

УДК 621.762.002

DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-3-11

**В.Ф. Безъязычный**, д.т.н.

(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва,  
152934, г. Рыбинск, Ярославская обл., ул. Пушкина, д. 53),

**Д.В. Федосеев**, аспирант

(ПАО «ОДК-САТУРН», Рыбинск)

E-mail: technology@rsatu.ru; denis.fedoseev@ues-saturn.r

## **Анализ параметров шероховатости поверхностей заготовок, полученных методом аддитивных технологий**

*Представлены результаты исследования параметров шероховатости поверхностей заготовок, полученных методом аддитивных технологий (лазерное спекание). Получены зависимости параметра шероховатости Ra от угла наклона поверхности относительно плоскости построения заготовки и угла поворота поверхности относительно движения ножа.*

**Ключевые слова:** заготовка; аддитивная технология; метод лазерного спекания; шероховатость поверхностей.

**V.F. Beziyazychny**, Dr.Sc.Tech.,

(Solovyov State Aircraft Technical University of Rybinsk,  
53, Pushkin Str., Rybinsk, Yaroslavl Region, 152934)

**D.V. Fedoseev**, Post graduate student

(PC "ODK-SATURN", Rybinsk)

## **Analysis of surface roughness parameters in billets obtained by method of additive technologies**

*The investigation results of surface roughness parameters in billets obtained by the method of additive technology (laser sintering) are presented. There are obtained dependences of roughness parameter Ra upon a surface tilt angle regarding a plane of billet formation and an angle of a surface turn with regard to a cutter motion.*

**Keywords:** billet; additive technology; method of laser sintering; surface roughness.

### **Введение**

От правильного выбора заготовки в значительной мере зависит общая трудоемкость и себестоимость изготовления детали. На выбор вида заготовки и метода ее получения влияют материал детали, ее размеры и конструктивные формы, а также годовой выпуск деталей и другие факторы.

Классический технологический процесс в машиностроительном производстве предусматривает получение заготовок методами литья, обработкой давлением (поковка, штам-

повка), прокатом. Также применяются заготовки из сортового материала и получаемые комбинированными методами. Технологический процесс предусматривает последовательное изменение формы, размеров, качества поверхности заготовки от момента поступления ее в обработку до получения готовой детали. Под «вычитающими» технологиями подразумевается механообработка – удаление («вычитание») материала из массива заготовки. Таким образом, инженеры прибегли к понятию (*subtractive*) «вычитание», чтобы определить новое понятие (*additive*) «добавление»,

т.е. в самом определении «аддитивные технологии» трактуются как противоположность технологиям механообработки [1, 2].

Аддитивный технологический процесс в настоящее время является динамично развивающимся и перспективным производственным процессом. Метод построения модели происходит путем добавления материала. Внедрение принципиально новых подходов к проектированию изделий, позволяет создавать сложнопрофильные детали, облегченные конструкции металлов и полимерных материалов, производство которых с использованием традиционных технологических методов просто невозможно.

Анализ новейших разработок показывает, что аддитивный технологический процесс в будущем – это рядовой обычный процесс, но чтобы науке достигнуть этого, необходимо преодолеть ряд проблем. Одной из таких проблем в настоящее время является отсутствие нормативных материалов по параметрам, характеризующим качество поверхностного слоя заготовок, в частности по параметрам шероховатости поверхности.

### Содержание исследования

Целью исследования являлось определение параметров шероховатости на поверхностях заготовок с различными углами наклона к плоскости построения, получаемых на установке послойного лазерного сплавления при синтезе микропорошков из материалов X15H5Д4Б и KX28M6 с толщиной слоя 20 мкм.

Опытный образец, спроектированный в САПР NX 10 и необходимый для исследования, представлен на рис. 1. Изготовление образцов происходило методом лазерного спекания порошка на установке послойного лазерного сплавления EOS 290.

