

Исследование свойств полимерных материалов аддитивного производства с эпоксидной обработкой и непосредственно после печати

В.В. Юрченко<sup>1</sup>, А.Н. Синько<sup>1</sup>, А.С. Берг<sup>1</sup>, А.А. Берг<sup>1</sup>

*Карагандинский технический университет, г. Караганда, Казахстан*

*Аннотация:* Полимерные структуры, изготовленные аддитивным способом или напечатанные на 3D-принтере, получают широкое распространение во многих отраслях промышленности, включая медицину, машиностроение и аэрокосмическую промышленность. В отличие от традиционных производственных технологий, таких как литье под давлением и механическая обработка, рентабельность, быстрый выход на рынок и способность изготавливать изделия сложной формы делают 3D-печать желательной альтернативой. Однако послойный процесс 3D-печати приводит к плохой прочности сцепления между полимерными слоями, дефектам и пустотам, а также к механической анизотропии. Чтобы исследовать последнее, в настоящем исследовании изучается реакция напряжения-деформации при различных ориентациях печати для 3D-печатных образцов АБС, подвергнутых растягивающей, сжимающей и изгибающей нагрузке.

*Ключевые слова:* экструзия материала, полимерные материалы, 3D моделирование, проектирование, аддитивные технологии.

Физические свойства образцов с одинаковыми условиями печати и дополнительной химической обработкой после обработки также считаются включенными в комплексный протокол определения характеристик. Несмотря на ориентацию печати (горизонтальную, боковую и вертикальную), модуль упругости и прочность на разрыв при растяжении 3D-печатного АБС-пластика оказались меньше, чем у его литого аналога, на 41% и 46% соответственно. Экспериментальные механические свойства при сжатии были предсказаны с погрешностью 2%, используя соотношение общей площади поперечного сечения горизонтально и вертикально напечатанных образцов. Кроме того, было обнаружено, что в жесткости на изгиб и разрушении преобладает растягивающая нагрузка, наблюдаемая в сечении образца ниже нейтральной оси. Полученные в результате средние значения модулей и прочности были скомпилированы на карту свойств, чтобы очертить взаимосвязь между свойствами и процессом 3D-печатного АБС, включая эффект разбавленной эпоксидной обработки и зависимость ориентации печати от ее механического поведения. В общем, карта свойств определяет конструктивную оболочку для измерения механической целостности 3D-печатного АБС в различных модальностях и направлениях.

На пересечении материаловедения и механического проектирования лежит взаимосвязь «свойство-структура-процесс», которая определяет характеристики

компонентов и структур при развертывании. Независимо от системы материалов, давно установлено, что производственный процесс играет ключевую роль в настройке свойств в соответствии с требованиями дизайна.

Появление технологий аддитивного производства воплощает в себе положительные и отрицательные аспекты влияния обработки на процесс проектирования. С одной стороны, возможность реализовать компоненты и структуры путем простой послойной укладки материала в желаемых местах положительно повлияла на всю цепочку поставок, позволив действительно своевременный подход для сокращения времени производства. вывод на рынок при значительном сокращении (в некоторых случаях устранении) необходимости в сложных и дорогостоящих инструментах. Более того, методы аддитивного производства устранили многие конструктивные ограничения, которые ранее накладывались на метод субтрактивного производства (например, токарная и фрезерная обработка), что, в свою очередь, расширило пространство для проектирования, позволяя конструкторам-механикам рассматривать варианты, которые ранее были недостижимы. Самый важный аспект аддитивного производства (взятый с точки зрения не зависящей от материала) - это возможность значительно снизить вес без потенциального влияния на жесткость и прочность за счет таких подходов, как оптимизация топографии и введение настраиваемой ячеистой структуры (даже в субмикромасштабе) соответственно. С другой стороны, подход послойного осаждения приводит к дефектам, плохой межфазной прочности и механической анизотропии. Последнее эпидемиологически ограничивает фазу анализа процесса проектирования за счет увеличения сложности конститутивных моделей, необходимых для точного и всестороннего представления поведения материалов. Такие модели с высокой точностью не только предполагают большие вычислительные затраты, но также сводят на нет соблазн аддитивного производства, ограничивая, например, применимость оптимизации топографии. Анизотропия, вызванная технологическим процессом, требует всеобъемлющего протокола определения характеристик для выяснения атрибутов материала, необходимых для описания определяющего поведения.

