

## **Усовершенствование технологии лазерной наплавки авиационных деталей путем использования адаптивной системы дистанционного бесконтактного измерения геометрических параметров**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»*

Исследован вопрос о применении лазерного дистанционного сенсора для контроля геометрии детали в процессе наплавки. Рассмотрена установка сенсора в оборудование для наплавки и его настройка, проведены измерения наплавленной геометрии. Выполнены анализ и обработка полученных данных.

Аддитивные производственные процессы занимают значительное место в создании трехмерной металлопродукции. Актуальность этой работы заключается в создании способа измерения геометрии авиационных деталей непосредственно во время обработки без изъятия их из станка, а также возможности управления параметрами технологического процесса для достижения наиболее высокого качества получаемого изделия.

**Ключевые слова:** лазерная наплавка, измерения, триангуляция, дистанционный лазерный сенсор, аддитивное производство, программирование.

### **1. Введение**

Аддитивные производственные процессы занимают значительное место в производстве трехмерной металлопродукции. Лазерная наплавка металлов является одним из самых инновационных процессов для производства металлических деталей на основе метода прямого осаждения металлов. Эту технологию применяют во многих областях промышленности, например в машиностроении, авиастроении, судостроении, медицине и других отраслях. В современном самолетостроении примером использования аддитивных технологий являются 3D-печатные кронштейны для Airbus A350 XWB. Кроме того, авиакомпания Air Transat из Монреаля применяет запчасти, напечатанные и доставленные компанией Airbus.

В работе исследован вопрос о применении лазерного дистанционного сенсора для контроля геометрии наплавленной детали непосредственно в процессе наплавки. Рассмотрены установка и настройка сенсора, проведены измерения наплавленной геометрии. Полученные в результате измерения могут использоваться в будущем для модификации управляющей программы наплавки. Актуальность настоящей разработки заключается в создании способа измерения геометрии непосредственно во время обработки без изъятия ее из станка, что повышает точность измерений, а также в возможности управления параметрами процесса наплавки для получения наиболее высокого качества изделия.

Преимущество использования лазерного сканирования заключается в том, что такое измерение является бесконтактным. Это предотвращает механическое повреждение измеряемого объекта. Диапазон измерений также довольно широкий – от 0,001 м до 100 м, что позволяет измерять довольно большой диапазон деталей, используя только одну универсальную настройку. Значения, полученные при измерении, автоматически отображаются, например, на экране компьютера, что дает возможность сначала сохранить все данные для дальнейшего

использования в цифровой форме, а во-вторых, значительно упрощает отслеживание необходимых изменений во время измерения. Для регистрации и сохранения данных измерений было разработано специальное программное обеспечение.

## **2. Лазерная наплавка металлов**

Лазерная наплавка металлических порошковых материалов – современная технология, в которой расплавляют основной металл на небольшую глубину с помощью лазерного контактного пятна и осаждают на его поверхность слой напыляемого материала со специфическими свойствами. Лазерная наплавка позволяет наносить слой любого материала или смеси различных материалов с широким диапазоном переменных параметров процесса для получения заданных функциональных свойств.

Лазерная наплавка металлов имеет ряд преимуществ по сравнению с обычными способами напыления, такими, как дуговая сварка и плазменное напыление. Технология нанесения металла с помощью лазерного наплавления дает возможность получить намного лучшее покрытие с высоким качеством поверхности при минимальном времени простоя оборудования.

Этот метод имеет следующие преимущества:

1. Уменьшение времени подготовки производства.
2. Снижение влияния температуры на структуру материала.
3. Возможность восстановления поврежденных участков рабочих изделий.
4. Производство инструментов типа «смарт-структур».

Новое и основное применение лазерной наплавки металлов – это технологии аддитивного производства (АП) и быстрого изготовления инструментов для ускоренного изготовления сложных деталей и инструмента. Технологии АП являются относительно новыми и позволяют изготавливать изделия непосредственно по данным САД-программ, без использования каких-либо традиционных инструментов. Сложные авиационные детали, которые нельзя изготовить традиционным способом, могут изготавливаться с очень коротким циклом производства. Также технологии позволяют не только сократить время производства, но и сделать деталь с необходимой макро- и микроструктурой. Это важно как при производстве самих авиационных деталей, так и при изготовлении оснастки для авиационного производства.

