

В. М. Бычков, А. Ю. Медведев, М. П. Савичев, В. В. Смирнов, А. В. Супов

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ БЛИСКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ СВАРКИ ТРЕНИЕМ

На основании экспериментов по линейной сварке трением лопаток с имитатором блиска, экспериментов по контролю качества сварных соединений и геометрических параметров сварного узла определены рациональные виды комплексного контроля качества при изготовлении сварных блисков. *Линейная сварка трением; сварные соединения; титановые сплавы; блиск; методы неразрушающего контроля сварных соединений; методы контроля размеров*

Освоение отечественной промышленностью производства блисков для перспективных авиационных газотурбинных двигателей вызвало необходимость проведения исследования надежности сварных соединений, полученных линейной сваркой трением (ЛСТ), и стабильности воспроизведения геометрических параметров сварного узла.

Проблема надежности сварных соединений, полученных с применением ЛСТ, связана с отсутствием в настоящее время в отечественной промышленности нормативных документов, регламентирующих методы контроля качества таких соединений.

Решение задачи стабильного воспроизведения геометрических параметров сварного узла при ЛСТ необходимо для обеспечения возможности присоединения к диску лопаток с окончательно обработанным профилем пера вне зоны сварки.

В связи с этим в УГАТУ и ОАО «УМПО» были выполнены исследования по комплексному контролю качества при изготовлении блисков с применением ЛСТ.

Контактная информация: 8(347)273-08-66

Работа выполнена в рамках проекта «Создание технологий и промышленного производства узлов и лопаток ГТД с облегченными высокопрочными конструкциями для авиационных двигателей новых поколений» (шифр 2010-218-01-133) в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 9.04.2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Экспериментальные результаты были получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО УГАТУ.

Особенностью сварных соединений, получаемых при ЛСТ, является технологическая схема пошаговой очистки стыка от поверхностных загрязнений в процессе сварки с выдавливанием загрязненного металла в грат на периферии стыка соединяемых деталей. При этом нарушение рекомендованного по результатам исследований режима сварки приводит к неполной очистке стыка и дефектам в виде окисных включений, микронесплавлений, не удаленных загрязнений поверхности и газовых пор, которые показаны на рис. 1. Такие дефекты микронного размера, сконцентрированные на периферии сварного шва, могут существенно снизить прочностные характеристики сварного соединения.

Наиболее простыми методами контроля наружных дефектов сварных швов являются визуально-измерительный и капиллярный методы контроля.

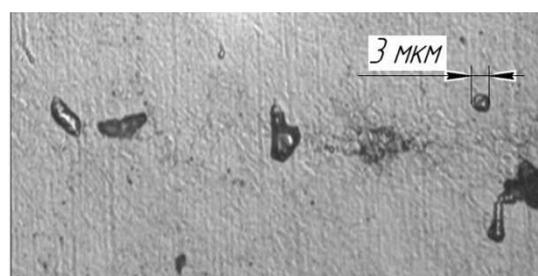


Рис. 1. Дефекты сварного шва полученного ЛСТ при неполной очистке стыка

Внешний вид поверхности шва при ЛСТ является характерным для каждого материала, формы свариваемых заготовок и других условий сварки, поскольку процесс ЛСТ на оборудовании с компьютерной системой контроля и управления обладает хорошей повторяемостью. Как видно на рис. 2, при ЛСТ на рекомендованном режиме двух имитаторов лопаток

и диска форма и размеры выдавленного грата мало отличаются. Выход грата за пределы свариваемого сечения произошел по всему контуру, что свидетельствует об отсутствии непроваров в сварном шве.