В то время как аддитивное производство применялось ко многим системам материалов, включая металлы, керамику, композиты и биологические материалы, 3D-печать полимеров была в центре внимания обширных академических и промышленных исследований. Полимеры можно аддитивно производить с помощью множества методов, которые делают их пригодными для многих применений и, следовательно, занимают большой рыночный сегмент. С производственной точки зрения полимеры обладают многочисленными желательными характеристиками, которые, в свою очередь, снижают стоимость производства, включая низкую температуру обработки, минимальную опасность для здоровья, а также широкую доступность и доступность оборудования. Наиболее распространенные процессы производства полимерных добавок включают, помимо прочего, струйную обработку связующего, струйную обработку материала, фотополимеризацию в ванне и экструзию материала, где качество конечной детали, размер печати и

полученные механические свойства сильно зависят от конкретного процесса. Например, точность размеров является проблемой в процессах струйной обработки связующего и материала, а также при фотополимеризации.

С другой стороны, экструзия материала устраняет некоторые из вышеупомянутых ограничений, включая размер печати, например, как недавно было продемонстрировано при реализации полномасштабной конструкции (например, наземные транспортные средства, строительное оборудование и морские суда) с использованием технологии аддитивного производства на больших площадях. Тем не менее, существуют серьезные научные и технические проблемы, которые остаются нерешенными, что замедляет распространение 3D-печати в практических приложениях (такая проблема медленно решается). Примечательно, что аддитивное производство полимеров было успешно продемонстрировано с использованием множества материалов, включая акрилонитрилбутадиенстирол (АБС), полимолочную кислоту, поливинилиденфторид, полипропилен, полиэфиримид, чтобы назвать несколько общих примеров. Из этих полимеров акрилонитрилбутадиенстирол является наиболее изученным, поскольку он подходит для многих из вышеупомянутых технологий аддитивного производства, из которых наиболее часто используется экструзия материалов.

Некоторые из желаемых свойств акрилонитрилбутадиенстирол включают низкую температуру плавления, высокую прочность на разрыв, устойчивость к химической коррозии и физическим воздействиям, пригодность для вторичной переработки и легкий вес.

Несмотря на повсеместное распространение полимеров и полимерных композитов в аддитивном производстве, как обсуждалось ранее, взаимосвязь свойств и процессов остается активной областью исследований, направленных на снижение неопределенности и, в свою очередь, способствует расширению применения в несущих и развертываемых в полевых условиях приложениях. В последние годы выявлено то, что детали и конструкции, напечатанные на 3D-принтере, используются в защитном оборудовании для аэрокосмической, автомобильной и спортивной промышленности (например, шлемы для американского футбола). Тем не менее, осторожность в отношении механической надежности структур на основе полимеров, полученных аддитивным способом, сохраняется по двум основным причинам.

Во-первых, в анализе конструкции отсутствует единая и систематическая структура анализа, которая учитывала бы ориентацию печати и ее влияние на общую структурную целостность деталей и компонентов.

Во-вторых, разница в механических свойствах от одного отпечатка к другому выходит за пределы разницы в литых или экструдированных деталях из-за динамических аспектов аддитивных технологий производства в целом (например, температуры окружающей среды для печати, температуры экструдера, скорости подачи, скорости печати и т. д.). Можно утверждать, что второй недостаток является основной причиной отсутствия единой системы анализа.

Проводятся непрерывные и энергичные исследования, направленные на раскрытие взаимосвязи свойств и процессов было выявлено влияние ориентации печати на растяжение, сжатие и изгиб выбранных образцов. Была исследована пластина пластике акрилонитрилбутадиенстирол Р430, который был напечатан в пяти различных ориентациях в диапазоне от 0 ° до 90 °, эти образцы затем были испытаны на растяжение, сжатие и 4-точечный изгиб.

Выявлены незначительном улучшении прочности на разрыв для ориентации печати под углом 90°, тогда как свойства сжатия и изгиба показали существенное улучшение при печати при ориентации под углом 0.

Исследования механических свойства деталей, которые были на короткое время погружены в раствор 90% диметилкетона и 10% воды, а затем отверждены, показали значительное уменьшение шероховатости поверхности, но также отмечено незначительное снижение прочности на разрыв. Однако обнаружено, что химическая обработка действительно улучшает свойства изгиба. Другие исследования были сосредоточены на характеристике химической постобработки поведения печатных образцов, что подчеркивает важность постпечатных процессов в потенциальном улучшении механических характеристик полимерных структур, напечатанных на 3D-принтере.

Таким образом, цель данного исследования - изучить влияние процесса постпечатной обработки на общие физические свойства 3D-печатного АБС-пластика. Обоснованием интеграции этапа постобработки является повышение функциональности трехмерных печатных структур. Напечатанные образцы использовались для оценки свойств на основе ориентации печати. В целом, основная цель этого исследования состоит в том, чтобы объяснить различия в механических свойствах с помощью подхода механики материалов, пытаясь устранить некоторые негативные аспекты 3D-печати свойств.

