

УДК 621.7

Причины появления и способы минимизации усадки при селективном лазерном спекании полимерных порошков

Жаворонкова Евгения Денисовна^(*)

zhavoronkova02@bk.ru

Воронова Полина Романовна

voronova-p@inbox.ru

Мельников Дмитрий Михайлович

melnikovd@bmstu.ru

SPIN-код: 7046-5680

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрена актуальность и важность технологии селективного лазерного спекания полимерных порошков в мировой и отечественной промышленности. Приведены ее достоинства перед другими аддитивными технологиями. Обозначен ключевой недостаток технологии — усадка. По отдельности рассмотрены причины появления усадки и способы минимизации ее влияния на конечную деталь. Среди причин изучены следующие: тип полимерного порошка, его внутренние свойства и примеси; мощность и длина волны лазера; температура выращивания; расположение детали в пространстве; равномерность остывания и влияние кислорода. Показаны результаты исследования некоторых факторов, влияющих на усадку. Сформулирован вывод о необходимости дальнейшего изучения технологии и улучшения качества получаемых с ее помощью деталей из-за прогнозируемого роста популярности и применимости этой технологии в мировой промышленности в течение ближайших четырех лет.

Ключевые слова: аддитивные технологии, селективное лазерное спекание, полимерные порошки, усадка, спектр поглощения полимеров

The causes and ways to minimize shrinkage during selective laser sintering of polymer powders

Zhavoronkova Evgeniya Denisovna^(*)

zhavoronkova02@bk.ru

Voronova Polina Romanovna

voronova-p@inbox.ru

Melnikov Dmitry Mikhailovich

melnikovd@bmstu.ru

SPIN-code: 7046-5680

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The relevance and importance of the technology of selective laser sintering of polymer powders in the global and domestic industry is considered. Its advantages over other additive technologies are given. The key drawback of the technology is shrinkage. The causes of shrinkage and ways to minimize its effect on the final part are considered separately. The following reasons have been studied: the type of polymer powder, its internal properties and impurities; laser power and wavelength; growing temperature; location of the part in space; uniformity of cooling and the effect of oxygen. The results of a study of some factors influencing shrinkage are shown. The conclusion is formulated that it is necessary to further study the technology and improve the quality of the parts obtained with its

help due to the projected growth in popularity and applicability of this technology in the global industry over the next four years.

Keywords: *additive technologies, selective laser sintering, polymer powders, shrinkage, absorption spectrum of polymers*

Введение. В статье рассматривается технология селективного лазерного спекания полимерных порошков в целом, подробнее изучается усадка деталей при выращивании их таким методом. Разобраны причины ее появления и способы минимизации ее влияния на геометрию деталей. Разобраться в этой проблеме необходимо по причине роста популярности технологии и появления новых материалов с улучшенными свойствами, что позволит ей занять новые ниши в промышленности в ближайшем будущем.

Материалы и методы. Технология селективного лазерного спекания полимерных порошков становится все популярней у производителей и является актуальной и на данный момент благодаря способности производить прочные, функциональные детали сложной геометрии без поддержек, что идеально подходит для мелкосерийного производства и быстрого прототипирования. Ее преимущества включают относительно высокую скорость изготовления, точность, отсутствие необходимости в опорных структурах, возможность работы с широким спектром промышленных полимеров, маленький вес получаемых деталей. Благодаря своим преимуществам технология активно применяется в автомобильной, аэрокосмической, медицинской, электронной и других областях.

Результаты. У пластиковых деталей, получаемых технологией селективного лазерного спекания, наиболее часто может встречаться такой дефект, как усадка, которая проявляется в искажении геометрии в процессе охлаждения. В некоторых случаях деталь может настолько исказиться, что ее использование будет невозможно. На равномерность и постепенность остывания, и, как следствие, на усадку, влияет множество факторов, которые, в свою очередь, можно контролировать или настраивать таким образом, чтобы в конечном итоге свести ее проявление к минимуму.

