



РАЗДЕЛ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК621.78.011

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.027

EDN: RBBXYM

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 110Г13Х2БРЛ МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ши Хай Нгуен ¹, Сергей Анатольевич Гаврилов ²,
Михаил Алексеевич Гурьев ³, Сергей Геннадьевич Иванов ⁴,
Алексей Михайлович Гурьев ⁵, Евгений Александрович Письменный ⁶

^{1, 2, 3, 4, 5} Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул, Россия

³ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co, Ltd, Синчан, Китай

⁴ Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху), Шаосин, Китай

^{4, 5} Ключевая государственная лаборатория цифрового текстильного оборудования провинции Хубэй, Ухань, Китай

⁶ АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», г. Москва, Россия

Аннотация. В настоящей исследовании методы планирования эксперимента использованы для установления взаимосвязи между параметрами термической обработки и механическими свойствами стали Гадфильда 110Г13Х2БРЛ (ударная вязкость и твердость). В качестве факторов варьировались температура аустенизации T , время выдержки τ ; среда охлаждения – солевой раствор – оставалась неизменной. Для определения оптимальных параметров термообработки опыты были организованы по ортогональному плану второго порядка и выполнена многокритериальная оптимизация по методологии поверхности отклика (RSM). По результатам экспериментальных исследований получены оптимальные значения: $T^{opt}=1039$ °C и $\tau^{opt}=40$ мин; при данном режиме ударная вязкость (KCU) и твердость составили соответственно 238,07 Дж/см² и 320 HV.

Ключевые слова: термическая обработка, аустенитная высокомарганцовистая сталь, 110Г13Х2БРЛ, метод планирования эксперимента, central composite designs, механические свойства.

Для цитирования: Оптимизация параметров термической обработки стали 110Г13Х2БРЛ методами планирования эксперимента / Нгуен Ш. Х. [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 1, С. 172–176. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/RBBXYM>.

Original article

OPTIMIZATION OF HEAT-TREATMENT PARAMETERS OF 110G13Kh2BRL STEEL USING DESIGN EXPERIMENTS METHODS

Shi H. Nguyen ¹, Sergey A. Gavrilo ², Michael A. Guryev ³,
Sergey G. Ivanov ⁴, Alexey M. Guryev ⁵, Evgeniy A. Pysmenny ⁶

^{1, 2, 3, 4, 5} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

³ Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co, Ltd, Xingchang, China

⁴ Innovative Center for Advanced Textile Technologies (Jianhua Laboratory), Senior Research Fellow, Shaoxing, China

^{4, 5} Key State Laboratory of Digital Textile Equipment of Hubei Province, Wuhan, China

⁶ JSC Research Institute of Railway Transport, Moscow, Russian Federation

Abstract. In the present study, design of experiments methods was used to establish the relationship between the heat-treatment parameters and the mechanical properties (impact toughness and hardness) of Hadfield steel 110G13Kh2BRL. The austenitizing temperature T and holding time τ were varied as factors, while the cooling medium – a salt solution – was kept constant. To determine the optimal heat-treatment parameters, the experiments were arranged according to a second-order orthogonal design, and multi-criteria optimization was carried out using the response surface methodology (RSM). Based on the experimental results, the following optimal values were obtained: $T^{opt} = 1039$ °C and $\tau^{opt} = 40$ min; under this regime, the impact toughness and hardness were 238.07 J/cm² (KCU) and 320 HV, respectively.

© Нгуен Ш. Х., Гаврилов С. А., Гурьев М. А., Иванов С. Г., Гурьев А. М., Письменный Е. А., 2026

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 110Г13Х2БРЛ МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Keywords: heat-treatment, austenitic high-manganese steels, 110G13Kh2BRL, design of experiments method, central composite designs, mechanical properties.

For citation: Nguyen, Sh. H., Gavrilov, S. A., Guryev, M. A., Ivanov, S. G., Guryev, A. M. & Pysmennyi, E. A. (2026). Optimization of heat-treatment parameters of 110G13KH2BRL steel using design experiments methods. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 172-176. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.027. EDN: <https://elibrary.ru/RBBXYM>.