При разработке карты свойств для 3D-печатного АБС необходимо учитывать два параметра, которые определяют рабочие характеристики, а именно, направленность нагрузки и пористую структуру, полученную в результате производственного процесса. Прочность детали, напечатанной на 3D-принтере, ниже, чем у литых или обработанных аналогов, тогда как детали, изготовленные с помощью последних процессов, демонстрируют почти изотропные свойства, связанные с полным уплотнением. С другой стороны, анизотропия, обнаруженная в компонентах, напечатанных на 3D-принтере, связана с послойным характером процесса 3D-печати, так что индивидуально напечатанные шарики не полностью перекрываются, что приводит к захваченным воздушным зазорам. Кроме того, граница раздела между уложенными впоследствии валиками заметно отличается из-за относительно быстрого процесса теплопередачи, ограничивающего примыкание полимерных цепей от одного слоя к другому, следовательно, нарушение адгезии является преобладающим механизмом разрушения. Кроме того, приложенная нагрузка распределяется между слоями на основе относительной ориентации между этими слоями, а также угла, который они составляют с направлением приложенной нагрузки. Другими словами, взаимодействие между направлением загрузки и ориентацией печати играет определяющую роль в

итоговой грузоподъемности. Хотя здесь основное внимание уделяется квазистатическому отклику материалов для 3D-печати, характеристики, зависящие от времени (т. е. вязкоупругий отклик), а также температурно-зависимое поведение полимеров, включая влияние скорости деформации имеет первостепенное значение.

Рассмотрена реакция на возможные вариации растягивающей, сжимающей и изгибающей нагрузки, в то время как растягивающие и сжимающие нагрузки классифицируются как одноосные нормальные силы, а изгибающие нагрузки подвергают поперечное сечение одновременно растягивающим и сжимающим нагрузкам в зависимости от внутреннего расстояния от объекта (нейтральная ось). Чтобы учесть зависимость способности материала выдерживать приложенные нагрузки от направления печати, для образцов, используемых в испытаниях на растяжение и изгибную нагрузку, были рассмотрены три различных ориентации печати, также для проведения сжимающей нагрузки были изготовлены две ортогональные ориентации. Стоит отметить, что описанный экспериментальный протокол (1) не зависит от материала и (2) будет применяться как для образцов после печати, так и для образцов, обработанных эпоксидной смолой.

Все образцы были напечатаны с использованием технологии моделирования наплавленного слоя после обработки модели с помощью программного обеспечения NX. Все параметры печати были предварительно установлены производителем принтера и оставались неизменными при изготовлении всех образцов, как обсуждается далее.

Прочностные характеристики напечатанного на 3D-принтере АБС были охарактеризованы при испытании образца типа IV в соответствии со стандартом. Чтобы учесть ориентацию слоев, геометрические размеры образцов типа IV были напечатаны в трех ортогональных ориентациях печати, как показано на (рисунок 1), которые включают:

А) «Горизонтальная» ориентация, при которой нагрузка поддерживается слоями по толщине (рисунок 1 а),

Б) «Боковая» ориентация, при которой нагрузка распределяется между слоями по ширине (рисунок 1 б), и

С) «Вертикальная» ориентация, при которой нагрузка в основном передается через границу раздела между последующими продольными слоями (рисунок 1 в).

