

## РОБОТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. М. ЮВШИН<sup>1</sup>, Ю. С. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>, А. С. ВОСОРКИН<sup>2</sup>, Е. И. ЯБЛОЧНИКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: yuvshin.alex@yandex.ru

<sup>2</sup>ООО „Би Питрон“, 191014, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрены преимущества использования термопластичных полимерных композиционных материалов и безавтоклавных технологий в аэрокосмической промышленности. Разработан роботизированный комплекс для реализации технологии автоматизированной выкладки изделий из таких материалов. Представлены результаты физико-механических испытаний образцов, изготовленных из термопластичного препрега, подтверждающие конкурентоспособность и преимущества термопластичных материалов и реализуемой технологии.

**Ключевые слова:** термопластичные материалы, безавтоклавные технологии, автоматизированная выкладка, роботизированный комплекс, препрег

Для изготовления изделий в различных отраслях промышленности массово используются полимерные композиционные материалы (ПКМ), при этом наиболее широкое распространение имеют материалы с реактопластами в качестве матрицы, что объясняется разнообразием технологий переработки и соответствующего оборудования.

В основном полимерные композиционные материалы применяются в аэрокосмической и автомобильной промышленности. По последним данным [1, 2], в конструкциях космических аппаратов используется около 50 % ПКМ, а полностью из ПКМ изготавливаются тарелки антенн, вспомогательные и силовые конструкции, корпуса двигателей и т. д. В то же время с ростом потребления ПКМ данными высокотехнологическими отраслями увеличиваются габаритные размеры и усложняется геометрия изготавливаемых деталей, ужесточаются предъявляемые к ним требования и растет себестоимость.

В связи с этим в последние десятилетия все большее внимание уделяется другой группе ПКМ, а именно термопластичным полимерным композиционным материалам (ТПКМ). Процесс изготовления изделий из таких материалов имеет следующие преимущества [3—7]:

- более короткий цикл изготовления;
- меньшая трудоемкость;
- широкие возможности автоматизации;
- отсутствие временных ограничений;
- меньшая энергоемкость (безавтоклавные технологии);
- широкие возможности по последующей обработке изделий, переформовке, сварке и т.д. при многократном нагреве и охлаждении как всего изделия, так и его отдельных частей без ухудшения свойств материала.

Кроме того, конструкционные термопластичные материалы:

- прочнее соответствующих реактопластов, что выражается в их более высокой ударной прочности и стойкости к повреждениям;
- практически нечувствительны к воздействию большинства технологических жидкостей и устойчивы к воздействию влаги;
- имеют длительный срок хранения;

- обладают возможностью вторичной переработки;
- менее вредны для здоровья.

Следует также отметить, что применение ТПКМ позволяет во многом уменьшить пожароопасность, а также снизить дымность и токсичность продуктов горения.

Согласно мировым тенденциям традиционные технологии изготовления деталей из ПКМ, использующие, в том числе, ручные методы формования, все чаще замещаются новыми автоматизированными технологиями, например, такими, как автоматизированная выкладка ленты, автоматизированная выкладка волокна и др. [8].

Высокая потребность в автоматизации обусловлена повышением требований к механическим и точностным характеристикам изделий. Востребованность, в частности, безавтоклавных технологий [9] объясняется меньшей себестоимостью готового изделия и меньшим технологическим временем, так как автоклавные технологии являются дорогостоящими из-за высокой цены оборудования, а технологическое время на изготовление детали напрямую зависит от времени отверждения полимера.

Для реализации безавтоклавной технологии — автоматизированной выкладки деталей из ТПКМ — разработан роботизированный комплекс, позволяющий получать прецизионные изделия с высокими механическими характеристиками при минимальном участии в этом процессе человека.

Автоматизированная выкладка (Automated Tape Placement) — это процесс выкладки ленты ТПКМ на формообразующую оснастку (оправку), обеспечивающий получение изделий с различной структурой армирования. Физика процесса заключается в подводе тепла, необходимого для расплавления связующего ленты ТПКМ и дальнейшей ее консолидации с приложением давления, что приводит к формообразованию готовой детали (рис. 1).

