

Исследование процесса быстрой 3D-печати углепластиковых деталей машин с использованием лазерного нагрева

М.Ю. Карелина^{1,2}, Д.А. Юдин^{1,2}, А.В. Терентьев^{1,2}

¹ Государственный университет управления, Москва, Россия;

² Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Непрерывные пластики, армированные углеродным волокном (CFRP), широко применяются в машиностроении, но традиционные методы их производства, такие как автоматическая укладка волокон (AFP) и автоматическая укладка ленты (ATL), отличаются высокой стоимостью и сложностью. Аддитивное производство, или 3D-печать, предлагает альтернативный подход, позволяя быстро изготавливать детали без использования пресс-форм. Однако скорость 3D-печати CFRP ограничена, что снижает её эффективность.

Цель работы — исследование возможности повышения скорости 3D-печати CFRP деталей, используя лазерный нагрев для оптимизации процесса плавления материала.

Методы. В исследовании использовалась 3D-печать CFRP с использованием лазера для нагрева материала, что позволило увеличить скорость печати до 30 мм/с. Исследовалось влияние различных параметров лазерного излучения, таких как мощность и скорость сканирования, на качество и механические свойства напечатанных образцов CFRP. Для анализа микроструктуры использовался электронный микроскоп.

Результаты. Эксперименты показали, что увеличение мощности лазера и скорости печати повышает прочность напечатанных изделий. Это обусловлено улучшением межслойных связей за счёт более равномерного расплавления материала. Однако избыточная мощность лазера приводит к перегреву и разложению полимерной матрицы, снижая прочность и долговечность изделий.

Заключение. Результаты исследования показывают, что лазерный нагрев позволяет значительно увеличить скорость 3D-печати CFRP, сохраняя высокое качество и прочность деталей. Оптимальный выбор параметров лазерного излучения является ключевым фактором для достижения максимальной производительности и качества 3D-печати деталей, изготовленных из CFRP.

Ключевые слова: 3D-печать; углеродное волокно; CFRP; детали машин; сельскохозяйственная техника; аддитивные технологии; механические свойства материалов.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Карелина М.Ю., Юдин Д.А., Терентьев А.В. Применение малогабаритных агрегатов при внесении удобрений на горных склонах. // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 4. С. **x-y**. DOI: 10.17816/0321-4443-636252 EDN: PUYOSE

Study of the Process of Rapid 3D Printing of Carbon Fiber Machine Parts Using Laser Heating

Maria Yu. Karelina^{1,2}, Denis A. Yudin^{1,2}, Alexey V. Terentyev^{1,2}

¹ State University of Management, Moscow, Russia;

² Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Carbon fiber reinforced continuous plastics (CFRP) are widely used in mechanical engineering, but conventional methods of their production, such as automatic fiber laying (AFP) and automatic tape laying (ATL), are characterized by high cost and complexity. Additive manufacturing, or 3D printing, offers an alternative approach, allowing parts to be manufactured quickly without using molds. However, the speed of CFRP 3D printing is limited, which reduces its efficiency.

AIM: Study of the possibility of increasing the speed of 3D printing of CFRP parts using laser heating to optimize the melting process of the material.

METHODS: The study involves CFRP 3D printing using a laser to heat the material, which increased the printing speed up to 30 mm/s. The influence of various laser radiation parameters, such as scanning power and speed, on the quality and mechanical properties of printed CFRP samples was studied. An electron microscope was used to analyze the microstructure.

RESULTS: Experiments have shown that increasing the laser power and printing speed increases the strength of printed products. This is due to the improvement of interlayer bonds due to a more uniform melting of the material. However, excessive laser power leads to overheating and decomposition of the polymer matrix, reducing the strength and durability of products.

CONCLUSION: The results of the study show that laser heating can significantly increase the speed of CFRP 3D printing, while maintaining high quality and durability of parts. The optimal choice of laser radiation parameters is a key factor for achieving maximum productivity and quality of 3D printing of CFRP parts.

Keywords: 3D printing; carbon fiber; carbon fiber reinforced continuous plastics (CFRP); machine parts; agricultural machinery; mechanical properties of materials.

TO CITE THIS ARTICLE:

Karelina MYu, Yudin DA, Terentyev AV. Study of the Process of Rapid 3D Printing of Carbon Fiber Machine Parts Using Laser Heating. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(4):x-y. DOI: 10.17816/0321-4443-636252 EDN: PUYOSE

ОБОСНОВАНИЕ

Непрерывные пластики, армированные углеродным волокном (CFRP), широко используются в аэрокосмической, автомобильной, нефтехимической и других отраслях промышленности благодаря своему малому весу и высокой прочности [1]. Процесс производства смол, армированных углеродным волокном, все чаще переходит от ручных технологий к автоматизированным, включая автоматическую укладку волокон (AFP) и автоматическую укладку ленты (ATL). Несмотря на преимущества, процесс характеризуется высокой стоимостью и сложностью проектирования и изготовления пресс-форм [2]. Аддитивное производство, или 3D-печать, представляет собой новую технологию формования, основанную на послойном принципе, позволяющую быстро изготавливать сложные детали без использования пресс-форм. 3D-печать CFRP является экономически эффективной и обеспечивает низкий вес и высокую прочность. Данная технология может быть применена при разработке и производстве деталей сельскохозяйственных машин и оборудования [3].