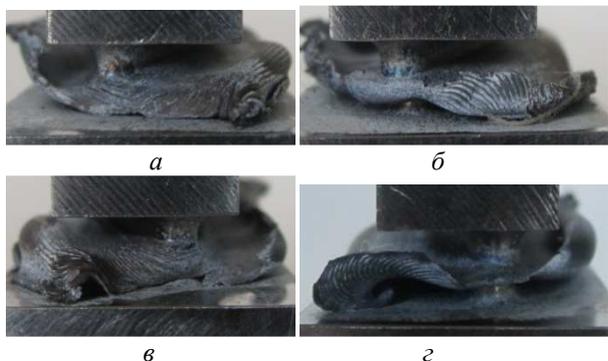


Рис. 2. Форма грата со стороны входной кромки (*а, б*) и выходной кромки (*в, з*) имитаторов № 1 и № 2 соответственно

Таким образом, вследствие хорошей повторяемости процесса ЛСТ, форма грата может служить критерием для оценки условий формирования соединения, и величина выдавливаемого в грат металла может использоваться как показатель полного удаления поверхностных загрязнений из сварного шва. При этом количественный показатель выхода грата должен устанавливаться для каждого типа соединения по экспериментальным данным.

Поскольку при ЛСТ недостаточное выдавливание грата из свариваемого стыка приводит к появлению щели на периферии сварного шва, то для выявления таких дефектов целесообразно использовать люминесцентный контроль по ГОСТ 26182-84 [1]. Такой контроль должен проводиться после окончательной механической обработки профиля лопатки.

Исследование люминесцентного и рентгеновского методов контроля выполнялось на имитаторах секции блиска, показанных на рис. 3.

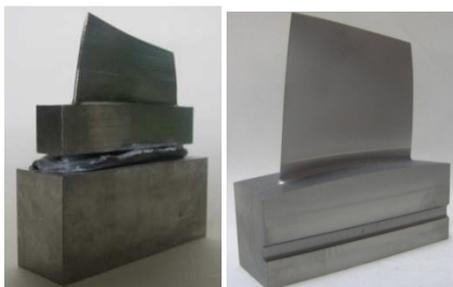


Рис. 3. Имитатор секции блиска: после сварки – слева и после окончательной механической обработки – справа

Пример реализации такого контроля показан на рис. 4. Контроль выполнялся на ОАО «УМПО» по 1 классу чувствительности (ширина раскрытия дефектов менее 1 мкм, согласно ГОСТ 18442-80 [2]) с применением индикаторного пенетранта ЛЖ-6А, проявителя ПР-1, очистителя ОЖ-1.

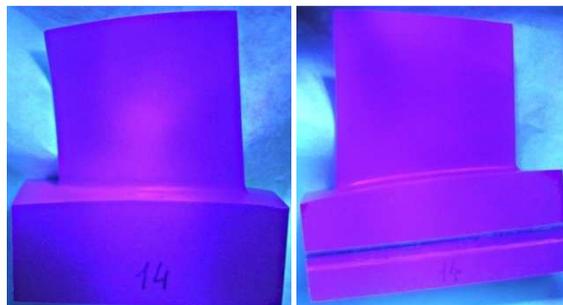


Рис. 4. Люминесцентный контроль сварного образца секции блиска со стороны спинки пера – слева и со стороны корыта пера – справа

Результаты проведенного люминесцентного контроля показали отсутствие дефектов микронного размера по всему контуру сварного шва на образцах секции блиска, полученных на рекомендуемом режиме ЛСТ.

В связи с вышеизложенным можно заключить, что люминесцентный контроль целесообразно использовать для выявления возможных поверхностных дефектов микронных размеров в сварных соединениях блисков.

Применение для соединений, полученных ЛСТ, средств неразрушающего контроля внутренних дефектов сильно ограничено тем, что дефекты имеют микронные и субмикронные размеры (рис. 1). Традиционные методы неразрушающего контроля внутренних дефектов: ультразвуковой контроль (УЗК), гамма- и рентгеноскопия, вихретоковый и магнитопорошковый методы не обладают достаточным разрешением для выявления столь мелких дефектов [3].

Однако разрешающая способность методов неразрушающего контроля существенно повышается при появлении нового оборудования с компьютерной обработкой данных и при оптимизации комплектации оборудования. Наиболее перспективны с этой точки зрения УЗК с применением технологии фазированных решеток и компьютерная рентгеновская томография.

