким показателем влагопоглощения [8]. Учитывая, что полиамидные материалы, предназначенные для изготовления изделий методом 3D-печати, хранятся в негерметичной таре, а также претерпевают многократные перепады температур от комнатной до рабочей температуры принтера (175 °C), можно предположить, что в порошке содержится большая доля влаги. В таком случае, это окажет негативное влияние на точность измерений ПТР.

Для определения влаги в образцах полиамидных порошков, нами был проведен гравиметрический анализ, результаты которого представлены в таблице 1:

Таблица 1.

Результаты гравиметрического исследования

Table 1.

The results of gravimetric studies

Образец Sample	Масса чашки, г Mass of the cups, g	Масса чашки и порошка до прокаливания, г Mass of the Cup and of the powder before calcination, g	Масса чашки и порошка после прокаливания, г Mass of the Cup and of the powder after calcination, g	Изменение массы до и после прокаливания, г The change of mass before and after calcination, g	Массовая доля общей влаги, % Mass fraction of total moisture, %
Первичный порошок Primary powder	103,983	107,9859	107,9827	0,0032	0,08
Вторичный порошок Secondary powder	93,1293	97,1302	97,1293	0,0009	0,02

Потери массы не превышают 0,25 %, что совпадает с заявленным производителем влагопоглощением. Можно сделать вывод, что гигроскопичность полиамидных порошков не оказывает значительного влияния на проведенные

исследования показателя текучести расплава и ею можно пренебречь. Определение динамической вязкости. Полученные данные представлены в виде таблицы 2:

Таблица 2.

Результаты измерений ПТР

Table 2.

The results of this change of melt index of thermoplastics

Опыт Experiment	Образец Sample	ПТР, г / 10 мин Melt index of thermoplastics, g / 10 min.	ПТРср, г / 10 мин The average melt index of thermoplastics, g / 10 min.
1	Первичный порошок Primary powder	54,32	55,42
2		56,74	
3		55,21	
4	Вторичный порошок Secondary powder	36,73	34,98
5		33,3	
6		34,92	

Одним из выводов, при анализе полученных результатов, является увеличение температуры, необходимой для плавления вторичного порошка.

Так же полученные данные являются косвенным доказательством агломерации частиц вторичного порошка.

Определение степени кристалличности. Для расчетов степени кристалличности необходимы

данные истинной плотности порошков. Результаты измерений представлены в виде таблицы 3.

Изменение степени кристалличности подразумевает не полный переход из аморфного состояния в кристаллическое, а изменение соотношения различных фаз (которых в полимерах насчитывают до 7) [9].

Таблица 3.

Результаты определения истинной плотности и степени кристалличности порошков, на основе полиамида-12

Table 3.

The results of determination of true density and degree of crystallinity of powders based on polyamide-12

Наименование показателя Name of the indicator	Исследуемый образец / Sample	
	PA2200 (Первичный) PA2200 (Primary powder)	PA2200 (Вторичный) PA2200 (Secondary powder)
Истинная плотность, г/см ³ True density, g/cm ³	1,0627	1,0478
Степень кристалличности Degree of crystallinity	0,5104	0,6170
Изменение степени кристалличности, % The change in the degree of crystallinity, %	10	

Увеличение степени кристалличности у переработанного полимера считается аномалией. Но нарушение такой тенденции обусловлено особенностями технологии селективного лазерного спекания: после завершения процесса печати, принтер остывает в течение 10 часов. Медленное остывание под собственным весом необходимо для того, чтобы избежать деформации изделий. Таким образом,

продолжительное нахождение порошка в камере при температуре, близкой к температуре плавления, а затем длительное охлаждение до комнатной температуры представляет собой идеальные условия для роста кристаллической фазы.

Синхронный термический анализ. Результаты исследования первичного и вторичного порошков представлены на рисунке 5, таблице 4.