Моделирование методом плавного осаждения (FDM) является распространённым методом 3D-печати CFRP [4]. Непрерывные волокна могут быть внедрены в пластик с помощью коаксиальной экструзии для создания препрега, подходящего для печати методом FDM, или непрерывные волокна и пластиковые нити могут одновременно подаваться в сопло принтера в процессе печати. Последние исследования, в основном, сосредоточены на печати препрегами [5]. В процессе печати нить из углепластика вводится в высокотемпературное сопло, нагревается резистивным нагревателем, в результате чего пластик на поверхности углеродного волокна переходит в расплавленное состояние. Затем расплавленная нить выдавливается через сопло и моментально затвердевает.

В настоящее время активно исследуется технология 3D-печати с использованием углепластиков [6]. На сегодняшний день исследования сосредоточены на улучшении механических свойств материалов для 3D-печати [7]. Из-за природы слоистого и пластичного сплавления получаемые детали обладают значительной анизотропией. На механические свойства таких изделий влияют такие параметры процесса, как температура печати, скорость печати и высота слоя, независимо от типа используемого пластика. Из результатов исследований следует, что механические свойства при растяжении снижаются с увеличением скорости печати, высоты слоя и ширины линии.

Механические свойства могут быть улучшены за счёт оптимизации параметров 3D-печати, а именно уменьшения пустот в композитных компонентах в условиях низкого давления. Стоит упомянуть, что печать углепластика в вакууме улучшает адгезию композита и уменьшает пористость. Герметизация в процессе 3D-печати значительно улучшает механические свойства печатной продукции [8].

Увеличение скорости печати имеет ключевое значение для повышения эффективности 3D-печати CFRP. Современные технологии в данной области исследований позволяют различать сырьё, содержащее короткие волокна, и сырьё с непрерывными волокнами. Эксперименты показали, что скорость печати на композитных материалах с непрерывным волокном может составлять всего 7 мм/с. Скорость печати чистого CFRP может составлять всего 5 мм/с. Скорость печати была увеличена до 10 мм/с для небольших 3D-принтеров и до 16 мм/с за счёт использования шнека для выдавливания полимолочной кислоты и последующего соединения его с углеродным волокном. Инновационные методы, такие как использование микроволн для создания вихревых токов в углеродном волокне, показали мощность нагрева в 18 Вт и скорость повышения температуры до 62,5 °C/с, что значительно уменьшает время печати деталей. Основная проблема при быстром нагреве материала при 3D-печати связана с низкой теплопроводностью и энергоэффективностью традиционных контактных резистивных нагревателей [9].

Лазеры обладают рядом преимуществ для производства изделий из углепластиков, включая бесконтактную работу, высокую плотность энергии и эффективность. Композиты-препреги с непрерывным армированием волокнами используются для изготовления деталей с помощью лазерного склеивания и резки [10]. Предварительный нагрев поверхности формируемого изделия лазером улучшает качество межслойного соединения. В AFP лазеры предпочтительнее газовых горелок и ИК-обогревателей из-за их высокой интенсивности излучения и способности увеличивать скорость укладки. Таким образом, замена резистивных нагревателей лазерами может значительно увеличить скорость нагрева и, соответственно, печати углепластика.

В данном исследовании проанализирован процесс быстрой 3D-печати моделей из углепластика с использованием лазерного нагрева. Для нагрева используется твердотельный импульсный лазер, а горячий валик уменьшает пустоты и улучшает адгезию между слоями в изделии. Данный метод позволил увеличить скорость печати до 30 мм/с по сравнению с предыдущими 5 мм/с. С помощью программного обеспечения COMSOL была разработана модель теплового поля для лазерного нагрева углепластика, позволяющая анализировать распределение температуры при различной мощности лазера и скорости печати, сохраняя постоянный радиус пятна. Были определены и проверены оптимальные параметры печати, оценены свойства при растяжении, изгибе и сдвиге образцов углепластика, изготовленных с помощью 3D-лазерной печати, исследованы изменения свойств образцов при различных скоростях печати и мощности лазера.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Основной целью данного исследования является изучение возможности и эффективности быстрой 3D-печати деталей из непрерывного углепластика (CFRP), армированного углеродным волокном, с использованием лазерного нагрева.