Лазерный метод по замеру шероховатости реализован при помощи конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS 4000, с использованием которого получили топографию поверхности исследуемого объекта. Показатели шероховатости исследовались в соответствии с ГОСТ 2789-73 по двум параметрам:  $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности и  $Rz$  – высота профиля неровностей.

Замеры производились с наружной (up face) и внутренней (down face) сторон (рис. 2) под углом наклона поверхности относительно плоскости построения в диапазоне от 30 до 90°, в интервале 10° и через каждые 30°

относительно движения ножа.

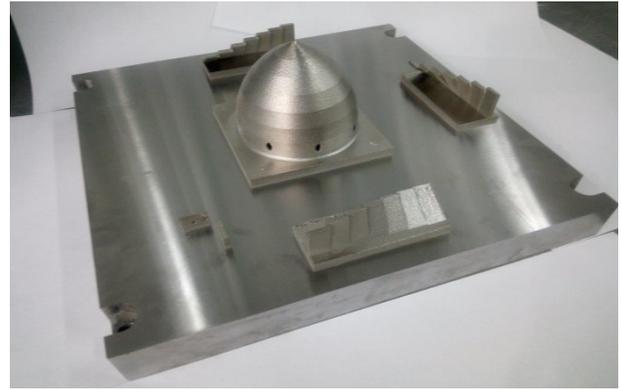


Рис. 1. 3D-модель опытного образца

В качестве примера на рис. 3 и 4 представлены топографии наружных поверхностей образца из материала X15H5Д4Б на установке Olympus LEXT OLS 4000 при угле поворота поверхности относительно движения ножа равном 0°.

Затем образец разрезали электроэрозионным методом, чтобы выполнить замеры параметров на внутренних поверхностях образца (рис. 5). Толщина стенки опытного образца составляет 2 мм. Замеры шероховатости внутренних поверхностей (down face) выполнялись аналогично замерам параметров шероховатости наружной поверхности.

Для наглядного примера на рис. 6 и 7 представлены топографии внутренних поверхностей образцов на установке Olympus LEXT OLS 4000 при угле поворота поверхности относительно движения ножа равном 0°.

Полученные результаты замера значений шероховатости наружных и внутренних поверхностей представлены в табл. 1.

На основании результатов замеров параметров шероховатости, представленных в табл. 1, построены графики зависимости значений  $Ra$  от углов поворота поверхности относительно ножа  $\alpha$  и наклона поверхности, относительно плоскости построения. Примеры таких графиков представлены на рис. 8 и 9.

Аналогично, были произведены замеры параметров шероховатости наружных и внутренних поверхностей образца, изготовленного из жаропрочного сплава кобальт–хром–молибден KX28M6 и установлены зависимости  $Ra$  от угла  $\alpha$  следующего вида:

$$Ra = C \cdot \alpha^x.$$

Как видно из рис. 8 и 9 значение  $C$  и  $x$  различны при изменении значений угла поворота поверхности  $\varphi$  относительно ножа (табл. 2 и 3).