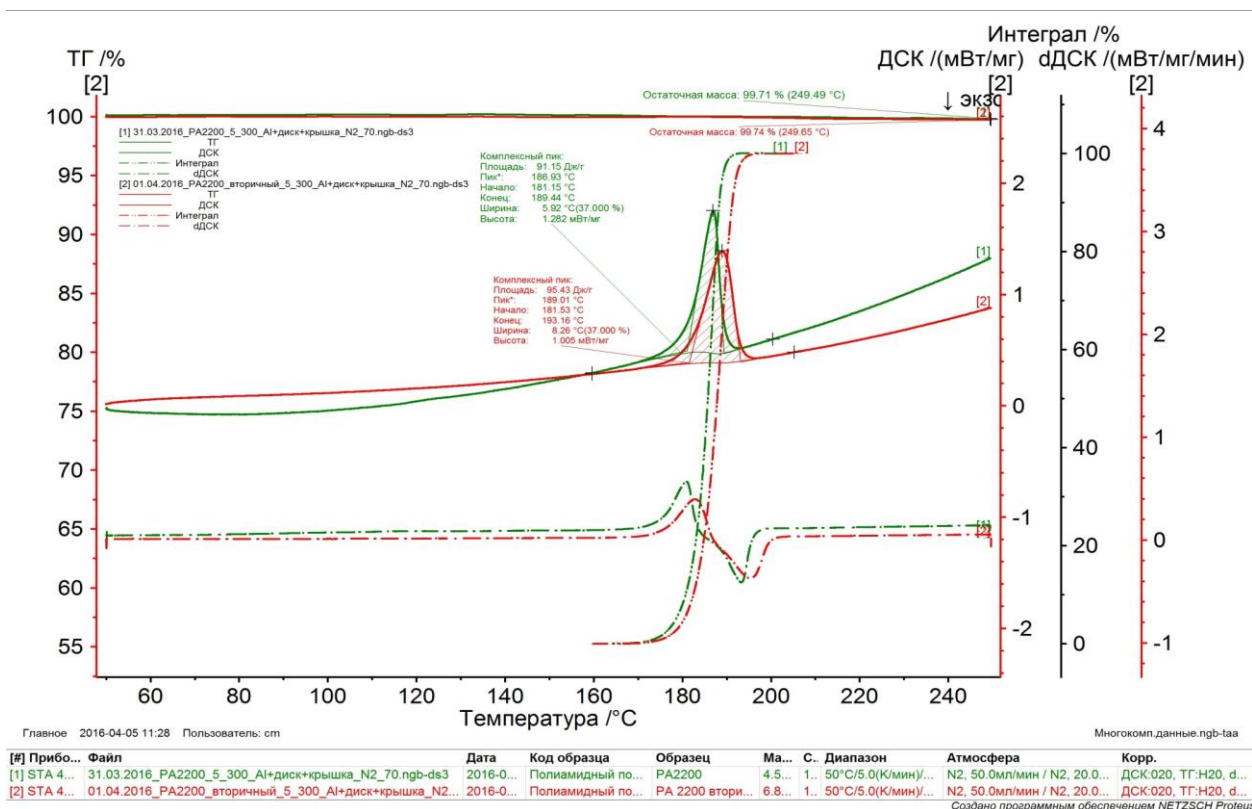


Рисунок 5. Результаты calorиметрического и гравиметрического исследования порошков.

Figure 5. Results of calorimetric and gravimetric studies of powders.

Таблица 4.

Результаты исследования порошков

Table 4.

The results of the study powders

Наименование исследования Name of research	Наименование показателя Name of the indicator	Образец	
		РА 2200 (Первичный) PA2200 (Primary powder)	РА 2200 (Вторичный) PA2200 (Secondary powder)
Дифференциальная сканирующая калориметрия Differential scanning calorimetry	Площадь, Дж/г Surface, J/g	91,15	95,43
	Пик, °C / Peak, °C	186,93	189,01
	Начало, °C Start, °C	181,15	181,53
	Конец, °C / End, °C	189,44	193,16
	Ширина, °C Width, °C	5,92	8,26
	Высота, мВт/мг Height, mW/mg	1,282	1,005
Термогравиметрический анализ Thermogravimetric analysis	Остаточная масса, % The residual mass, %	99,71	99,74

На термограмме дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) в интервале температур от 50 до 150 °C у первичного порошка наблюдается экзотермический эффект, что можно объяснить различиями в теплоемкости и молекулярной структуре исследуемых порошков.