МЕТОДЫ

В процессе изготовления образцов, описанном в этом исследовании, пластиковый слой, армированный углеродным волокном, создается с использованием лазера вместо обычного контактного резистивного нагревателя. Как показано на рис. 1, *a*, материал подается в направляющую с помощью механизма подачи и направляется в зону лазерного излучения. Здесь часть лазерной энергии отражается и поглощается прозрачной матричной смолой на поверхности материала. Остаточная лазерная энергия проникает в полимерную матрицу и поглощается углеродным волокном, вызывая нагревательный эффект. Процесс позволяет быстро накапливать тепло. Благодаря теплопроводности полимерная матрица на поверхности переходит в расплавленное состояние. Затем расплавленная сердцевина уплотняется и затвердевает на месте под давлением горячего валика.

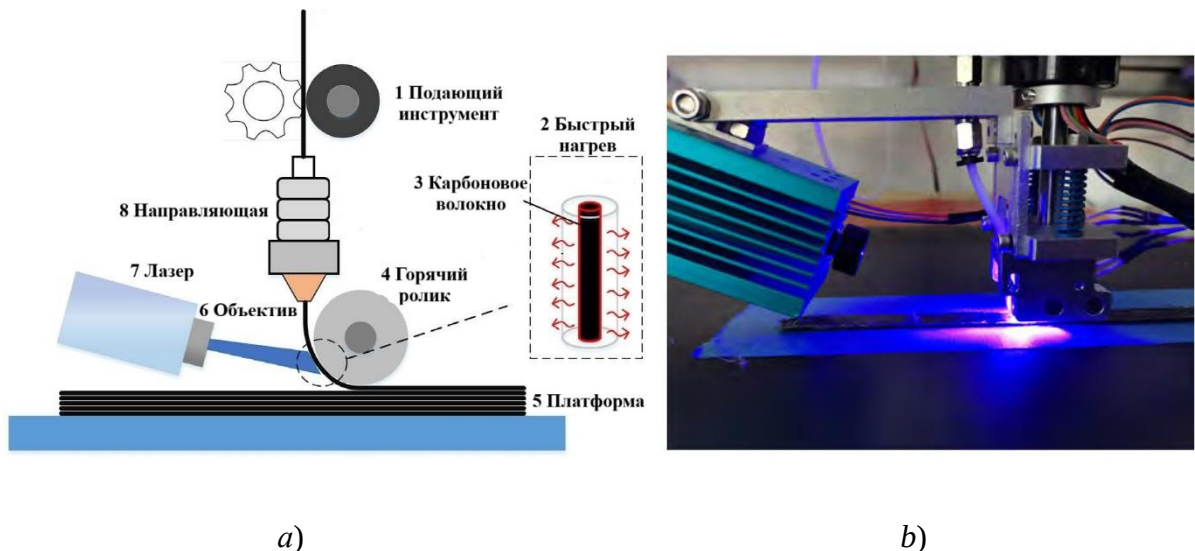


Рис. 1. Быстрая лазерная 3D-печать: *a* — принцип печати: 1 — подающий инструмент; 2 — быстрый нагрев; 3 — карбоновое волокно; 4 — горячий ролик; 5 — платформа; 6 — объектив; 7 — лазер; 8 — направляющая; *b* — процесс печати.

Fig. 1. Fast 3D laser printing: *a*: printing principle: 1, feeding tool; 2, fast heating; 3, carbon fiber; 4, hot roller; 5, platform; 6, lens; 7, laser; 8, guide; *b*: printing process.

В качестве армирующего материала было использовано непрерывное углеродное волокно 1 kT 300 на основе полиакрилонитрила производства SINOPEC. В качестве матричной смолы использовалась прозрачная полимолочная кислота 4032D производства NatureWorks. Объёмная доля волокон рассчитана по следующей формуле и составила приблизительно 16,2%:

$$V_f = \frac{kd^2}{D^2}, \quad (1)$$

где V_f — обозначает объёмную долю углеродных волокон (безразмерная величина (доля от 1)), k — технические характеристики жгута из углеродного волокна (безразмерная величина (количество нитей или волокон в жгуте)), d — диаметр одного углеродного волокна (7 мкм), а D — диаметр CFRP (м).

На рис. 1, *b* показан 3D-принтер непрерывного действия из углеродного волокна, содержащий трёхосевую конструкцию перемещения XYZ и печатающую головку из углепластика. Шаговый двигатель расположен над печатающей головкой для регулировки направления печати, обеспечивая соответствие траектории лазерного излучения. Щётки, расположенные под печатающей головкой, пропускают ток между вращающейся и неподвижной частями. Направляющее устройство фиксирует углепластик, направляя его в зону лазерного облучения. Горячий валик обеспечивает необходимое давление для печати, а натяжение перед печатью регулируется пружинным механизмом. В системе используется твёрдотельный импульсный лазер номинальной мощностью 5,5 Вт, излучающий синий свет с длиной волны 400-450 нм. Мощность лазера регулируется с помощью широтно-импульсной модуляции.