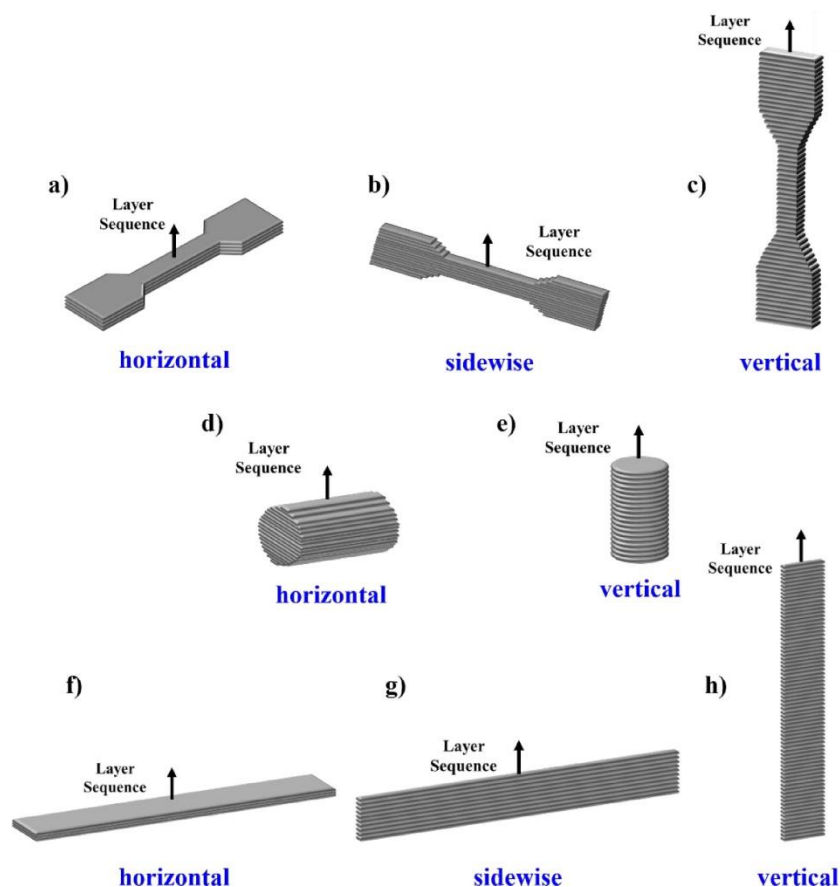


Рисунок 1 – Ориентация печати и геометрия образца, используемые при испытаниях на растяжение (a, b, c), сжатие (d, e) и на изгиб (f, g, h), схематически демонстрирующие анизотропию, вызванную процессом при осаждении слоев.

Все испытания на растяжение были выполнены на силовой раме, оснащенной датчиком нагрузки 1 кН и экстензометром больших деформаций, с использованием ручных тисков с зубчатой поверхностью пирамидальной формы для предотвращения проскальзывания. Пять образцов были успешно протестированы для каждой из трех ориентаций печати в исходных условиях и в условиях, обработанных эпоксидной смолой (обсуждаемых ниже). Все образцы были испытаны при квазистатической скорости нагружения 5 мм/мин до полного разрушения.

В итоге можно сделать следующий вывод, что в связи с растущим спросом на 3D-печатные детали на основе полимеров понимание и прогнозирование общих механических характеристик деталей, зависящих от ориентации, произведенных в процессе послойного производства, имеет решающее значение для определения целостности этих деталей и того, будут ли они удовлетворять требования к дизайну. В эданном исследовании включены механические реакции на напряжение-деформацию как напечатанных, так и обработанных эпоксидной смолой образцов, чтобы обеспечить всесторонний процесс характеристики, 3D-напечатанные образцы АБС с различной ориентацией печати были исследованы для выяснения их общих физических

свойств при растяжении, сжатии и изгибе. В целом, независимо от ориентации печати и обработки эпоксидной смолой, модули упругости и предел текучести АБС-пластика, напечатанного на 3D-принтере, были меньше, чем у его литых или литых под давлением аналогов.

Расчетное соотношение общей площади поперечного сечения образцов, напечатанных вертикально и горизонтально, хорошо согласуется с соотношением механического поведения при сжатии, в то время как поведение при растяжении, как было обнаружено, соответствующим образом предсказывает реакцию на изгиб и разрушение, что было дополнительно рассмотрено через разницу в моменте инерции. Кроме того, карта свойств, состоящая из усредненных значений прочности и модулей, определяет взаимосвязь между свойствами и процессом аддитивного производства АБС печати и после обработки эпоксидной смолой, что в дальнейшем было рассмотрено через дисперсию момента инерции.

### **Библиографический список**

Барт, В.Е. Применение полимербетонов в станкостроении/ В.Е. Барт, Г.С. Санина, С. А. Шевчук// Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства. Серия 6 – 3. Технология металлообрабатывающего производства. Обзорная информ., 11. – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 40 с.

Барт В.Е., Санина Г.С., Шевчук С.А. Применение синтегрона в станкостроении // Станки и инструмент. - 1993. -№ 1. -С. 15-17.

Авраамова Т.М., Бушуев В.В., Гиловой Л.Я. и др.; под ред. Бушуева В.В. Металлорежущие станки: учебник. - М.: Машиностроение - 2011. 608 с.

Юсеф Г., Смило Дж., Блоурчян А., Хюнь Н. У., Карапетян А. В. Многофункциональные конструкции из АБС, моделируемые методом наплавления. Журнал инженерных материалов и технологий: (на рассмотрении).

Юсеф Г., Албан М., Уэллс Б., Новорожденный Д. Рамки предварительного анализа для крупномасштабных материалов и конструкций, напечатанных на 3D-принтере, и т.д.