## **3. Лазерная триангуляция**

Лазерные датчики можно разделить на две категории. Первая – лазеры с высоким разрешением, которые используют в приложениях контроля смещения и положения, где требуется высокая точность и стабильность. Вторая – триангуляционные лазерные датчики, которые менее точны, но не так дороги, как другие.

Этот тип датчиков содержит твердотельный лазерный источник света и детектор PSD или CMOS / CCD. Лазерный луч проецируется на измеряемую мишень, и часть луча отражается через фокусирующую оптику на детектор. Принцип работы лазерного датчика показан на рис. 1.

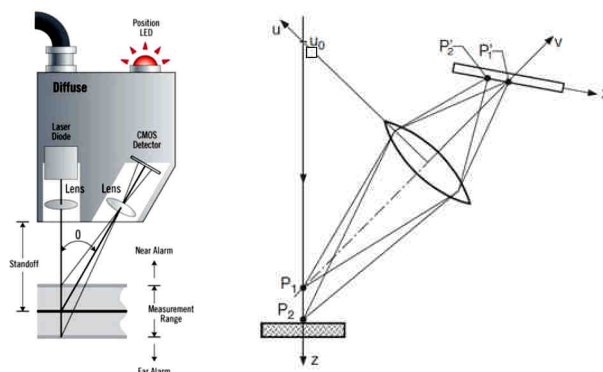


Рис. 1. Принцип работы триангуляционного лазерного сенсора

Методы лазерных измерений основаны на изменении параметров таких лазерного излучения после взаимодействия с поверхностью:

- 1) амплитуда;
- 2) волновой вектор (описывает направление лазерного луча и длину волны);
- 3) частота;
- 4) поляризация (описывает направление электрического поля).

Использование лазерной триангуляции дает возможность измерять не только расстояние, но также и контур и форму поверхностей (рис. 2). Для большинства авиационных деталей как раз и характерна сложная пространственная форма (при малой жесткости самой детали).

Длины волн, которые используют в триангуляционных датчиках, находятся в красном и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне, как, например, 660, 670, 685 и 780 нм. Лучистый поток изменяется от 1 до 100 мВт в зависимости от среднего расстояния измерения, диапазона измерения и длины волны.

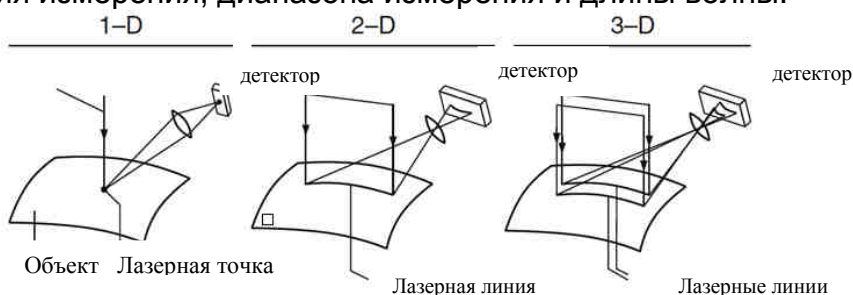


Рис. 2. Принцип метода лазерной триангуляции. Слева измерение расстояния с помощью лазерного луча, ограниченного центром, центр: участок лазерного излучения для измерения контуров и профилей, справа: проекция нескольких лазерных линий для измерения формы

#### 4. Используемое оборудование

Для проведения эксперимента используют микродистанционный лазерный сенсор, показанный на рис. 3. Такой сенсор может быть подключен с помощью соответствующего выхода к электрической схеме, а через нее – к компьютеру или другому выводящему устройству.