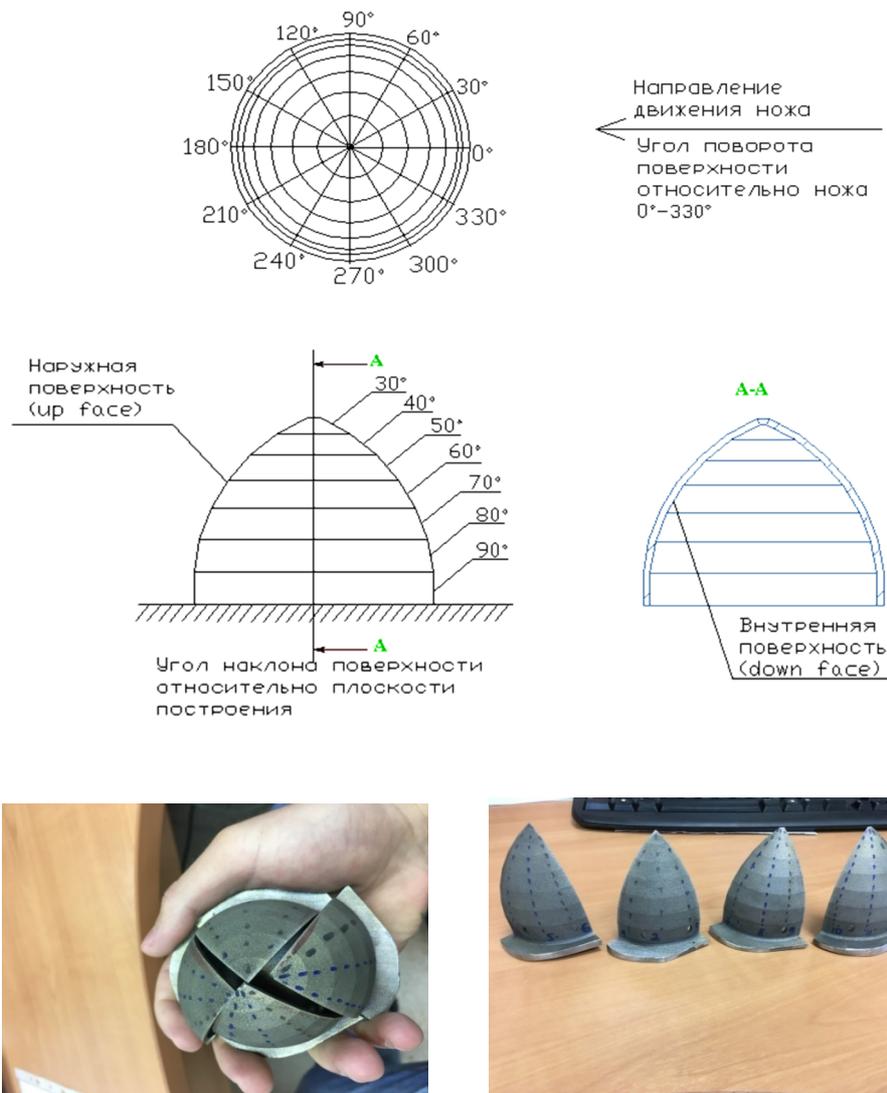


Рис. 2. Схема замера шероховатости поверхности образца

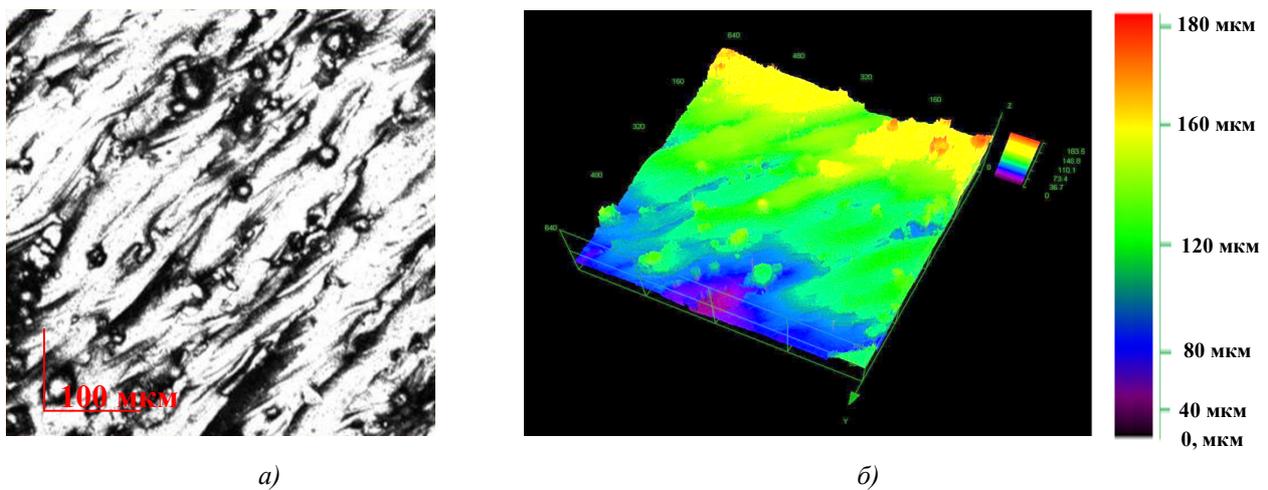


Рис. 3. Топография наружной поверхности (а) и вид изображения 3D (б). Угол наклона поверхности относительно плоскости построения равен 30°