Для обеспечения оптимального плавления углепластика необходимо точно регулировать мощность лазера, поскольку недостаточное поглощение энергии предотвращает плавление, в то время как чрезмерное поглощение энергии приводит к разложению при высоких температурах. Подходящий диапазон температур нагрева углепластика составляет 180-230°C. С помощью COMSOL была разработана тепловая модель лазерного нагрева углепластика для определения оптимальной мощности лазера при различных скоростях печати. Амплитудное распределение поперечного сечения поля излучения лазерного резонатора соответствует функции Гаусса, при этом энергия уменьшается от центра к краям.

Когда лазер облучает материал, энергия отражается, поглощается и передается на поверхность материала. Для непрозрачного углеродного волокна пропускание лазера незначительно, а поглощение лазера составляет приблизительно 48%. В связи со сложностью процесса лазерного нагрева углепластика была создана упрощенная двумерная модель теплового поля для изучения теплопередачи и распределения температуры во время нагрева. Были сделаны следующие допущения:

1. Полимерная матрица полностью прозрачна, не отражает оптические лучи при нагревании и имеет коэффициент поглощения лазерной энергии, равный 0.
2. Теплофизические параметры углеродного волокна, такие как теплоёмкость при постоянном давлении, плотность и теплопроводность, остаются неизменными при изменении температуры.
3. Эффект вторичного облучения после отражения лазера не учитывается.
4. Углеродное волокно рассматривается как единое целое, без учёта его проникновения в матричную смолу.

Нагревательный эффект лазера на углеродном волокне моделируется как тепловой поток на поверхности углеродного волокна. Процесс нагрева включает в себя накопление тепла, конвекцию и теплопроводность. Граничное уравнение для процесса выглядит следующим образом:

$$\rho C_p \frac{\delta T}{\delta \tau} + \rho C_p u \cdot \Delta T - \Delta \cdot (k \cdot \Delta T) = Q, \quad (2)$$

где Q указывает на поверхностный источник тепла, соответствующий распределению по Гауссу, и используется для моделирования теплового излучения лазера, выраженного как:

$$Q = \frac{2P}{\pi r^2} \cdot \eta \cdot e^{-2\left(\frac{x-x_0}{r}\right)^2 - \left(\frac{y-y_0}{r}\right)^2}, \quad (3)$$

где P — обозначает мощность лазера (Вт); η — представляет собой КПД лазера; r — радиус лазерного пятна (м); x_0, y_0 — координаты точки лазерного облучения (м).

Во время нагревания матричная смола претерпевает фазовый переход из твёрдой фазы в жидкую, и её скрытая теплота сгорания q_a выражается в виде функции:

$$q_a = h_a(T - T_a). \quad (4)$$

Теплофизические параметры углеродного волокна T300 и полимолочной кислоты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Теплофизические параметры углеродного волокна и PLA (полилактид)

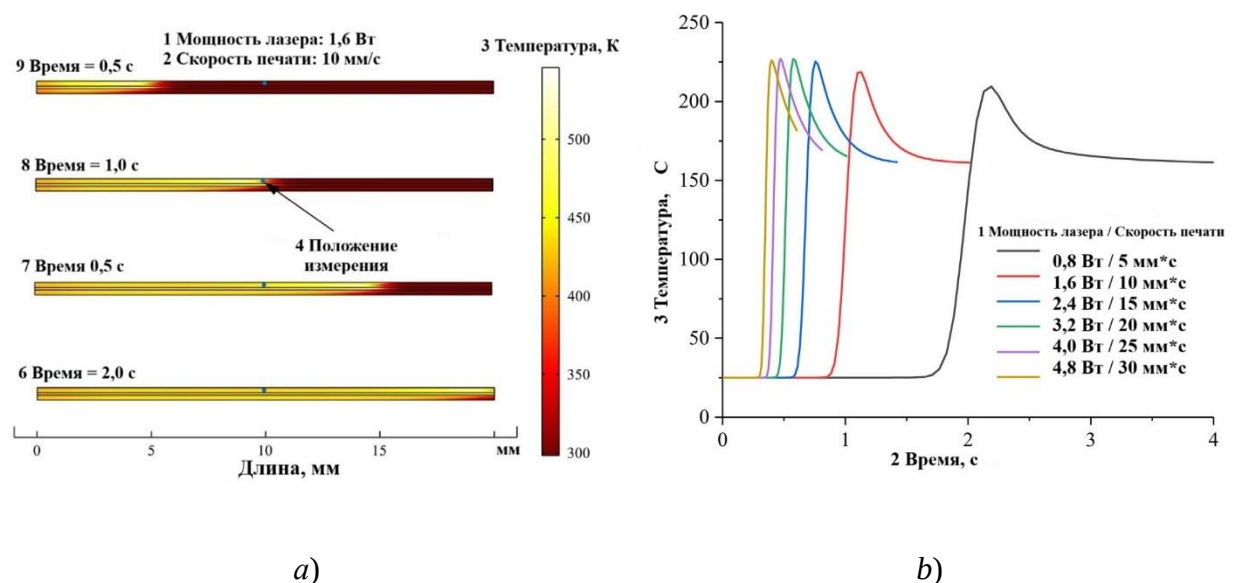
Table 1. Thermophysical parameters of carbon fiber and PLA (polylactide)