Тип полимерного порошка, его внутренние свойства и примеси. Спектр применяемых порошков и добавляемых к ним примесей очень широкий, у каждого порошка и каждой примеси есть свои внутренние свойства, по которым и определяют, насколько «устойчивой» будет смесь к влиянию усадки. Основным таким свойством является коэффициент теплового расширения: чем выше его значение, тем больше материал подвержен усадке.

Коэффициент линейного теплового расширения (КТЛР) является количественной характеристикой способности материала изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Он определяется как относительное изменение длины материала при изменении температуры на один градус. Полимерные материалы демонстрируют значительно более высокие КТЛР по сравнению с металлами. Это обусловлено особенностями структуры полимеров и характером межмолекулярных взаимодействий. Введение в полимер

минеральных примесей (стеклянные волокна, углеродные волокна, минеральные порошки) значительно снижает КТЛР. Многие полимеры способны поглощать влагу из окружающей среды, что приводит к их набуханию. Этот эффект может быть сопоставим с тепловым расширением или даже превышать его, особенно для гидрофильных полимеров типа нейлона. В таблице приведены значения некоторых полимеров и примесей, применяемых в селективном лазерном спекании [1].

КТЛР различных полимеров и примесей

Пластик/полимер	Коэффициент $\alpha \cdot 10^{-5}$ (1/К)	Температурный диапазон (°С)
Полипропилен (PP)	11,0	0–100
Нейлон	8,0–10,0	20–80
Полиамид-6 (РА-6)	8,2–9,7	0–180
Полиамид-12 (РА-12)	9,6–10	0–180
Углеволокно (CF)	–0,1–0,1	20–70
Стеклопластик	0,5–2,0	20–150

Мощность и длина волны лазера. Из-за относительно низких температур плавления полимеров, для их спекания не требуется больших мощностей лазера. В установках применяются лазеры с мощностями от 25 до 1000 Вт. Наиболее часто применимыми являются лазеры с мощностью около 100 Вт. Мощность лазера должна быть тщательно подобрана для обеспечения полного спекания без перегрева. Недостаточная мощность приводит к слабому межслойному соединению и высокой пористости. Избыточная — к деградации полимера, образованию пузырей и большему проявлению усадки. Также необходимо качественно сфокусировать луч: меньший диаметр пятна обеспечивает более высокое разрешение и точность [2, 3].

Большую роль играет длина волны излучения. В зависимости от конкретного материала, спектр его поглощения может быть разным. В большинстве своем полимеры наилучшим образом поглощают инфракрасное излучение, причем дальнего диапазона. В связи с чем, большую популярность в установках СЛС имеют СО₂-лазеры, длина волны которых 10,6 мкм. Однако, некоторые производители начали использовать волоконные лазеры. Они имеют ряд преимуществ по сравнению с газовыми [3]:

Повышенная точность обработки материала: пучок СО₂-лазеров обладает большим разбросом в сравнении с пятном волоконного лазера. Поэтому точность спекания порошка у волоконных лазеров выше, и они способны воспроизводить более мелкие элементы геометрии;

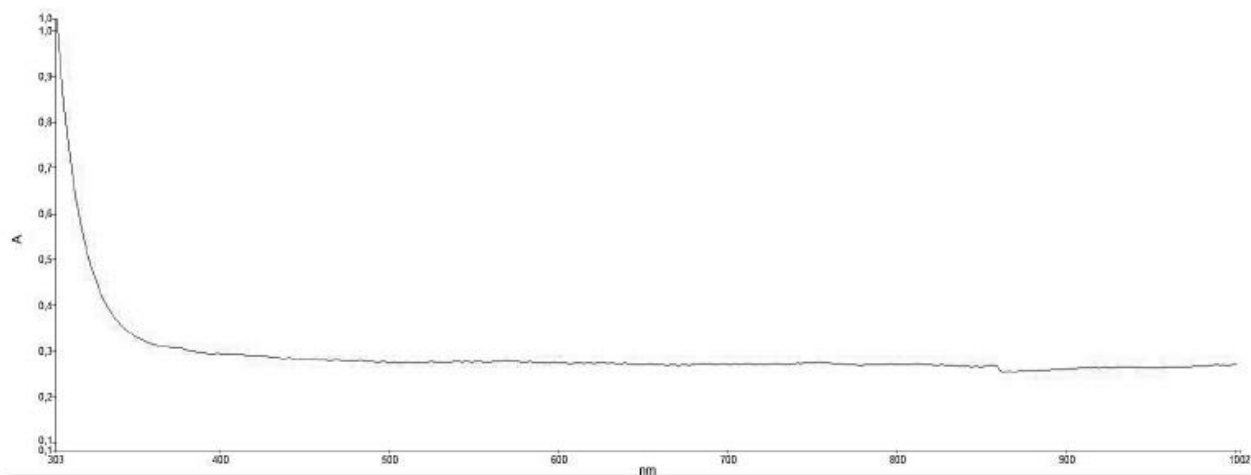
Увеличенная производительность: волоконные лазеры обрабатывают материал в 2–3 раза быстрее чем СО₂-лазеры, что увеличивает скорость спекания пластикового порошка и общую производительность установки;