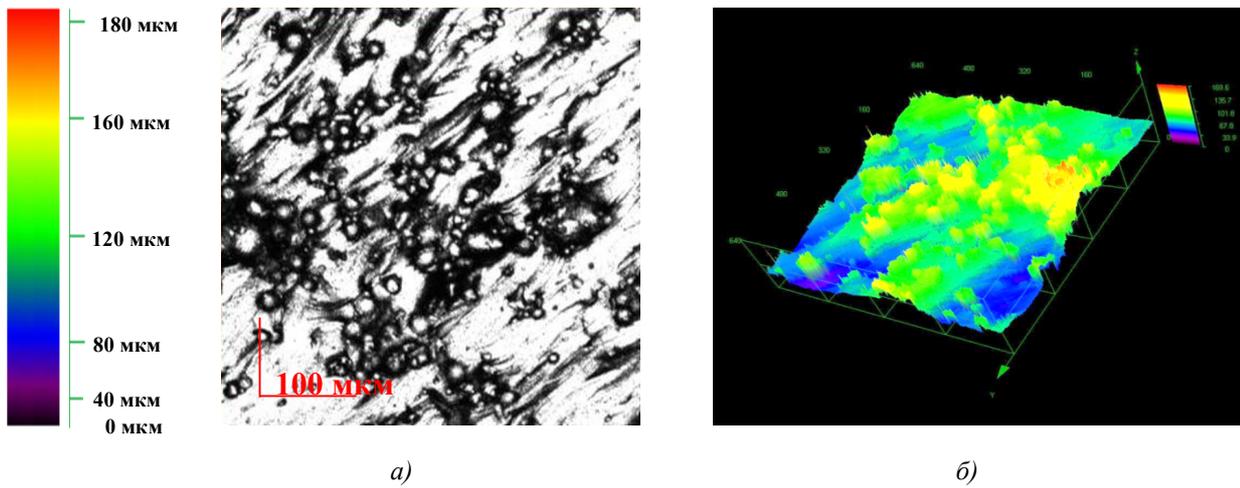


Рис. 4. Топография наружной поверхности (а) и вид изображения 3D (б). Угол наклона поверхности относительно плоскости построения равен  $40^\circ$