ВВЕДЕНИЕ

Аустенитная высокомарганцовистая сталь, известная как сталь Гадфильда, получила широкое распространение и считается надёжным материалом во многих промышленных областях [1–4]. В настоящее время, чтобы удовлетворять жёстким требованиям к высокой ударной стойкости, износостойкости, а также сочетания высокой прочности и пластичности при экономичной технологии производства, этот тип стали обычно легируют карбидообразующими элементами – Cr, V, Ti и др. [4–6] – и подвергают термической обработке [7–11]. В литом состоянии сталь Гадфильда содержит твердые и хрупкие карбидные фазы, сконцентрированные на границах зёрен, что приводит к охрупчиванию материала [2, 3]. Нагрев при 950–1150 °С с соответствующей выдержкой (в зависимости от размеров изделия) приводит к растворению карбидных фаз, а последующая закалка с подходящей скоростью предотвращает повторное выделение карбидов на границах зёрен в процессе охлаждения и фиксирует структуру аустенита [10, 13].

Параметры термической обработки – температура аустенизации, время выдержки являются критически важными и непосредственно влияют на конечное качество стали Гадфильда [8–10]. Поэтому поиск оптимальных значений температурно-временных режимов термообработки имеет принципиальное значение. В настоящем исследовании для обработки экспериментальных данных и построения регрессионной модели, позволяющей установить взаимосвязь между параметрами термообработки и механическими свойствами (твёрдостью и ударной вязкостью) стали, применяется метод планирования эксперимента Бокса–Уилсона [14–17]. Преимущество данного подхода заключается в том, что он требует меньшего числа опытов по сравнению с традиционными методами при более высокой статистической надёжности получаемых результатов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы стали Гадфильда 110Г13Х2БРЛ размером 55×10×10 мм³ подвергали термической обработке в камерной печи типа СНОЛ. В качестве факторов рассматривались три параметра: температура аустенизации T, время выдержки t и скорость охлаждения v. Однако в настоящем исследовании внимание сосредоточено на двух первых факторах – T и t; скорость охлаждения была принята как фиксированная величина. Экспериментальные измерения сред-

ней скорости охлаждения образцов в 10 % водном растворе поваренной соли выполнены термометрическим способом. Значение средней скорости охлаждения в интервале температур 1050–100 °С при этом составило 407 °С/с. Экспериментальные отклики:

- ударная вязкость Y_1 измерялась на маятниковом копре Метротест КМ-300;
- средняя микротвёрдость Y_2 измерялась на микротвердомере МН-6 при нагрузке 200 г.

Диапазоны натуральных значений факторов приведены в таблице 1. Для реализации метода планирования эксперимента натуральные переменные – T и t – должны быть преобразованы в виртуальные переменные x_1, x_2 (табл. 1).

Таблица 1 – Диапазоны значений и виртуальные переменные параметров термообработки

Table 1 – Ranges of values and virtual variables of heat treatment parameters

Факторы	T (°C)	t (мин)
Значение	950–1050	40–80
Виртуальные переменные	x_1	x_2

При применении ортогонального комбинированного плана второго порядка Бокса–Уилсона (central composite design, CCD) для двух факторов необходимо выполнить 9 опытов: число опытов в факторных точках $2^2 = 4$; число осевых (звёздных) точек – 4; число опытов в центре плана – 1. В этом случае виртуальные переменные принимают три уровня: –1, 0 и +1.

Переход от натуральных переменных к виртуальным показан в таблице 2.

Таблица 2 – Соответствие натуральных значений факторов их виртуальным переменным

Table 2 – Correspondence of natural values of factors to their virtual variables

Натуральные переменные	Уровни виртуальных переменных			Интервал варьирования
	Верхний (+1)	Нулевой (0)	Нижний (-1)	
T (°C)	1050	1000	950	50
t (мин)	80	60	40	20

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

После проведения 9 опытов были получены значения ударной вязкости и микротвёрдости (табл. 3).

Таблица 3 – Результаты экспериментальных исследований / Table 3 – Results of experimental studies

No.	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	$X'_1=x_1^2-2/3$	$X'_2=x_2^2-2/3$	Y_1	Y_2
1	+	+	+	+	0.33333	0.33333	175	217
2	+	–	+	–	0.33333	0.33333	230	254
3	+	+	–	–	0.33333	0.33333	240	320
4	+	–	–	+	0.33333	0.33333	251	215
5	+	+	0	0	0.33333	–0.66667	200	227
6	+	–	0	0	0.33333	–0.66667	225	222
7	+	0	+	0	–0.66667	0.33333	195	230
8	+	0	–	0	–0.66667	0.33333	233	313
9	+	0	0	0	–0.66667	–0.66667	215	200

Построение регрессионной модели ударной вязкости.