При УЗК разрешение получаемых графических изображений ограничено как длиной волны используемых колебаний, так и шириной

диаграммы направленности, а также возможностями фокусировки луча. Ультразвуковые преобразователи с фазированной решеткой позволяют обеспечить фокусировку сигнала во всех точках контролируемого объема, существенно повышая разрешающую способность по сравнению с традиционными не фокусированными преобразователями и, соответственно, улучшая качество получаемых изображений.

Минимальный размер дефекта, надежно обнаруживаемого ультразвуковым способом, зависит от многих факторов, включая уровень шума, частоту преобразователя, качество поверхности ввода. Рекомендованная длина волны [4]:

$$\lambda \leq 4 \cdot D,$$

где D – минимально выявляемый дефект, мкм.

При большей длине волны она не будет отражаться от дефекта и, соответственно, дефект не будет обнаружен.

Технические характеристики представленных на рынке ультразвуковых дефектоскопов ряда известных фирм, использующих фазированные решетки, представлены в табл. 1.

Большинство приведенных в табл. 1 дефектоскопов имеет максимальную частоту, превышающую частоту серийно производимых датчиков с рабочей частотой не более 15 МГц. При такой частоте датчика и скорости звука в титане 3127 м/с расчетная длина волны ультразвукового излучения составит 208 мкм. При этом размер выявляемого дефекта превышает 50 мкм, что совершенно недостаточно для выявления типичных для ЛСТ дефектов сварного шва.

Таблица 1

**Ультразвуковые дефектоскопы
с фазированными решетками**

	Диапазон рабочих частот, МГц	Частоты датчиков, МГц
Olimpus Omni Scan MX2	0,75...18	1,5; 2,5; 3,5; 5; 7,5; 10
Isonic 2010	0,2...25	
PhasorXS	0,3...15	1; 2; 2,5; 4; 5; 10; 15
Harfang X32	1..15	2,25; 5,0; 7,5
Harfang Veo	0,5...18	
Epoch 1000	0,2...26,5	2; 2,5; 4; 5; 10

Рентгеновский контроль сварных соединений имитатора секции блиска исследовался на компьютерном томографе Nikon Metrology XT H 450 LC, имеющемся на ОАО «УМПО» (рис. 5). Этот томограф комплектуется микрофокусной рентгеновской трубкой с минимальным диаметром фокусного пятна 30 мкм (при 80 кВ) и плоскопанельным детектором Perkin Elmer XRD 1621 с размером пикселя 200 мкм.



Рис. 5. Томограф Nikon Metrology XT H 450 LC

Контроль имитатора секции блиска выполнялся по схеме, представленной на рис. 6. Контрольный образец располагался на минимальном расстоянии f от источника излучения (коллиматора рентгеновской трубки), при этом обеспечивалось максимальное геометрическое увеличение. Толщина просвечиваемого материала в зоне контроля сварного шва составляет менее 5 мм, что позволяет производить контроль при мощности 80 Вт и минимальном размере фокусного пятна 30 мкм. Согласно паспортной документации на томограф Nikon Metrology XT H 450 LC, пространственное разрешение для лопатки шириной 50 мм при максимальном увеличении ($\times 20$) составляет около 25 мкм. При этом за счет компьютерной обработки изображения выявляются дефекты несколько меньшего размера – 2/3 от пространственного разрешения (17 мкм).

На рис. 7 приведены полученные на томографе снимки имитатора секции сварного блиска. На них, благодаря различной проницаемости сваренных материалов для рентгеновский лучей, отчетливо видна граница сварного шва, разделяющая лопатку (ВТ6) и имитатор диска (ВТ8-1). Дефектов сварного шва при максимальном разрешении томографа в сварных швах не обнаружено.