Параметр	Единица измерения	Углеродное волокно	Полимолочная кислота
Плотность ρ	кг/м ³	1760	1250
Теплоемкость при постоянном давлении C_p	Дж/(кг/К)	956	1950
Теплопроводность k	Вт/(м/К)	5,5	0,23
Латентная теплота l	кДж/кг	43,000	68
Температура фазового перехода T	К	3900	453
Номинальная мощность лазера P	W	5,5	
Радиус лазерного пятна r	мм	1,5	
Угол облучения	°	32	

Под воздействием лазерного излучения углеродное волокно быстро нагревается и проводит тепло как в осевом, так и в радиальном направлениях, как показано на рис. 2, а. Подходящая температура для углеродного волокна, подвергнутого воздействию лазера, достигается путем последовательной регулировки мощности лазера и скорости печати (см. рис. 2, с).

Для проверки теоретической модели и результатов моделирования были проведены эксперименты. В ходе экспериментов в углеволокно был встроен высокоточный ($\pm 0,1$ °C) микротермистор, поверхность которого была полностью покрыта полимолочной кислотой, что позволяло измерять внутреннюю температуру пластика.

Для проверки теоретической модели и результатов моделирования были проведены эксперименты. В ходе экспериментов в углеволокно был встроен высокоточный ($\pm 0,1$ °C) микротермистор, поверхность которого была полностью покрыта полимолочной кислотой, что позволяло измерять внутреннюю температуру пластика.



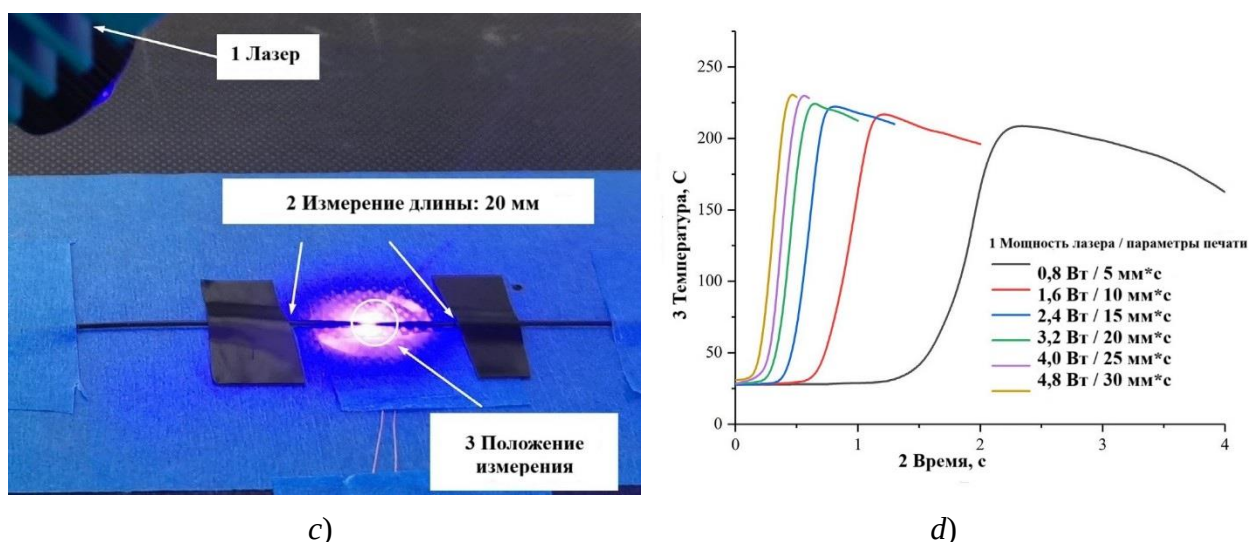


Рис. 2. Эксперимент по оценке мощности лазера: *a* — изменение температуры углепластика, облученного лазером мощностью 1,6 Вт со скоростью печати 10 мм/с: перечень слов: 1 — мощность лазера 1,6 Вт; 2 — скорость печати 10 мм/с; 3 — температура, К; 4 — положение измерения, мм; 5 — длина, мм; 6 — время = 2,00 с; 7 — время = 0,5 с; 8 — время=1,00 с; 9 — время=0,5 с; *b* — имитация температуры в месте измерения: 1 — мощность лазера / скорость печати; 2 — время, с; 3 — температура, °C; *c* — экспериментальный процесс: перечень слов: 1 — лазер; 2 — измерение длины: 20 мм; 3 — положение измерения; *d* — фактическая температура в месте измерения: перечень слов: 1 — мощность лазера / скорость печати; 2 — время, с; 3 — температура, °C.