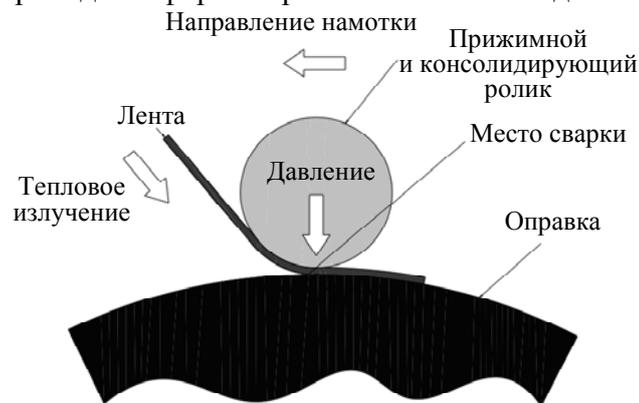


Рис. 1

Установка для выкладки состоит из двух основных частей — промышленного манипулятора и одноосного позиционера, которые в совокупности обеспечивают для всей установки семь степеней свободы, что позволяет изготавливать изделия различной степени сложности (рис. 2, а). Манипулятор представляет собой промышленный робот Kawasaki RS80N с шестью степенями свободы с закрепленным на нем рабочим органом в виде технологической намоточной головки. Одноосный позиционер фиксирует оправку. Траектория движения намоточной головки, ее ориентация и скорость вращения оправки в позиционере определяют траекторию выкладки ленты на оправку, что позволяет достичь необходимой структуры армирования изделия.

Технологическая головка обеспечивает подачу ленты ТПКМ в рабочую область, нагрев зоны сварки, а также прижим ленты к ранее уложенным слоям. Для реализации этих основных функций технологическая головка включает в себя следующие элементы (рис. 2, б):

- систему направляющих роликов;
- систему контроля натяжения ленты в виде тензодатчика и тормозного механизма;

— устройство фокусировки лазерного пучка и контроля температуры в пятне контакта; это устройство представляет собой лазерную головку, которая соединяется с диодным лазерным модулем посредством оптоволокну; сам диодный лазерный модуль (модуль накачки) мощностью 0,5 кВт с сопутствующим оборудованием расположен в отдельном блоке;

— устройство прижима ленты в месте контакта в виде пружинного подвеса прижимного ролика.

Единая система управления роботизированным комплексом содержит контроллеры управления промышленным роботом, контроллеры системы натяжения и модуль управления лазером (драйвер лазера).