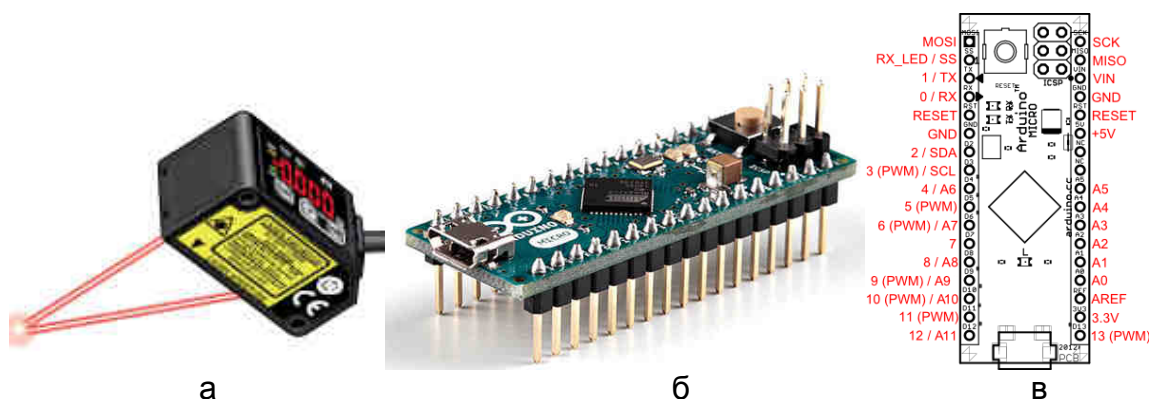


Рис. 3. Сенсор и микроконтроллер: а – микролазерный дистанционный сенсор HG-C Series; б – микроконтроллер Arduino micro; в – соответствующие выходы микроконтроллера

Для автоматической обработки результатов измерений компьютера, была написана программа для приема, обработки и вывода данных на экран персонального компьютера. Для этой цели была использована программа Visual Studio 2012. Важным моментом является пересчет аналоговых значений, поступающих с сенсора с диапазоном от 0 до 1023, в реальные единицы, например, в мм. Для этого используют формулу:

$$R = \min V + \left( \frac{Range}{N_{max}} \right) \cdot N_m,$$

где:  $R$  – величина измеряемого отклонения, мм;

$\min V$  – минимально возможное отклонение – (-79.5 мм);

$Range$  – величина диапазона отклонений; (161.1 мм);

$N_{max}$  – максимальное аналоговое значение, которое может быть преобразовано в отклонение (1021);

$N_m$  – измеряемое аналоговое значение в данный момент.

Для верификации этого уравнения были проведены контрольные измерения.

Кроме того, для проведения эксперимента используют лазер “Rofin FL 010 (Multi Mode)”, порошок питатель Twin-120-V и 5 - координатный фрезерный станок “Fagor CNC 8070”, модифицированный для лазерной наплавки (рис. 4).



Рис. 4. Используемое оборудование: а – порошок питатель; б – 5-координатный фрезерный станок

## 5. Результаты экспериментов

На этом этапе было проведено измерение тестовой авиационной детали со сложной геометрией, вид и модель которой показаны на рис. 5.

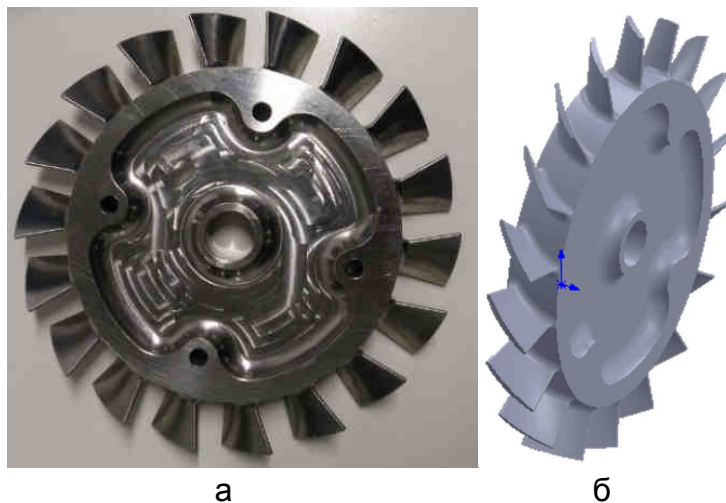


Рис. 5. Тестовая авиационная деталь: а – фрезерованная деталь; б – электронная модель детали

После настройки параметров лазера, настройки системы координат станка, настройки кинематической схемы станка программа может быть запущена. Процесс и результаты наплавки показаны на рис. 6. На диске созданы три лопатки, которые наплавлялись слой за слоем, без ошибок в программе.

