

МНОГОФАКТОРНАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ КАЧЕСТВА СТП-СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

© 2025 А.С. Макаров

Научно-производственное объединение «Техномаш» имени С.А. Афанасьева», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 05.03.2025

Исследовано влияние основных технологических параметров процесса сварки трением с перемешиванием (СТП) [1, 2] на структуру и механические свойства сварных соединений для заготовок из сплавов БрХ08«Ш». С использованием методов планирования эксперимента (теории оптимального эксперимента) [3, 4] построена математическая модель влияния определяющих параметров процесса СТП на качество сварных соединений листовых заготовок из сплавов БрХ08«Ш».

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием (СТП), ракетно-космическая техника, качество сварных СТП-соединений, твёрдость сварного соединения, теория оптимального эксперимента.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-55-59

EDN: FHPCWW

ВВЕДЕНИЕ

Основными материалами, применяемыми в космической промышленности, являются металлические материалы – конструкционные алюминиевые, магниевые, никелевые и титановые сплавы, специальные жаропрочные стали и сплавы на основе меди [5].

Исследования выполнялись с целью оптимизации технологий изготовления ключевых сварных ДСЕ изделий ракетно-космической техники (РКТ) на листах из сплава БрХ08«Ш» шириной 900-1200 мм.

Хромистая бронза, обладая высокими механическими свойствами и жаропрочностью в сочетании с высокой тепло- и электропроводностью, является основой низколегированных медных сплавов, в целом ряде случаев являющихся единственными, обеспечивающими необходимую работоспособность важнейших ДСЕ новейших образцов изделий РКТ.

Важнейшими свойствами хромистых бронз являются высокие (соизмеримые с медью) тепло- и электропроводность, коррозионная стойкость, отсутствие «водородной болезни», технологичность при горячей и холодной деформации, сварке и пайке [6].

ПРОБЛЕМАТИКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Основной проблемой СТП-соединений являются различного рода и вида нарушения целостности материала сварных швов, прежде всего, непровар корня шва, полостные каналы и микротрещины.

Отметим, что все эти дефекты надёжно выявляются существующими средствами ультразвукового контроля, основной причиной их появления является неправильно выбранный режим сварки, а основным способом устранения причины появления этих дефектов является корректировка режима сварки, для определения параметров которого необходимо установить объективную зависимость свойств СТП-соединений от параметров СТП для того или иного свариваемого материала и толщины заготовки.

Исключив толщину материала, так как это в основном прямая зависимость от геометрии сварного инструмента, которая не рассматривалась в нашем исследовании, оставим для рассмотрения только свойства свариваемого материала, при этом, поскольку одним из основных измеряемых свойств материала является его твёрдость [7, 8], примем в нашем исследовании эту характеристику в качестве изучаемого и оптимизируемого параметра.

Возвращаясь к технологии отметим, что основными факторами обеспечения качества процесса СТП принято считать:

- скорость сварки, мм/мин;
- частоту вращения инструмента, об/мин;
- угол наклона инструмента, град;
- давление бурта инструмента на соединяемые детали, Н/м²;
- глубину погружения инструмента, мм;
- геометрию инструмента.

Исключив из рассмотрения последнюю позицию, так как на практике инструмент выбирается до момента непосредственно сварки, оставим для дальнейшего рассмотрения и построения математической модели «качество СТП-соединений – режим сварки» первые пять.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ БАЗИС ПОСТРОЕНИЯ МНОГОФАКТОРНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для формирования математической модели зависимости твёрдости материала сварного шва, принятого в работе за базовое свойства сварного соединения, от основных параметров процесса, применим методику планирования эксперимента (теорию оптимального эксперимента) позволяющую сформировать математическую модель исследуемой системы и выявить принципиальные закономерности изменения исследуемого показателя процесса от переменных его факторов с заданной вероятностью их соответствия реальным значениям.