Рис. 5. Внутренняя поверхность образца

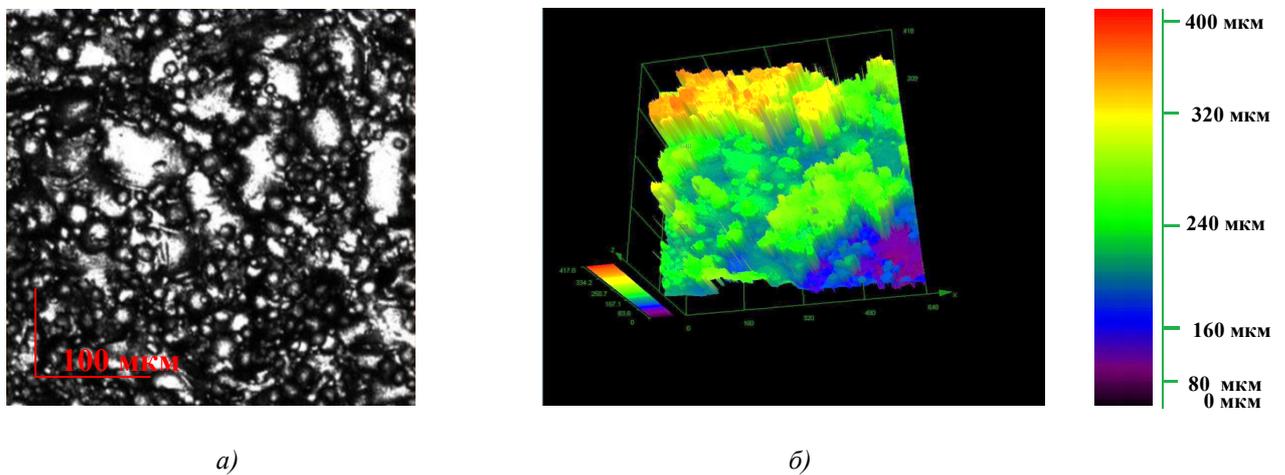


Рис. 6. Топография внутренней поверхности (а) и вид изображения 3D (б). Угол наклона поверхности относительно плоскости построения равен  $30^\circ$

На основании данных, приведённых в табл. 2 и 3, были установлены зависимости значений  $S$  и  $x$  от угла  $\varphi$  (табл. 4).

В связи с изложенным формулы для определения значений  $Ra$  будут иметь следующий вид:

Материал X15H5Д4Б:

– шероховатость наружной поверхности:

$$Ra = 36,932\varphi^{-0,694} \cdot \alpha^{0,0722\varphi 0,289},$$

– шероховатость внутренней поверхности:

$$Ra = 5,664\varphi^{0,388} \cdot \alpha^{-0,2055\varphi 0,142}$$

Материал KX28M6:

– шероховатость наружной поверхности:

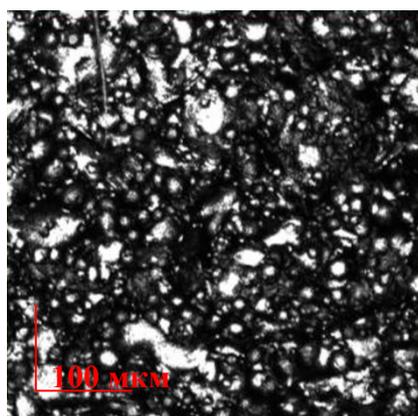
$$Ra = 0,467\varphi^{-0,22} \cdot \alpha^{0,275\varphi 0,158},$$

– шероховатость внутренней поверхности:

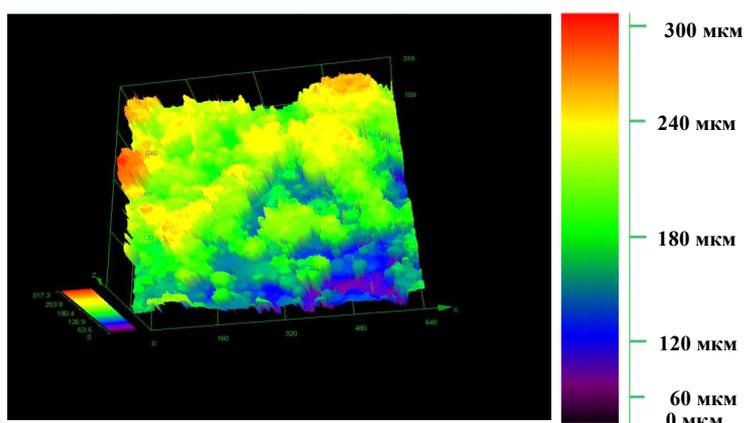
$$Ra = 23520\varphi^{0,753} \cdot \alpha^{-3,556\varphi-0,239}$$

В табл. 5 и 6 приведены результаты расчётов по полученным формулам и их сопостав-

ление с результатами замеров параметров шероховатости.