При нагревании до 181 °C наблюдается появление пиков на кривых, которые связаны с поглощением тепла, необходимого для плавления. Большая площадь пика кривой, соответствующей

вторичному порошку, а также её смещение в сторону более высоких температур, свидетельствует о необходимости большего количества тепла, необходимого для его плавления. Вторичный порошок, вследствие нахождения в камере принтера, претерпевал физические, химические изменения, что сказалось на повышении температуры его плавления. В подтверждение этому могут служить данные об изменении степени кристалличности, показателя текучести расплава у образцов.

Высота пика кривой первичного порошка свидетельствует о большем эндотермическом эффекте. Большой пик при его плавлении указывает на более однородную структуру. После переработки порошка увеличивается его молекулярно-массовое распределение [10], высота его пика при плавлении уменьшается, а площадь увеличивается. Смещение пика вправо показывает, что вторичному порошку для плавления необходима большая температура.

Кривая 2-го порядка dДСК является качественной характеристикой. Принято считать, что точки перегиба на этой кривой свидетельствуют о смещении равновесия, вызванного образованием нового компонента. Так же могут протекать и другие процессы, среди которых: изменения степени кристалличности, соотношения аморфной и кристаллической фаз, изменение линейного строения молекулы и др.

Ход кривой термогравиметрического анализа показывает изменения массы порошка в процессе нагревания до заданной температуры. Эти данные коррелируют с проведенными ранее гравиметрическими испытаниями и не идут в разрез с паспортными данными исследуемых материалов.

Анализируя полученные результаты, можно предположить, что главной причиной появления дефектов на готовых изделиях является недостаточное количество энергии лазерного

излучения при его постоянной мощности. Это можно объяснить появлением во вторичном порошке химических структур, на расплавление которых требуется дополнительное тепло. Такими структурами могут быть новые твердые фазы, продукты деструкции, окисления или гидролиза порошка. На увеличение энергии плавления может влиять и изменение среднего размера и формы зерна порошка вследствие его агломерации или, например, поверхностного дробления.

Заключение

В ходе проведенных исследований нам удалось выявить различия, связанные с ухудшением физико-химических свойств порошка, после переработки. Наиболее значимым является укрупнение частиц вторичного порошка, по отношению к первичному. В связи с этим, у порошка, уже прошедшего стадию переработки, наблюдается увеличение температуры плавления, что вызывает дефекты изготовленных деталей: так как мощность углеродного лазера, сплавляющего частицы порошка, фиксирована, её энергии недостаточно для протекания эндотермической реакции, вызванной плавлением вторичного порошка. Таким образом, частицы порошка сплавляются лишь частично, вследствие чего у полученных изделий наблюдается увеличение хрупкости.

ЛИТЕРАТУРА

1 Mengxue Y., Chang Z., Xiaoyong T. Design and Selective Laser Sintering of complex porous polyamide mould for pressure slip casting // *Materials & Design*. 2016. P. 198–205.

2 Mys N., Verberckmoes A., Cardon L. Processing of Syndiotactic Polystyrene to Microspheres for Part Manufacturing through Selective Laser Sintering // *Polymers*. 2016. P. 11–15.

3 Kumaresan, T., Gandhinathan R., Ramu M. Design, analysis and fabrication of polyamide/hydroxyapatite porous structured scaffold using selective laser sintering method for bio-medical applications // *Journal of mechanical science and technology*. 2016. P. 5305–5312.

4 Miron-Borzan C.S., Dudescu M.C., Abd Elghany K. Analysis of Mechanical Properties of Selective Laser Sintered Polyamide Parts Obtained on Different Equipment // *Materiale plastic*. 2015. P. 39–42.

5 Griffiths C.A., Howarth J., De Almeida-Rowbotham G.A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing // *Journal of cleaner production*. 2016. P. 74–85.

6 Patent № 2012053922 A1 EP, МПК С 08 J 11/04. Method for recovering polymer powders / Gavrilin S.A.; № 10858717; Appl. 21.10.2010; Publ. 26.04.2012.