В планировании эксперимента моделью зависимости исследуемого свойства объекта от основных параметров процесса является адекватная для принимаемого уровня доверительной вероятности регрессионная модель изучаемой системы:

$$y_m = f_m(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (1)$$

где y_m – контрольное свойство исследуемого процесса (отклик),

$x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ – переменные (варьируемые в экспериментах) факторы исследуемого процесса.

Функция (1) может быть достаточной сложной, однако, как бы сложна она ни была, предполагается, что в локальных областях измерения переменных её можно с достаточной точностью аппроксимировать полиномами вида:

$$b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j}^n b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (2)$$

В локальных областях измерения переменных, где предполагается монотонное изменение отклика от варьируемых в эксперименте факторов, функцию (1), принято аппроксимировать так называемыми линейными степенными рядами:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j}^n b_{ij} x_i x_j + \dots + b_{123\dots n} x_1 x_2 x_3 \dots x_n. \quad (3)$$

Как было сказано, для нашего исследования в качестве переменных выбраны пять параметров сварки, обозначения которых в будущей математической модели и интервалы варьирования в экспериментах приведены Табл. 1.

Таблица 1. Факторы математической модели

Наименование	Обозначение	Интервалы варьирования
Скорость сварки, $v_{св}$, мм/мин	x_1	24 - 42
Частота вращения инструмента, n , об/мин	x_2	850 - 1660
Угол наклона инструмента, α , град	x_3	1 - 2
Давление бурта инструмента, p , Н/м ²	x_4	10,5 - 13,5
Глубина погружения инструмента, h , мм	x_5	3,9 - 12,1

Функция отклика – «у» (значение твёрдости сварного соединения по Роквеллу, HRC) выбрана исходя из того, что для обеспечения качественного соединения значение твёрдость сварного шва должно быть близка к значению твёрдости свариваемого материала.

Измерения твёрдости проводили стандартным цифровым твердомером в центральной точке сварного шва [9].

В качестве плана эксперимента выбрали матрицу полного факторного эксперимента ПФЭ 2⁵, позволяющего получить математическое описание рассматриваемого процесса в виде статистически значимого фрагмента полинома:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_5 x_5 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{15} x_1 x_5 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{25} x_2 x_5 + b_{34} x_3 x_4 + b_{35} x_3 x_5 + b_{45} x_4 x_5 + b_{12345} x_1 x_2 x_3 x_4 x_5. \quad (4)$$

С целью снижения влияния на модель различных не учтённых в исследовании при выборе системы переменных факторов опыты регулярной матрицы проводились в случайной последовательности (принцип рандомизации).

Оценки коэффициентов искомой модели получают, как правило, методом наименьших квадратов (МНК), при этом в силу определенных свойств матрицы выбранного плана расчётные формулы МНК-оценок коэффициентов сводятся к соотношениям (5):

$$\begin{aligned}
 b_i &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{N}; \\
 b_{ij} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 &\dots\dots\dots \\
 b_{ij\dots m} &= \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} \dots x_{mu} y_u}{N}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

или, в матричной форме [5, 8]:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y, \tag{6}$$

где: X^T – транспонированная матрица X;

$(X^T X)$ – так называемая информационная матрица, или матрица моментов.

Сводная матрица условий проведения опытов и полученных в этих значений твердости приведена в Табл. 2.