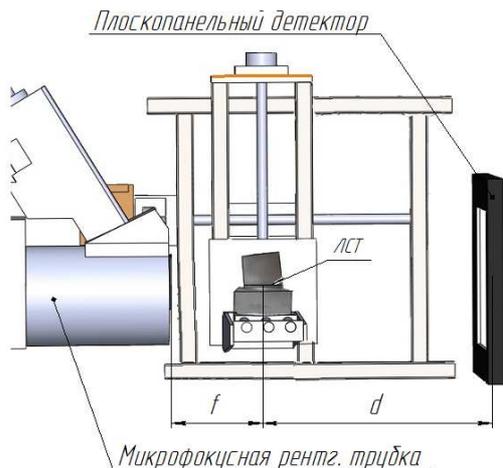


Рис. 6. Схема контроля имитатора секции блиска

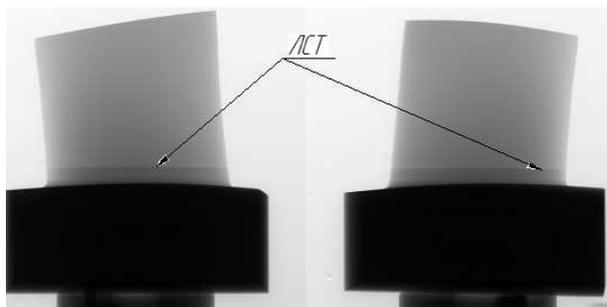


Рис. 7. Изображение сварного шва, полученного на рентгеновском томографе Nikon Metrology XT H 450 LC

Для получения в несколько раз большего разрешения томографии возможна замена стандартной панели томографа на CMOS-панель Shad-o-Snap 2048 производства Radicon Imaging Corp, имеющей шаг пикселя 48 мкм, и применение на томографе микрофокусных трубок с меньшим размером фокусного пятна. В таком варианте компоновки оборудования рентгеновская томография дает возможность выявлять дефекты микронного размера, что позволяет сделать вывод о целесообразности такого контроля для сварных соединений при ЛСТ.

Таким образом, из неразрушающих методов контроля внутренних дефектов единственным приемлемым методом является рентгеновская компьютерная томография с применением в оборудовании микрофокусных трубок и панелей детекторов с наибольшим разрешением.

Практика промышленного применения ЛСТ за рубежом свидетельствует, что циклограммы процесса сварки, записанные системой регист-

рации параметров режима применяемого оборудования, также целесообразно использовать для контроля качества сварного шва. Пример такой циклограммы показан на рис. 8 при осадке нагрева 3 мм.

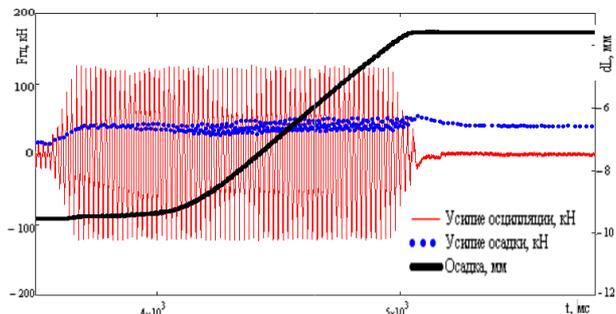


Рис. 8. Циклограмма процесса ЛСТ с осадкой нагрева 3 мм

Характеристики процесса ЛСТ, определенные при изучении циклограмм сварки на одном режиме нескольких имитаторов секции блиска и описывающие процесс формирования сварного соединения, представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, для четырех сваренных образцов имитаторов секции блиска измеренное время сварки колеблется от среднего значения в пределах 2,3 %; установившаяся скорость осадки – в пределах 4,8 %; фактическая осадка – в пределах 0,2 %.

Таким образом, на основе полученных в циклограмме ЛСТ характеристик процесса при сварке серии однотипных изделий можно осуществлять статистически обоснованный объективный инструментальный контроль качества сварных соединений.