а)



б)

Рис. 7. Топография внутренней поверхности (а) и вид изображения 3D (б). Угол наклона поверхности относительно плоскости построения равен 40°

### 1. Значения шероховатости поверхностей образца из материала X15H5Д4Б

Угол наклона поверхности относительно плоскости построения, $\alpha^\circ$	Угол поворота поверхности относительно ножа, $\varphi^\circ$	Шероховатость наружных поверхностей		Шероховатость внутренних поверхностей	
		$Ra$	$Rz$	$Ra$	$Rz$
90	0	5,3	31,5	6,6	39,6
	30	8,8	49,8	5,3	30,4
	60	6,6	42,5	5,5	29,3
	90	6,7	47,1	5,7	29,6
	120	5,4	36,1	5	25,5
	150	6,5	36,4	4,7	24,8
	180	5,8	37,7	5,2	29,6
	210	7,3	43,9	7,3	38,1
	240	6,1	33,5	5,9	33,1
	270	3,9	24,9	7,2	39,9
	300	3,8	21,4	5,1	34,5
330	4,4	28,3	5,6	35	
80	0	7,4	46,2	6,9	41,5
	30	8,6	45,5	6,7	36,6
	60	4,1	27,3	6,4	39
	90	5,8	36,7	3,6	23
	120	7,2	48,6	5,5	28
	150	5,9	42,2	5,6	30,7
	180	7,1	48	5,5	31,1
	210	6,2	37,9	7,7	40
	240	5,6	34,5	7,8	41
	270	5,8	33,2	5,9	33,4
	300	5	29,6	6,4	36,4
330	4,4	25,5	5,2	31,2	
70	0	5,6	31	7,2	44,8
	30	7,8	45,3	6,8	41,7

Продолжение таблицы 1

	60	6,3	39,7	5,9	31,4
	90	6,7	38,8	6,9	38,9
	120	6	41,5	6,3	36,9
	150	7,3	46,6	5,8	34,6
	180	7	40,5	6,4	31,4
	210	5,1	31,7	7,7	40,8
	240	5,5	32	6,6	38,2
	270	4	26,1	7,5	42
	300	3,8	26	7,6	41,3
	330	4,4	27,7	6	36,1
60	0	5,3	30,3	6,6	37,5
	30	6,7	39,2	6,7	35,4
	60	6,9	61,7	5,9	34,4
	90	6	45,9	6,9	35,9
	120	5,9	37,1	6,1	33,3
	150	7	49,6	5,9	32,9
	180	7,8	47,5	5,4	30,6
	210	4,8	29,2	7,7	40,8
	240	3,9	23,4	5,4	35,3
	270	4,5	29	8,9	51,2
	300	3,2	20,2	7,9	51,6
	330	4,3	24,7	5,8	34,9
50	0	3,8	24,3	9,8	52,1
	30	7,8	43,2	7,6	42,2
	60	7,6	50,2	6,9	39,4
	90	7,9	46,5	6	34
	120	5,7	35,7	6,5	37,2
	150	6,5	38,6	5,5	33,7
	180	8,3	45,9	5,7	34,8
	210	4,9	28,9	8,7	46,1
	240	2,5	18,8	8,8	49,3
	270	4,3	28,9	9,4	52,6
	300	2,9	18,3	8,2	46,9
	330	2,3	15	7,7	43,7
40	0	3,4	25,6	11,5	65,5
	30	6,1	43,7	6,6	39,5
	60	8	60,5	6	30,6
	90	7,3	54,3	6,7	39,6
	120	4,9	33,4	6,2	37,4
	150	6,4	40,5	7,7	44,3
	180	7,1	40,3	7,3	40,1
	210	6	36,6	7,9	52,4
	240	2,5	18,8	7,3	43,1
	270	3,3	24	9,2	54,8
	300	3,1	20	8,7	52,6
	330	2,9	18,3	8,8	55,3
30	0	2,4	17	12,5	67,3
	30	4,8	32,6	9,1	68,6
	60	3,7	28	13,2	62,4

Продолжение таблицы 1

90	3,9	27,2	8,9	56,8
120	5,2	38,9	4	24,6
150	5,2	34,4	7,7	47
180	4,9	34,6	11,7	67,3
210	3,3	23,9	9,8	51
240	3,1	23,1	12,6	68,1
270	3,6	27,5	11,5	74,1
300	2,4	17,3	8,7	53,1
330	2,3	15,6	13	74,1