Таблица 2. Матрица опытов

№ № опыта	Условия проведения опытов					Значения твердости
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	
1	50	500	1	10,5	3	84,8
2	100	500	1	10,5	3	84,1
3	50	600	1	10,5	3	83,4
4	100	600	1	10,5	3	82,9
5	50	500	2	10,5	3	82,1
6	100	500	2	10,5	3	81,6
7	50	600	2	10,5	3	80,0
8	100	600	2	10,5	3	78,6
9	50	500	1	13,5	3	77,4
10	100	500	1	13,5	3	76,6
11	50	600	1	13,5	3	75,8
12	100	600	1	13,5	3	75,1
13	50	500	2	13,5	3	74,8
14	100	500	2	13,5	3	73,4
15	50	600	2	13,5	3	72,3
16	100	600	2	13,5	3	71,1
17	50	500	1	10,5	10	70,5
18	100	500	1	10,5	10	69,2
19	50	600	1	10,5	10	68,6
20	100	600	1	10,5	10	68,0
21	50	500	2	10,5	10	66,9
22	100	500	2	10,5	10	65,6
23	50	600	2	10,5	10	64,3
24	100	600	2	10,5	10	63,1
25	50	500	1	13,5	10	62,0
26	100	500	1	13,5	10	61,7
27	50	600	1	13,5	10	60,4
28	100	600	1	13,5	10	59,2
29	50	500	2	13,5	10	58,6
30	100	500	2	13,5	10	57,1
31	50	600	2	13,5	10	56,3
32	100	600	2	13,5	10	55,2

Вычислив по данным этой таблицы коэффициенты $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$, получим искомую математическую модель.

$$y = 68,29 + 0,00842 x_1 + 0,01983 x_2 + 3,64508 x_3 + 2,63169 x_4 + 2,20465 x_5 + 0,000000498 x_1 x_2 - 0,00130 x_1 x_3 - 0,0000243 x_1 x_4 - 0,00006773 x_1 x_5 - 0,0005963 x_2 x_3 - 0,0000149 x_2 x_4 - 0,0000178 x_2 x_5 - 0,00181 x_3 x_4 - 0,0246 x_3 x_5 - 0,0031 x_4 x_5 - 0,0000000013 x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 \quad (7)$$

Из-за отсутствия практической возможности провести достаточно большое число повторных опытов, хотя бы в нескольких точках плана, оценки дисперсии воспроизводимости и, соответственно, статистической значимости полученных коэффициентов, рабочую модель сократили до:

$$y = 68,29 + 3,64508 x_3 + 2,63169 x_4 + 2,20465 x_5 \quad (7a)$$

или, округлив значения коэффициентов до практически здоровой размерности:

$$y = 68,29 + 3,65 x_3 + 2,63 x_4 + 2,20 x_5. \quad (7б)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что полученная многофакторная регрессионная модель качества СТП-сварных соединений является основной ступенью разрабатываемого метода обеспечения качества сварных соединений, выполненных с помощью технологии СТП. Основная идея метода заключается в применении системы средств измерений (разработанных ранее и зарегистрированных в Федеральном информационном фонде обеспечения единства измерений), которая вести мониторинг сварного соединения (сварного шва) в реальном времени (непосредственно в процессе сварки) и позволяет оператору в процессе работы проводить корректировки основных критериев качества СТП, таких как частоты вращения сварного инструмента, давление сварного инструмента на заготовку и т.п., в зависимости от измеряемых средствами измерений показаний и рекомендаций разрываемого метода обеспечения качества сварных соединений, выполненных с помощью технологии СТП.

Полученная многофакторная регрессионная модель обеспечения качества СТП-сварных соединений создана на основе экспериментальных исследований АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева», полученных в процессе соединения заготовок из сплавов БрХ08«Ш». Однако, её применение возможно и для соединения технологией СТП заготовок из других сплавов, при наличии соответствующих статистических данных.