Таблица 2

Характеристики процесса ЛСТ

Образец	Время сварки, с	Средняя скорость установившейся осадки	Задаваемая осадка нагрева, мм	Осадка по циклограмме, мм	Осадка фактическая, мм
1	1,482	6,15	5,8	6,19	5,95
2	1,533	6,71	5,8	6,24	5,95
3	1,503	6,45	5,8	6,18	5,97
4	1,478	6,31	5,8	6,18	5,96
среднее значение	1,499	6,40	5,8	6,2	5,96

Изучение стабильности воспроизведения геометрических параметров сварного узла при ЛСТ проводилось контактным и оптическим методом с целью определения точности позиционирования привариваемой лопатки блиска. При этом был опробован вариант с использованием контактного измерительного щупа на обрабатывающем центре и вариант применения имеющегося в УГАТУ оптометрического цифрового комплекса ATOS II 400XL.

На начальном этапе отработки технологии ЛСТ на имитаторах секции блиска инструментальный контроль после сварки выполнялся щупом с рубиновым наконечником диаметром 5 мм на обрабатывающем центре с точностью не менее 0,01 мм. Такой контроль оказался необходимым для проверки точности позиционирования лопатки при креплении ее в зажимающей оснастке. Кроме того, он был использован для подтверждения результатов оптического измерительного контроля сваренных образцов при точной настройке параметров горизонтального и вертикального перемещения сварочной машины.

Однако для сварного блиска в целом такой способ контроля множества точек на десятках лопаток не рационален ввиду большой трудоем-

кости. В этом случае целесообразно применение 3D-сканирования, позволяющего построить трехмерную модель исследуемого объекта и сравнить ее с теоретическим профилем блиска.

В качестве 3D-сканера при обмере опытных образцов имитаторов секции блиска, изготовленных при настройке параметров машины для ЛСТ, использовался комплекс ATOS II 400XL. Перед началом измерений была задана система координат с расположением осей согласно рис. 9, а.

В соответствии с технологическими перемещениями подвижной детали при ЛСТ ось Z направлена перпендикулярно к поверхности А и параллельно оси проковки при сварке, ось Y расположена на пересечении поверхностей А и Б, ось X расположена на пересечении поверхностей Б и В параллельно оси осцилляции. Полученная на сканере с точностью около 0,01 мм трехмерная модель каждого сваренного образца сравнивалась с теоретической трехмерной моделью, построенной в результате совмещения по сварочным припускам трехмерных моделей лопатки и имитатора диска с учетом заданной осадки.

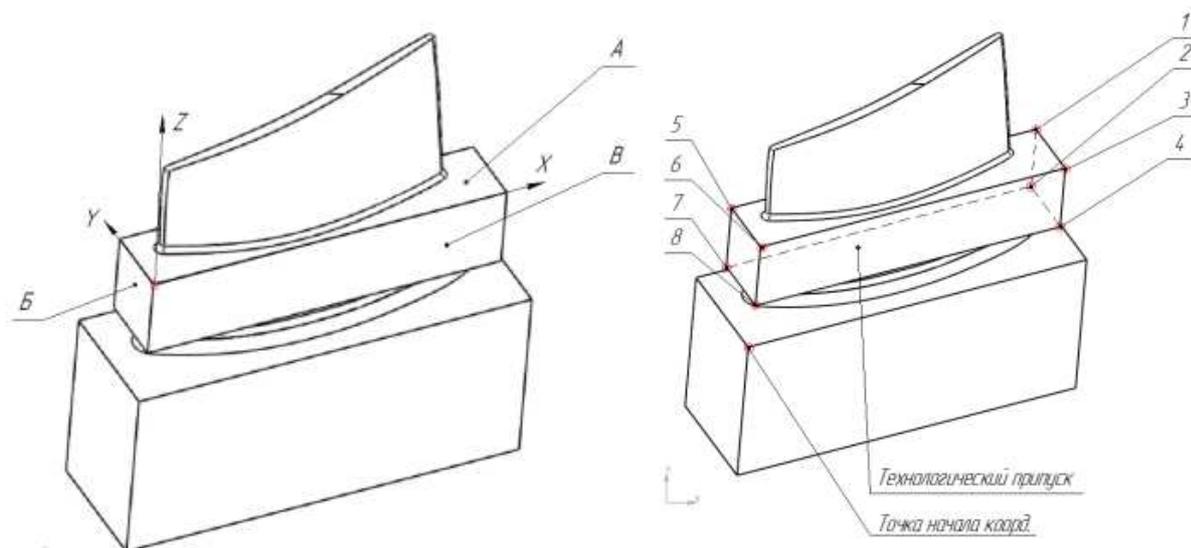


Рис. 9. Условия, принятые в процессе измерений: а – расположение осей, принятое при измерении на комплексе ATOS, б – положение крайних точек технологического припуска лопатки

