

УДК 621.791.011:669.715

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
СОЕДИНЕНИЙ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ СВАРКЕ  
ПЛАВЯЩИМСЯ И НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

**Е.С. ГОЛУБЦОВА**, д-р техн. наук  
Белорусский национальный технический университет  
**Н.Б. КАЛЕДИНА**  
Белорусский государственный технологический университет

*Проведен статистический анализ основных показателей механических свойств основного металла и сварных соединений различных сплавов на основе алюминия, полученных плавящимся и неплавящимся электродами. Исследованы предел прочности сварных соединений, предел прочности металла швов, условный предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость, угол загиба соединений.*

**Ключевые слова:** механические свойства, сварные соединения сплавов на основе алюминия, плавящийся и неплавящийся электроды, матрица плана, статистическая обработка результатов эксперимента, сварка ТИГ, МИГ.

**STATISTICAL ANALYSIS OF THE MECHANICAL  
PROPERTIES OF ALUMINUM ALLOY COMPOUNDS  
UNDER WELDING BY MELTING AND NON-MELTING  
ELECTRODE**

**E.S. GOLOUBTSOVA**, Dr. of Engineering Sciences  
Belarusian National Technical University  
**N.B. KALEDZINA**  
Belarusian State Technological University

*A statistical analysis of the main indicators of the mechanical properties of the base metal and welded joints of various aluminum-based alloys obtained by melting and non-melting electrodes was carried out. The tensile strength of welded joints, the tensile strength of the weld metal, the conventional yield strength, the relative elongation, the impact strength, the bending angle of the joints are investigated.*

**Keywords:** *mechanical properties, welded joints of aluminum-based alloys, melting and non-melting electrode, plan matrix, statistical processing of experimental results, TIG, MIG welding.*

Сварка алюминиевых сплавов плавящимся и неплавящимся электродами позволяет получать сравнительно высокие уровни прочности и пластичности швов.

В данной работе, в отличие от работы [1], проведен статистический анализ основных показателей механических свойств основного металла и сварных соединений сплавов на основе алюминия различных систем легирования, химический состав которых представлен в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Химический состав алюминиевых сплавов, мас. % [1]

Марка сплава	Система легирования	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Li	Zn	Sc	Ti	Zr
АМг6	Al-Mg-Mn	–	6,4	0,6	0,4	0,4	–	–	–	0,1	–
1420	Al-Mg-Li	–	5,4	0,2	0,2	0,15	2,1	–	–	–	0,1
1201	Al-Cu	5,7	–	0,2	0,3	0,2	–	–	–	–	0,1
1460	Al-Cu-Li	3,0	–	0,1	0,12	0,1	2,0	–	0,1	0,1	0,1
1925о.н	Al-Zn-Mg	–	1,5	–	0,4	–	–	7,0	–	–	–
В96Цо.н.	Al-Zn-Mg-Cu	2,3	1,9	–	0,2	0,2	–	8,1	–	–	0,1

В качестве этих показателей использовали предел прочности сварных соединений  $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$ , предел прочности металла швов  $\sigma_{\text{в}}^{\text{ш}}$ , условный предел текучести металла швов  $\sigma_{0,2}^{\text{ш}}$ , относительное удлинение  $\delta^{\text{ш}}$ , ударную вязкость  $KCV^{\text{ш}}$ , Дж/см<sup>2</sup>; угол загиба соединений  $\alpha$ , град.

Исследовали  $\sigma_{\text{в}}^{\text{св}}$ , МПа;  $\sigma_{\text{в}}^{\text{ш}}$ , МПа;  $\sigma_{0,2}^{\text{ш}}$ , МПа и  $\delta^{\text{ш}}$ , % сварных соединений сплава АМг6, выполненных ТИГ (неплавящийся электрод) и МИГ (плавящийся электрод) процессами проволоками СвАмг6; СвАмг63 и СвАмг63Sc.

