

**Рубан К. Е., Бахматов П. В.**  
**K. E. Ruban, P. V. Bakhmatov**

**РАСЧЁТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ЗАВИСИМОСТЬ  
ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ  
ШВОВ СПЛАВА АМг5**

**CALCULATION OF A MATHEMATICAL MODEL THAT DETERMINES  
THE DEPENDENCE OF THE INPUT PARAMETERS OF LASER WELDING  
ON THE FORMATION OF THE WELDED JOINTS ALLOY AMg5**

**Рубан Ксения Евгеньевна** – магистрант кафедры технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)177-73-24. E-mail: krauzer\_sams96@list.ru.

**Ksenia E. Ruban** – Master's Degree Student, Welding and Metallurgical Production Technology Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27; tel. 8(914)177-73-24. E-mail: krauzer\_sams96@list.ru.

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии сварочного и металлургического производства Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Pavel V. Bakhmatov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Welding and Metallurgical Production Technology, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel. 8(914)160-76-54. E-mail: mim@knastu.ru.

**Аннотация.** Рассчитана математическая модель, позволяющая определять зависимость входных параметров лазерной сварки на геометрические характеристики сварного шва сплава АМг5 толщиной 1,5 мм. Полученная математическая модель позволяет прогнозировать геометрические параметры сварного шва при выполнении роботизированной лазерной сварки.

**Summary.** A mathematical model is calculated that allows determining the dependence of the input parameters of laser welding on the geometric characteristics of the AMg5 alloy weld with a thickness of 1.5 mm. The resulting mathematical model makes it possible to predict the geometric parameters of the weld when performing robotic laser welding.

**Ключевые слова:** алюминиевые сплавы, лазерная сварка, дробно факторный эксперимент, математическая модель.

**Key words:** aluminum alloy, laser welding, fractional factor experiment, mathematical model.

УДК 621.791.725

На сегодняшний день лазерные технологии активно используются в промышленности при поверхностном упрочнении [1], резке и оплавлении. Наиболее перспективной технологией для промышленного использования является лазерная сварка. Целью настоящей работы является определение влияния режимов сварки на геометрические параметры сварного шва при роботизированной лазерной сварке.

На основе работы [2] для определения математической модели, описывающей взаимосвязь мощности ( $x_1$ ), скорости сварки ( $x_2$ ), расстояния до фокальной плоскости ( $x_3$ ), ширины ( $y_1$ ), глубины вогнутости ( $y_2$ ) и превышения проплава ( $y_3$ ), решено провести статическое моделирование

дробно факторного эксперимента. Выбираем уровни варьирования факторов из соображений возможности реализации опытов в пределах технологических ограничений.

Составлена матрица планирования и карта проведения эксперимента (см. табл. 1).

Таблица 1

Уровни варьирования факторов, карта проведения эксперимента

Параметры		$x_1$	$x_2$	$x_3$
Размерность		Вт	мм/с	мм
Основной уровень		775	10	245
Верхний уровень		800	12	250
Нижний уровень		650	8	240
Интервал варьирования		$\pm 25$	$\pm 2$	$\pm 5$

Номер опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	2	3	4	5	6	7
1	-1	+1	+1	1,68	0,13	0,08
2	-1	-1	+1	3,43	0,54	0,12
3	-1	+1	-1	1,46	0,07	0
4	-1	-1	-1	1,32	0,09	0
5	+1	+1	-1	1,52	0,05	0
6	+1	+1	+1	2,75	0,41	0,38
7	+1	-1	+1	3,39	0,8	0,16
8	+1	-1	-1	1,3	0,05	0

Выполнены контрольные образцы для проверки адекватности модели (см. табл. 2).

Таблица 2

Карта проведения дополнительных экспериментов

Номер опыта	Входные параметры			Выходные параметры		
	Мощность, Вт	Скорость сварки, мм/с	Фокусное расстояние, мм	$y_1$	$y_2$	$y_3$
1	780	11	250	3,05	0,44	0,1
2	760	10	250	3,3	0,48	0,4

На основании данных произведён расчёт математической модели по методике [3]. По результатам расчётов определены следующие уравнения регрессии:

$$y_1 = -35,043 + 0,005X_1 + 0,141X_3,$$

$$y_2 = -11,13 + 0,0024X_1 + 0,041X_3,$$

$$y_3 = -5,99 + 0,0017X_1 + 0,0011X_2 + 0,0019X_3.$$

Модель можно считать адекватной, если  $F < F_{\text{табл}}$ . Табличное значение критерия Фишера находят в зависимости от числа степеней свободы  $f_1 = k - 1$  и доверительной вероятности (0,95),  $F_{\text{табл}} = 161$ .

$$F = \frac{0,81}{0,045} = 18, \quad F' = \frac{0,08}{0,008} = 10, \quad F'' = \frac{0,014}{0,008} = 1,75.$$

Так как  $F < F_{\text{табл}}$ , то с доверительной вероятностью модель можно считать адекватной.

Для построения графиков зависимости входных параметров от геометрических характеристик сварных швов необходимо установить область допустимых значений  $y_1, y_2, y_3$  (см. рис. 1).