Уравнение регрессии для ударной вязкости имеет вид:

$$Y_1 = a'_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2$$

По результатам расчетов значения коэффициентов регрессии a приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчет коэффициентов регрессии a / Table 4 – Calculation of regression coefficients a

Обратная матрица G^{-1}						$X^T \cdot Y_1$	$A = G^{-1} \cdot (X^T \cdot Y_1)$	
0.1111	0	0	0	1.67E-06	1.67E-06	1964	a'_0	218.222
0	0.1667	0	0	0	0	-91	a_1	-15.1667
0	0	0.1667	0	0	0	-124	a_2	-20.6667
0	0	0	0.25	0	0	-44	a_{12}	-11
1.67E-06	0	0	0	0.5	-2.1E-18	11.66	a_{11}	5.83333
1.67E-06	0	0	0	-2.1E-18	0.5	14.66	a_{22}	7.33333

Поскольку в исходной матрице не предусматривались повторные опыты, в настоящей работе дополнительно были выполнены четыре опыта в центральной точке плана (при нулевых уровнях факторов). Полученные значения составили соответственно: 210; 213; 215; 217. При этом дисперсия воспроизводимости S_b^2 рассчитана (табл. 5).

Проверку статистической значимости коэффициентов регрессии b выполняли по результатам повторных опытов в центре плана. При числе степеней свободы $f_{is} = 3$ и уровне значимости $\alpha = 0,05$ по таблице распределения Стьюдента получаем $t = 3,182$. Сравнительные расчетные значения t_i с табличным t : если $|t_i| > t$, то соответствующий коэффициент регрессии является статистически значимым.

Таблица 5 – Проверка статической значимости коэффициентов регрессии

Table 5 – Checking the static significance of regression coefficients

y_{ij}	\bar{y}_{ij}	$(y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2$		a'_0	a_1	a_2	a_{12}	a_{11}	a_{22}
210	213.75	14.063		218.22	-15.17	-20.67	-11	5.83	7.33
213		0.563	$S(b_i)^2$	0.991	1.487	1.487	2.23	4.46	4.46
215		1.563	$S(b_i)$	0.995	1.219	1.219	1.493	2.112	2.112
217		10.563	t_i	219.31	-12.44	-16.95	-7.37	2.76	3.47
$S_b^2 =$		8.92							

По результатам, представленным в таблице 5, статистически значимыми являются следующие коэффициенты регрессии: $a'_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{22}$.

Проверка адекватности модели.

Дисперсия остатка $S_{ост}^2$ при $N=9, L=5$ и по результатам расчета $(Y_i - \bar{Y})^2$:

$$S_{ост}^2 = \frac{\sum_{i=1}^9 (Y_i - \bar{Y})^2}{N-L} = \frac{172.84}{4} = 43.21.$$

Оценим отношение: $F = \frac{S_{ост}^2}{S_b^2} = \frac{43.21}{8.92} = 4.844$.

По таблице Фишера при уровне значимости $\alpha = 0.05; f_1 = 9-5 = 4; f_2 = 4-1 = 3$, получаем $F_{0.05}(3,4) = 9,117$. Сравнение показывает, что $F < F_{0.05}(3,4)$, следовательно, модель является адекватной (соответствует экспериментальным данным).

Значение a_0 вычисляли по a_0 согласно уравнениям [16] имеем $a_0 = 213.33$. Таким образом, экспериментальная регрессионная модель для ударной вязкости Y_1 имеет вид:

$$Y_1 = 213.33 - 15.17x_1 - 20.67x_2 - 11x_{12} + 7.33x_1^2.$$

Построение регрессионной модели микротвердости.

Уравнение регрессии для микротвердости имеет вид:

$$Y_2 = b'_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2.$$

Аналогично построению регрессионной модели для ударной вязкости, были рассчитаны коэффициенты регрессии b , приведенные в таблице 6.