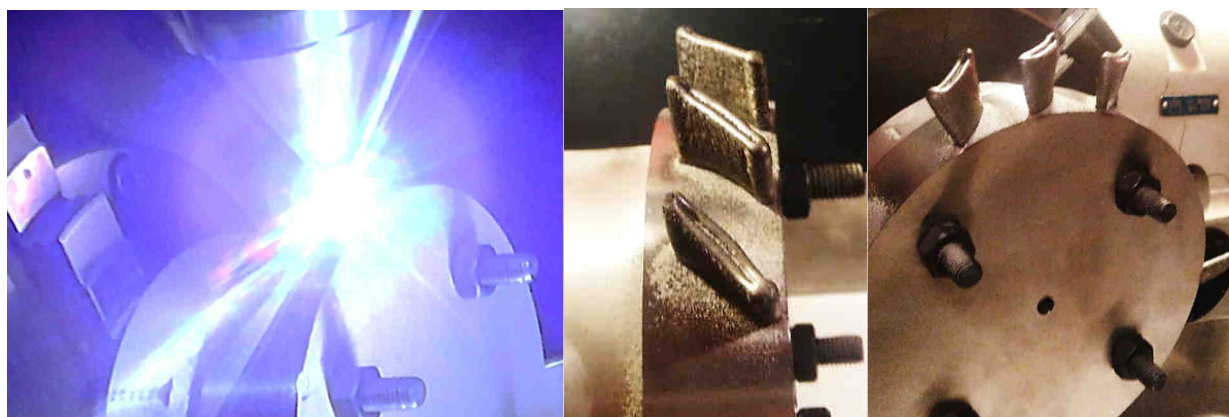


Рис. 6. Процесс наплавки и наплавленные лопатки

Измерения проводили вручную и по запрограммированной траектории. Результаты измерений показаны на рис. 7 и 8.