Fig. 2. An experiment to estimate the laser power: *a*, temperature change of carbon fiber irradiated with a 1.6 W laser at a printing speed of 10 mm/s; *b*: simulation of the temperature at the measuring point; *c*, experimental process; *d*, the actual temperature at the measuring point.

Для проверки теоретической модели и результатов моделирования были проведены эксперименты. В ходе экспериментов в углеволокно был встроен высокоточный ($\pm 0,1$ °C) микротермистор, поверхность которого была полностью покрыта полимолочной кислотой, что позволяло измерять внутреннюю температуру пластика.

Лазером, установленным на направляющей оси X принтера FDM, можно управлять для перемещения вдоль оси X. Лазер перемещается слева направо с различной скоростью, проходя точку измерения термистора. Движение лазера вдоль углеродного волокна стимулирует процесс динамического облучения, происходящий во время печати. На рис. 2, *d* представлена корреляция между температурой в месте измерения и затраченным временем при движении лазера с разной скоростью, что согласуется с результатами моделирования, представленными на рис. 2, *b*.

Несколько наборов однонаправленных образцов углепластика были напечатаны со скоростью от 5 до 30 мм/с, чтобы подтвердить возможность и стабильность высокоскоростной 3D-печати углеродного волокна с использованием лазерного нагрева. Размеры образцов для испытания на растяжение составляли 120×10×2 мм (длина, ширина, толщина). Образцы для испытания на изгиб в трёх точках имели размеры 80×10×4 мм (длина, ширина, толщина).

Все образцы были напечатаны концентрическими контурами, как показано на рис. 3, *a*. Методика испытаний представлена на рис. 3, *b*. Основные параметры печати подробно описаны в табл. 2.

Таблица 2. Параметры 3D-печати

Table 2. 3D printing parameters

Параметр	Единица измерения	Значение
Температура валика	°C	200
Температура подложки	°C	60
Высота слоя	мм	0.15
Скорость печати	мм/с	5-30
Теоретическая температура печати	°C	200
Мощность лазера	W	0,8...4,8

Механические свойства оценивались с помощью универсальной испытательной машины WWW-20KN. Испытание на растяжение проводилось при скорости нагружения 2 мм/мин, а растягивающая деформация измерялась с помощью электронного экстензометра, прикреплённого к образцу. Испытание на связывание проводилось при ширине опоры 64 мм и скорости нагружения 10 мм/мин. Испытание на сдвиг проводилось путём растягивания образца со скоростью нагружения 2 м/мин. Методика испытания механических свойств представлена на рис. 3.

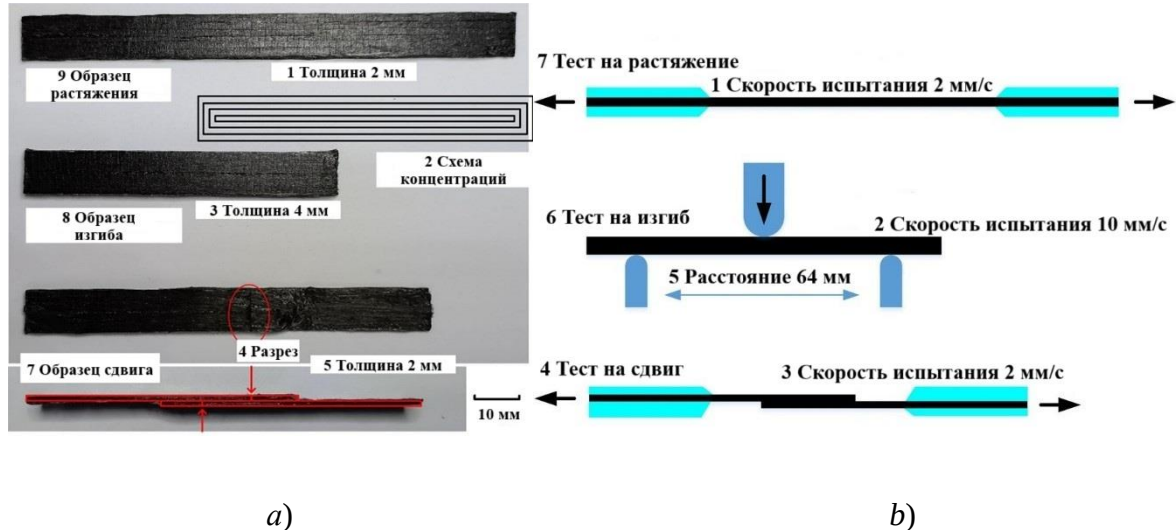


Рис. 3. Испытание механических свойств: *a* — размер и траектория образца: 1 — толщина 2 мм; 2 — схема концентраций; 3 — толщина 4 мм; 4 — разрез; 5 — толщина 2 мм; 6 — 10 мм; 7 — образец сдвига; 8 — образец изгиба; 9 — образец растяжения; *b* — принцип испытания: 1 — скорость испытания 2 мм/с; 2 — скорость испытания 10 мм/с; 3 — скорость испытания 2 мм/с; 4 — тест на сдвиг; 5 — расстояние 64 мм; 6 — тест на изгиб; 7 — тест на растяжение.