Таблица 6 – Расчет коэффициентов регрессии b / Table 6 – Calculation of regression coefficients b

Обратная матрица G^{-1}						$X^T \cdot Y_2$	$B = G^{-1} \cdot (X^T \cdot Y_2)$	
0.1111	0	0	0	1.67E-06	1.67E-06	2198	b'_0	244.222
0	0.1667	0	0	0	0	73	b_1	12.167
0	0	0.1667	0	0	0	-147	b_2	-24.5
0	0	0	0.25	0	0	-142	b_{12}	-35.5
1.67E-06	0	0	0	0.5	-2.1E-18	-10.34	b_{11}	-5.167
1.67E-06	0	0	0	-2.1E-18	0.5	83.65	b_{22}	41.833

Так же дополнительно были выполнены четыре опыта в центральной точке плана (при нулевых уровнях факторов). Полученные значения составили соответственно: 205; 195; 190; 210. При этом дисперсия воспроизводимости S_b^2 рассчитана (табл. 7).

Проверку статистической значимости коэффициентов регрессии b выполняли аналогично проверке статистической значимости для коэффициентов регрессии при построении регрессионной модели ударной вязкости.

Таблица 7 – Проверка статической значимости коэффициентов регрессии

Table 7 – Checking the static significance of regression coefficients

y_{ij}	\bar{y}_{ij}	$(y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2$		b'_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
205	200	25		244.22	12.17	-24.5	-35.5	-5.17	41.83
195		25	$S(b_i)^2$	9.26	13.88	13.88	20.83	41.66	41.66
190		100	$S(b_i)$	3.04	3.73	3.73	4.56	6.45	6.45
210		100	t_i	80.34	3.26	-6.57	-7.78	-0.8	6.486
$S_b^2 =$		83.33							

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ 110Г13Х2БРЛ МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

По результатам, представленным в таблице 7, статистически значимыми являются следующие коэффициенты регрессии: b'_0 , b_1 , b_2 , b_{12} , b_{22} .

Проверка адекватности модели.

Дисперсия остатка $S_{\text{ост}}^2$ при $N = 9$, $L = 5$ и по результатам расчёта $(Y_i - \bar{Y})^2$:

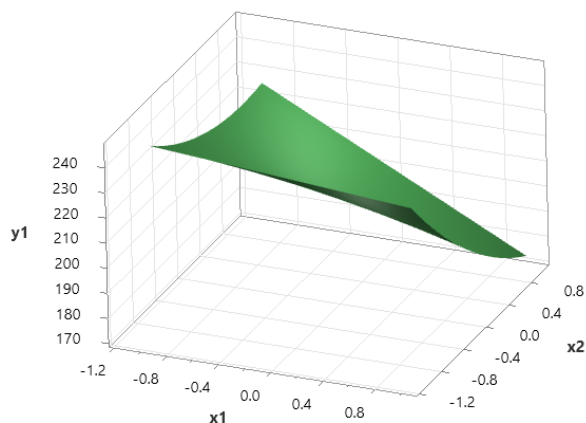
$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^9 (Y_i - \bar{Y})^2}{N-L} = \frac{1575}{4} = 393.75.$$

Оценим отношение: $F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_B^2} = \frac{393.75}{83.33} = 4.725$.

По таблице Фишера при уровне значимости $\alpha = 0.05$; $f_1 = 9-5=4$; $f_2 = 4-1=3$, получаем $F_{0.05}(3,4) = 9.117$. Сравнение с расчетного значения критерия Фишера с табличным значением, показывает, что $F < F_{0.05}(3,4)$, следовательно, модель является адекватной (полностью соответствует экспериментальным данным).

Значение b_0 вычисляли по b_0 , согласно уравнениям [16] имеем $b_0 = 216.333$. Таким образом, экспериментальная регрессионная модель для ударной вязкости Y_2 имеет вид:

$$Y_2 = 216.33 + 12.17x_1 - 24.5x_2 - 35.5x_{12} + 41.83x_2^2.$$



Оптимизация параметров термической обработки стали 110Г13Х2БРЛ.