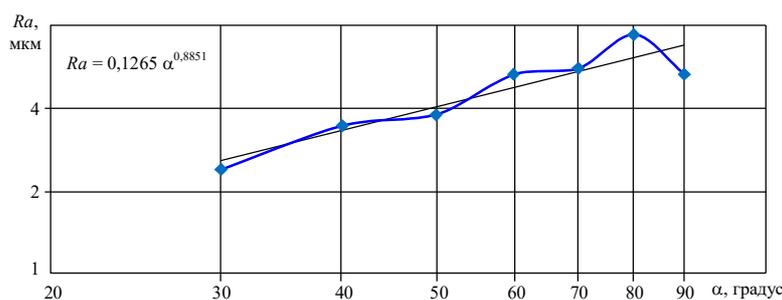


Рис. 8. Зависимость значения  $Ra$  от угла наклона поверхности относительно плоскости построения образца при  $\varphi = 0^\circ$

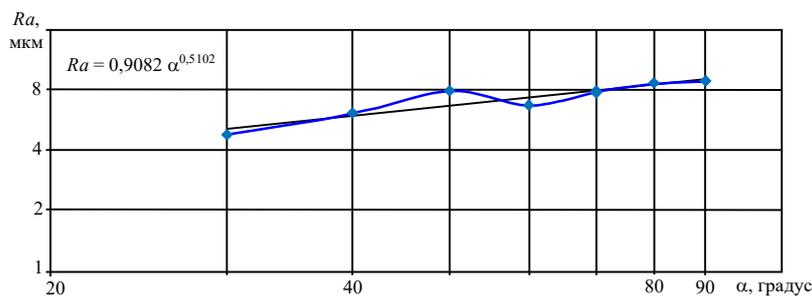


Рис. 9. Зависимость значения  $Ra$  от угла наклона поверхности относительно плоскости построения образца при  $\varphi = 30^\circ$

2. Значения  $C$  и  $x$  при изготовлении образцов из X15H5Д4Б

Угол замера относительно движения ножа, $\varphi^\circ$	С наружной стороны		С внутренней стороны	
	$C$	$x$	$C$	$x$
0	0,1265	0,8851	120,02	-0,658
30	0,9082	0,5102	26,668	-0,336
60	3,7038	0,1176	71,065	-0,581
90	2,2181	0,2548	43,911	0,486
120	2,6081	0,1947	3,152	-
150	3,4218	0,154	31,73	-0,411
180	3,9425	0,1339	79,287	-0,621
210	0,7128	0,4944	19,492	-0,219
240	0,2052	0,7515	62,168	-0,525
270	1,3916	0,2703	62,253	-0,498
300	0,4176	0,5182	39,858	-0,418
330	0,219	0,6825	175,4	-0,796

3. Значения  $C$  и  $x$  при изготовлении образцов из КХ28М6

Угол замера относительно движения ножа, $\varphi^\circ$	С наружной стороны		С внутренней стороны	
	$C$	$x$	$C$	$x$
0	0,0736	0,835	1836,9	-0,43
30	0,1388	0,6910	90,153	-0,707
60	0,7865	0,2479	398,87	-1,046
90	0,0477	0,9450	699,15	-1,203
120	0,7469	0,2499	268,52	-0,986
150	0,0543	0,9265	3532,9	-0,58
180	0,1086	0,7351	542,85	-1,124
210	0,1113	0,7285	2592,8	-1,502
240	0,2066	0,5873	161,5	-1,378
270	0,0554	0,9098	42,149	-0,538
300	0,2232	0,5959	307,76	-0,989
330	0,1941	0,6135	55,686	-0,59