Изучали влияние двух качественных факторов ( $x_1$  – ТИГ и МИГ,  $x_2$  – марка проволоки (СвАмг6; СвАмг63 и СвАмг63Sc) с помощью плана 2×3, где 2 – два уровня процесса (ТИГ и МИГ), а 3 – три марки проволоки.

Для оценки влияния взаимодействия этих факторов ( $x_1x_2$ ) в каждой ячейке плана проводили три опыта ( $n = 3$ ). Результаты этого опыта приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Предел прочности сварных соединений ( $y_1 = \sigma_B^{CB}$ , МПа)

$B \backslash A$	СвАмг6	СвАмг63	СвАмг63Sc
ТИГ	300	308	312
	316	324	328
	332	340	344
МИГ	309	314	318
	325	330	334
	341	346	350

Для оценки влияния факторов применим дисперсионный анализ [2], который позволяет оценить влияние всех факторов и их взаимодействий.

Вычисляем сумму квадратов всех наблюдений:

$$Q_5 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \sum_{v=1}^n x_{ijv}^2 = 1\,918\,563, \quad (1)$$

где  $k = 3$  – число электродов;  $m = 2$  – способ сварки (ТИГ и МИГ);  $n = 3$  – число параллельных опытов в каждой ячейке.

Согласно применяемой методике расчета, используем средние значения трех наблюдений, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Средние значения  $y_1 = \sigma_B^{CB}$

$B \backslash A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$x'_j$
ТИГ( $B_1$ )	316	324	328	968
МИГ( $B_2$ )	325	330	334	969
$x_i$	641	654	662	1957

Сумма всех элементов  $\left( \sum_{j=1}^m x'_j = 1957 \right)$  в таблице 2 вычисляется по формуле:

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m x_{ij} = \sum_{i=1}^k x_i = \sum_{j=1}^m x'_j. \quad (2)$$

Обработку данных таблицы 3 проводили по правилам двухфакторного дисперсионного анализа без повторения. Для этого находим:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m x_{ij}^2 = 638497; \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^k x_i^2 = 638420,5; \quad (4)$$

$$Q_3 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^m x_j^2 = 638381,7; \quad (5)$$

$$Q_4 = \frac{\sum_{i=1}^k x_i^2}{k m} = 638308,2. \quad (6)$$

Дисперсию воспроизводимости вычисляем по формуле:

$$S^2 = \frac{Q_5 - nQ_1}{m \cdot k(n-1)} = \frac{3072}{12} = 256, \quad (7)$$

а также совместную дисперсию воспроизводимости и взаимодействия:

$$S_0^2 = \frac{Q_1 + Q_4 - Q_2 - Q_3}{(k-1)(m-1)} = 1,485. \quad (8)$$

Для проверки значимости эффекта взаимодействия ( $AB$ ) необходимо сравнить дисперсии  $n \cdot S_2^2 = 4,455$  и  $S_2 = 256$  по критерию Фишера  $F$ :

$$F_{2,12} = \frac{n \cdot S_0^2}{S^2} = \frac{4,455}{256} \ll 1, \quad (9)$$

т. е. эффект взаимодействия незначим.

По отдельности оценим влияние факторов  $A$  и  $B$ :

$$f_1 = k - 1 = 3 - 1 = 2; \quad f_2 = m \cdot k(n - 1) = 2 \cdot 3(3 - 1) = 12;$$

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_4}{k - 1} = 56,165; \quad (10)$$

$$F_A = \frac{S_A^2}{S_0^2} = 37,82 > F_{1,2} = 19,2.$$

$$S_B^2 = \frac{Q_3 - Q_4}{m - 1} = 73,53; \quad (11)$$

$$F_B = \frac{S_B^2}{S_0^2} = 49,515 > F_{1,2} = 18,5.$$

Таким образом, оба фактора  $A$  и  $B$  (марка электрода и виды процесса – ТИГ и МИГ) значительно влияют на предел прочности  $\sigma_B^{CB}$  сварного соединения, причем фактор  $B$  (процесс МИГ) несколько больше влияет на эту характеристику.