Fig. 3. Testing of mechanical properties: *a*: the size and path of the sample; *b*: the test principle.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Прочность на разрыв постепенно снижается по мере увеличения скорости печати от 5 до 15 мм/с, после чего следует резкое снижение при скорости 20 мм/с. Наклон кривой прочности на изгиб заметно увеличивается при скорости печати 25 мм/с. Прочность на сдвиг снижается экспоненциально с увеличением скорости печати. При скорости печати 5 мм/с средние значения прочности образцов на растяжение, изгиб и сдвиг составили 280,72 МПа, 387,85 МПа и 17,45 МПа соответственно. Эти показатели снизились на 5,39%, 12,53% и 10,6% соответственно, когда скорость печати увеличилась до 15 мм/с. Примечательно, что результат демонстрирует лучшую производительность по сравнению со снижением прочности на изгиб на 38,46%, о котором сообщалось в других испытаниях при аналогичной скорости.

Кроме того, при скорости печати 30 мм/с прочность на растяжение, изгиб и сдвиг составила 217,17 МПа, 241,82 МПа и 9,76 МПа соответственно, что представляет собой снижение на 22,64%, 37,19% и 44,07% от их значений при 5 мм/с.

ОБСУЖДЕНИЕ

Механические свойства углеродного волокна при 3D-лазерной печати оценивались на различных скоростях печати, чтобы выявить возможность быстрого прототипирования с использованием углеродного волокна. Прочность на растяжение в продольном направлении, прочность на изгиб и прочность на сдвиг при быстрой 3D-печати из углеродного волокна с использованием лазера демонстрируют отрицательную корреляцию со скоростью печати. Модуль упругости при изгибе также демонстрирует отрицательную корреляцию со скоростью печати, тогда как модуль упругости при растяжении остаётся неизменным.

Метод целесообразно уточнить применительно к конкретным типам деталей, например, силовым элементам рам, корпусным или соединительным узлам с повышенными

требованиями к прочности и точности. Разработанная технология экономически целесообразна для единичного и мелкосерийного производства, особенно при изготовлении оригинальных или труднодоступных запасных частей, а также при быстром прототипировании деталей с высокой степенью индивидуализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании рассмотрен метод быстрой 3D-печати непрерывных пластиков, армированных углеродным волокном, с использованием лазерного нагрева. Лазерное излучение поглощается углеродным волокном, что приводит к быстрому накоплению тепла и передаче его полимерной матрице, что значительно увеличивает скорость нагрева. Это позволяет быстро изготавливать композитные детали для сельскохозяйственных машин. По сравнению с традиционными процессами контактного нагрева, которые ограничены скоростью печати менее 5 мм/с, предлагаемый способ позволяет достичь скорости до 30 мм/с и выше, тем самым повышая производительность 3D-печати деталей сельскохозяйственных машин из углеродного волокна.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. М.Ю. Карелина — разработка концепции исследования, формулировка цели и задачи исследования, осуществление общего научного руководства и контроль за достоверностью результатов; Д.А. Юдин — выполнение аналитического обзора литературы, проведение экспериментального исследования, а также участие в интерпретации полученных данных; А.В. Терентьев — реализация математической обработки результатов, подготовка графических материалов и непосредственное участие в написании и редактировании текста статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Данная статья подготовлена в рамках выполнения 1-го этапа научно-исследовательской работы, реализуемой за счёт средств федерального бюджета (источник финансирования — Минобрнауки РФ) по теме: «Разработка научных, методологических и практических основ реверсивного инжиниринга для решения комплексных задач импортозамещения в агропромышленном комплексе Российской Федерации» (шифр научной темы FZNW-2024-0026).

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: M.Yu. Karelina: development of the research concept, formulation of the aims and objectives of the study, implementation of general scientific guidance and control over the results reliability; D.A. Yudin: performing an analytical review of the literature, conducting experimental research, as well as participating in the interpretation of the data obtained; A.V. Terentyev: implementation of mathematical processing of the results, preparation of graphic materials and direct participation in writing and editing the text of the manuscript. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval: N/A.