Созданная многофакторная регрессионная модель обеспечения качества СТП-сварных соединений внесла существенный вклад в обеспечение качества выпускаемой АО «НПО «Техномаш» им. С.А. Афанасьева» продукции, позволив значительно сократить временные и финансовые расходы на отработку процесса СТП для соединения заготовок из сплавов БрХ08«Ш».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1195846 (А.с. СССР 1195846. Кл. МПК В 23 К.).
2. Патент № 5460317. Friction stir butt welding / USA, W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham et al.; Оpubл. 1995.
3. Должанский, Ю.М. Оптимизация свойств машиностроительных материалов с использованием ЭВМ / Ю.М. Должанский, Г.Б. Строганов, Р.Е. Шалин. – М.: Воениздат, 1979. – 240 с.
4. Налимов, В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
5. Макаров, А.С. Сварка трением с перемешиванием. Перспективы при создании ракетно-космической техники. Преимущества, проблемы и возможности повышения качества / А.С. Макаров // Технология машиностроения. – 2024. – № 9 (267). – С. 26-32.
6. Николаев А.К. И вновь о хромистой бронзе // РИТМ машиностроения. – 2019. – № 1. – URL: <https://ritm-magazine.com/en/node/2865> (дата обращения 14.02.2025).
7. ГОСТ 9013-59 «Металлы. Методы измерения твёрдости по Роквеллу». – М.: Издательство стандартов, 2001. – 10 с.
8. ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвёрдости вдавливанием алмазных наконечников». – М.: Издательство стандартов, 1993. – 34 с.
9. Кочергин, С.А. Сварка трением с перемешиванием листовой заготовки из бронзового сплава / С.А. Кочергин, Г.М. Домрачев, Т.С. Свиридова, А.И. Белавин, А.В. Титкин, И.И. Витол // Вестник НПО «Техномаш». – 2023. – № 2. – С. 13-18.

MULTIFACTORIAL REGRESSION MODEL OF THE QUALITY OF STP-WELDED JOINTS

© 2025 A.S. Makarov

Scientific and Production Association «Technomash» named after S.A. Afanasyev, Moscow, Russia.

The influence of the main technological parameters of the friction-mixing welding process [1, 2] on the structure and mechanical properties of welded joints for blanks made of BrX08»Sh» alloys has been studied. Using experimental planning methods (theory of optimal experiment) [3, 4], a mathematical model of the influence of the defining parameters of the STP process on the quality of welded joints of sheet blanks made of BrX08»Sh» alloys was constructed.

Keywords: Friction welding with stirring (STP), rocket and space technology, the quality of welded STP joints, the hardness of the welded joint, the theory of optimal experiment.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-2-55-59

EDN: FHPCWW

REFERENCES

1. Avtorskoe svidetel'stvo № 1195846 (A.s. SSSR 1195846. Kl. MPK V 23 K.).
2. Patent № 5460317. Friction stir butt welding / USA, W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham et al.; Opubl. 1995.
3. Dolzhanskij, Yu.M. Optimizaciya svojstv mashinostroitel'nyh materialov s ispol'zovaniem EVM / Yu.M. Dolzhanskij, G.B. Stroganov, R.E. Shalin. – M.: Voenizdat, 1979. – 240 s.
4. Nalimov, V.V. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremal'nyh eksperimentov / V.V. Nalimov, N.A. Chernova. – M.: Nauka, 1965. – 340 s.
5. Makarov, A.S. Svarka treniem s peremeshivaniem. Perspektivy pri sozdanii raketno-kosmicheskoy tekhniki. Preimushchestva, problemy i vozmozhnosti povysheniya kachestva / A.S. Makarov // Tekhnologiya mashinostroeniya. – 2024. – № 9 (267). – S. 26-32.
6. Nikolaev A.K. I vnov' o hromistoj bronze // RITM mashinostroeniya. – 2019. – № 1. – URL: <https://ritm-magazine.com/en/node/2865> (data obrashcheniya 14.02.2025).
7. GOST 9013-59 «Metally. Metody izmereniya tvyordosti po Rokvellu». – M.: Izdatel'stvo standartov, 2001. – 10 s.
8. GOST 9450-76 «Izmerenie mikrotvyordosti vdavlivaniem almaznyh nakonechnikov». – M.: Izdatel'stvo standartov, 1993. – 34 s.
9. Kochergin, S.A. Svarka treniem s peremeshivaniem listovoj zagotovki iz bronzovogo splava / S.A. Kochergin, G.M. Domrachev, T.S. Sviridova, A.I. Belavin, A.V. Titkin, I.I. Vitol // Vestnik NPO «Tekhnomash». – 2023. – № 2. – S. 13-18.