В исследовании для оптимизации процесса термообработки стали 110Г13Х2БРЛ применён метод поверхности отклика (RSM). Поскольку входные параметры x_1 и x_2 одновременно влияют на показатели Y_1 и Y_2 , задача представляет собой двухкритериальную оптимизацию режима термообработки и может быть записана в следующем виде:

$$\begin{cases} Y_1 = \max. f_1(x_1^{\text{опт}}, x_2^{\text{опт}}) \\ Y_2 = \max. f_2(x_1^{\text{опт}}, x_2^{\text{опт}}) \\ \forall x_1, x_2 \in [-1; 1] \end{cases}$$

В исследовании для расчёта оптимальных параметров использовали метод поверхности отклика (RSM), применяя программное обеспечение Minitab. По результатам оптимизации получены следующие значения кодированных переменных: $x_1 = 0,783173$, $x_2 = -1$, что соответствует значениям целевых функций $Y_1 = 238.07 \text{ Дж/см}^2$; $Y_2 = 320 \text{ HV}$. После перехода к натуральным переменным получено $T^{\text{опт}} = 1040 \text{ }^\circ\text{C}$; $t^{\text{опт}} = 40 \text{ мин}$.

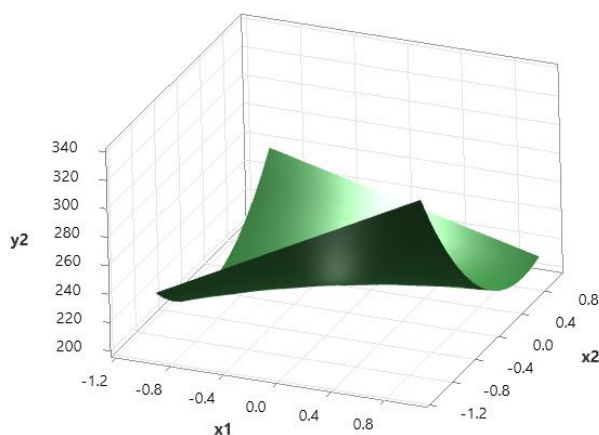


Рисунок 1 – Графики влияния x_1 и x_2 на значения Y_1 (ударная вязкость) и Y_2 (твёрдость)

Figure 1 – Graphs of the influence of x_1 and x_2 on the values of Y_1 (impact strength) and Y_2 (hardness)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты многокритериальной оптимизации процесса термообработки высокомарганцевистой стали 110Г13Х2БРЛ показали, что оптимальными являются температура аустенизации $1039 \text{ }^\circ\text{C}$ и время выдержки 40 мин, обеспечивающие наилучшее сочетание механических свойств: ударная вязкость 238 Дж/см^2 при твёрдости 320 HV . Данные значения, полученные расчетным путем, также были подтверждены экспериментально: образцы, термообработанные по оптимальному режиму, показали следующие значения – ударная вязкость (КСУ) $235 \pm 3 \text{ Дж/см}^2$ при твердости $300 \pm 8 \text{ НВ}$. Полученный уровень свойств позволяет рекомендовать указанный оптимальный режим термообработки для промышленного применения при изготовлении деталей из стали 110Г13Х2БРЛ, работающих в условиях высоких ударных нагрузок и интенсивного абразивного износа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ASM metal handbook, volume 01, 1991. Properties and Selection ferrous Alloys and Special-Purpose materials.
2. Нгуен Ш.Х., Иванов С.Г., Гурьев М.А. [и др.] // Влияние параметров термической обработки на структуру и свойства высокоуглеродистых высоко-

марганцевых сталей. Обзор // *Металлург.* 2025. № 12. С. 23–28. DOI: 10.52351/00260827_2025_12_23.

3. Valera L.B., Tressia G., Masoumi M., Bortoletto E.M., Regattieri C., Sinatore A. // Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur // *Engineering Failure Analysis.* 2021. 122. doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105295.

4. Zavadil R., Kuyucak S. // Microstructure vs. Impact Toughness Relationship in Hadfield's Austenitic Manganese Steel // *Microsc. Microanal.* 2002. 8, S02. P. 1290–1291. doi: 10.1017/S1431927602104880.

5. Pham M.K., Nguyen D.N., Le T.C., Hoang T.Q. // Effects of chromium content and impact load on microstructures and properties of high manganese steel // *Materials Science Forum.* 2014. Vol. 804. P. 297–300.

6. Pham M.K., Nguyen D.N., Hoang A.T. // Influence of Vanadium Content on the Microstructure and Mechanical Properties of High-Manganese Steel // *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS.* 2018. Vol. 18, № 02. P. 141–147.

