

Заключение. На основании открытых литературных источников выполнен анализ известных типов распределенных нагревательных систем, выделены их преимущества и недостатки с учетом сферы применения. Установлено, что наиболее экономичным вариантом является применение карбоновых (углеродных) нагревательных проводов. На основе проведенных экспериментов определена зависимость его удельного сопротивления от температуры: температурный коэффициент сопротивления провода типа 12K с номинальным удельным сопротивлением 33 Ом / м в интервале температур 20...100°C имеет отрицательное значение и составляет $-0,0157 \text{ Ом} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Таким образом, при использовании карбонового провода для распределенных нагревательных устройств обязательным элементом является терморегулятор, так как при нагреве кабеля количество выделяемого тепла еще больше увеличивается из-за отрицательного температурного коэффициента углеродного волокна.

Список цитируемых источников

1. Minco Heat 12k: нагревательный кабель из углеродного волокна [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://aliexpress.ru/item/4000972288188.html> (дата обращения: 24.04.2025).
2. Одножильный нагревательный кабель TXLP DRUM [Электронный ресурс]. — Могилев, 2010—2025. — URL: https://housemaster.by/index.php?route=product/product&path=103_150_151&product_id=7311 (дата обращения: 21.04.2025).
3. Электрические элементные нагреватели : пособие / А. Е. Заяц [и др.] ; под ред. Е. М. Зайца. — Минск : БГАТУ, 2011. — 180 с.
4. Теплый пол (нагревательные кабели) Devi DEVIflex™ 792 Вт/44 м [Электронный ресурс]. — 2025. — URL: <https://220shop.by/p147593019-teplyj-pol-nagrevatelnye.html?yclid=16659021573912002559> (дата обращения: 25.04.2025).
5. Углеродный (карбоновый) кабель [Электронный ресурс]. — Минск, 2025. — URL: <https://electro-nagrev.ru/catalog/gibkie-nagrevateli/uglerodnyy-karbonovyy-kabel/> (дата обращения: 25.04.2025).

УДК 621.762

О. Н. Журавский, Е. В. Петровский, И. А. Богданович

*Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Барановичи, Республика Беларусь*

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В АДДИТИВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Введение. Металлические порошки, разработанные специально для аддитивного производства, представляют собой основу для создания легких, прочных и высокоэффективных изделий методом 3D-печати. Эти материалы, обладающие уникальными характеристиками, такими как размер частиц, сыпучесть и состав, позволяют реализовывать сложные конструкции с внутренними каналами, что особенно выгодно для дорогих материалов, используемых в аэрокосмической и других отраслях. Ключевым фактором успеха является оптимальное распределение частиц по размерам, что обеспечивает высокое качество и стабильность каждой партии.

Целью исследования является анализ существующих металлических порошкообразных веществ, используемых в аддитивном производстве и методов их получения.

Основная часть. Порошки для 3D-печати представляют собой мелкие частицы металлических материалов, специально разработанные для аддитивного производства. Эти порошки обладают уникальными характеристиками, такими как размер частиц, сыпучесть и состав, что делает их подходящими для различных методов 3D-печати [1—2].

Методы получения металлических порошков делятся на два типа: механические и физико-химические [1—4]. Механические методы являются более распространёнными. Для их осуществления используют специальные приборы, с помощью которых будет выполняться дробление металла. Особенно выгодно использовать данный метод при изготовлении порошков из бериллия, сурьмы или хрома.

Метод распыления относится к самым эффективным методам производства металлических порошков. С помощью специальных приспособлений производится распыление расплавленного металла. При этом металл взаимодействует со сжатым воздухом и направляется в воду. В процессе распыления частицы порошка отличаются высокой скоростью остывания, благодаря чему изготовленные детали будут отличаться прочностью.

Метод восстановления — распространённый физико-химический способ изготовления порошков. С помощью газов и твёрдых веществ можно провести восстановление порошка из железа, титана и других металлов.

Существует несколько типов распространённых металлических порошков, используемых в 3D-печати:

1. Титановый порошок. Обладает высокой прочностью, отличной коррозионной стойкостью и малым весом, что делает его идеальным для аэрокосмической, медицинской и автомобильной промышленности, где требуются легкие и прочные компоненты.

2. Алюминиевый порошок. Легкий и экономичный, с хорошей тепло- и электропроводностью, используется в аэрокосмической отрасли, автомобилестроении и бытовой электронике для создания деталей, требующих высокой прочности и низкого веса.

3. Порошок из нержавеющей стали. Широко применяется благодаря своим отличным механическим свойствам и коррозионной стойкости, используется в автомобилестроении, медицине и производстве потребительских товаров.

4. Порошок из никелевого сплава. Обладает высокой термостойкостью и прочностью, а также исключительной коррозионной стойкостью, используется в аэрокосмической, нефтегазовой и химической промышленности.