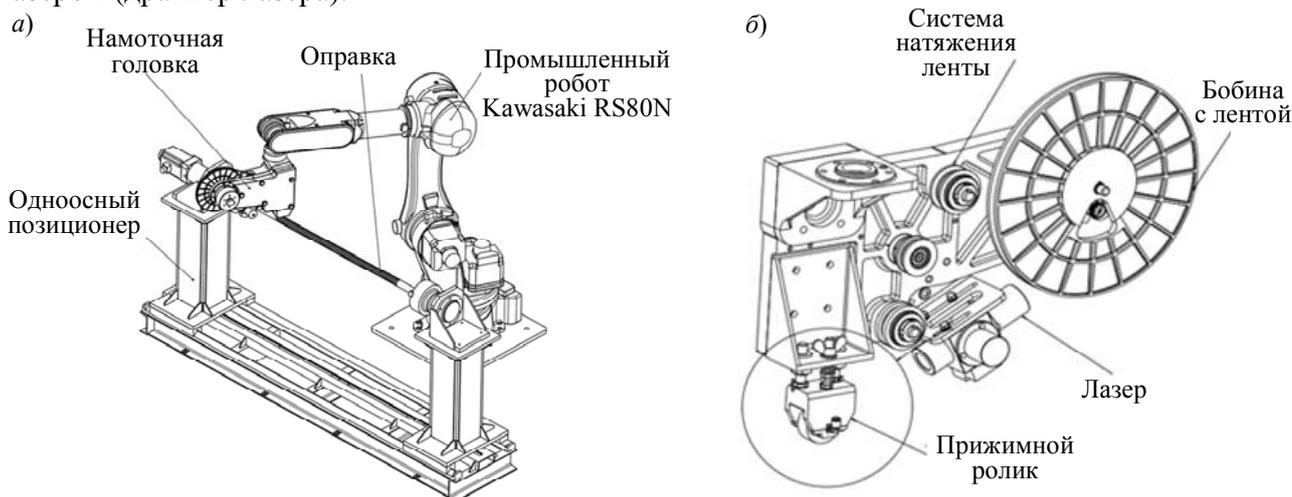


Рис. 2

Программирование установки для выкладки реализовано посредством системы виртуального моделирования технологических процессов “Delmia”, позволяющей программировать робот без необходимости остановки производства. Разработка управляющих программ для робота состоит из следующих основных этапов:

- построение траектории выкладки;
- построение ключевых точек на траектории;
- настройка параметров движения робота;
- проверка управляющей программы;
- подача роботу управляющей программы.

Повышение эффективности разработки управляющих программ достигается за счет автоматизированного построения траектории выкладки. Рис. 3 демонстрирует автоматически построенную траекторию выкладки.

Система “Delmia” позволяет проводить предварительную проверку управляющей программы (рис. 4), что обеспечивает ее качество и отсутствие столкновений инструмента с оснасткой, заготовкой или роботом.

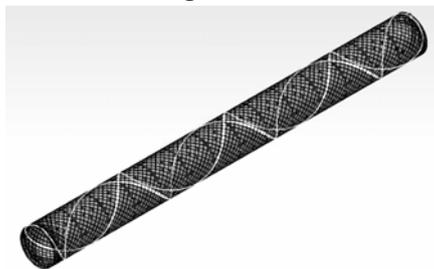


Рис. 3

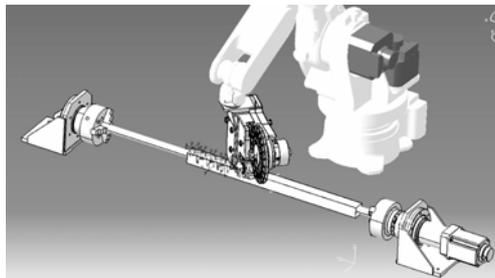


Рис. 4

Для подтверждения конкурентоспособности и преимуществ термопластичных материалов и разрабатываемой технологии автоматизированной выкладки были проведены физико-механические испытания образцов изделий. Образцы были изготовлены из термопластичного

препрега (полимерного композиционного материала-полуфабриката) на основе полифениленсульфида марки Fortron 0214 с углеродным армирующим наполнителем марки Umatex UMT 45-12K-EP. Схема армирования (0 и 90°) характеризует ориентацию ленты материала относительно оси вращения изделия. При изготовлении образцов использовались теоретически и экспериментально полученные параметры процесса выкладки, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Температура излучения лазера, °С	310
Скорость намотки, м/мин	4
Прижимное давление, Н	100
Угол падения лазерного излучения, ...°	14,5

В ходе испытаний определялись модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел прочности при растяжении; количество образцов — 5, температура испытания 23 °С, тип образцов — по ГОСТ 32656-2014. Полученные при испытаниях результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Номер образца				
	1	2	3	4	5
Ширина $b$ , мм	14,896	15,074	14,732	14,906	14,928
Толщина $h$ , мм	1,224	1,418	1,204	1,222	1,162
Площадь поперечного сечения, мм <sup>2</sup>	18,233	21,375	17,737	18,215	17,346
Начальная расчетная длина, 10 мм	50	50	50	50	50
Модуль упругости $E$ , МПа	67016,01	52083,73	66000,15	59133,93	60119,48
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,087	0,084	0,092	0,08	0,067
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	873,29	697,96	923,2	760,55	759,92

Согласно данным табл. 2, среднее значение модуля упругости  $E = 60\ 871$  МПа, среднее значение коэффициента Пуассона  $\nu = 0,08$ , средний предел прочности  $\sigma_b = 802,98$  МПа.