7 Шутин Ю.Ф. Физикохимия полимеров: Монография. Воронеж: Воронежская областная типография, 2012. 840 с.

8 Hofland E.C., Baran I., Wismeijer D.A. Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts // *Advances in materials science and engineering*. 2017. P. 109–114.

9 Майникова Н.Ф., Кох-Татаренко В.С., Желтов А.А., Решетова А.Д. и др. Исследование износостойкости полиамида // *Потенциал современной науки*. 2017. № 2 (28). С. 14–18.

10 Давыдов В.М., Мороков А.А. Лазерная обработка конструкционного полиамида на маломощном лазере // *Ученые заметки ТОГУ*. 2016. Т. 7. № 4. С. 445–448.

REFERENCES

1 Mengxue Y., Chang Z., Xiaoyong T. Design and Selective Laser Sintering of complex porous polyamide mould for pressure slip casting. *Materials & Design*. 2016. pp. 198–205.

2 Mys N., Verberckmoes A., Cardon L. Processing of Syndiotactic Polystyrene to Microspheres for Part Manufacturing through Selective Laser Sintering. *Polymers*. 2016. pp. 11–15.

3 Kumaresan, T., Gandhinathan R., Ramu M. Design, analysis and fabrication of polyamide/hydroxyapatite porous structured scaffold using selective laser sintering method for bio-medical applications. *Journal of mechanical science and technology*. 2016. pp. 5305–5312.

4 Miron-Borzan C.S., Dudescu M.C., Abd Elghany K. Analysis of Mechanical Properties of Selective Laser Sintered Polyamide Parts Obtained on Different Equipment. *Materiale plastic*. 2015. pp. 39–42.

5 Griffiths C.A., Howarth J., De Almeida-Rowbotham G.A design of experiments approach for the optimisation of energy and waste during the production of parts manufactured by 3D printing. *Journal of cleaner production*. 2016. pp. 74–85.

6 Gavrilin S.A. Method for recovering polymer powders. Patent № 2012053922, 2012.

7 Shutilin Yu.F. Fizikokhimiya polimerov [Physical chemistry of polymers] Voronezh, Voronezh regional printing house, 2012. 840 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Юрий Ф. Шутилин д.т.н., профессор, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, shurf7@mail.ru

Маргарита С. Щербак к.т.н., доцент, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, schmstpp@yandex.ru

Владимир В. Хрипушин к.х.н., доцент, кафедра физики и химии, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Ст. Большевиков, 54а, г. Воронеж, 394064, Россия, hvivat@yandex.ru

Инна А. Борисова магистр, кафедра химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, innaholiday@mail.ru

КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ПОСТУПИЛА 02.11.2017

ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 20.11.2017

8 Hofland E.C., Baran I., Wismeijer D.A. Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts // *Advances in materials science and engineering*. 2017. P. 109–114.

9 Mainikova N.F., Koh-Tatarenko V. S., Zheltov, A.A., Reshetova A.D. et al. Study of wear resistance of polyamide. *Potentsial sovremennoi nauki* [Potential of modern science] 2017. no. 2 (28). pp. 14–18. (in Russian).

10 Davydov V.M., Morokov A.A. Laser machining of polyamide with a low-power laser. *Uchenye zametki TOGU* [Scientists notes of PNU] 2016. vol. 7. no. 4. pp. 445–448. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Yurii F. Shutilin Dr. Sci. (Engin.), professor, department of chemistry and chemical technology organic compounds and polymer processing, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, shurf7@mail.ru

Margarita S. Shcherbakova Cand. Sci. (Engin.), associate professor, department of chemistry and chemical technology organic compounds and polymer processing, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, schmstpp@yandex.ru

Vladimir V. Khripushin Cand. Sci. (Chem.), associate professor, department of physics and chemistry, air force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Bolshevikov str., 54A, Voronezh, 394064, Russia, hvivat@yandex.ru

Inna A. Borisova master student, Department of chemistry and chemical technology organic compounds and polymer processing, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, innaholiday@mail.ru

CONTRIBUTION

All authors equally participated in writing the manuscript and responsible for the plagiarism

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

RECEIVED 11.2.2017

ACCEPTED 11.20.2017