5. Порошок на основе кобальт-хрома. Известен своей биосовместимостью и устойчивостью к высоким температурам и износу, применяется в медицинских и зубных имплантатах, а также в аэрокосмической и промышленной отраслях [3—6].

Применение металлических порошков в аддитивном производстве позволяет создавать более легкие, прочные и высокоэффективные изделия. Это экономически выгодно для дорогих материалов, используемых в небольших объемах с нестандартной геометрией, например, для аэрокосмических компонентов. 3D-печать также значительно упрощает изготовление сложных конструкций с внутренними каналами для конформного охлаждения в литевых формах.

Распределение частиц по размерам особенно важно в оптимальном диапазоне размеров: слишком большое количество мелких или крупных частиц за пределами идеальной фракции приводит к дефектам. Производители стремятся к высокому выходу продукции в рамках узкой спецификации и стабильному качеству партии.

Ниже представлены отдельные заводы-производители, которые осуществляют выпуск металлических порошков для 3D-печати:

– Китайская компания Metal3DP (г. Циндао). Производит различные порошки, например, порошки сплава на основе алюминия, представляющие собой алюминиевые сплавы, состоящие в основном из алюминия, меди и небольшого количества магния и марганца. Эти сплавы обладают исключительной прочностью и отличной усталостной прочностью, что делает его идеальным для применения в тех областях, где требуются легкие материалы с высокими механическими свойствами [7].

– Китайская компания LWPM является современным крупным и перспективным производителем порошков с передовыми технологиями и сложным технологическим оборудованием. Они производят различные продукты такие как: LAP100.29 представляющий собой сверхчистый порошок железа, распыленный водой. Этот порошок широко используется для производства фрикционных материалов с низкой кажущейся плотностью [8].

– Российский завод по производству металлических порошков ООО «ПМП» (г. Рязань) является одним из крупнейших производителей оловянного, свинцового, припойного, медного и баббитового порошков различных марок, а так же баббитов, припоев и сплавов на основе олова, свинца, меди, серебра и цинка [9].

– Российский завод АО «ПОЛЕМА» (г. Тула) – ведущий мировой производитель изделий из высокочистого хрома, молибдена, вольфрама, металлических порошков и композиционных материалов.

Распыленные порошки, выпускаемые АО «ПОЛЕМА», классифицируются на две группы: порошки для напыления и наплавки покрытий и порошки конструкционного назначения. Первая группа — это более 200 марок порошков для напыления и наплавки покрытий различными методами: самофлюсующиеся никелевые, железные и медные сплавы, инструментальные стали, высокоуглеродистые и низкоуглеродистые стали и сплавы, коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы, композиционные порошки и сплавы на основе олова и цинка. Вторая группа — порошки конструкционного назначения — это прессуемые порошки чистых металлов (хром, молибден, вольфрам, никель, титан), сплавы на основе меди (бронзы, латуни), нержавеющей стали, специальные сплавы с высокой магнитной проницаемостью (пермаллой), материалы для дробеструйной обработки поверхности деталей (инструментальные стали). Порошки этой группы применяются для производства листового проката, прутков и поковок из цветных и тугоплавких металлов, инструмента, спеченных и деформируемых деталей, композиционных материалов, используемых в электротехнике, электронике, приборостроении, машиностроении, авиакосмической отрасли, атомной энергетике, транспортных средствах, в производстве фильтров, газопоглотителей и в др. областях техники [10].

Заключение. Металлические порошки для 3D-печати играют ключевую роль в аддитивном производстве, обеспечивая уникальные характеристики, которые позволяют создавать легкие, прочные и высокоэффективные изделия. Их производство с использованием современных технологий гарантирует высокую чистоту и стабильное качество, что особенно важно для применения в высокотехнологичных отраслях, таких как аэрокосмическая. Оптимизация распределения частиц по размерам является критически важной для достижения качественных результатов, что подчеркивает необходимость строгого контроля на всех этапах производства. Таким образом, использование металлических порошков в 3D-печати открывает новые горизонты для создания сложных конструкций и улучшения производственных процессов.

Список используемых источников

1. Каменев, С. В. Технологии аддитивного производства : учебное пособие / С. В. Каменев, К. С. Романенко. — Оренбург : Оренбург. гос. ун-т, 2017. — 145 с.
2. Валетов, В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие / В. А. Валетов — Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2015. — 63 с.