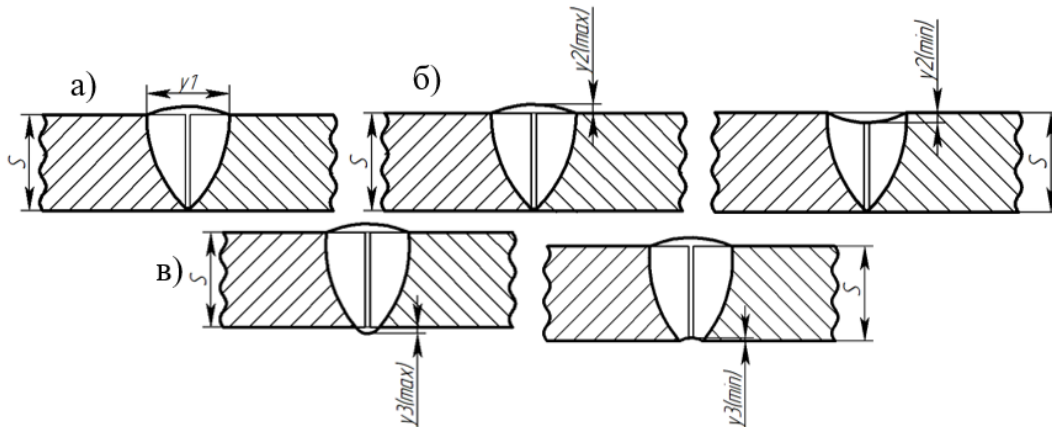


Рис. 1. Контролируемые выходные параметры:

а – ширина; б – выпуклость/вогнутость усиления шва; в – выпуклость/вогнутость корня шва

По ГОСТ 13919-2-2017 [4] рассчитаны области допустимых значений выходных параметров для листов сплава АМг5 толщиной 1,5 мм (см. табл. 3). Стандарт не регламентирует ширину сварного соединения.

Таблица 3

Допустимые значения выходных параметров

Категория сварного соединения	$y_1$	$y_2$		$y_3$	
		min	max	min	max
1	-	-0,075	0,43	-0,15	0,43
2	-	-0,15	0,5	-0,3	0,5
3	-	-0,23	0,65	-0,45	0,65

В результате исследования получены графики зависимости (см. рис. 2) параметров  $x_1, x_2, x_3$ , обеспечивающих рассчитанные геометрические размеры сварного соединения.

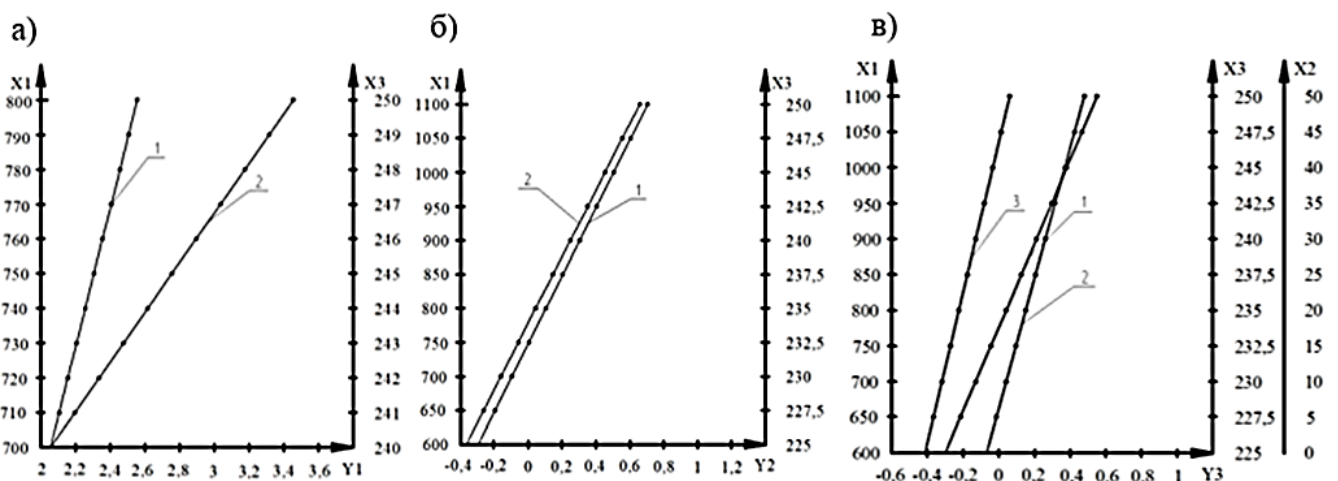


Рис. 2. Зависимость ширины (а) (1 – при расстоянии до фокальной плоскости 240 мм; 2 – при выходной мощности излучения 700 Вт), выпуклости лицевой (б) (1 – при расстоянии до фокальной плоскости 235 мм; 2 – при выходной мощности излучения 770 Вт) и корневой (в) (1 – при скорости сварки 10 мм/с и расстоянии до фокальной плоскости 240 мм; 2 – при выходной мощности излучения 800 Вт и расстоянии до фокальной плоскости 240 мм; 3 – при выходной мощности излучения 700 Вт и скорости сварки 10 мм/с) части шва от входных параметров

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Лазерное упрочнение углеродистой стали У10 / В. А. Ким, А. С. Матарыкина, С. С. Матарыкина, Л. О. Назаренко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1(34). – С. 75-82.
2. Цымбал, В. П. Математическое моделирование металлургических процессов: учеб. пособие для вузов / В. П. Цымбал. – М.: Металлургия, 1986. – 240 с.
3. Судник, В. А. Методы исследования сварочных процессов: учеб. пособие / В. А. Судник, В. А. Ерофеев. – Тула: ТПИ, 1980. – 100 с.
4. ГОСТ ISO 13919-2-2017. Сварка. Соединения, полученные электронно-лучевой и лазерной сваркой. Руководство по оценке уровня качества для дефектов. Часть 2. Алюминий и его сплавы. Введ. 2018-03-01. – М.: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2017. – 13 с.