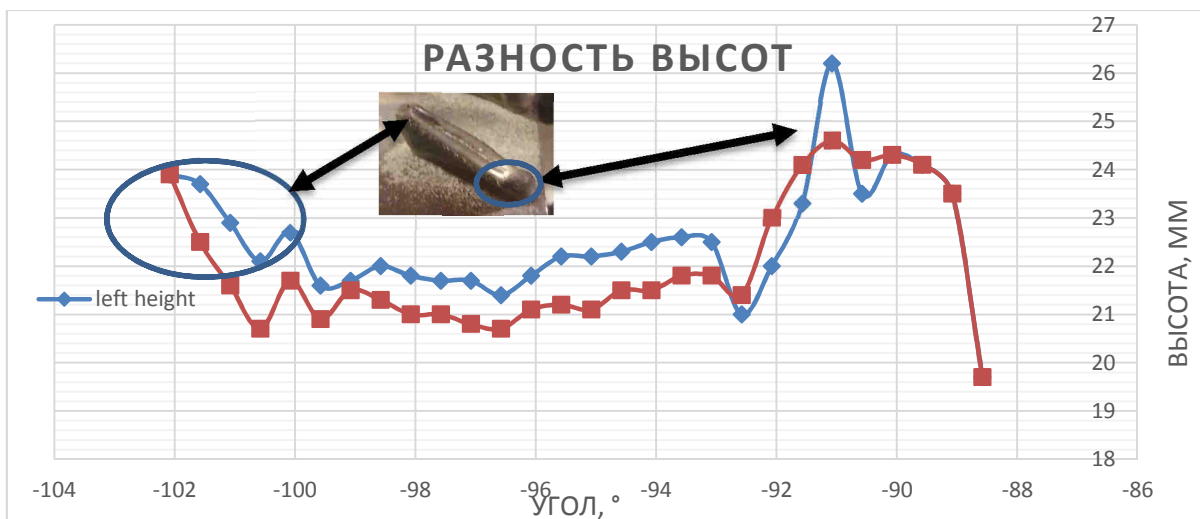


Рис. 7. Результаты ручного измерения

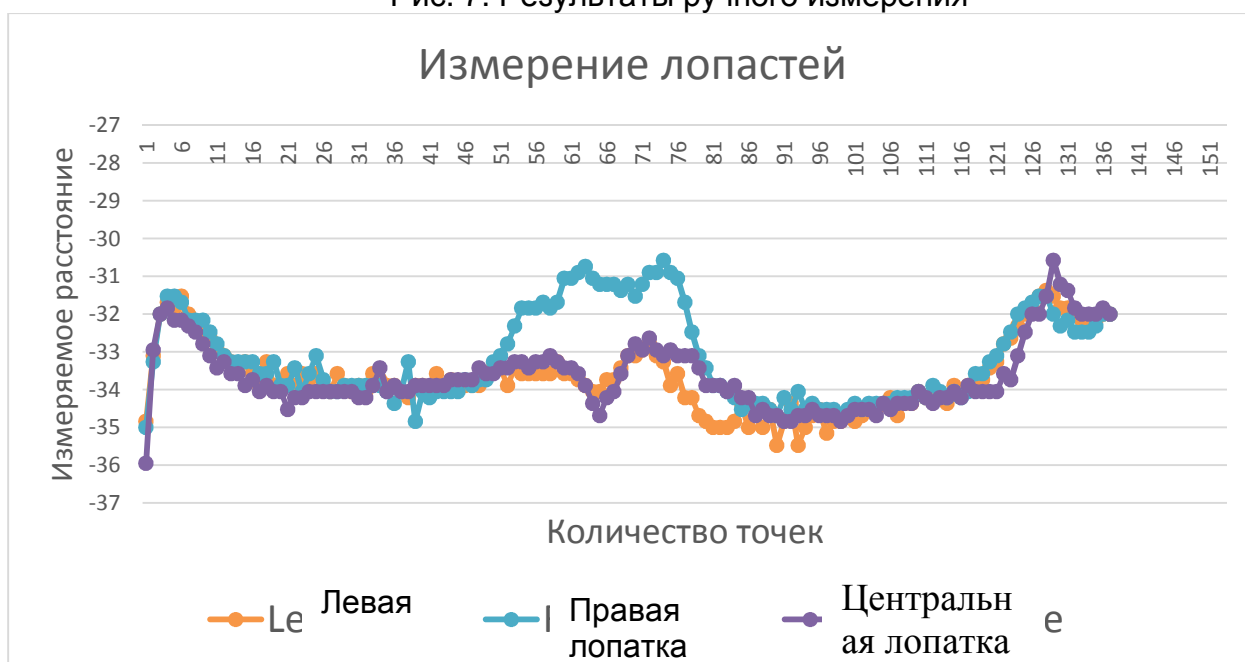


Рис. 8. Результаты программного измерения

### Выводы

Исследована возможность проведения бесконтактных измерений авиационных деталей, получаемых лазерной наплавкой, непосредственно в процессе их изготовления для своевременной коррекции параметров технологического процесса, чтобы достичь требуемого высокого качества наплавляемых деталей. Были проведены установка лазерного сенсора в оборудование для лазерной наплавки, калибровка сенсора, программирование траекторий движения сопла для наплавки и сенсора, измерение наплавленной геометрии. Полученные данные были обработаны. Можно сказать, что бесконтактное лазерное измерение размеров – перспективное направление в аддитивной технологии по следующим причинам:

1. Установка датчика в машину проста. В процессе установки не было

существенных трудностей. Все материалы, необходимые для успешной установки датчика, широко распространены.

2. Высокая экономическая рентабельность. Основные издержки заключаются только в покупке сенсора. Материалы для установки очень дешевы и не имеют большого влияния в финансовом отношении, как и процесс настройки. Все необходимое программное обеспечение также общедоступное.