Полученные по результатам испытаний параметры образцов из ТПКМ оказались идентичными параметрам образцов из ПКМ с реактопластичным связующим, изготовленных методом ручной выкладки и подвергшихся отверждению в автоклаве [10], однако в то же время значения модуля упругости и предела прочности исследованных образцов оказались вдвое ниже этих же параметров у образцов с реактопластичным связующим, изготовленных по технологии автоматизированной выкладки [11].

По результатам проведенных исследований можно сказать, что технология автоматизированной выкладки имеет большой потенциал развития и высокую конкурентоспособность в области технологий по изготовлению прецизионных и высокопрочных деталей из ТПКМ. Развитие разработанного роботизированного комплекса видится в возможности использования манипуляторов различного типа: роботов разной грузоподъемности, порталных систем разных размеров и т. д. Также возможно увеличение функциональности самой технологической головки: добавление функций обрезки и подачи ленты, дополнительных систем контроля, разных типов устройств, реализующих нагрев области сварки. Это позволит получить установку для производства широкого спектра изделий из ТПКМ: от маленьких до габаритных, от простых тел вращения до фасонных деталей с еще более высокими прочностными характеристиками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rana S., Fanguero R. Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering: Processing, Properties and Applications. Woodhead Publishing, 2016.

2. *Nikhil V. Nayak*. Composite materials in aerospace applications // Intern. Journal of Scientific and Research Publications. 2014. Vol. 4, iss. 9.
3. PPS for Continuous Fiber Composites Aerospace Applications // Celanese [Электронный ресурс]: <<http://celanese.com/engineered-material>>, 14.08.2017.
4. *Akca E., Gursel A.* A review on the matrix toughness of thermoplastic materials // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2015. Vol. 3, N 2. P. 1—8.
5. *Wyppych G.* Handbook of Polymers. Toronto: ChemTec Publishing, 2016.
6. *McKeen L. W.* The Effect of UV Light and Weather on Plastic and Elastomer. Waltham: Elsevier, 2013. 388 p.
7. *Campbell F. C.* Structural Composite Materials. Ohio: ASM International, 2010.
8. The Outlook for Thermoplastics in Aerospace Composites, 2014—2023 [Электронный ресурс]: <<http://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-thermoplastics-in-aerospace-composites-2014-2023#carousel6c6739d1-6331-42bf-9dc1-aa0cfa0833b2>>, 14.08.2017.
9. No Autoclave, No Oven, No Problem! [Электронный ресурс]: <<http://compositesmanufacturingmagazine.com/2014/08/out-of-autoclave-solutions-expand-composite-opportunities-across-market-sectors/>>, 14.08.2017.
10. *de Paiva F. J. M., Mayer S., Rezende M. C.* Comparison of tensile strength of different carbon fabric reinforced epoxy composites // Materials Research. 2006. Vol. 9, N 1. P. 83—89.
11. *Dell'Anno G., Partridge I., Cartié D., Hamlyn A., Chehura E., James S., Tatam R.* Automated manufacture of 3D reinforced aerospace composite structures // Intern. Journal of Structural Integrity. 2011. Vol. 3, iss. 1. P. 22—40.

#### Сведения об авторах

- Александр Михайлович Ювшин** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: [yuvshin.alex@yandex.ru](mailto:yuvshin.alex@yandex.ru)
- Юрий Сергеевич Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: [ysandreev@corp.ifmo.ru](mailto:ysandreev@corp.ifmo.ru)
- Алексей Сергеевич Восоркин** — ООО „Би Питрон“; инженер-конструктор; E-mail: [asv@beerpitron.com](mailto:asv@beerpitron.com)
- Евгений Иванович Яблочников** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: [eugeny\\_tps@mail.ru](mailto:eugeny_tps@mail.ru)

Поступила в редакцию  
15.02.18 г.