Funding sources: This article was prepared as part of the 1st stage of the research work carried out at the expense of the federal budget (the source of funding is the Ministry of Education and Science of the Russian Federation) on the topic: "Development of scientific, methodological and practical foundations of reverse engineering for solving complex import substitution problems in the agricultural industry of the Russian Federation" (code of the scientific topic FZNW-2024-0026).

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Lopatin YuA. Application of 3D printing by the FDM method in the repair of machines and equipment. *Tekhnicheskii servis mashin*. 2019;3(136):40–45. (In Russ.) EDN: RXQGXX
2. Romanov PS, Yankovskiy DV. Rapid prototyping and 3D printing in mechanical engineering. *Kompleksnye problemy razvitiya nauki, obrazovaniya i ekonomiki regiona*. 2014;2(5):85–89. (In Russ.) EDN: TLAPLX
3. Aldoshin NV, Golubev VV, Vasil'ev AS, et al. Prospects for the use of plastic parts of agricultural machinery. *AgroEkoInzheneriya*. 2023;3(116):20–34. doi: 10.24412/2713-2641-2023-3116-20-33 (In Russ.) EDN: IFEBHA
4. Akhmedova ShA. Traditional and additive technologies in the production of machine parts. *Universum: tekhnicheskie nauki*. 2021;11-1(92):34–37. (In Russ.) EDN: RINBTY
5. Nefelov IS, Baurov NI. Technological features of manufacturing parts with threaded surfaces using 3D printing methods for operation in various climatic conditions. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2024;4:28–32. doi: 10.31044/1684-2561-2024-0-4-28-32 (In Russ.) EDN: NIVEJQ
6. Nefelov IS. Investigation of the influence of fillers on the strength characteristics of filament for 3D printing. *Interstroymekh-2022: Materials of the XXVI International Scientific and Technical Conference, Yaroslavl, October 12–14, 2022*. Yaroslavl: Yaroslavl State Technical University; 2022:315–319. (In Russ.) EDN: IKWVQF.
7. Laisha AK, Bushmanov DV, Pyanzin AM. Study of the influence of printing speed on the quality and accuracy of products manufactured using FDM 3D printing technology. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2024;105-13:219–223. doi: 10.18411/trnio-01-2024-678 (In Russ.) EDN: HCUGUQ
8. Andryushkin, AY, Butsikin, EB, Li, C. Influence of the 3D printing speed of an additive installation using FDM technology on the accuracy of the product. *Aerokosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2023;1(2):118–129. (In Russ.) EDN: BHWMTT
9. Zlenko MA, Nagaïtsev MV, Dovbyush VM. *Additivnye tekhnologii v mashinostroenii: Posobie dlya inzhenerov*. Moscow: Tsentral'nyi ordena Trudovogo Krasnogo Znameni nauchno-issledovatel'skii avtomobil'nyi i avtomotornyi institut "NAMI"; 2015:220. (In Russ.) EDN: VYHRMD
10. Panichev SA, Fonov PS. Study of the quality of filling the product in 3-D printing at different printing speeds. *Nauka nastoyashchego i budushchego*. 2018;1:303–304. (In Russ.) EDN: YATQPB

ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

*** Юдин Денис Александрович,**
аспирант,
специалист Лаборатории реверсивного
инжиниринга;
адрес: Россия, 109542, Москва, Рязанский пр-
кт, д. 99;
ORCID: 0009-0006-5702-980X;
eLibrary SPIN: 2005-7116;
e-mail: Denis.yudin.qaz@gmail.com

Соавторы:

Карелина Мария Юрьевна,
д-р техн. наук, д-р пед. наук, профессор,
проректор;
ORCID: 0000-0003-0335-7550;
eLibrary SPIN: 1852-1782;
e-mail: karelinamu@mail.ru

Терентьев Алексей Вячеславович,
д-р техн. наук, профессор,
профессор кафедры «Детали машин и теория
механизмов»;
ORCID: 0000-0003-3500-2201;
eLibrary SPIN: 6676-4524;
e-mail: aleksej.terentev.67@bk.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

*** Denis A. Yudin,**
Postgraduate,
Specialist of the Reverse Engineering Laboratory;
address: 99 Ryazansky ave, Moscow, Russia,
109542;
ORCID: 0009-0006-5702-980X;
eLibrary SPIN: 2005-7116;
e-mail: Denis.yudin.qaz@gmail.com

Co-Authors:

Maria Yu. Karelina,
Dr. Sci. (Engineering), Dr. Sci. (Pedagogy),
Professor;
Vice-Rector;
ORCID: 0000-0003-0335-7550;
eLibrary SPIN: 1852-1782;
e-mail: karelinamu@mail.ru

Alexey V. Terentyev,
Dr. Sci. (Engineering), professor,
Professor of the Machine Parts and Theory of
Mechanisms Department;
ORCID: 0000-0003-3500-2201;
eLibrary SPIN: 6676-4524;
e-mail: aleksej.terentev.67@bk.ru