Экономичность: волоконные лазеры расходуют меньше электропитания, что приводит к снижению себестоимости изготавливаемых изделий. Выше и рабочий ресурс лазеров этого вида, что позволяет оптимизировать стоимость владения установкой;

Практичность: волоконные лазеры не требуют наличия сложной оптики, характерной для CO_2 -лазеров. Поэтому они не нуждаются в регулярной юстировке со стороны технического персонала и значительно проще в эксплуатации.

При всех перечисленных преимуществах остается главный недостаток волоконных лазеров в изучаемой технологии — длина волны 1,064 мкм. По этой причине некоторые типы пластикового порошка плохо поглощают их энергию, следствием чего становится невозможность качественного спекания пластика [3].

Ведутся исследования спектра поглощения полимеров и, соответственно, изучается возможность внедрения в СЛС лазеров других диапазонов, например, ультрафиолетовых. Для наглядности была проведена спектрография чистого порошка и получен график, показанный на рисунке. Порошок подвергался влиянию длин волн от 303 нм до 1002 нм. На графике видно, что полимер гораздо лучше поглощает ультрафиолетовое излучение, нежели видимое, отсюда интерес к возможности применения УФ-лазеров для селективного лазерного спекания.



Спектрография полимерного порошка

Температура выращивания. Выбор температуры напрямую влияет на усадку и зависит от используемой смеси порошка. Под смесью порошка имеется ввиду не только химический состав нового порошка, но и пропорции, в которых новый порошок смешивается со старым, который уже был в камере выращивания и подвергался влиянию температур. Стандартно такие пропорции составляют 50/50, на деле же отработанного порошка обычно добавляют в смесь сильно больше, чем нового, в целях экономии материала и избавления потребности в частой утилизации отработанного материала. При стандартном

смешивании температура потребуется чуть меньше, чем если в смеси старого порошка будет больше, чем нового. Например, если в установке используется смесь 85/15, где 15 % — содержание нового порошка, выращивание происходит при температуре 170 °С, но если бы содержание нового порошка было 50 %, то температуру можно было бы понизить до около 150–160 °С. Эти данные взяты с эксплуатируемой установки в Научно-исследовательском автомобильном и автомоторном институте. На примере той же установки: перед выращиванием разравненная смесь в камере прогревается и просушивается при температуре около 130 °С в зоне выращивания и 110 °С в зонах подачи порошка в течение 1–2 часов, само выращивание происходит при температуре 170 °С. Такой выбор сделан эмпирически и обусловлен как раз таки составом смеси. Если печатать при меньшей температуре, то усадка начнет проявляться очень рано и деталь загнет на 5–10 слое. Если печатать на большей температуре, то близлежащие порошинки начнут спекаться и деталь будет невозможно от них очистить. Температура постоянно считывается в камере выращивания с помощью инфракрасных датчиков, таким образом, ее можно контролировать и изменять в случае необходимости.

Расположение детали в пространстве. С точки зрения экономии времени наилучшим расположением детали в камере является горизонтальное, однако в таком случае вероятность того, что усадка исказит деталь, очень велика. Для минимизации влияния усадки на деталь рекомендуется располагать деталь наименьшим сечением к столу. В то же время не рекомендуется располагать детали с большой длинной и маленьким сечением вертикально, потому что усадка проявляется и в этом направлении, а значит длина детали на выходе может быть меньше, чем должна. Таким образом, чаще всего детали располагают под углом к столу. В любом случае, подход ко всем деталям индивидуальный и необходимо руководствоваться конкретной геометрией при их расположении.