Самое высокое значение  $\sigma_B^{CB} = 331,9$  МПа получено при использовании процесса МИГ (плавящийся электрод) и проволоки АМг63Sc.

Результаты исследования предела прочности сварного шва  $y_2 = \sigma_B^{III}$ , МПа приведены в таблице 4, где  $B$  – вид процесса (ТИГ, МИГ), а  $A$  – марка проволоки (СвАмг6; СвАмг63 и СвАмг63Sc).

В таблице 5 представлены средние и кодированные значения  $y_2 = \sigma_B^{III}$ .

Статистическую обработку проводили так же, как и в предыдущем опыте:

$$Q_5 = 11007; \quad Q_1 = 2673; \quad Q_2 = 2441; \quad Q_3 = 1978; \quad S^2 = \frac{Q_5 - nQ_1}{m \cdot k(n - 1)} = 249.$$

$$S_0^2 = \frac{Q_1 + Q_4 - Q_2 - Q_3}{(k-1)(m-1)} = 46; \quad \frac{n \cdot S_0^2}{S^2} = \frac{3 \cdot 46}{249} = 0,565 < 1, \text{ т. е. эффект}$$

взаимодействия незначим.

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_4}{k-1} = 301,5 \approx 302; \quad S_B^2 = \frac{Q_3 - Q_4}{m-1} = 140.$$

$$F_B = \frac{S_B^2}{S_0^2} = 3,043 < F_{1,2} = 18,5.$$

Таблица 4 – Прочность сварного шва  $\sigma_B^{CB}$

$B \backslash A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1^*$	$A_2^*$	$A_3^*$
$B_1$ (ТИГ)	273	305	309	-27	5	9
	294	320	324	-6	20	24
	309	335	339	9	35	39
$B_2$ (МИГ)	299	306	317	-1	6	17
	314	321	332	14	21	32
	329	336	347	29	36	47

$A_1^*, A_2^*, A_3^*$  – разность между опытным значением показателя, минус 300 (приведено для облегчения вычислений)

Таблица 5 – Средние и кодированные значения  $y_2 = \sigma_B^{III}$

$B \backslash A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	СвАмг6	СвАмг63	СвАмг63Sc	$\Sigma B$
$B_1$	294	320	324	-6	20	24	38
$B_2$	314	321	332	14	21	32	67
$\Sigma B$	608	641	641	8	41	56	105

Таким образом, оба фактора незначимы, т. е. при ошибке опыта  $S_y = 16$  влияние обоих факторов и их взаимодействия не выявляется. Полученные данные практически не отличаются от их среднего значения  $\bar{y}_2 = \frac{1905}{6} = 318$  МПа.

Значения  $y_3 = \sigma_{0,2}^{III}$  приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Значения  $y_3 = \sigma_{0,2}^{\text{III}}$

$B \backslash A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	СвАмг6	СвАмг63	СвАмг63Sc
$B_1$ (ТИГ)	161	173	164	1	13	4
	169	181	172	9	21	12
	177	189	180	17	29	20
$B_2$ (МИГ)	168	176	167	8	16	7
	176	184	175	16	24	15
	184	192	183	24	32	23

Средние значения  $y_3 = \sigma_{0,2}^{\text{III}}$  и их кодированные значения приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Средние значения  $y_3 = \sigma_{0,2}^{\text{III}}$  и их кодированные значения

$B \backslash A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	СвАмг6	СвАмг63	СвАмг63Sc	$x'_j$
$B_1$ (ТИГ)	169	181	172	9	21	12	42
$B_2$ (МИГ)	176	184	175	16	24	15	55
$x_i$	345	365	347	25	25	27	97

$$Q_1 = 1723, Q_2 \approx 1690, Q_3 = 1596, Q_4 = 1568, Q_5 = 5937.$$

$$S^2 = \frac{Q_5 - nQ_1}{m \cdot k(n-1)} = 64, \quad S_0^2 = \frac{Q_1 + Q_4 - Q_2 - Q_3}{(n-1)(m-1)} = 2,5; \quad n \cdot S_0^2 = 7,5;$$

$$F = \frac{n \cdot S_0^2}{S^2} < 1 - \text{эффект взаимодействия незначим.}$$

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_4}{k-1} = 61; \quad F_A = \frac{S_A^2}{S_0^2} = 24,4 > 19,2, \text{ т.е. значимо } A.$$

$$S_B^2 = \frac{Q_3 - Q_4}{m-1} = 28; \quad F_B = \frac{S_B^2}{S_0^2} = 11,2 < 18,5, \text{ т.е. вид процесса (ТИГ}$$