**Ссылка для цитирования:** Ювшин А. М., Андреев Ю. С., Восоркин А. С., Яблочников Е. И. Роботизированный комплекс для реализации технологии автоматизированной выкладки изделий из термопластичных композиционных материалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 8. С. 672—677.

#### ROBOTIZED COMPLEX FOR THE REALIZATION OF TECHNOLOGY OF AUTOMATED PLACING OF PRODUCTS FROM THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS

A. M. Yuvshin<sup>1</sup>, Yu. S. Andreev<sup>1</sup>, A. S. Vosorkin<sup>2</sup>, E. I. Yablochnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: [yuvshin.alex@yandex.ru](mailto:yuvshin.alex@yandex.ru)

<sup>2</sup> Bee Pitron, Ltd., 191014, St. Petersburg, Russia

Advantages of using thermoplastic polymer composite materials and non-autoclave technologies in the aerospace industry are considered. A robotic complex was developed to implement the technology of automated laying of products from such materials. The results of physical and mechanical tests of samples made of thermoplastic prepreg confirm the competitiveness and advantages of thermoplastic materials and the technology being implemented.

**Keywords:** thermoplastic materials, non-autoclave technologies, automated laying of products, robotized complex, prepreg

#### REFERENCES

1. Rana S., Figueiro R. *Media. The Officers' Mess Business Centre*, UK, Woodhead Publishing, 2016, pp. 1—15.

2. Nayak N.V. *Intern. J. of Scientific and Research Publications*, 9 September 2014, no. 9(4).
3. *PPS for Continuous Fiber Composites Aerospace Applications*, Celanese, <http://celanese.com/engineered-material>.
4. Akca E., Gursel A. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 2015, no. 2(3), pp. 1–8.
5. Wypych G. *Handbook of Polymers*, Toronto, ChemTec Publishing, 2016.
6. McKeen L.W. *The Effect of UV Light and Weather on Plastic and Elastomer*, Waltham, Elsevier, 2013, 388 p.
7. Campbell F.C. *Structural Composite Materials*, Materials Park, ASM International, 2010.
8. *The Outlook for Thermoplastics in Aerospace Composites, 2014-2023*, <http://www.compositesworld.com/articles/the-outlook-for-thermoplastics-in-aerospace-composites-2014-2023#carousel6c6739d1-6331-42bf-9dc1-aa0cfa0833b2>.
9. *No Autoclave, No Oven, No Problem!* <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2014/08/out-of-autoclave-solutions-expand-composite-opportunities-across-market-sectors>.
10. de Paiva F.J.M., Mayer S., Rezende M.C. *Materials Research*, 2006, no. 1(9), pp. 83–89.
11. Dell'Anno G., Partridge I., Cartié D., Hamlyn A., Chehura E., James S., Tatam R. *International Journal of Structural Integrity*, 2011, no. 1(3), pp. 22–40.

#### Data on authors

- Alexander M. Yuvshin** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: [yuvshin.alex@yandex.ru](mailto:yuvshin.alex@yandex.ru)
- Yuri S. Andreev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: [ysandreev@corp.ifmo.ru](mailto:ysandreev@corp.ifmo.ru)
- Alexey S. Vosorkin** — Bee Pitron, Ltd.; Engineer-Designer; E-mail: [asv@beepitron.com](mailto:asv@beepitron.com)
- Evgeny I. Yablochnikov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; Head of the Department; E-mail: [eugeny\\_tps@mail.ru](mailto:eugeny_tps@mail.ru)

**For citation:** Yuvshin A. M., Andreev Yu. S., Vosorkin A. S., Yablochnikov E. I. Robotized complex for the realization of technology of automated placing of products from thermoplastic composite materials. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 8. P. 672–677 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-8-672-677