Равномерность остывания и влияние кислорода. Из-за резких перепадов температур деталь может исказиться резко и очень сильно, даже при соблюдении всех вышеупомянутых рекомендаций. Более того, усадка проявляется только при наличии кислорода, то есть при окислении материала. Соответственно, камера выращивания предварительно заполняется азотом, содержание кислорода не должно превышать 5,5 %. Для достижения плавности остывания и устранения утечек азота в установке предусмотрено множество решений, способствующих этому: в камере выращивания для сохранения тепла зона построения отделена от зон подачи порошка металлическими заслонами; бункер выращивания, который опускается вниз с выращенными слоями, оборудован уплотнителем для защиты от утечки азота, подушкой-утеплителем и ТЭНом, поддерживающим температуру снизу, так как все нагреватели располагаются на верхней стенке камеры; шахта, в которую опускается бункер, сделана из тефлона.

Обсуждение. Для минимизации влияния усадки необходимо: подобрать полимерный порошок таким образом, чтобы коэффициент температурного

расширения был не слишком велик, но и в то же время чтобы конечное изделие из выбранного порошка соответствовало эксплуатационным требованиям, присмотреться к применению композитных материалов; подобрать мощность лазера для качественного спекания, но не допускать перегрева порошка; подобрать хорошо поглощаемую материалом длину волны лазера: это либо дальний инфракрасный диапазон, либо ближний ультрафиолетовый с примечаниями; подобрать температурный режим выращивания; обеспечить плавное остывание и отсутствие окисления детали кислородом; грамотно расположить деталь в камере выращивания.

Проведенное исследование и его результаты очень важны для промышленности, так как согласно анализу рынка селективного лазерного спекания и прогнозу на 2024–2029 гг. индийской консалтинговой компании Mordor Intelligence, среднегодовой темп роста технологии составит 22,46 % в течение прогнозируемого периода. Селективное лазерное спекание было определено как одна из наиболее предпочтительных технологий, и ожидается, что в течение прогнозируемого периода будет наблюдаться устойчивый рост благодаря его различным преимуществам по сравнению с другими технологиями, используемыми для печати [5].

Заключение. В статье были успешно рассмотрены причины появления и способы минимизации усадки при селективном лазерном спекании полимерных порошков, приведен конкретный план действий для выращивания минимально геометрически искаженной детали, а также объяснено, почему важно заниматься совершенствованием технологии, и какое место она будет занимать на рынке и в промышленности в ближайшие годы.

Список источников

- [1] *Таблица тепловых расширений металлов и пластиков: коэффициенты КТЛР материалов.* URL: <https://inner.su/articles/tablitza-teplovykh-rasshireniy-metallov-i-plastikov-koeffitsienty-ktlr-materialov/#section1> (дата обращения 15.09.2025).
- [2] *Таблица параметров SLS для полимеров: PA12, PA11, TPU процессы печати.* URL: <https://inner.su/articles/tablitza-parametrov-sls-dlya-polimerov-pa12-pa11-tpu-protsessy-pechati/#sls-principles> (дата обращения 15.09.2025).
- [3] El Magri A., Bencaid S.E., Vanaei H.R., Vaudreuil S. Effects of Laser Power and Hatch Orientation on Final Properties of PA12 Parts Produced by Selective Laser Sintering. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. no. 3674. <https://doi.org/10.3390/polym14173674>
- [4] *Типы лазеров SLS 3D принтера. Отличия CO2 и волоконных лазеров.* URL: <https://www.jetcom-3d.ru/application/vidy-lazero-v-sls-3d-printera/> (дата обращения 15.09.2025).
- [5] *Анализ размера и доли рынка селективного лазерного спекания — тенденции роста и прогнозы (2024–2029 гг.).* URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/selective-laser-sintering-market> (дата обращения 15.09.2025).