На рис. 10–13 показаны результаты этого сравнения для сваренных при настройке машины MDS образцов № 1 и № 2. Из полученных данных обмера на образце № 1 следовало, что при установке оснастки с лопаткой на машину произошло ее смещение по оси Y на 0,34 мм. По оси X в момент остановки осцилляции смещение от заданного положения на образце № 1 составило 0,45 мм, а осадка по оси Z на 0,1 мм превысила заданное значение. В соответствии с этими данными, которые совпали с контрольным обмером контактным методом, были скорректированы программируемые параметры перемещения машины MDS и положение сварочной оснастки.

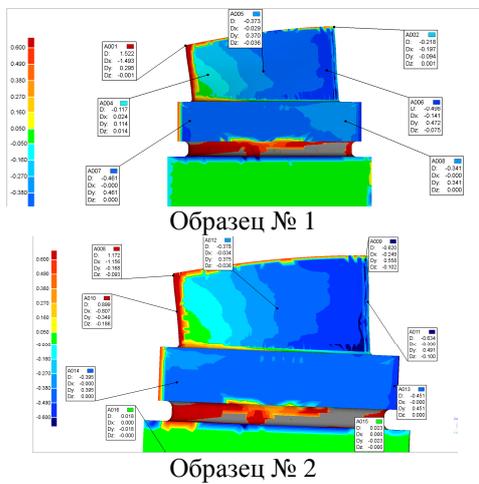


Рис. 10. Сравнение образцов № 1 и № 2 с геометрической моделью (вид со стороны «спинки» пера)

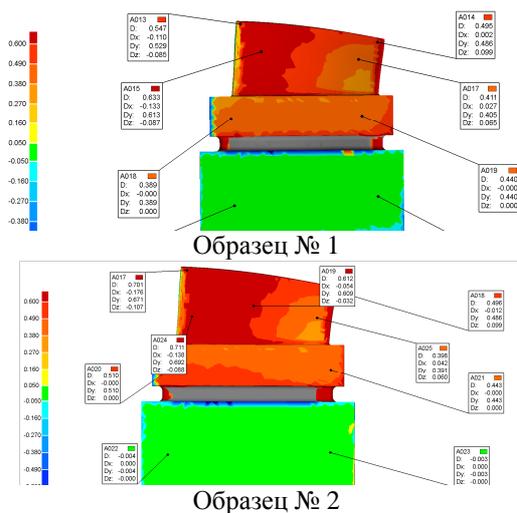


Рис. 11. Сравнение образцов № 1 и № 2 с геометрической моделью (вид со стороны «корыта» пера)

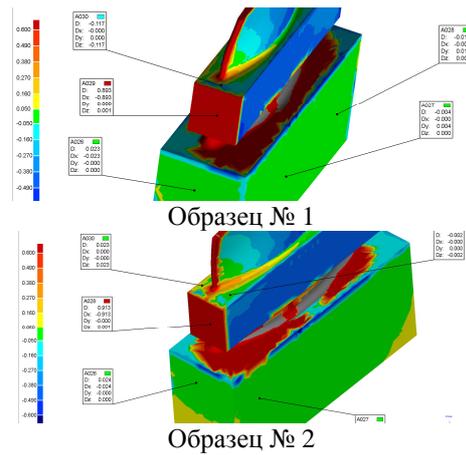


Рис. 12. Сравнение образцов № 1 и № 2 с геометрической моделью (вид со стороны входной кромки пера)