4. Значения  $C$  и  $x$  от угла  $\varphi$

Материал образцов	Сторона образца	Значения	
		$C$	$x$
X15H5Д4Б	Наружная	$36,932\varphi^{-0,694}$	$0,0722\varphi^{0,289}$
	Внутренняя	$5,664\varphi^{0,388}$	$-0,2055\varphi^{0,142}$
КХ28М6	Наружная	$0,467\varphi^{-0,22}$	$0,275\varphi^{0,158}$
	Внутренняя	$23520\varphi^{0,753}$	$-3,556\varphi^{-0,239}$

5. Результаты расчётов и результаты замеров параметров шероховатости для материала изделия X15H5Д4Б

Угол поворота поверхности относительно движения ножа $\varphi, ^\circ$	Угол наклона поверхности относительно плоскости построения $\alpha, ^\circ$	Значения $Ra$ , мкм (по формуле)	Значения $Ra$ , мкм (замер на приборе)
Наружная сторона детали			
90	90	5,365	6,7
150	70	4,213	7,3
210	40	3,153	6,0
240	50	3,266	2,5
270	60	3,374	4,5
Внутренняя сторона детали			
60	30	7,9	3,7
120	50	7,45	5,7
180	70	6,88	7,0
270	80	3,92	5,8
330	60	7,9	4,3

6. Результаты расчётов и результаты замеров параметров шероховатости для материала изделия КХ28М6

Угол поворота поверхности относительно движения ножа $\varphi, ^\circ$	Угол наклона поверхности относительно плоскости построения $\alpha, ^\circ$	Значения $Ra$ , мкм (по формуле)	Значения $Ra$ , мкм (замер на приборе)
Наружная сторона детали			
60	30	1,128	1,3
120	50	1,603	1,9
180	70	2,103	3,0
240	80	2,435	3,2
330	90	2,852	2,7
Внутренняя сторона детали			
90	60	5,09	3,3
150	70	5,347	3,1
210	80	5,926	3,2
270	90	4,925	3,0

**Заключение**

Полученные в результате исследования значения параметров шероховатости, а также расчётные зависимости позволяют конструкторам и технологам ориентироваться с учётом шероховатости поверхностей заготовок и деталей, изготовленных методом лазерного спекания, в дальнейших конструкторских расчётах.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гибсон, Я., Розен, Д., Стракер, Б. Технологии ад-

дитивного производства. – М.: Техносфера, 2016. – 656 с.

2. Шишковский, И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объёмных изделий. – М.: Физматлит, 2009. – 424 с.

**REFERENCES**

1. Gibson, Ya., Rosen, D., Straker, B. *Technologies of Additive Production*. – M.: Techno-sphere, 2016. – pp. 656.

2. Shishkovsky, I.V. *Laser Synthesis of Functional-Gradient Meso-Structures and Solid Products*. – M.: Phys-mathlit, 2009. – pp. 424.

Рецензент д.т.н. В.Н. Варавка

УДК 621.791.14

DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-11-21

**В.В. Овчинников**<sup>1</sup>, д.т.н., **А.М. Дриц**<sup>2</sup>, к.т.н., **Т.Ю. Скакова**<sup>3</sup>, к.т.н.  
 (1, 3 АНО ВО Московский политехнический университет, 107023, г. Москва, ул. Большая Семеновская, 38,  
 2 ООО "Аркионик-СМЗ", 123317, Москва, Краснопресненская наб., 18)  
 E-mail: vikov1956@mail.ru

**Технологическое обеспечение качества сварного шва, полученного методом трения с перемешиванием**

Систематизированы основные дефекты, возникающие при сварке трением с перемешиванием (СТП) стыковых соединений алюминиевых сплавов. Выявлены основные причины возникновения таких дефектов как несплавления, грат, перегрев металла лицевой стороны шва. Определен диапазон оптимальных соотношений, выражающих длину линейного перемещения инструмента вдоль стыка за один его оборот (подача на один оборот), в котором обеспечивается качественное формирование швов алюминиевых сплавов. Показана возможность исправления дефектов путем повторного прохода СТП.

**Ключевые слова:** сварка трением с перемешиванием; алюминиевые сплавы; режимы сварки; механизм формирования соединения; температура нагрева; дефекты соединений.