3. Высокая точность и стабильность полученных данных. Лазерные измерения относятся к очень точному типу измерений. Датчик способен измерять отклонение размеров до 0,1 мм.

4. Возможность дальнейшего использования полученных данных для изменения программы управляющей наплавкой в зависимости от текущей геометрии детали. Данные от датчика могут передаваться непосредственно в специально разработанное приложение и периодически перестраивать траекторию. Процесс контроля не требует переустановки детали, т.е. не вносит дополнительных погрешностей. Более того, сразу после завершения процесса создания детали, будут известны ее реальные геометрические размеры.

В заключение можно сказать, что измерительные технологии с использованием лазерного сенсора являются очень эффективными системами контроля, и последующее совершенствование данной технологии может быть достигнуто повышением точности данных, скорости их получения и расширением возможности их применения в отечественной авиационной промышленности.

### Список литературы

1. Mazumder J, Schilerer A, Choi J. Direct materials deposition: designed macro and microstructure. Mater Res Innovat 1999;3:118}31.
2. Keicher DM, Smugeresky JE. The laser forming of metallic components using particulate materials. J Metals 1997;49(5):51}4.
3. Milewski JO, Lewis GK, Thoma DJ&et al. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition. J Mater Process Tech 1998;75(1}3):165}72.
4. J. Mazumder\*, D. Dutta, N. Kikuchi, A. Ghosh Closed loop direct metal deposition: art to part Optics and Lasers in Engineering 34 (2000) 397}414.
5. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров.– М: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».
6. Dirk Stöbener, Matko Dijkman, Dennis Kruse, Distance measurements with laser-triangulation in hot environments, XVII IMEKO World Con-gress Metrology in the 3rd Millennium June 22-27, 2003, Dubrovnik, Croatia
7. R. Noll, Lasertriangulation, Handbuch Vision, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2007, S. 56–60
8. J. Mazumder, J. Choi, K. Nagarathnam, J. Koch, and D. Hetzner, "Direct metal deposition of H13 tool steel for 3-D components," JOM, Vol. 49, №. 5, p. 55—60, 1997.

Поступила в редакцию 01.03.2017.

## **Удосконалення технології лазерного наплавлення авіаційних деталей шляхом використання адаптивної системи дистанційного безконтактного вимірювання геометричних параметрів**

Розглянуто питання про застосування лазерного дистанційного сенсора для контролю геометрії деталі в процесі наплавлення. Розглянуто встановлення сенсора в обладнання для наплавлення та його налаштування, проведені вимірювання наплавленої геометрії. Виконані аналіз та оброблення отриманих даних.

Аддитивні виробничі процеси займають значне місце в створенні тривимірної металопродукції. Актуальність цієї роботи полягає в створенні способу вимірювання геометрії авіаційних деталей безпосередньо під час оброблення без вилучення їх із верстата, а також можливості керування параметрами технологічного процесу для досягнення найбільш високої якості одержуваного виробу.

**Ключові слова:** лазерне наплавлення, вимірювання, триангуляція, дистанційний лазерний сенсор, адитивне виробництво, програмування.

## **Improvement of the technology of laser cladding of aircraft parts by using an adaptive system for remote non-contact measurement of geometric parameters**

The paper discusses the using of a laser remote sensor to control the geometry of a part in the process of cladding. The installation and adjustment of the sensor in the equipment for surfacing are considered, and the welded geometry is measured. The analysis and processing of the obtained data is performed.

Additive production processes occupy a significant place in the creation of three-dimensional metal products. The urgency of this work is to create a method for measuring the geometry of aviation parts directly during processing without removing them from the machine, and also the possibility of controlling the parameters of the technological process to achieve the highest quality of the product obtained.

**Key words:** laser surfacing, measurements, triangulation, remote laser sensor, additive production, programming.

### **Сведения об авторе:**

**Гушпіт Роман Миколайович** – студент, каф. 104 «Технології виробництва літальних апаратів», Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.