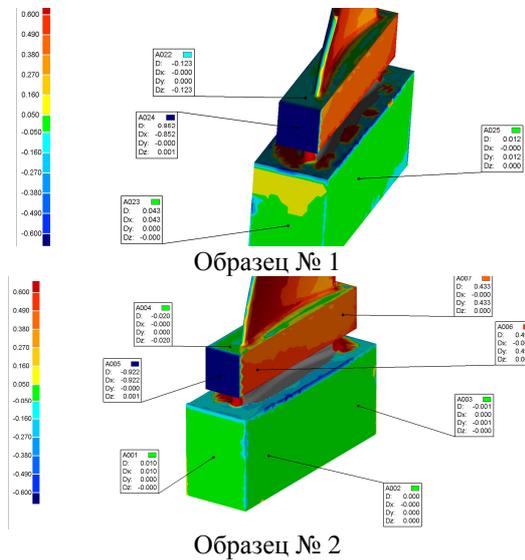


Рис. 13. Сравнение образцов № 1 и № 2 с геометрической моделью (вид со стороны выходной кромки пера)

На образце № 2 при обмере после сварки был выявлен угловой перекося лопатки относительно оси Y с максимальным отклонением на 0,1 мм.

Как выяснилось при проведении дополнительных измерений, причиной такого перекося у образца № 2 оказалось сложение перекося опорных поверхностей заготовки лопатки с недостаточной регулировкой параллельности опорных плит сварочной машины. На основании этих измерений были введены дополнительные требования по эксплуатации машин для ЛСТ и входного контроля свариваемых деталей.

ВЫВОДЫ

1. Процесс ЛСТ на оборудовании с компьютерной системой контроля и управления обладает хорошей повторяемостью, что позволяет применять визуально-измерительный контроль выхода грата по контрольному образцу.

2. Для выявления возможных при ЛСТ поверхностных дефектов рекомендуется использовать люминесцентный контроль по ГОСТ 26182-84 после окончательной механической обработки профиля лопатки.

3. Ультразвуковой контроль для выявления типичных при ЛСТ дефектов микронного размера применять не целесообразно, поскольку максимальная рабочая частота имеющихся на мировом рынке датчиков не позволяет в титановых сплавах выявлять дефекты размером менее 0,05 мм.

4. Из неразрушающих методов контроля внутренних дефектов единственным приемлемым методом является компьютерная томография с применением в оборудовании микрофокусных трубок и панелей детекторов с наибольшим разрешением.

5. На основе записанных компьютером характеристик процесса при сварке трением серии однотипных деталей можно осуществлять статистически обоснованный объективный инструментальный контроль качества сварных соединений, изготавливаемых с применением ЛСТ.

6. Как на этапе отработки технологии ЛСТ, так и при изготовлении блисков необходимо осуществлять инструментальный контроль критических размеров свариваемых деталей и сварочной оснастки, а также полученных сварных конструкций. При этом в серийном производстве инструментальный контроль сварного блиска рационально выполнять с использованием 3D-сканера путем сравнения полученной трехмерной модели с теоретическим профилем блиска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 26182-84 Контроль неразрушающий. Люминесцентный метод течеискания.
2. ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
3. **Клюев В. В.** Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
4. Olympus. Introduction to phased array ultrasonic technology applications, R/D Tech, 2007

ОБ АВТОРАХ

Бычков Владимир Михайлович, доц. каф. оборудования и технологии сварочн. производства. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1976). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Уральск. политехн. ин-т, 1980). Иссл. в обл. физики и техники дуговых и плазменных процессов в сварочном производстве.

Медведев Александр Юрьевич, доц. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по машинам и технологии сварочн. производства (Тольяттинск. гос. ун-т, 2003). Иссл. в обл. моделирования нагрева при сварке, аргонодуговой сварки, сварки трением.

Савичев Максим Павлович, мл. науч. сот. той же каф. Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. контроля сварных соединений, полученных линейной сваркой трением.

Смирнов Вадим Владимирович, вед. инженер каф. машин и технологии литейного производства. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1985).

Супов Андрей Владимирович, нач. технологическ. бюро ОАО «УМПО». Дипл. инженер по оборудованию и технологии сварочн. производства (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. линейной сварки трением.