7. Tecza G., Garbacz-Klempka A. // Microstructure of Cast High-Manganese Steel Containing Titanium // *Archives of Foundry engineering.* 2016. Vol.16, Issue 4. P. 163–168. doi: 10.1515/afe-2016-0103.

8. Wahyudi H., Pratiwi S.E., Supriyanto A.A., Bayyu Aji D.P. // The influence of heat rate and austenitization temperature on microstructure and hardness of

Hadfield steel // SINERGI. 2023. Vol.27, № 2. P. 241–248. doi: 10.22441/sinergi.2023.2.012.

9. Jafarian H.R., Sabzi M., Mousavi Anijdan S.H., Eivani A.R., Park N. // The influence of austenitization temperature on microstructural developments, mechanical properties, fracture mode and wear mechanism of Hadfield high manganese steel // Journal of materials research and technology. 2021. 10. P. 819–831.

10. Hosseini S., Limooei M.B. // Optimization of Heat Treatment to Obtain Desired Mechanical Properties of High Carbon Hadfield Steels // World Applied Sciences Journal. 2011. Vol. 15, Issue 10. P. 1421–1424.

11. Higuera-Cobos O.F., Cely-Bautista M.M., Munoz-Bolanos J.A. // Effect of Heat Treatment on the Microstructural Heterogeneity and Abrasive Wear Behavior of ASTM A128 Grade C Steel // Materials. 2024. 17, 2884. doi: 10.3390/ma17122884.

12. S. Ayadi and A. Hadji // Effect of Heat Treatments on the Microstructure and Wear Resistance of a Modified Hadfield Steel // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. 2019. 41, № 5. P. 607–620. doi: 10.15407/mfint.41.05.0607.

13. Bandanadjaja B., Hidayat E. // The effect of two-step solution heat treatment on the impact properties of Hadfield austenitic manganese steel // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1450. doi: 10.1088/1742-6596/1450/1/012125.

14. Montgomery, Douglas C. Design and Analysis of Experiments: Response surface method and designs. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc. 2005.

15. Box G.E., Hunter J.S., Hunter W.G. Statistic for Experimenters: Design, Innovation and Discovery. 2nd Edition. 2005.

16. Luu D.B. Thiet kethucnghiemtrong co khi. The construction publisher. Ha Noi. 2017.

17. Nguyen C. Planning experiments, 3th edition. VNUHCMC, Vietnam. 2004. P. 120.

Информация об авторах

Ш. Х. Нгуен – аспирант, Алтайский государственный технический университет.

С. А. Гаврилов – аспирант, Алтайский государственный технический университет.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.

М. А. Гурьев – доцент, Алтайский государственный технический университет, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co, Ltd, Синчан, Китай.

С. Г. Иванов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Алтайский государственный технический университет, Инновационный центр современных текстильных технологий (Лаборатория Цзяньху), ведущий научный сотрудник, Шаосин, Китай, Ключевая государственная лаборатория цифрового текстильного оборудования провинции Хубэй, ведущий научный сотрудник, Ухань, Китай.

А. М. Гурьев – доктор технических наук, профессор, Алтайский государственный технический университет, Ключевая государственная лаборатория цифрового текстильного оборудования провинции Хубэй, ведущий научный сотрудник, Ухань, Китай.

Е. А. Письменный – кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», г. Москва, Россия.

Information about the authors

Sh.H. Nguyen - Postgraduate Student, Polzunov Altai State Technical University.

S.A. Gavrilov - Postgraduate student, Polzunov Altai State Technical University.

M.A. Guryev - Associate Professor, Polzunov Altai State Technical University, Zhejiang Brilliant Refrigeration Equipment Co, Ltd, Xingchang, China.

S.G. Ivanov - Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Polzunov Altai State Technical University, Innovative Center for Modern Textile Technologies (Jianhu Laboratory), Senior Researcher, Shaoxing, China, Key State Laboratory of Digital Textile Equipment in Hubei Province, Senior Researcher, Wuhan, China.

A.M. Guryev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Polzunov Altai State Technical University, Key State Laboratory of Digital Textile Equipment in Hubei Province, Leading Researcher, Wuhan, China.

E.A. Pysmennyi - Candidate of Technical Sciences, Deputy General Director, Joint Stock Company "Scientific Research Institute of Railway transport", Moscow, Russia.