или МИГ) не влияет на величину  $\sigma_{0,2}^{\text{III}}$ .

Результаты исследования относительного удлинения  $y_4 = \delta, \%$  приведены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8 – Относительное удлинение  $y_4 = \delta$ , %

$B \backslash A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$B_1$ (ТИГ)	21 22 23	25,8 26,8 27,8	20,6 21,6 22,6
$B_2$ (МИГ)	18,2 19,2 20,2	25 26 27	18 19 20

Таблица 9 – Средние значения  $y_4 = \delta$ , %

$B \backslash A$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$x'_j$
$B_1$ (ТИГ)	22	26,8	21,6	70,4
$B_2$ (МИГ)	19,2	26	19	64,2
$x_i$	41,2	52,8	40,6	134,6

$Q_1 = 3074,44 \approx 3074$ ,  $Q_2 = 3066,82 \approx 3067$ ,  $Q_3 = 3025,93 \approx 3026$ ,  
 $Q_4 = 3019,53 \approx 3020$ ,  $Q_5 = 9235,32 \approx 9235$ ;

$$S^2 = \frac{Q_5 - nQ_1}{mk(n-1)} = 1; \quad S_0^2 = \frac{Q_1 + Q_4 - Q_2 - Q_3}{(n-1)(m-1)} = 0,61; \quad n \cdot S_0^2 = 1,83;$$

$$F_{2,12} = \frac{n \cdot S_0^2}{S^2} = 1,83 < 3,9, \quad \text{при } f_1 = 2 \text{ и } f_2 = 12. \text{ Из выполненных и}$$

последующих расчетов следует, что эффект взаимодействия также незначим:

$$S_A^2 = \frac{Q_2 - Q_4}{k-1} = 23,7, \quad F_A = \frac{S_A^2}{S_0^2} = 38,8 > 19,2;$$

$$S_B^2 = \frac{Q_3 - Q_4}{m-1} = 6,4, \quad F_B = \frac{S_B^2}{S_0^2} = 10,49 < 18,5.$$

Таким образом, применение МИГ и СвАмг63Sc не всегда обеспечивает высокие свойства сварных соединений.



### Список литературы

**1. Машин, В.С.** Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом / В.С. Машин, А.Г. Покляцкий, В.Е. Федорук // Автоматическая сварка. – 2005. – № 9. – С. 43–49.

**2. Берикашвили, В.Ш.** Статистическая обработка данных, планирование эксперимента и случайные процессы / В.Ш. Берикашвили, С.П. Оськин. – М.: Изд-во Юрайт, 2019. – 164 с.

### References

**1. Mashin, V.S.** *Mekhanicheskie svojstva soedinenij alyuminievyh splavov pri svarke plavyashchimsya i neplavyashchimsya elektrodom* [Mechanical properties of joints of aluminum alloys in welding with consumable and non-consumable electrodes] / V.S. Mashin, A.G. Poklyatsky, V.E. Fedoruk // *Avtomaticheskaya svarka = Automatic welding*. – 2005. – No. 9. – P. 43–49.

**2. Berikashvili, V.Sh.** *Statisticheskaya obrabotka dannyh, planirovanie eksperimenta i sluchajnye processy* [Statistical data processing, experiment planning and random processes] / V.Sh. Berikashvili, S.P. Oskin. – Moscow: Yurayt Publ., 2019. – 164 p.

*Поступила 06.07.2021*  
*Received 06.07.2021*