3. Гиршов В. Л. Современные технологии в порошковой металлургии: учебное пособие / В. Л. Гиршов, А. А. Котов, В. Н. Цеменко– Санкт-Петербург : Политехн. Ун-т, 2010. — 385 с.
4. Чечуга, А.О. Использование металлических порошков в аддитивном производстве / А. О. Чечуга // Известия ТулГУ Технические науки. — Выпуск №12, 2021. — С. 457—459.
5. Новое поколение жаропрочных никелевых сплавов с иерархической структурой и их применение в аддитивных технологиях : материалы 13-й международной научно-технической конференции, Минск, 16-18 мая 2018. / гос. науч. учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа» ; редкол.: Левашов Е. А [и др.]. С. —Минск : ГНО, 2018. — 65 с.
6. Особенности материалов и технологий аддитивного производства изделий : сб. науч. ст. / Тульский гос. пед. ун-т им. Л. Н. Толстого ; редкол.; А. Н. Кубанова [и др.]. — Тула : ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2019. — 477 с.
7. Металлические порошки для 3D-печати и аддитивного производства. — URL: <https://met3dp.com/ru/>. (дата обращения : 01.05.2025).
8. Китай материалы для порошковой металлургии. — URL: <https://ru.lwpowder.com>. (дата обращения : 01.05.2025).
9. Завод по производству металлических порошков. — URL: <http://metall-pmp.ru>. (дата обращения : 01.05.2025).
10. АО «ПОЛЕМА» — URL: <https://www.polema.net>. (дата обращения : 01.05.2025).

УДК 69.059.25

Е. И. Занько

Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
Барановичи, Республика Беларусь

ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОГО ЭЛЕМЕНТА «ШТОК-ПОРШЕНЬ»

Введение. Метод конечных элементов (МКЭ) в настоящее время широко используется для решения различных задач механики деформируемого твердого тела, в частности для выполнения экспресс расчетов на прочность на этапе 3Д проектирования конструкций [1]. Суть метода заключается в разбиении твердотельной модели на конечное число элементов, составлении и последующем решении системы линейных алгебраических уравнений. Большинство современных САД систем имеет специальные инструменты, предназначенные для автоматизации подобных расчетов.

Целью работы является анализ устойчивости детали «Шток-поршень» и определение коэффициента запаса устойчивости, в следствии наложения на ее максимального давления при эксплуатации, для определения работоспособности исследуемой детали.

В состав АРМ FEM входят инструменты подготовки деталей и сборок к расчёту, задания граничных условий и нагрузок, а также встроенные генераторы конечно-элементной (КЭ) сетки как с постоянным, так и с переменным шагом и постпроцессор. Этот функциональный набор позволяет смоделировать твердотельный объект и комплексно проанализировать поведение расчётной модели при различных воздействиях с учетом статике, собственных частот, устойчивости и теплового нагружения. Для создания конечно-элементного представления объекта в АРМ FEM предусмотрена функция генерации КЭ (сетки, при вызове которой происходит соответствующее разбиение объекта с заданным шагом. Если созданная расчетная модель имеет сложные неравномерные геометрические переходы, то может быть проведено так называемое адаптивное разбиение. Для того, чтобы результат процесса был более качественным, генератор КЭ сетки автоматически с учетом заданного пользователем максимального коэффициента сгущения варьирует величину шага разбиения.

Основная часть. В качестве объекта исследования будем использовать модель детали «Шток-поршень», представленную на рисунке 1.

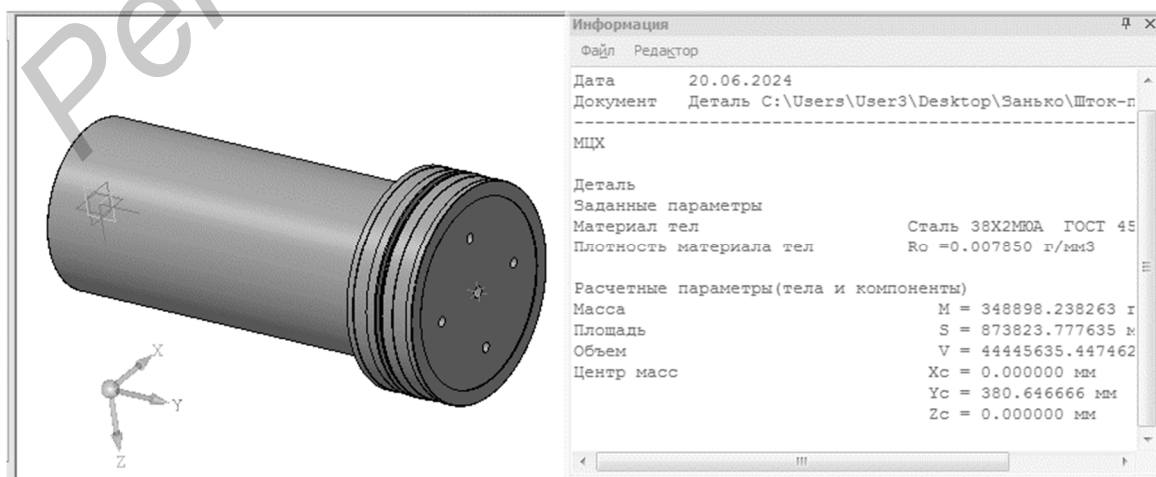


Рисунок 1 — Модель «Шток-поршень»